

# Non-invasive thermometry during hyperthermic cancer treatment

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet medicinteknik

Jacob Andreasson, Viggo Eriksson, Thea Lundmark,  
Niklas Magnusson, Simone Milevski, Linnea Persson

---

**INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK (E2)**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2024  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

KANDIDATARBETE 2024

# Icke-invasiv temperaturmätning under hypertermisk cancerbehandling

Jacob Andreasson, Viggo Eriksson, Thea Lundmark,  
Niklas Magnusson, Simone Milevski, Linnea Persson



**CHALMERS**

Institutionen för Elektroteknik (E2)  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2024

Icke-invasiv temperaturmätning under hypertermisk cancerbehandling  
Jacob Andreasson, Viggo Eriksson, Thea Lundmark,  
Niklas Magnusson, Simone Milevski, Linnea Persson

© Jacob Andreasson, Viggo Eriksson, Thea Lundmark, Niklas Magnusson, Simone Milevski, Linnea Persson, 2024.

Handledare: Robin Nilsson, Institutionen för elektroteknik (E2)  
Examinator: Hana Dobsicek Trefna, Institutionen för elektroteknik (E2)

Kandidatarbete 2024  
Institutionen för Elektroteknik (E2)  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Modell av systemet som används i detta projekt.

Skriven i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg 2024

Icke-invasiv temperaturmätning under hypertermisk cancerbehandling  
Jacob Andreasson, Viggo Eriksson, Thea Lundmark,  
Niklas Magnusson, Simone Milevski, Linnea Persson  
Institutionen för Elektroteknik (E2)  
Chalmers Tekniska Högskola

## Abstract

A possible method for non-invasive thermometry is microwave thermometry. However, this method has limitations, including reflected waves and interference between the antennas. This project aims to improve the existing method to address these issues. The goal is to demonstrate the concept validation of microwave thermometry for monitoring heat development during hyperthermia treatment.

To demonstrate concept validation, certain measurements needed to be conducted and further evaluated. Prior to the measurements, some preparations were made, including troubleshooting and calibration, gel and phantom manufacturing, and some minor experiments. The minor experiments included investigating the absorption capacity of the manufactured gel and the provided foam material Eccosorb. Once the preparations were completed, the main experiment was conducted where an imaging system with absorption material was filled with water. In the center of the system, a phantom with properties resembling a brain with a tumor was placed. Microwaves were transmitted and measured, and then used in a reconstruction algorithm to generate heat maps of the phantom.

The results from the preparations showed that the manufactured gel had better absorption capacity than the foam material and was therefore chosen to be used in the main experiment. Additionally, one of the minor experiments showed that distilled water could be replaced with tap water in the measurements. Another result also showed that the gel contaminates the water after some time. Unfortunately, the lack of sufficiently good equipment led to the data from the measurements in the main experiment being unusable in the reconstruction algorithm, and thus no heat maps could be produced. A numerical simulation in CST Studio Suite was created according to the dimensions of the imaging system. This was done to use simulated data in the reconstruction algorithm as well. Unfortunately, complications also arose during this part of the project, which resulted in that a new model needed to be constructed and new simulations had to be done. When the new results were presented there were no more time to test if this model could have produced heat maps.

The reason the measurements did not turn out as intended was largely due to the inadequate performance of the antennas in the imaging system. To obtain usable data, these measurements would need to be redone with functional antennas, and then concept validation might have been demonstrated. However, the conclusion can still be drawn from the preparatory experiments that the manufactured gel functions as a good absorption material.

---

## Sammanfattning

En möjlig metod för icke-invasiv temperaturmätning är mikrovågstermometri, däremot har metoden begränsningar, bland annat reflekterade vågor och störningar mellan antennerna. Detta projekt syftar till att förbättra den befintliga metoden för att lösa dessa problem. Målet är att påvisa konceptvalidering av mikrovågstermometri för övervakning av värmeutvecklingen under hypertermibehandling.

För att kunna påvisa konceptvalidering har vissa mätningar behövts genomföras och vidare utvärderas. Inför mätningarna har en del förberedelser gjorts som inkluderar felsökning och kalibrering, gel- och fantomtillverkning samt en del mindre experiment. De mindre experimenten inkluderar bland annat undersökning av absorptionsförmågan hos den tillverkade gelen samt det tillhandahållna skummaterialet Eccosorb. När förberedelserna var genomförda kunde det stora experimentet genomföras där ett avbildningssystem med absorptionsmaterial fylldes med vatten. I mitten av systemet placerades en fantom med egenskaper efterliknat en hjärna med tumör. Mikrovågor transmitterades och mättes, och användes därefter i en rekonstruktionsalgoritm i syfte att generera värmekartor över fantomen.

Resultaten från förberedelserna visade att den egentillverkade gelen hade bättre absorptionsförmåga än skummaterialet och valdes därför att användas i det stora experimentet. Dessutom visade ett av de mindre experimenten att destillerat vatten kunde ersättas med kranvatten i mätningarna. Ett annat resultat visade också att gelen kontaminerar vattnet efter viss tid. Tyvärr ledde bristen på tillräckligt bra utrustning till att datan från mätningarna, från det stora experimentet, inte kunde användas i rekonstruktionsalgoritmen, och därmed kunde inga värmekartor tas fram.

En numerisk simulering i CST Studio Suite skapades enligt avbildningssystemets dimensioner. Detta för att även använda simulerad data i rekonstruktionsalgoritmen. Tyvärr uppstod komplikationer även under denna del av projektet, vilket medförde att simuleringen behövde göras om för att nå önskade resultat. När väl dessa presenterades fanns inte tiden att testa om denna modell eventuellt hade kunnat producera värmekartor.

Anledningen till att mätningarna inte blev som tänkt berodde därmed till stor del på bristande prestanda hos antennerna i avbildningssystemet. För att kunna få användbar data hade dessa mätningar behövts göras om med fungerande antenner, och då hade eventuellt konceptvalidering kunnat påvisats. Dock kan slutsatsen ändå dras från de förberedande experimenten att den tillverkade gelen fungerar som ett bra absorptionsmaterial.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Syfte . . . . .	4
1.2	Avgränsningar och förändringar från tidigare arbete . . . . .	5
1.2.1	Avbildningssystem . . . . .	5
1.2.2	Absorptionsmaterial . . . . .	5
1.2.3	Rekonstruktionsalgoritm . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>7</b>
2.1	Mikrovågor . . . . .	7
2.2	Dielektriska egenskaper . . . . .	7
2.3	Mikrovågstermometri . . . . .	8
2.4	Vector Network Analyzer (VNA) och spridningsparametrar . . . . .	8
2.5	Ekvationer för rekonstruktionsalgoritm . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Metod</b>	<b>11</b>
3.1	Förberedelser inför mätningar . . . . .	11
3.1.1	Felsökning och kalibrering inför mätningar . . . . .	11
3.1.2	Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten . . . . .	12
3.1.3	Geltillverkning . . . . .	12
3.1.4	Initial testning av absorptionsmaterial . . . . .	14
3.1.5	Fantomtillverkning . . . . .	16
3.1.6	Undersökning av kontaminering av vatten . . . . .	17
3.2	Experiment och numerisk simulering . . . . .	17
3.2.1	Mätningar i avbildningssystemet . . . . .	18
3.2.2	Numerisk simulering . . . . .	19
3.3	Bildrekonstruktion . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>21</b>
4.1	Förberedelser inför mätningar . . . . .	21
4.1.1	Felsökning och kalibrering inför mätningar . . . . .	21
4.1.2	Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten . . . . .	24
4.1.3	Geltillverkning . . . . .	26
4.1.4	Initial testning av absorptionsmaterial . . . . .	27
4.1.5	Fantomtillverkning . . . . .	29

---

4.1.6	Undersökning av kontaminering av vatten . . . . .	30
4.2	Experiment och numerisk simulering . . . . .	31
4.2.1	Mätningar i avbildningssystemet . . . . .	31
4.2.2	Numerisk simulering . . . . .	33
4.3	Bildrekonstruktion . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>36</b>
5.1	Förberedelser inför mätningar . . . . .	36
5.1.1	Felsökning och kalibrering inför mätningar . . . . .	36
5.1.2	Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten . . . . .	37
5.1.3	Geltillverkning . . . . .	38
5.1.4	Initial testning av absorptionsmaterial . . . . .	38
5.1.5	Fantomtillverkning . . . . .	39
5.1.6	Undersökning av kontaminering av vatten . . . . .	39
5.2	Experiment och numerisk simulering . . . . .	40
5.2.1	Mätningar i avbildningssystemet . . . . .	40
5.2.2	Numerisk simulering . . . . .	40
5.3	Bildrekonstruktion . . . . .	41
5.4	Metodkritik . . . . .	41
5.5	Framtidsavsnitt . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Slutsats</b>	<b>44</b>
6.1	Förberedelser inför mätningar . . . . .	44
6.1.1	Felsökning och kalibrering för mätningar . . . . .	44
6.1.2	Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten . . . . .	44
6.1.3	Geltillverkning . . . . .	44
6.1.4	Initial testning av absorptionsmaterial . . . . .	45
6.1.5	Undersökning av kontaminering av vatten . . . . .	45
6.2	Experiment och numerisk simulering . . . . .	45
6.2.1	Mätningar i avbildningssystemet . . . . .	45
6.2.2	Numerisk simulering . . . . .	46
6.3	Bildrekonstruktion . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Samhälleliga och etiska aspekter</b>	<b>47</b>
7.1	Etiska aspekter . . . . .	47
7.2	Samhälleliga aspekter . . . . .	47
	<b>Källförteckning</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Geltillverkning</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Saltmängd i gel</b>	<b>II</b>
<b>C</b>	<b>Saltmängd i tumör</b>	<b>III</b>
<b>D</b>	<b>Fresnels Ekvation</b>	<b>IV</b>

# 1

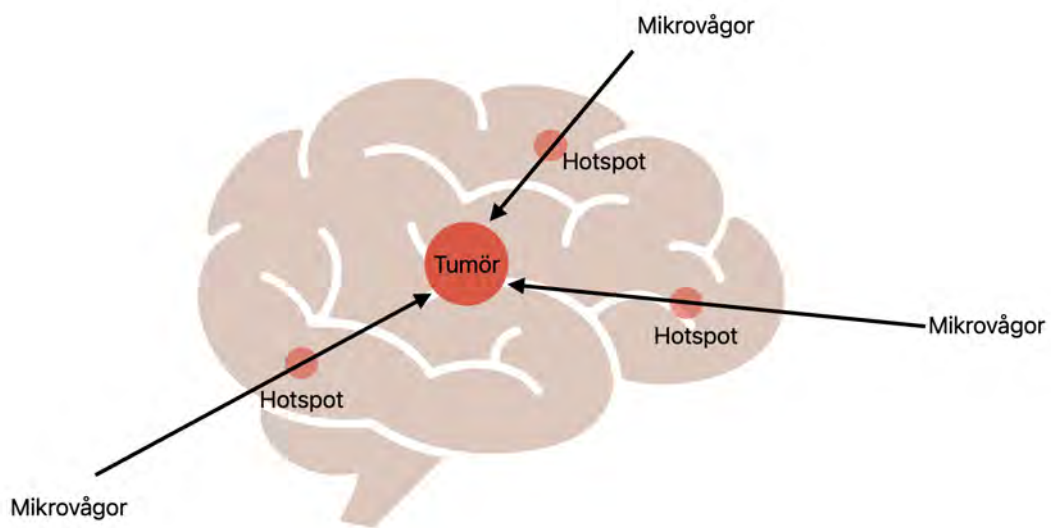
## Inledning

I Sverige diagnostiseras årligen cirka 350 barn med cancer [1]. Av dessa är det ungefär vart tredje fall som utgörs av tumörer i hjärnan eller andra delar av det centrala nervsystemet (CNS) [1]. För att behandla dessa tumörer används idag kirurgi, strålbehandling och kemoterapi, ofta i kombination med varandra [2]. Med dessa behandlingsmetoder blir 80% av patienterna botade. Däremot får många av barnen både kroppsliga och psykologiska biverkningar på grund av de höga stråldoserna som hjärnan bestrålas med under utvecklingsfasen [1, 3]. Nackdelen med strålning och kemoterapi är dock att inte bara cancercellerna skadas, utan även att frisk vävnad kan ta skada [4, 5, 6]. Dessa biverkningar är önskvärda att minimeras, vilket potentiellt hade kunnat genomföras med mikrovågshypertermi i kombination med strålning och kemoterapi [7]. Genom att värma upp tumörvävnaden till hypertermiska temperaturer inför standardiserad cancerbehandling, är förhoppningen att kunna minska såväl mängden stråldos som cytostatika till patienten. Detta i syfte att undvika biverkningar men ändå kunna uppnå samma resultat [8].

Syftet med mikrovågshypertermi är att värma upp tumören till en temperatur mellan 40-44°C, detta genom att applicera ett elektriskt fält fokuserat mot tumören under ett tidsspän på ca 60 minuter [9]. För att kunna göra detta i djupliggande tumörer placeras ett antenssystem runt patienten. Ett exempel på hur ett sådant system ser ut visas i figur 1.1. Antenssystemet genererar ett elektriskt fält som skapar en positiv interferens, beroende på inställd fas och amplitud, vilket gör att energin i vågorna kan fokuseras mot tumören [10]. När vågorna sedan absorberas i tumören leder detta till en ökad temperatur i området. En utmaning med denna metod är att det elektriska fältet även kan absorberas av omkringliggande vävnad och inte bara av tumören. Detta skapar därmed icke önskvärda uppvärmda områden i frisk vävnad, så kallade 'hotspots', vilka visas i figur 1.2. Detta kan orsaka irreversibla skador, vilket i sin tur kan leda till att patienten får kognitiva problem [11].



**Figur 1.1:** Exempel på hur ett antensystem för hypertermi kan placeras runt patient för djupliggande tumörer i hjärnan.

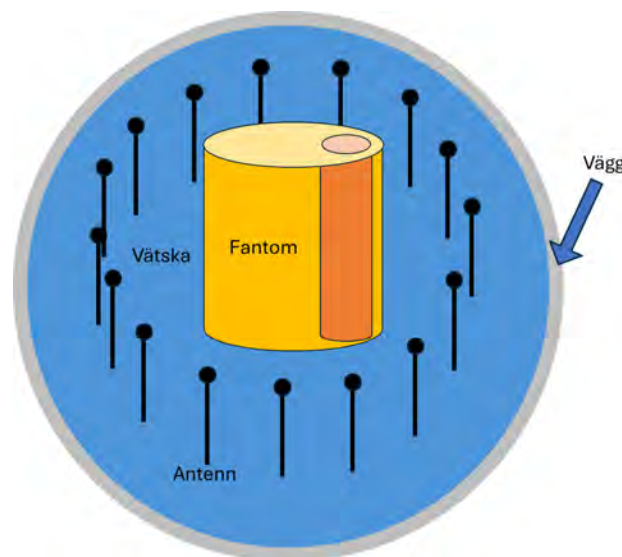


**Figur 1.2:** Visualisering av hotspots och hur dessa kan förekomma under hypertermibehandling.

För att säkerställa att tumören värms upp till den önskade temperaturen och att omkringliggande vävnad inte värms upp till skadliga nivåer, krävs ett övervaknings-system som mäter temperaturen. Vanliga övervakningsmetoder för temperaturmätning är fiberprobar och magnetisk resonanstomografi (MR). Fiberprobar är dock invasiva, vilket innebär att dessa inte kan användas i hjärnan, och dessutom ger dem bara lokal information i närheten av deras placering [12]. Vid användning av magnetisk resonanstomografi kan en tredimensionell, icke-invasiv monitorering av temperaturen i objektet skapas. Däremot är den inte tillräckligt snabb för att användas i realtid. Dessutom är MR en kostsam metod med begränsad tillgänglighet, som även ger osäkerhet i temperaturavläsningen till följd av patientrörelser samt variationer i det magnetiska fältet [13]. MR kräver även att antensystemet ska vara kompatibelt med MR-kameran för att inte störa magnetfältet [14].

Som ett alternativ till dessa metoder har mikrovågstermometri presenterats som en potentiell metod för icke-invasiv temperaturmätning, där samma system kan användas för såväl uppvärmning som för temperaturavläsning [9]. När temperaturen ändras i ett material förändras dess dielektriska egenskaper, vilket påverkar hur mikrovågor absorberas och reflekteras [15]. Detta samband kan användas vid mikrovågstermometri genom att mäta reflektionskoefficienterna från mikrovågorna över tid. Reflektionskoefficienterna används sedan i en rekonstruktionsalgoritm för att ta fram värmekartor över området omringat av antennerna.

Ett försök för konceptvalidering för användandet av mikrovågstermometri som en icke-invasiv temperaturmätning, har tidigare gjorts med den förenklade modellen visualiserad i figur 1.3 och som presenteras i [9]. Modellen innefattar en behållare med 16 monopolära antenner omgivna av en vätska, där patienten modelleras med hjälp av en fantom med dielektriska egenskaper som efterliknar hjärnvävnad och tumör [9].



**Figur 1.3:** Modell utav systemet som användes vid försök till konceptvalidering.

Med denna modell transmitteras dock vågorna inte enbart genom fantomen, vilket hade varit önskvärt, utan de reflekteras även från väggarna och från fantomens yta inuti avbildningssystemet [9]. Dessutom fås störande signaler från så kallad 'mutual coupling', där antennerna mäter signaler direkt från varandra. För att undvika dessa vågor, vilka orsakar brus i bildrekonstruktionen, användes en vattenalkoholblandning (80:20). Detta i syfte att dämpa signalerna eftersom blandningen har absorberande egenskaper. Nackdelen med denna blandning är dock att även de signaler som är tänkta att transmitteras genom fantomen kommer att dämpas, vilket blir problematiskt, då all energi från signalerna behöver nå fram för att fantomen ska kunna värmas upp till önskad temperatur. Dessutom medför de dämpade signalerna att rekonstruktionen inte når tillfredsställande resultat, trots att brussignalerna har minimerats.

Den nuvarande metoden behöver alltså vidareutvecklas för att kunna påvisa konceptvalidering. Problemet med att dämpa de oönskade signalerna, men bevara de önskade signalerna, är inte en svårighet endast för detta system utan ett generellt problem inom värmeövervakning för hypertermi. En lösning på detta problem hade därför kunnat innebära stora framsteg inom forskningsfältet.

## 1.1 Syfte

Syftet med projektet är att påvisa konceptvalidering av mikrovågstermometri, för att kunna övervaka värmeutvecklingen under en hypertermibehandling. Metoden baseras på att detektera förändringar av dielektriska egenskaper i vävnader genom att mäta reflektionskoefficienter från mikrovågor. Detta syftar till att lösa problemet med reflektion från behållarens väggar samt att dämpa 'mutual coupling'-signalerna, utan att samtidigt dämpa de transmitterade vågorna genom fantomen.

För att reducera mikrovågorna som reflekteras från systemets väggar till antennerna, utan att dämpa alla signaler, har praktiska lösningar utvecklats samt utvärderats. Detta genom att absorptionsmaterial har lagts till i konstruktionen, i syfte att absorbera vågorna vid väggen i stället för att reflektera dessa. Ett av absorptionsmaterialen som testats är tillhandahållet sedan tidigare, medan det andra har tillverkats under projektets gång, utifrån önskade dielektriska egenskaper. Dessutom har vatten, i stället för en alkoholblandning, använts som vätska i behållaren för att inte absorbera signalerna som är önskvärda att transmitteras genom fantomen.

Mikrovågstermometri är känsligt för 'mutual coupling', vilket detta projekt har begränsat genom att testa en ny, tillhandahållen rekonstruktionsalgoritm, som tar hänsyn till störningar mellan antennerna. Detta med förhoppning om att konstruera noggrannare värmekartor.

## 1.2 Avgränsningar och förändringar från tidigare arbete

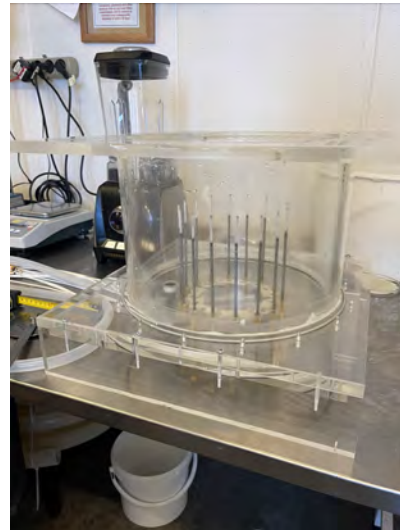
I detta projekt har tre avgränsningar gjorts. Detta innefattar ett redan konstruerat avbildningssystem, undersökning av enbart två absorptionsmaterial och en befintlig rekonstruktionsalgoritm som ej är utvecklad av kandidatgruppen utan av hypertermigruppen på Chalmers Tekniska Högskola.

### 1.2.1 Avbildningssystem

Avbildningssystemet har återanvänts från tidigare arbete [9], och har därmed inte tillverkats av kandidatgruppen. I figur 1.4a och 1.4b visas avbildningssystemet. Viktigt att notera är att det återanvända avbildningssystemet, är en förenkling av ett hypertermisystem. Ett exempel på ett mer komplett system kan ses i figur 1.1.



**Figur 1.4a:** Avbildningssystemet ovanifrån.

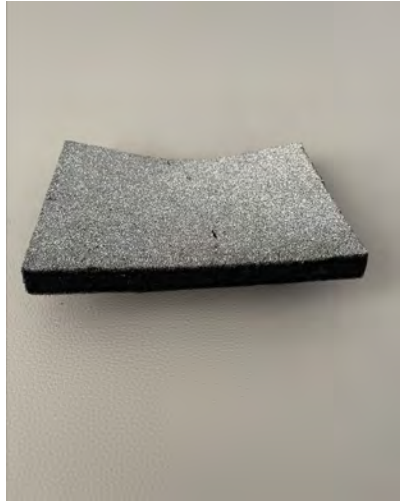


**Figur 1.4b:** Avbildningssystemet från sidan.

### 1.2.2 Absorptionsmaterial

I tidigare arbete användes, som nämnt ovan, en alkoholblandning som vätska i avbildningssystemet i syfte att minska reflektion av vågor från väggarna samt 'mutual coupling'. Detta resulterade dock i att även de transmitterade signalerna genom fantomen dämpades, vilket gjorde det svårt att rekonstruera bilderna. I detta projekt har därför alkoholblandningen bytts ut mot destillerat vatten, eftersom de elektromagnetiska vågorna inte absorberas av denna vätska [16]. Detta har medfört att de transmitterade signalerna från fantomen blir starkare, vilket är nödvändigt för att kunna rekonstruera bra bilder [17].

Dock innebar bytet av vätska att ett absorptionsmaterial behövs läggas till på insidan av systemets väggar, i syfte att absorbera de reflekterade vågorna som sprids mot avbildningssystemets väggar. Detta för att undvika att även dessa signaler förstärks. Två olika absorptionsmaterial har utvärderats under projektet, ett absorberande skummaterial kallat Eccosorb tillverkat av Laird som visas i figur 1.5a och en egentillverkad gel med önskade dielektriska egenskaper som visas i figur 1.5b.



**Figur 1.5a:** Utskuren bit av det tillhandahållna absorberande skummaterial Eccosorb.



**Figur 1.5b:** Utskuren bit av den egentillverkade absorberande gelen.

Skummaterialiet undersöktes då detta är ett material med god absorptionsförmåga för högre frekvenser, med en förhoppning om att det även skulle fungera bra för lägre frekvenser när den sänks ned i vatten. Gelen antogs ha bra absorptionsförmåga för alla frekvenser, men då denna inte är lika hållbar som skummaterialiet behövde dessa två jämföras för att se vilken som passade bäst för just denna tillämpning.

### 1.2.3 Rekonstruktionsalgoritm

Rekonstruktionsalgoritmen som använts för att framkalla värmekartor är framtagen sedan innan och inte utvecklad av projektgruppen. Anledningen till att ingen egen algoritm framställts är på grund av att det är en tidskrävande process samt att gruppen inte besitter tillräckliga kunskaper för att kunna göra detta inom den tidsram som finns för projektet.

Algoritmen som användes var en vidareutveckling av den algoritm som användes i tidigare arbete [9]. Dock har en betydande förändring skett då algoritmen nu även tar hänsyn till 'mutual coupling'

# 2

## Teori

I detta avsnitt tas teori på avancerad nivå och som ligger till grund för arbetet upp. Avsnittet lyfter områdena mikrovågor, dielektriska egenskaper, mikrovågstermometri, vector network analyzer och spridningsparametrar samt ekvationer som använts för rekonstruktionsalgoritmen.

### 2.1 Mikrovågor

Mikrovågor utgör en del av det elektromagnetiska spektrumet och innehåller frekvenser mellan 300Mhz till 300GHz, vilket motsvarar våglängder mellan 10 – 0.01mm [18]. En elektromagnetisk våg består utav ett magnetiskt fält och ett elektriskt fält som är vinkelräta mot varandra och vågens riktning, vågen är alltså transversell [19]. Denna våg bär på energi som delvis absorberas av material som vågen propagerar igenom. Energin som materialet absorberar från vågen omvandlas till värmeenergi där uppvärmningen beror på materialets dielektriska egenskaper som permittiviteten och framför allt konduktivitet. Permittiviteten beskriver ett materials förmåga att polariseras efter inverkan av ett elektriskt fält och konduktiviteten beskriver ledningsförmågan hos det specifika materialet [20, 21, 22].

### 2.2 Dielektriska egenskaper

Komplex permittivitet kan beskrivas med  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 [F/m]$  där  $\varepsilon_r$  är den relativa permittiviteten och  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  är permittiviteten för vakuum [23]. Den relativa permittiviteten kan delas upp i en reell del och en imaginär del:  $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r''$  där  $\varepsilon_r'$  är den reella delen och beskriver hur polariserbart materialet är vilket påverkar hur mycket energi som kan lagras i mediet och där  $\varepsilon_r''$  är den imaginära delen som relaterar till hur mycket energi som förloras i mediet [20, 21, 23]. Den imaginära delen kan även relateras till konduktiviteten,  $\sigma [S/m]$  sådan att  $\sigma = \varepsilon_r'' \omega \varepsilon_0$

När ett dielektriskt material värms upp förändras de dielektriska egenskaperna i materialet enligt ekvation 2.1.

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \cdot 10^{-11} f E^2 \varepsilon_r'' \quad (2.1)$$

där  $\rho [kg/m^3]$  är densiteten hos objektet,  $C_p [J \cdot (kg^{-1} \circ C^{-1})]$  är den specifika värmekapaciteten,  $E [V/m]$  är det elektriska fältets intensitet,  $\Delta t [s]$  är tidslängden under mätningen,  $\Delta T [^\circ C]$  är temperaturskillnaden och  $f [Hz]$  är frekvensen [15]. Från

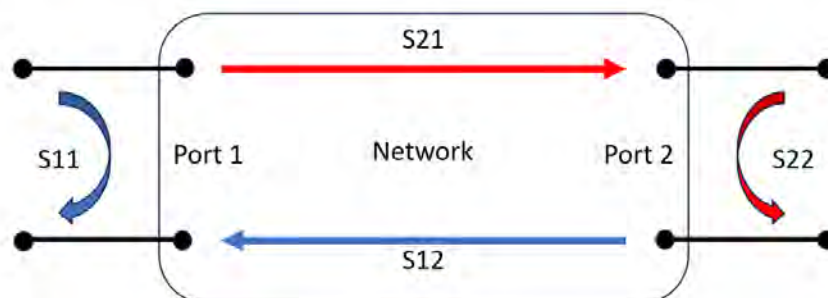
denna ekvation syns det även att de dielektriska egenskaperna är frekvensberoende. Att egenskaperna hos dielektriska material förändras med temperatur kan utnyttjas inom mikrovågstermetri för att mäta temperaturen i det uppvärmda området under en hypertermibehandling [9, 24].

## 2.3 Mikrovågstermetri

Mikrovågstermetri är en icke-invasiv metod för monitorering av ett objekts temperatur i realtid [25]. Metoden använder sig av ett antenssystem och bygger på att mäta skillnaden mellan de två dielektriska egenskaperna permittivitet och konduktivitet för olika vävnader, där den absorberade energin av mikrovågorna är proportionell mot temperaturen i objektet. När temperaturen ökar i objektet så försämras de dielektriska egenskaperna hos objektet vilket medför att mer av mikrovågorna reflekteras tillbaka till antenssystemet. Denna korrelation kan användas för att göra en tidsdomän inversions algoritm för att rekonstruera temperaturen hos objektet i realtid [24].

## 2.4 Vector Network Analyzer (VNA) och spridningsparametrar

Vector Network Analyzer (VNA) är ett test-instrument som används för att mäta prestanda hos elektromagnetiska system [26]. VNA:n är utrustad med en signalgenerator och en uppsättning mottagare för att avgöra förändringen i signalen. Huvudsakligen används systemet för att beräkna spridningsparametrar. Spridningsparametrarna definierar förhållandet av infallande respektive reflekterade mikrovågor för ett system [27]. Det vill säga att spridningsparameter  $S_{i,j}$  beskriver hur mycket av vågen som transmitterats från antenn  $i$  till antenn  $j$ . Spridningsparametrarna beräknas genom att VNA:n stimulerar en port och samtidigt mäter med övriga portar. Detta upprepas sedan för samtliga portar och frekvenser och på så sätt beräknas spridningsparametrarna. En schematisk bild som beskriver detta samband för en VNA med 2 portar visas i figur 2.1.



**Figur 2.1:** Schematisk bild över spridningsparametrar i en två-ports VNA.

## 2.5 Ekvationer för rekonstruktionsalgoritm

Rekonstruktionsalgoritmen från tidigare arbete samt den nya algoritmen baseras på ekvation 2.2 [28].

$$E_{obj}^a(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \int_{\Omega} G(r, \hat{r}) \cdot O(\hat{r}) E_{tot}^a(r) d\hat{r}, \quad (2.2)$$

där  $E_{obj}^a$  [V/m] är det elektriska fältet skapat av antenn a som reflekteras från objektet,  $\omega$  [Hz] är vinkelfrekvensen,  $c$  [m/s] är ljusets hastighet och  $\Omega$  är bilddomänen.  $G(r, \hat{r})$  står för den dyadiska Greens funktionen där  $r$  är en positionsvektor till den undersökta punkten och  $\hat{r}$  representerar positionsvektorn till alla punkter som det integreras över för godtycklig position  $\mathbf{r}$ .  $O(\hat{r}) = \Delta\epsilon_r + \frac{i}{\omega\epsilon_b}\Delta\sigma$  är objektfunktionen där  $\Delta\epsilon_r$  [F/m] är skillnad i permittivitet,  $\epsilon_b$  [F/m] är bakgrundspemittivitet och  $\Delta\sigma$  [S/m] är skillnad i konduktivitet. Slutligen står  $E_{tot}^a$  [V/m] för det totala elektriska fältet i bilddomänen som genereras av antenn a.

I den tidigare rekonstruktionsalgoritmen gjordes antagandet att  $E_{obj}^a(r) = E_{Scatter}^a(r)$  vilket visas i figur 2.2a, där  $E_{Scatter}^a(r)$  är det elektriska fält som sprids efter att antenn a har transmitterat och som kan fås via ekvation 2.3 där  $E_{inc}^a(r)$  är det inkommande elektriska fältet, även kallat incidentfältet.

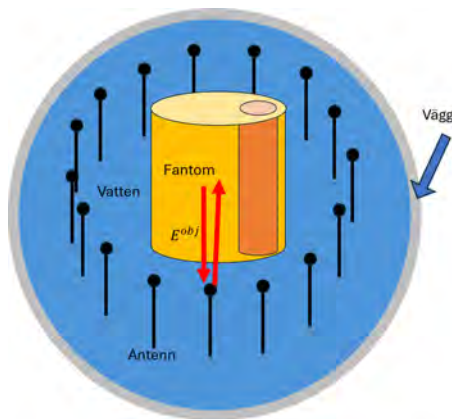
$$E_{Scatter}^a(r) = E_{tot}^a(r) - E_{inc}^a(r). \quad (2.3)$$

Detta antagande är dock missvisande då de uppmätta spridningsparametrarna även påverkas av fält mellan antennerna,  $E_{coupling}(r)$  så kallad 'mutual coupling' och från reflektionerna från väggarna av avbildningssystemet,  $E_{wall}(r)$ . Med dessa faktorer inräknade fås i stället  $E_{Scatter}^a(r) = E_{obj}^a(r) + E_{coupling}^a(r) + E_{wall}^a(r)$  vilket visualiseras i figur 2.2b.

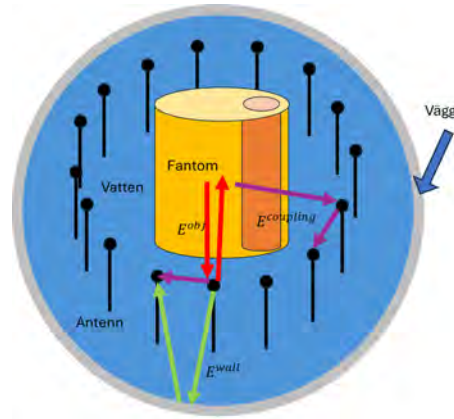
$E_{wall}^a(r)$  försvinner ur ekvationen enligt figur 2.2c då dessa signaler absorberas av absorptionsmaterialet på systemets väggar. Genom att sedan göra en mätning utan fantomen i systemet enligt figur 2.2c blir ekvationen  $E_{Scatter}^a(r) = E_{coupling}^a(r)$  vilket gör att denna term kan räknas ut och sedan användas för beräkning av  $E_{obj}^a(r)$ . När  $E_{Scatter}^a(r)$  har fått fram kan det användas med ekvation 2.2 och 2.3 för att relatera uppmätta spridningsparametrar,  $\Delta S_{ij}$  [dB] via ekvation 2.4 [9, 28].

$$\Delta S_{ij} = C \int_{\Omega} E_{inc,j}(r) \Delta O(r) E_{inc,i}(r) dr, \quad (2.4)$$

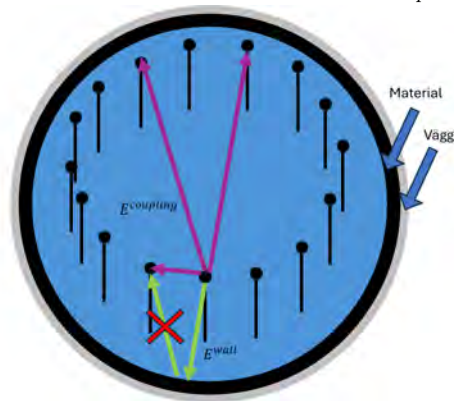
där  $C = \frac{-k_b^2}{4i\omega\mu}$ ,  $k_b$  är det förlustfria bakgrundsvågnumret och  $\mu$  [H/m] är permeabiliteten.



Figur 2.2a: Illustration av  $E_{obj}^a$ .



Figur 2.2b: Illustration av  $E_{obj}^a$ ,  $E_{wall}^a$  och  $E_{coupling}^a$ .



Figur 2.2c: Illustration av  $E_{obj}^a$  och  $E_{coupling}^a$  där  $E_{wall}^a$  försvunnit.

# 3

## Metod

I metodavsnittet beskrivs tillvägagångssättet för förberedelserna inför mätningar, genomförandet av experiment, numeriska simuleringar och slutligen hur uppmätt data använts för att generera värmekartor.

### 3.1 Förberedelser inför mätningar

Innan mätningarna kunde påbörjas kontrollerades utrustningen som behövdes för att genomföra experimenten. Därefter konstruerades ett recept för geltillverkning samt ett recept för fantomen, där önskade dielektriska egenskaper matchades. Även två mindre experiment genomfördes för att verifiera absorptionsmaterialen.

#### 3.1.1 Felsökning och kalibrering inför mätningar

För att få så noggranna resultat som möjligt under mätningarna samt att viss avvikelser upptäcktes i systemet under en initial mätning, undersöktes alla kablar mellan VNA:n och antennerna i avbildningssystemet. Även antennerna felsöktes för att garantera att dessa fungerade och inte behövde bytas. Kablarna undersöktes genom att först mäta spridningsparametrarna för en referenskabel med känd prestanda. Därefter mättes och jämfördes resultaten för varje kabel där de kablar som hade liknande spridningsparametrar som referenskabeln behölls. När 16 fungerande kablar hittats kopplades dessa samman med VNA:n och kalibrerades mot varandra med hjälp av en kalibreringsenhet. För att felsöka antennerna användes två av de redan felsökta och verifierade kablarna. Motstående antenner i avbildningssystemet kopplades samman med varsin kabel och de transmitterade vågorna mellan antennerna undersöktes för att se att dessa överensstämde, det vill säga att spridningsparametrarna för varje antennpar var lika. Denna mätning utfördes med en 2-ports VNA, där varje antennpar därmed testades enskilt. Antennerna genomgick också en visuell inspektion för att undersöka potentiella defekter.

Efter den initiala kalibreringen väcktes misstanke om antennernas prestanda. Det gjordes då ytterligare en felsökning i avbildningssystemet genom att mäta motstående antenner mot varandra. Detta efter att med hjälp utav en vinkelhake säkerställa antennernas vinkelräta position mot bottenplattan. Denna mätning gjordes med en 16-ports VNA, för att inte behöva byta ut kopplingarna mellan varje mätning, vilket behövde göras i tidigare felsökning. Genom detta tillvägagångssätt gavs alla resultat från samma mätning med förhoppningen om bättre resultat.

För att kunna mäta dielektriska egenskaper i material användes Dielectric Assessment Kit for Thin Layers (DAK-TL2), vilket är ett instrument som tillåter karakterisering av dielektriska egenskaper för flytande, fasta och halvfasta material. De dielektriska egenskaperna beräknas med hjälp av reflektionskoefficienten vid probens ände [29]. För att mätningarna skulle bli så noggranna som möjligt kalibrerades DAK-TL2 inför varje mättillfälle i luft, kortslutning samt för destillerat vatten. Kalibreringen gjordes mot vätskor, då mätningarna genomfördes på vätskor och gel vilka räknas som halvfasta material. Anledningen till att kalibreringen gjordes mot vätskor och inte fasta material trots att gelen är halvfast, beror på att gelen var tillverkad att efterlikna dielektriska egenskaper hos vätskor. Mellan varje mätning rengjordes även instrumentet med desinfektionsmedel.

### 3.1.2 Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten

För att underlätta framtida mätningar gjordes ett initialt test av kranvattnets dielektriska egenskaper, i jämförelse med det destillerade vattnets egenskaper. Om kranvattnets permittivitet och konduktivitet kunde antas tillräckligt lika värdena för destillerat vatten, skulle resterande mätningar kunna göras med kranvatten. Detta var önskvärt då tillgängligheten av destillerat vatten var begränsad. Gränsen för att anta kranvatten som ett rimligt substitut till destillerat vatten valdes till inom 1% intervall från det faktiska värdet för permittiviteten och ett intervall inom 5% för konduktiviteten. Dessa gränser bestämdes för att säkerställa att kranvattnets dielektriska egenskaper är likvärdiga med det destillerade vattnet. I avsnitt 5.1.2 argumenteras detta vidare.

Både kranvatten och destillerat vatten hölls först upp i varsin behållare för att sedan över en dag stå i rumstemperatur. Detta för att säkerställa att vätskorna skulle ha samma temperatur vid mätning, då temperaturen har inverkan på de dielektriska egenskaperna [15]. Mätningarna gjordes sedan i DAK-TL2 där samma mängd kranvatten och destillerat vatten hölls upp var för sig för att sedan mätas.

### 3.1.3 Geltillverkning

För att hitta en gel med liknande permittivitet som vatten ( $\epsilon \approx 78$  F/m för frekvensintervallet 0.1-1 GHz vid rumstemperatur) men med max 20% avvikelse, tillverkades flera olika geler utifrån receptet i Appendix A, men där saltmängden varierades [30]. Denna specifika gräns på 20% är ett önskemål från Massimiliano Zanolini, som är skaparen av algoritmen som avsnitt 5.1.3 går in djupare på. Anledningen till att permittiviteten ska vara lika är för att största möjliga mängd av mikrovågorna ska gå in i gelen och dämpas [31]. För att matcha permittiviteten räknades den optimala saltmängden ut, beräkningarna kan ses i Appendix B. Från denna uträkning valdes även gel med +/- 5g salt att undersökas.

Alla geler testades sedan med DAK-TL2 för att få fram permittiviteten och konduktiviteten. Efter mätning valdes den gel som stämde bäst överens med de önskade dielektriska egenskaperna. När rätt saltmängd på gelen hade hittats kunde gelen börja tillverkas och gjutas in i avbildningssystemet enligt Appendix B. Hur tillverkningen gick till visas även i figur 3.1a och 3.1b.



**Figur 3.1a:** Uppvärmning av gel under omrörning.



**Figur 3.1b:** Temperaturavläsning till 95 °C.

För att få en slät och uniform gel med samma tjocklek, användes en soptunna med lämplig form. Soptunnan placerades i mitten av behållaren och tejpades sedan temporärt fast i behållarens botten. Längs kanterna trycktes papper ner för att absorbera eventuellt läckage. Vätskeblandningen fick svalna till 50°C för att minska eventuellt läckage innan den hälldes ned i mellanrummet mellan avbildningssystemets insida och soptunnans utsida, vilket visas i figur 3.2. När gelen stelnat plockades tejpens och pappret bort och soptunnan kunde lyftas ur avbildningssystemet.



**Figur 3.2:** Pågående gjutning av gel med hjälp av soptunna som form.

### 3.1.4 Initial testning av absorptionsmaterial

Innan mätningarna med avbildningssystemet påbörjades, gjordes ett initialt experiment. Detta för att undersöka vilket av de två absorptionsmaterialen som absorberade störst mängd energi från mikrovågorna. Anledningen till varför detta genomfördes är för att få en uppfattning om prestandan på de två absorptionsmaterialen, inför de kommande experimenten med avbildningssystemet.

Inför experimentet tillverkades en extra gel och båda absorptionsmaterialen skars sedan ut i lika stora delar, med samma tjocklek för att bli jämförbara. Därefter placerades dessa i en glasslåda via en fästordning enligt figur 3.3a och 3.3b. Mätningar genomfördes därefter för vardera absorptionsmaterial. Ytterligare en gel skars ut och plastades sedan in för att undersöka om plasten påverkade mätningarna enligt figur 3.3c. En basmätning utan något material mellan antennen utfördes också i syfte att användas som jämförelsevärde för de olika materialen enligt figur 3.3d.

Fästordningen i glasslådan gjordes på så sätt, att materialen placerades på samma avstånd från antennerna som vid mätningarna i avbildningssystemet, detta för att få jämförbara resultat mellan mätningarna. Antennerna kopplades sedan till en 2-ports VNA för att kunna transmitta mikrovågor från antennerna. Under experimentet transmitterades vågorna från antennerna som sedan registrerades av motstående antenn på andra sidan av absorptionsmaterialet, se figur 3.3e för modell.

Genom att sedan studera amplituden av den registrerade signalen för båda materialen kunde ett mått på attenueringsförmågan hos absorptionsmaterialen tas fram. Under den initiala testningen upptäcktes det att skummaterial kontaminerat glasslådan. För att se hur mycket kontaminering det skulle bli i avbildningssystemet placerades skummaterial i tanken och vatten hölls i för att sedan stå i 60 minuter.



**Figur 3.3a:** Konstruktion glasslåda med gel.



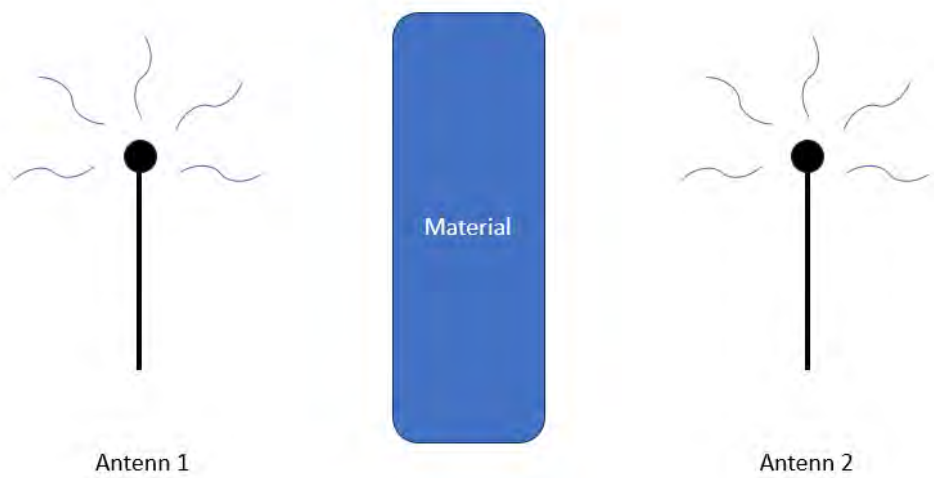
**Figur 3.3b:** Konstruktion glasslåda med skummaterial.



**Figur 3.3c:** Konstruktion glasslåda med gel inlindat i plast.



**Figur 3.3d:** Konstruktion glasslåda utan absorptionsmaterial.



**Figur 3.3e:** Skiss av experimentuppställning av absorptionsmätning.

### 3.1.5 Fantomtillverkning

För att övervaka värmefördelningen i systemet behövs ett objekt som kan värmas upp. Därför tillhandahölls en fantom som visas i figur 3.4. Fantomen består av en vätskebehållare tillverkad i polyetylentereftalat, samt en mindre cylindrisk behållare tillverkad av okänt plastmaterial. Innehållet på vätskorna valdes så att de dielektriska egenskaperna skulle matcha hjärnvävnad och tumör. I och med att hjärnan består av ca 40% grå hjärnsubstans och 60% vit hjärnsubstans användes permittiviteten 35-55 F/M som riktlinje för den normala hjärnvävnaden, och även för glycerolblandningen. Detta för att den lägsta permittiviteten för vit substans är 35 F/m och den högsta för grå substans är 55 F/m för frekvenser mellan 500MHz-1.2GHz [32]. För konduktivitet gäller riktlinjerna 0.5-1.2 S/m enligt samma resonemang för detta frekvensintervall, för hjärnvävnad [32]. Den mindre behållaren sänktes ned i vätskebehållaren och den större behållaren fylldes med en vatten-glycerol-blandning (20:80), i syfte att efterlikna dielektriska egenskaper av normal hjärnvävnad. Glycerolblandningen testades även med DAK-TL2 för att verifiera att de dielektriska egenskaperna stämde då det var en blandning som projektgruppen ej gjorde själva.



**Figur 3.4:** Konstruktion av fantom.

De dielektriska egenskaperna för gliom, en av de vanligaste cancerformerna i det centrala nervsystemet hos barn, har visat sig vara 30% högre än vanlig hjärnvävnad[33]. Detta innebär en riktlinje på permittivitet 45.5-71.5 och konduktivitet 0.65-1.56 [34]. Dessa riktlinjer användes för att beräkna mängden salt i saltblandningen enligt Appendix C som sedan användes som saltblandning i den mindre behållaren i fantomen.

När fantomen var färdigkonstruerad markerades mittpunkten i avbildningssystemet. Detta för att kunna mäta in fantomens position inför upprepande mätningar, för att få mer jämförbara resultat mellan mätningarna. För att veta hur lång tid mätningarna skulle ta, värmdes saltblandningen upp i en kastrull på en kokplatta till 55°C och hölls sedan ner i tumörbehållaren som befann sig i avbildningssystemet.

En kökstermometer placerades i mitten av tumörbehållaren för att mäta avsvälningen. Noteringar gjordes efter att tumören nått 50°C. Tumörblandningen fick sedan sjunka till 24°C, vilket var nära rumstemperaturen. Under avsvälningen noterade två personer varje temperaturförändring med en hel grad samt tidpunkt för detta. Därefter beräknades ett medelvärde av tidpunkterna för temperaturförändringen, i syfte att få mer noggranna resultat.

### 3.1.6 Undersökning av kontaminering av vatten

Högre konduktivitet av vattnet leder, som nämnt tidigare, till oönskade egenskaper som innefattar att mer energi går förlorad i vattnet. En hypotes är att gelen troligen kommer kontaminera det omkringliggande vattnet i avbildningssystemet. För att kontrollera att vattnet med låg konduktivitet inte kontamineras av gelen som är designad för att ha en hög konduktivitet, behövdes en metod för att undersöka kontamineringen av vattnet när den är i kontakt med gelen.

För att kontrollera eventuell kontaminering tillverkades två lika stora geler. Den ena plastades sedan in som en möjlig metod för att minska kontamineringen mellan vatten och gelen, innan de båda gelerna lades i varsin lika stor plastbehållare. Behållarna innehållande gelerna fylldes sedan med rumstempererat vatten och en tredje behållare utan gel fylldes med samma rumstempererade vatten som referens.

Under tre dagar testades sedan permittiviteten och konduktiviteten av vattnet i de tre behållarna. Detta för att se om gelen kontaminerar vattnet och om kontamineringen i sådana fall kan minskas om den plastas in. Detta är av intresse då vatten hålls ned i avbildningssystemet med gelen i.

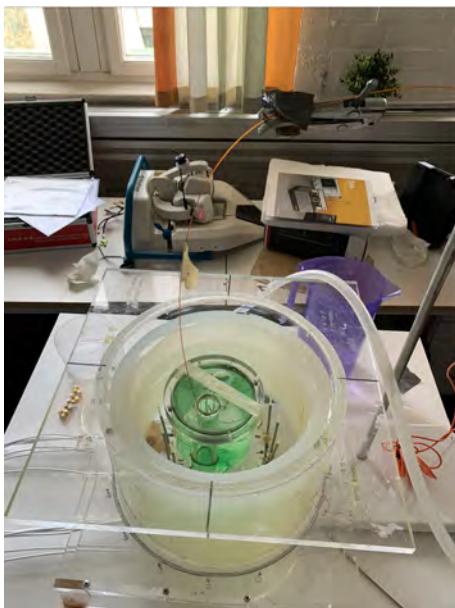
## 3.2 Experiment och numerisk simulering

Experimentavsnittet är uppdelat i mätningar och numerisk simulering. Första delen av avsnittet beskriver hur mätningar på avbildningssystemet genomförts, medan avsnittet kring numerisk simulering beskriver användningen av CST Studio Suite för att skapa en virtuell modell av systemet som sedan kan användas för simuleringar.

### 3.2.1 Mätningar i avbildningssystemet

Efter att kalibrering och felsökning hade genomförts kunde mätningarna på avbildningssystemet genomföras. De kalibrerade kablarna anslöts mellan VNA:n och antennerna i avbildningssystemet och det antecknades vilka kablar på avbildningssystemet som var kopplade till vilka portar på VNA:n. Anledningen till att denna information noterades beror på att rekonstruktionsalgoritmen och simuleringen i CST ska stämma överens, för att dessa ska kunna jämföras.

När systemet med den gjutna gelen var ihopkopplat med VNA:n fylldes avbildningssystemet med vanligt kranvatten tills antennerna var täckta med ungefär 3cm vatten, varpå en markering gjordes för vattennivån. Därefter genomfördes en första mätning utan fantom. Efter detta placerades fantomen i mitten av avbildningssystemet, på markerad position. En liten mängd vatten togs även ut ur systemet för att nå samma höjd som markeringen då vattenhöjden under alla experimenten skulle vara densamma. Därefter värmdes tumörblandningen upp enligt avsnittet 3.1.5 till ca 55°C och en fiberprobe placerades i denna för att sedan hängas upp i en ställning för att under hela mätningen ta temperaturen från samma position i tumören. I figur 3.5 och figur 3.6 visas hela experimentuppställningen. När temperaturen hade nått 50°C placerades tumören i fantomen och mätningen pågick i lika många minuter som den första fantommätningen beskriven i avsnitt 3.1.5 resulterade i. Detta redovisas även i avsnitt 4.2. Under denna tid sparades datan från VNA:n med ett fem sekunders intervall mellan varje mätning med hjälp av ett python-skript som sparade ned datan automatiskt. Femsekunders intervall valdes för att kunna fånga varje temperatursänkning med en grad celsius vilket vidare beskrivs i avsnitt 5.2.1. Skriptet var tillhandahållet, men med vissa brister för att fungera på denna applikation, vilket innebar att viss kodning fick genomföras innan skriptet var körbart.



**Figur 3.5:** Upphängningsanordning för fiberprobe.



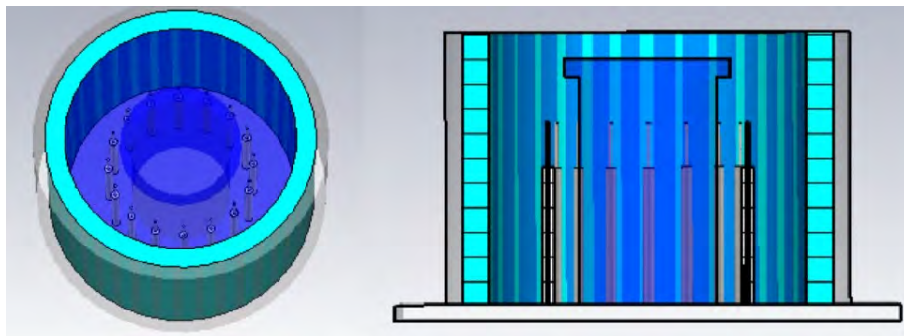
**Figur 3.6:** Uppställning av experiment.

### 3.2.2 Numerisk simulering

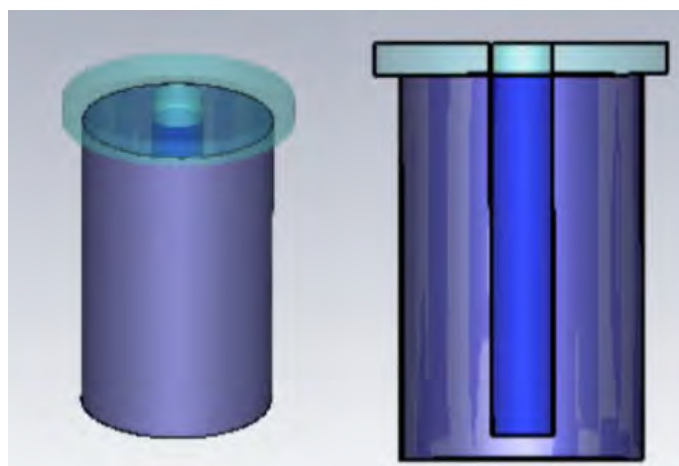
I och med att rekonstruktionsalgoritmen från tidigare arbete kräver resultat från simulerade experiment, har en modell med avbildningssystemets dimensioner skapats i CST Studio Suite. Detta kunde konstrueras via att först göra noggranna mätningar på hela avbildningssystemets dimensioner. Den färdiga modellen i CST med 16 antenner kan ses i figur 3.7a.

Absorptionsmaterialen skapades i CST med hjälp av mätningar med DAK-TL2. Resultaten från DAK-TL2-mätningarna för materialen importerades därefter till CST via MATLAB. Även fantomen behövde modelleras genom att först mäta alla dimensioner. I figur 3.7b visas modellen av fantomen fylld med glycerol och saltblandning. Däremot behövdes inga material skapas då glycerol och saltblandningen existerar som färdiga material i programmet. Resultaten från simuleringen exporterades via MATLAB för att sedan konstruera bilder över värmefördelningen i bildsystemet.

Under körning av den numeriska simuleringen upptäcktes ett fel som misstänktes kunde inverka på resultatet. Därför konstruerades ytterligare en modell för att kunna kontrollera och jämföra om den tidigare modellen var felaktig. Med denna genomfördes sedan samma simulering.



**Figur 3.7a:** Avbildningssystem med fantom modellerat i CST Studio Suite.



**Figur 3.7b:** Fantommodell och tvärsnitt av fantom.

### 3.3 Bildrekonstruktion

När all data samlats in sparades datan ned och skickades till skaparen av rekonstruktionsalgoritmen, som använde den nya rekonstruktionsalgoritmen på datan.

På samma data testades även den gamla rekonstruktionsalgoritmen för att kunna jämföra och utvärdera prestandan av den nya algoritmen.

# 4

## Resultat

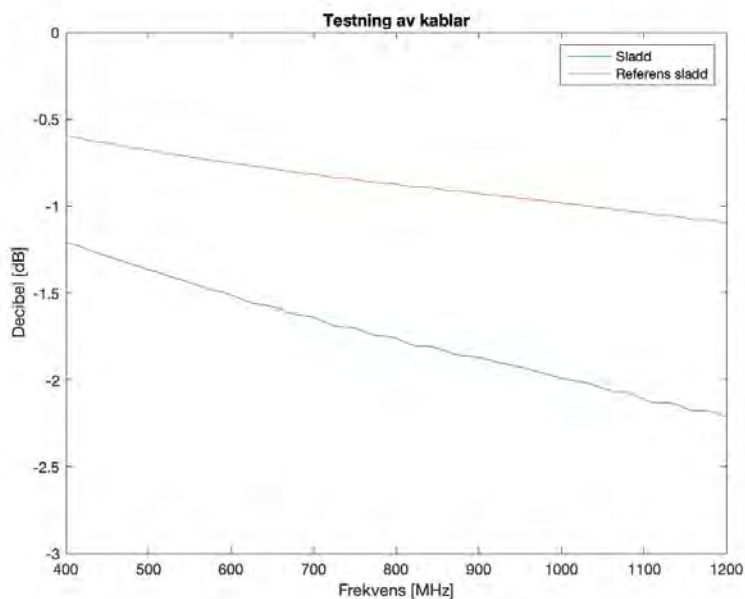
Nedan presenteras en sammanställning av insamlat resultat från projektet, vilket innefattar resultat från förberedelser inför mätningar, experiment och numeriska simuleringar samt bildrekonstruktion.

### 4.1 Förberedelser inför mätningar

I detta avsnitt presenteras resultaten från förberedelserna inför mätningarna, vilket innefattar felsökning och kalibrering, jämförelse av dielektriska egenskaper, gel- och fantomtillverkning samt en initial testning av absorptionsmaterial.

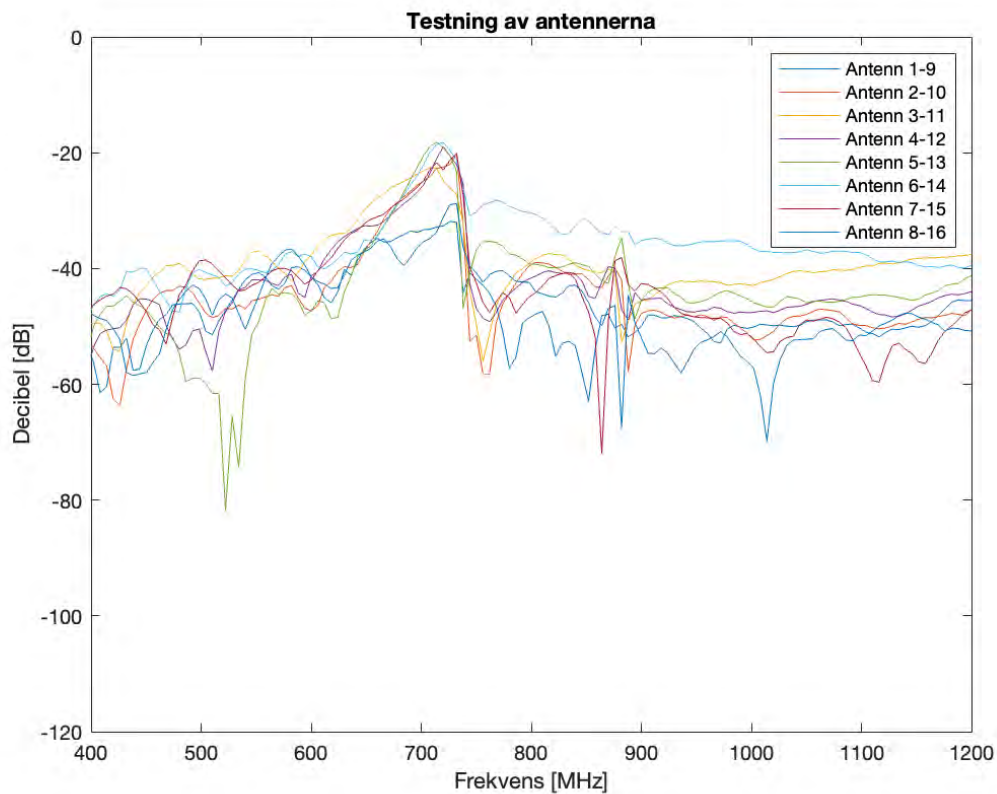
#### 4.1.1 Felsökning och kalibrering inför mätningar

I figur 4.1 visas resultatet från en av felsökningarna, där en kabel jämförs med referenskabeln. Ur figuren syns att de följer varandra med avseende på mönstret när det kommer till frekvensberoendet, men att de ej har samma amplitud. De kablar som felsöktes inför mätningarna visade godtagbar kvalitet, vilket innebär att de följer referenskabelns kurva relativt väl och kan användas framöver under projektet.



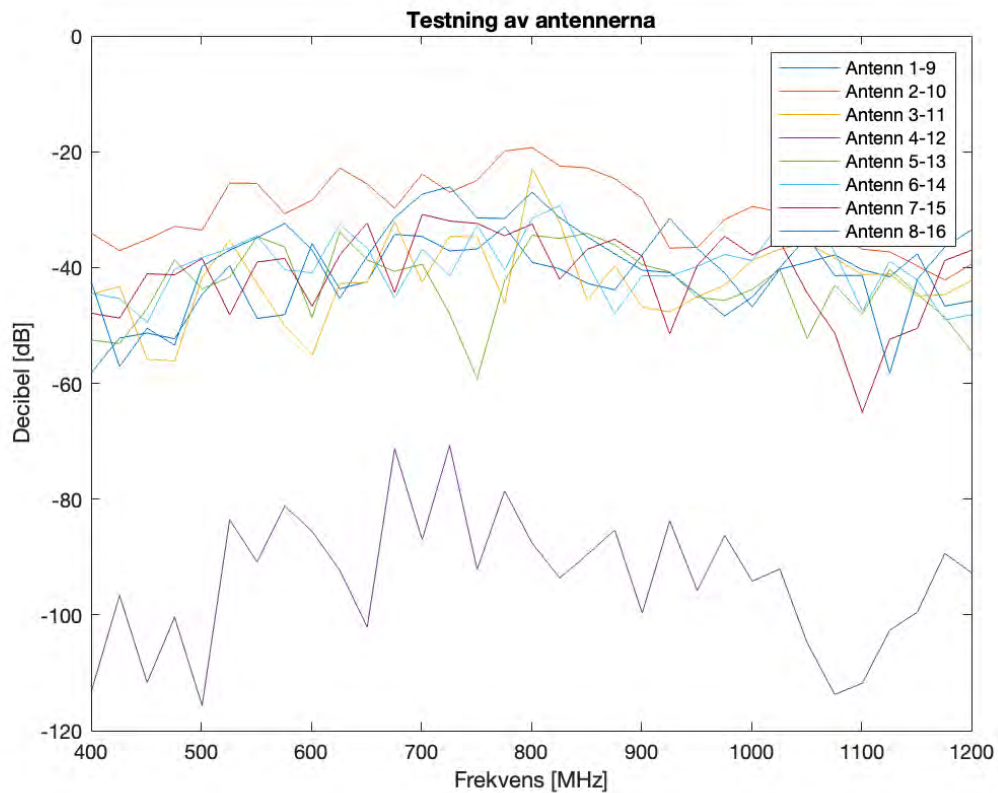
**Figur 4.1:** Exempel från en felsökning där referenskabeln jämförs med en kabel.

Spridningsparametrarna till motstående antenn i avbildningssystemet från 2-ports VNA:n plottades för att se hur antennerna korrelerade till varandra enligt figur 4.2. För ideala antenner borde alla plottar följa varandra, dock blev inte utfallet sådant, utan alla antennpar avviker mer eller mindre ifrån varandra.



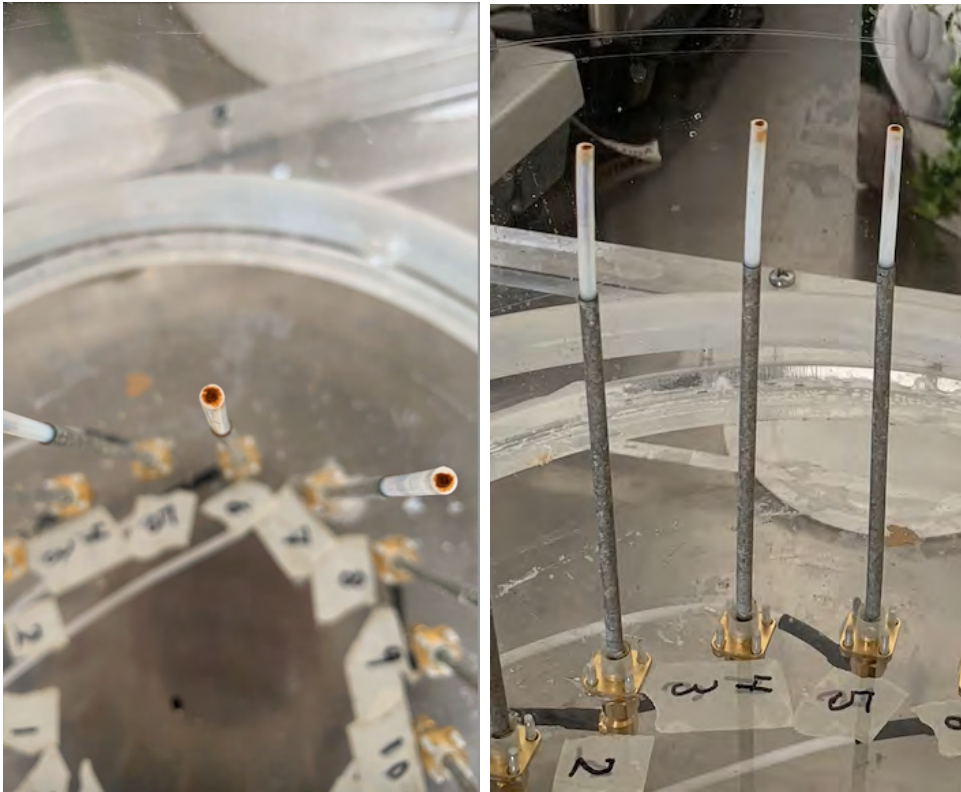
**Figur 4.2:** Spridningsparamerar för motstående antennpar vid mätning i 2-ports VNA.

Försöket att förbättra spridningsparametrarna till motstående antenn i avbildningssystemet från 16-ports VNA:n plottades för att se hur antennerna korrelerade till varandra enligt figur 4.3. Dock avviker antennernas spridningsparametrar mot varandra även under denna mätning, och särskilt avvikande är antennpar 4-12.



**Figur 4.3:** Spridningsparametrar för motstående antennpar vid mätning i 16-ports VNA, efter åtgärd att förbättra antennernas prestanda.

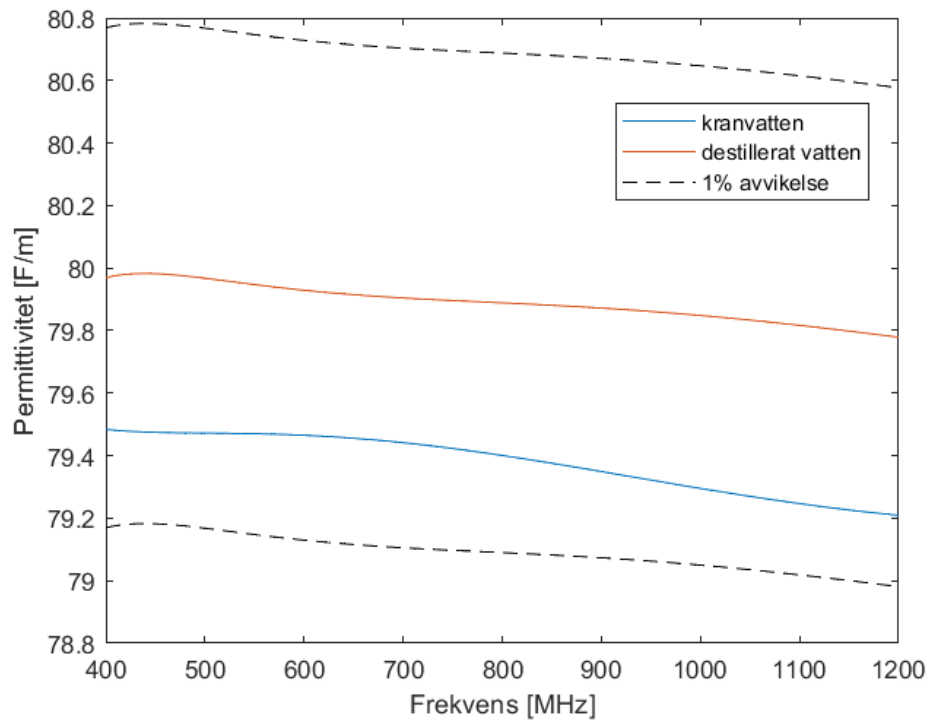
Efter den visuella inspektionen, sågs att antennerna oxiderat samt att en del av antennerna var något deformerade. Oxideringen kan ses i figur 4.4a och exempel på en böjd antenn visas i figur 4.4b.



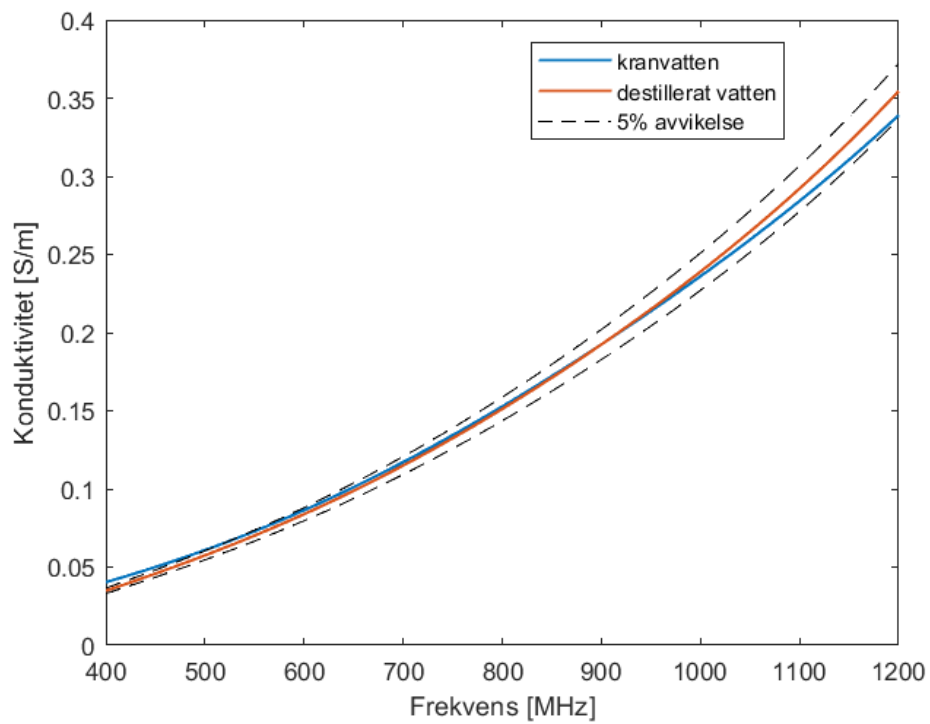
**Figur 4.4a:** Oxidation av antenner.  
**Figur 4.4b:** Exempel på en defekt antenn som är lite böjd.

#### 4.1.2 Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten

Figur 4.5 visar att kranvattnets permittivitet är lägre än permittiviteten för destillerat vatten, men dock inom en procents avvikelse. I figur 4.6 visas skillnaden mellan kranvattnets och det destillerade vattnets konduktivitet samt en avvikelse på fem procent från det destillerade vattnets värde. Kranvattnets konduktivitet är inom det godkända intervallet för de flesta frekvenser men ligger strax utanför för de allra lägsta frekvenserna.



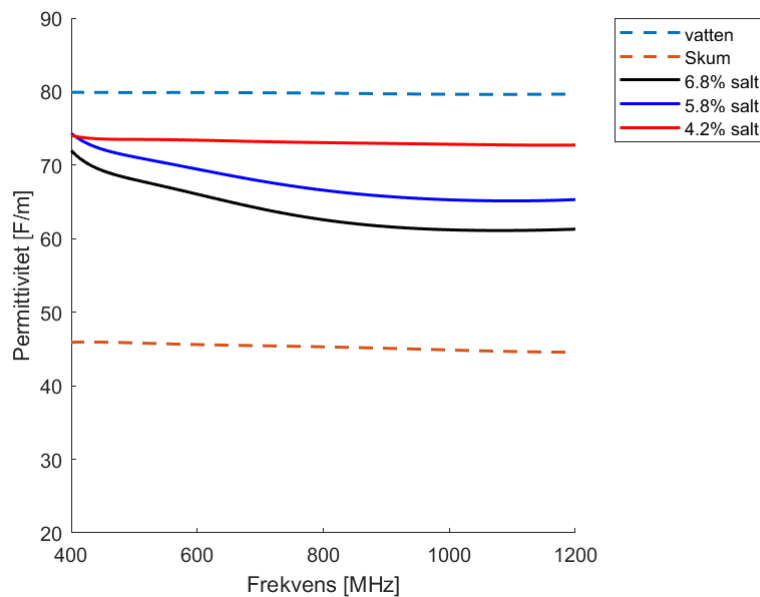
**Figur 4.5:** Permittiviteten för kranvatten, destillerat vatten samt 1% avvikelse.



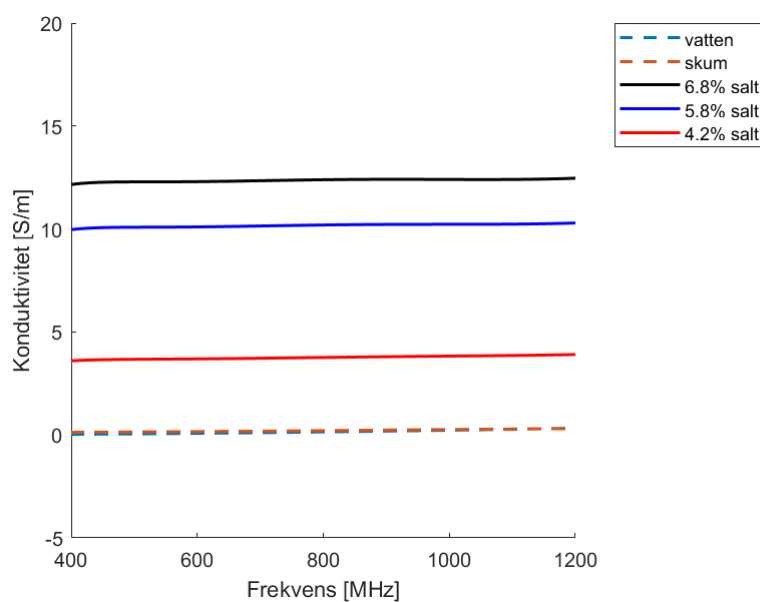
**Figur 4.6:** Konduktiviteten för kranvatten, destillerat vatten samt 5% avvikelse.

### 4.1.3 Geltillverkning

I figur 4.7 och figur 4.8 nedan visas resultaten för permittivitet respektive konduktivitet för vatten, skummaterial och för geler med olika saltmängder. I figurerna visas hur saltet påverkas av de dielektriska egenskaperna, tydligt noteras konduktiviteten ökar ju högre saltmängd gelen har medan permittiviteten minskar för högre salthalter.

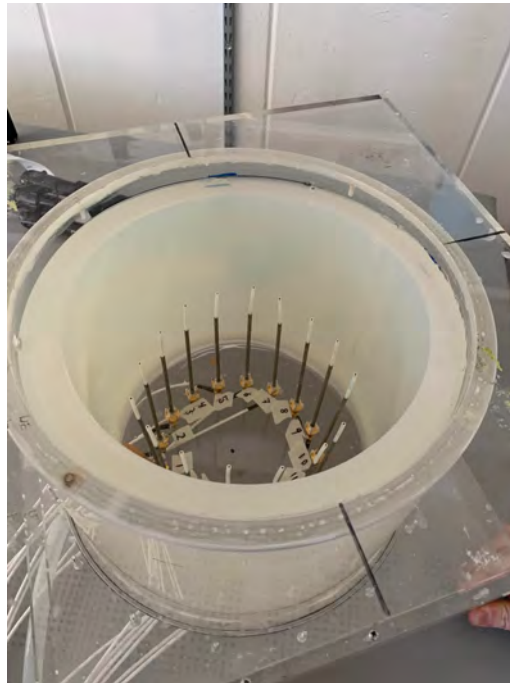


**Figur 4.7:** Permittivitet beroende på material och saltmängd.



**Figur 4.8:** Konduktivitet beroende på material och saltmängd.

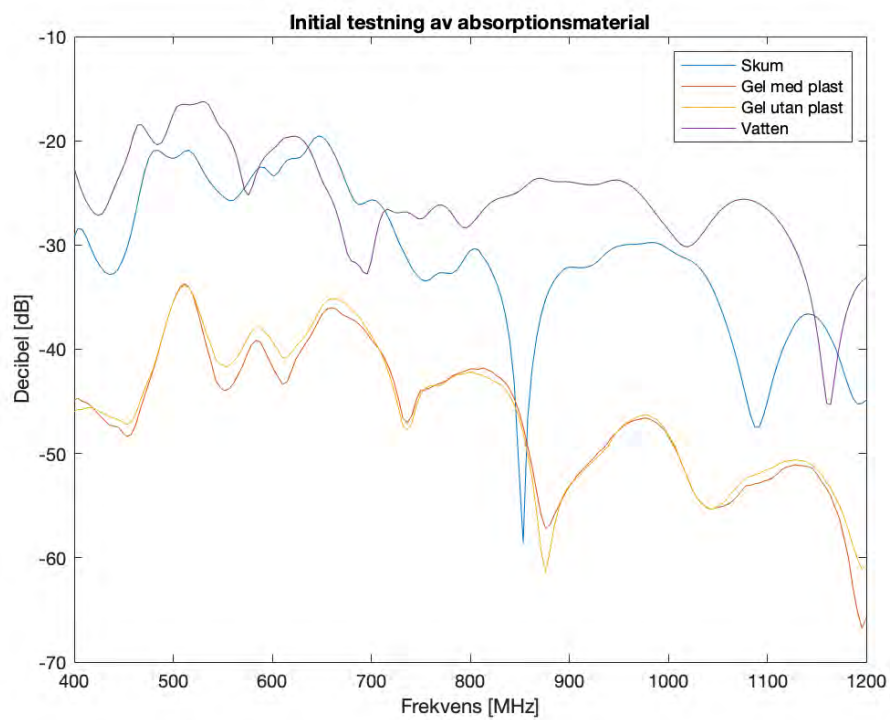
I figur 4.9 visas slutresultatet av geltillverkningen i avbildningssystemet när gelen har stelnat och soptunnan tagits bort. Gelen är stabil nog att kunna hålla sig upprätt av sig själv samt är fri från luftbubblor.



**Figur 4.9:** Resultat av den egentillverkade gelen i avbildningssystemet.

#### 4.1.4 Initial testning av absorptionsmaterial

I figur 4.10 visas resultaten från den initiala testningen av absorptionsmaterialen med gel, inplastad gel och skummaterial. Figuren visar också referensmätningen med enbart vatten utan något absorptionsmaterial. Amplituden för både den inplastade och icke-inplastade gelen är väldigt lika, samt betydligt lägre än vad de är för skummaterialen och referensmätningen för vattnet. Dock har skummaterialen en frekvens mellan 800MHz och 900MHz där amplituden drastiskt minskar. Generellt sett minskar även amplituden för alla material för de högre frekvenserna jämfört med de lägre.



**Figur 4.10:** Initial testning av absorptionsmaterial.

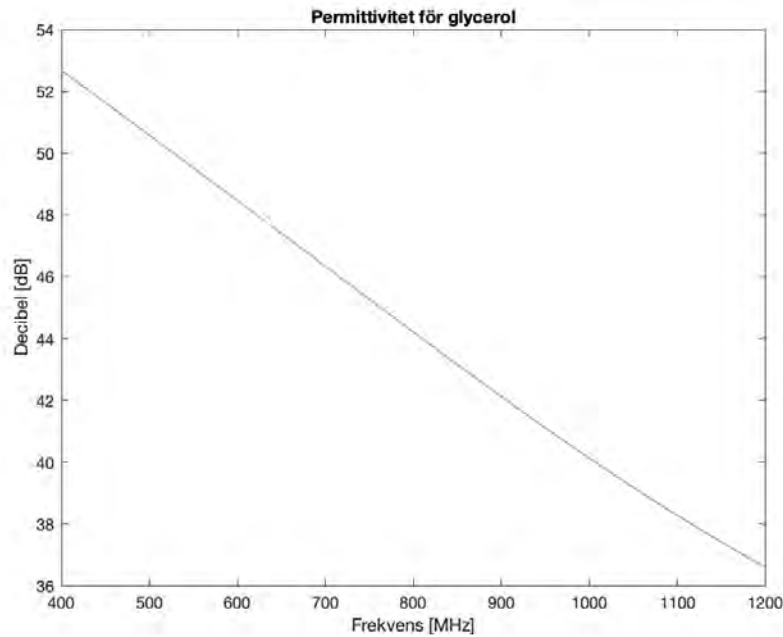
Figur 4.11 visar tydligt hur vattnet kontamineras av skummaterialiet efter 60 minuter.



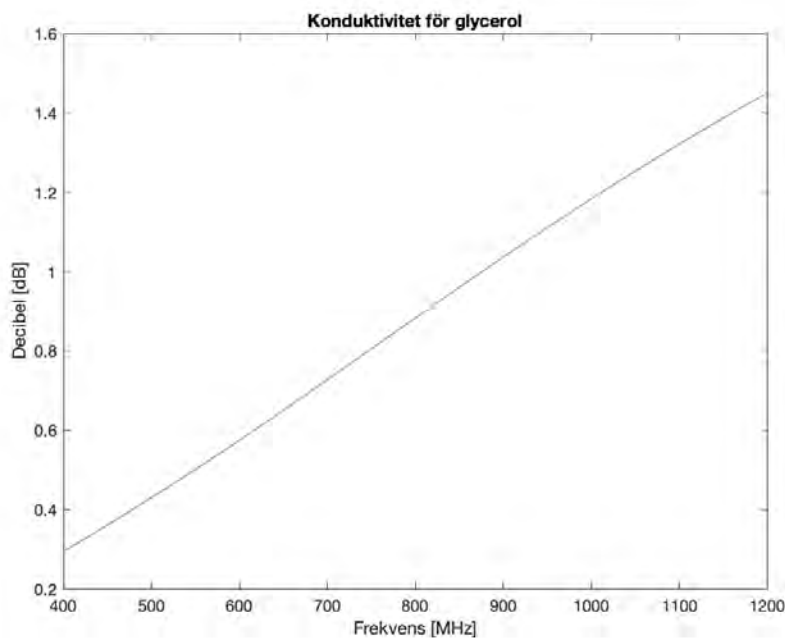
**Figur 4.11:** Kontaminering av vatten efter skummaterialiet.

### 4.1.5 Fantomtillverkning

Från uträkningarna i Appendix C konstaterades det att saltmängden för tumörblandningen var 8.766g per 100ml. I figur 4.12 och 4.13 visas resultatet av mätningarna på glycerolblandningen. Från dessa figurer konstateras att blandningen ligger inom de önskvärda intervallen för att matcha hjärnvävnad.

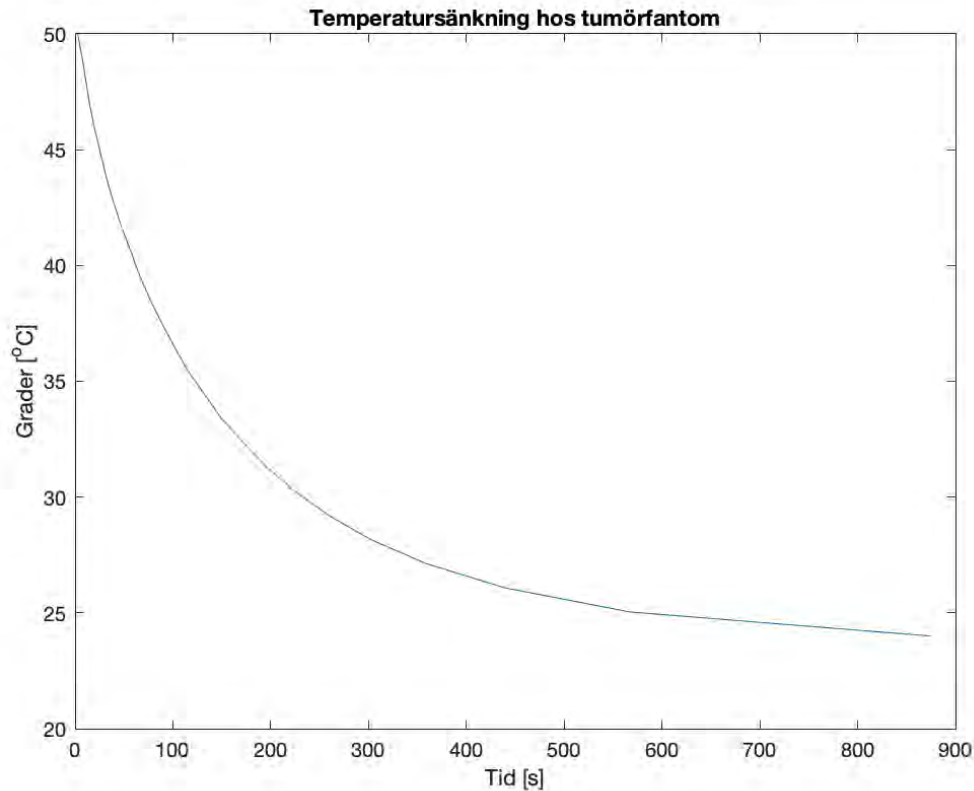


**Figur 4.12:** Permittivitet för glycerol för frekvenserna 400MHz till 1200MHz.



**Figur 4.13:** Konduktivitet för glycerol för frekvenserna 400MHz till 1200MHz.

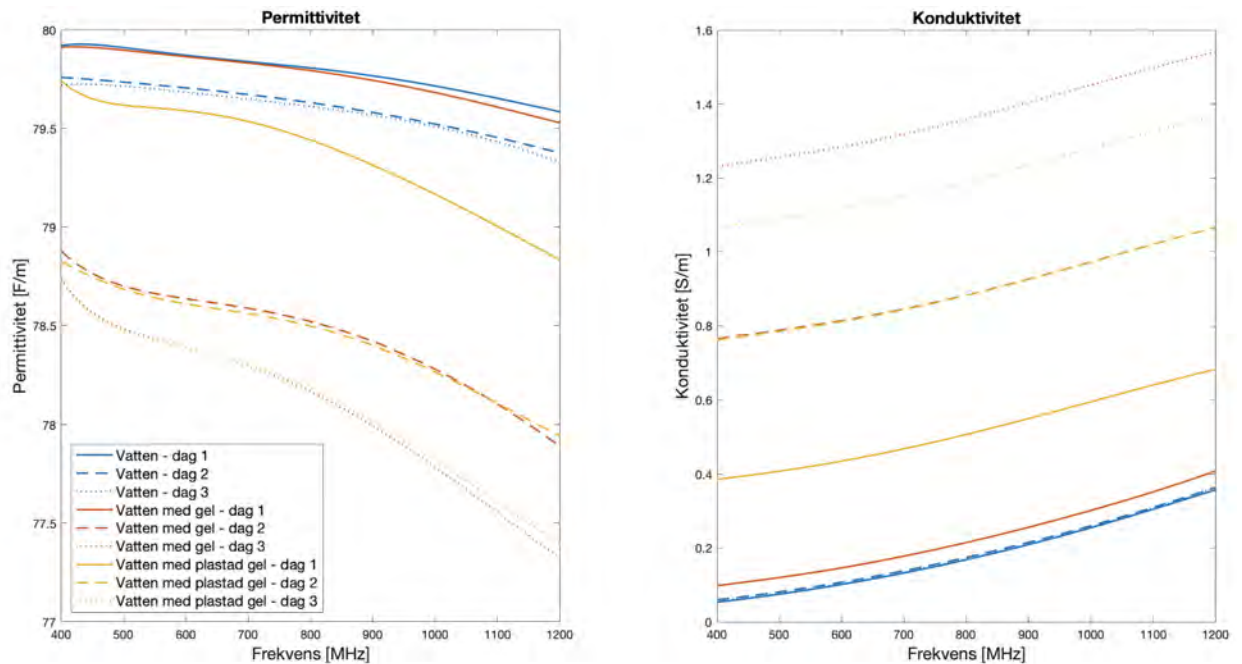
Resultatet från avsvälningen presenteras i figur 4.14. I figuren visas det att temperaturen avtar exponentiellt med tiden och att den börjar stabiliseras runt 900s vilket motsvarar 15 minuter.



**Figur 4.14:** Resultat från avsvälning av fantom med avseende på tid.

#### 4.1.6 Undersökning av kontaminering av vatten

I figur 4.15 nedan visas kontaminering av vatten av icke-inplastad gel samt inplastad gel under tre dagar. Från figurerna kan det ses att permittiviteten sjunker efter andra och tredje dagen för alla tre vattenproverna. Däremot är det störst skillnad för vattnet med gel och vattnet med inplastad gel, vanligt kranvatten sjunker inte lika mycket. För konduktiviteten är vanligt vatten oförändrat för alla dagarna medan konduktiviteten ökar för både vattnet med inplastad gel och icke-inplastad gel.



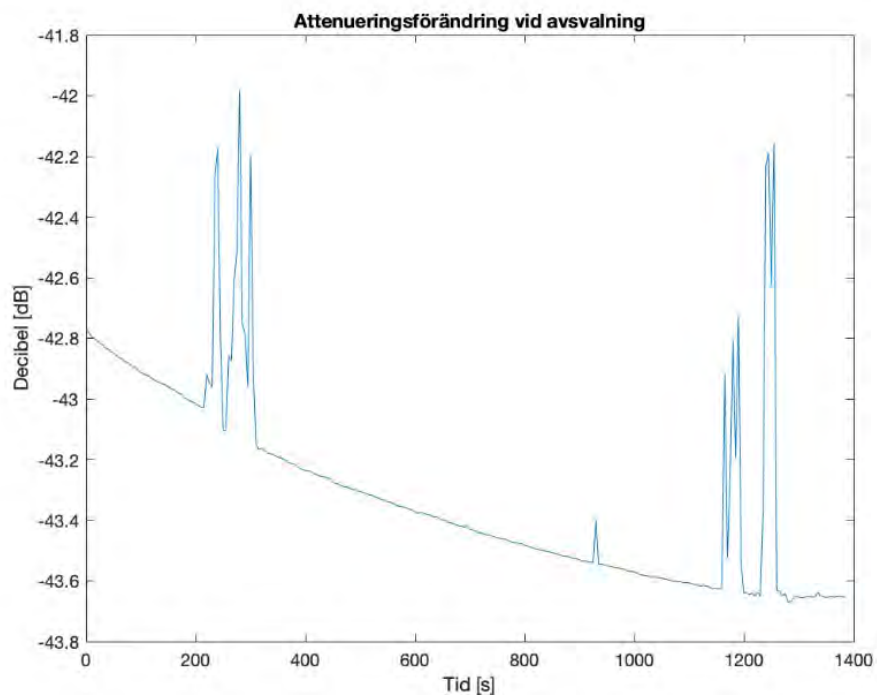
**Figur 4.15:** Permittivitets- och konduktivitetsskillnader under 3 påföljande dagar för vatten, vatten med gel samt vatten med inplastad gel.

## 4.2 Experiment och numerisk simulering

I följande avsnitt presenteras resultat från de mätningar som gjordes både med och utan fantom. Även reflektionskoefficienterna från den numeriska simuleringen presenteras.

### 4.2.1 Mätningar i avbildningssystemet

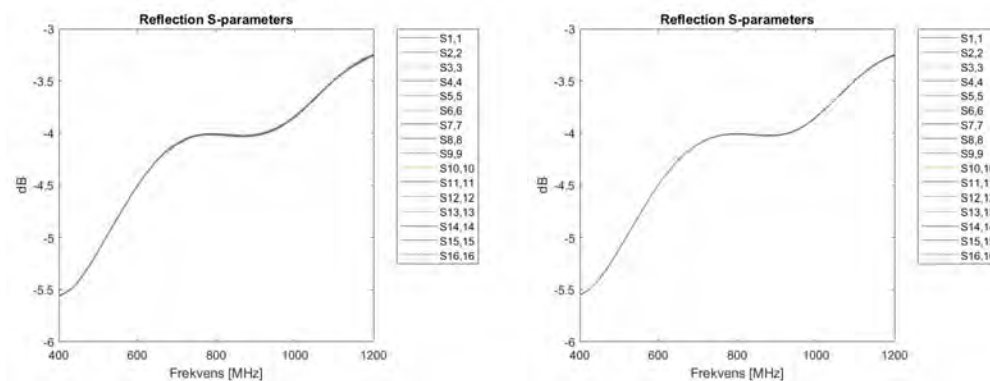
I figur 4.16 visas hur medelvärdet av alla spridningsparametrarna, både reflekterade och transmitterade, avtar över tid från mätningarna i avbildningssystemet. Detta resultat kan jämföras med figur 4.14 där det ses att kurvorna följer varandra i form men att det finns vissa avvikelser i signal i figur 4.16 vid tidsintervallen 200s-300s, 950s-1000s och 1150s-1300s.



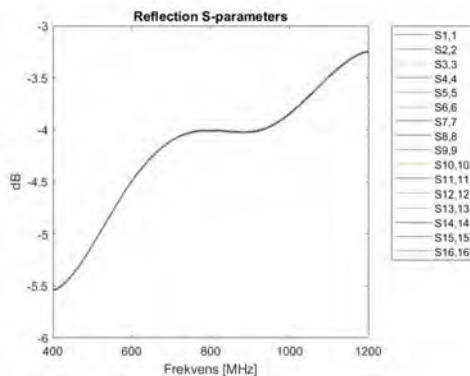
**Figur 4.16:** Attenuering av signal i avbildningssystemet över tid.

## 4.2.2 Numerisk simulering

I figur 4.17a, 4.17b och 4.17c presenteras reflektionskoefficienterna för de olika simulerade experimenten med den första modellen som misstänktes vara felaktig. Från figurerna ses det att alla kurvor ser likadana ut, vilket de inte bör göra då det är olika typer av mätningar, en med gel och fantom, en med gel utan fantom och en utan både gel och fantom. I och med att dessa ser likadana ut kan det konstateras att någonting i modellen är felaktigt.

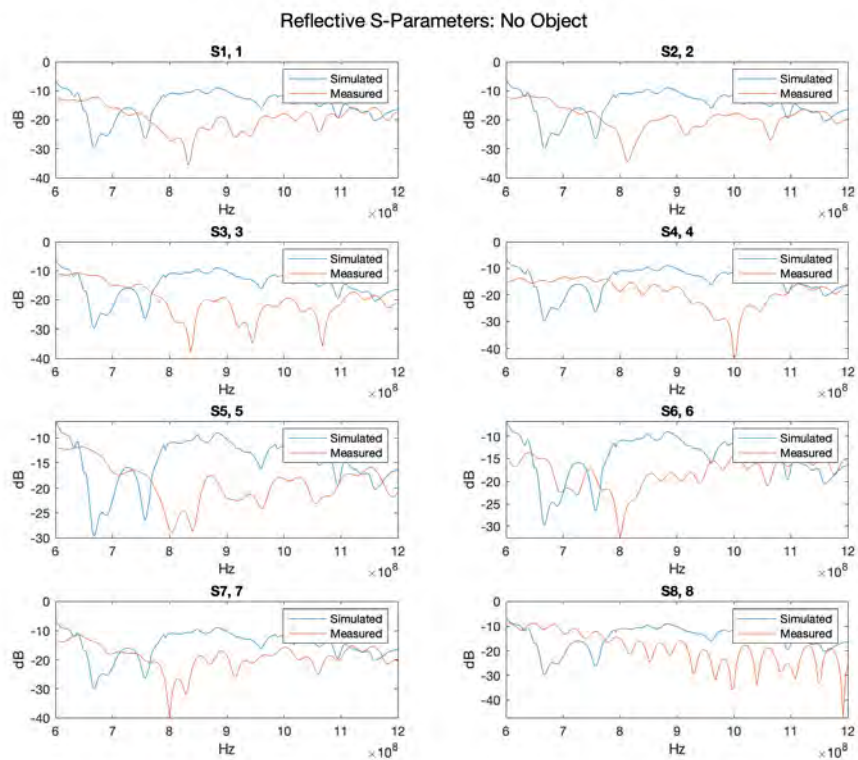


**Figur 4.17a:** Spridningsparamterar för simulering med gel och fantom. **Figur 4.17b:** Spridningsparametrar för simulering med gel utan fantom.

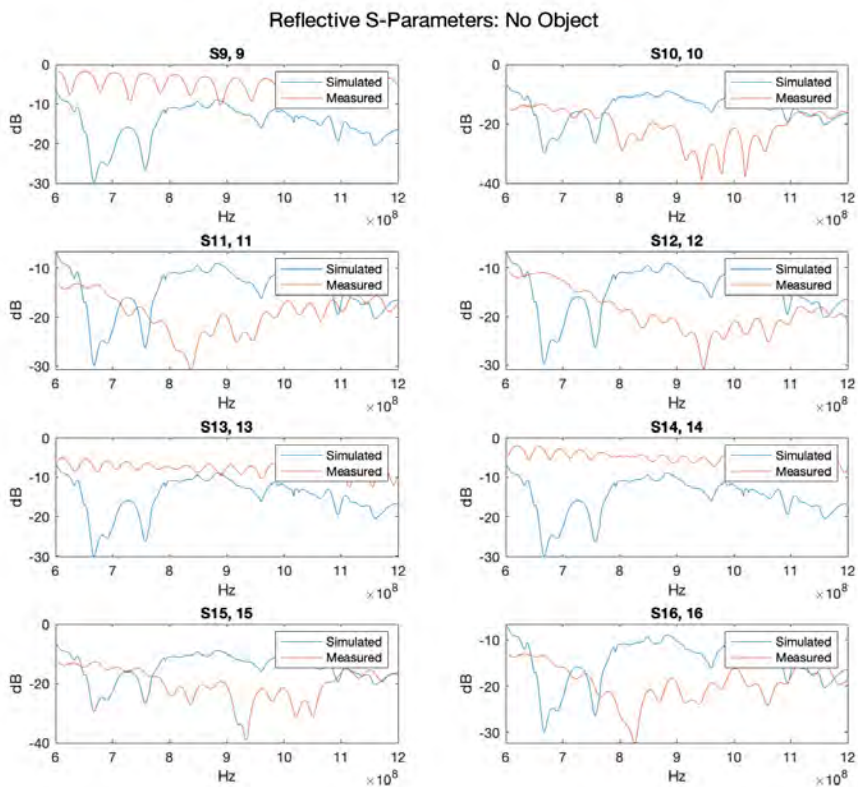


**Figur 4.17c:** Spridningsparamterar för simulering utan gel och fantom.

Resultatet från simuleringen med den andra modellen för gel utan fantom tillsammans med spridningsparametrarna från mätningen visas i figur 4.18a och 4.18b. Vid jämförelse av dessa figurer med figur 4.17b från den tidigare modellen, visas det att spridningsparametrarna nu skiljer sig åt mellan antennerna vilket indikerar att denna modell fungerar. Vid jämförelse av den nya simuleringen tillsammans med de uppmätta spridningsparametrarna syns det också ytterligare en gång att vissa antenner inte fungerar. Exempelvis för spridningsparameter S9,9 som syns i figur 4.18b, där det syns att den uppmätta datan inte alls följer den simulerade samt att den har ett upprepande vågmönster. Spridningsparameter S2,2 däremot har inte det upprepande vågmönstret och följer den simulerade kurvan på ett bättre sätt.



**Figur 4.18a:** Spridningsparametrar för simulering med gel utan fantom för antenn 1-8.



**Figur 4.18b:** Spridningsparametrar för simulering med gel utan fantom för 34 antenn 9-16.

### 4.3 Bildrekonstruktion

Rekonstruktionsalgoritmerna lyckades varken generera bilder från den uppmätta datan eller den simulerade datan. Därmed visas inga resultat nedan.

# 5

## Diskussion

I diskussionen kommer olika ställningstaganden under projektets gång att tas upp och förklaras. Även viss analys av resultaten och metoden kommer att genomföras samt att utvecklingsmöjligheter för detta arbete kommer att presenteras.

### 5.1 Förberedelser inför mätningar

I detta avsnitt kommer en diskussion kring resultaten från felsökningen, geltillverkningen och de första undersökningarna inför mätningarna att föras. I de första undersökningarna inkluderas jämförelsen mellan kranvatten och destillerat vatten, den initiala testningen av absorptionsmaterial samt undersökningen av kontaminering av vatten.

#### 5.1.1 Felsökning och kalibrering inför mätningar

Kablarna visade under felsökningen inga större avvikelser, men hade inte heller ideal prestanda. Dock fanns inga nya kablar att tillgå, så av de som fanns valdes de kablar med bäst prestanda. Om nya kablar hade varit tillgängliga skulle dessa ha föredragits och eventuellt även lett till förbättrade resultat. Dock hade det varit viktigt att även testa de nya kablarna då det alltid finns en risk att prestandan inte är tillräckligt bra.

Inte heller antennerna gav ideala resultat. Mätningarna av spridningsparametrar för motstående antennpar visade stor skillnad mellan olika antennpar, vilket indikerar på att antennerna inte fungerar som de ska. Under projektet har det skett mycket arbete inuti avbildningssystemet, särskilt vid gjutning och borttagning av gelen, vilket eventuellt kan ha orsakat fler skador på antennerna än de redan presenterade defekterna i avsnitt 4.1.1, efter att felsökningen var genomförd.

Exempel på skador som kunnat uppstå på grund av arbetet i avbildningssystemet är att vissa antenner har oxiderat under tiden mätningarna i vatten pågått samt att de har böjts vid geltillverkningen, vilket kan ha påverkat mätresultaten. Detta på grund av att lagret av oxidation samt böjningen av antennen kan påverka antennens förmåga att transmittera och mäta vågor. Tyvärr fanns det ingen möjlighet att byta ut antennerna inom rimlig tid, eftersom leveranstiden var för lång och antennerna inte skulle ha kunnat levereras före projektets avslut.

Efter det stora experimentet gjordes åtgärder för att se om prestandan hos antenner kunde förbättras. Detta genom att räta upp antenner samt genom att testa alla antenner i samma mätning i en 16-ports VNA, i stället för att testa varje par för sig i en 2-ports VNA i syfte att minska felkällor. Detta gav andra typer av resultat enligt figur 4.3 jämfört med resultatet i första mätningen presenterade i figur 4.2. Efter detta togs beslutet att det inte kommer gå att förbättra de befintliga antennerna, utan för att uppnå bättre resultat behöver antenner bytas ut.

Mätningarna som gjordes med instrumentet DAK-TL2 kan inte heller påstås ge ideala resultat. Anledningen till detta är då nya kalibreringar genomfördes efter varje ny mätomgång och då kalibreringarna inte gick att få likadana, oavsett hur många omkalibreringar som genomfördes. Dessutom fanns ingen standardiserad form för att kunna mäta exempelvis gelen med samma tjocklek varje gång vilket även det kan ha påverkat mätningarna och inte gjort de lika jämförbara.

För att få mätningarna med DAK-TL2 att bli så noggranna som möjligt, trots att kalibreringen inte fungerade helt som den skulle, torkades det noggrant med desinfektionsmedel mellan varje mätning. Anledningen till detta är för att garantera så att det inte finns rester kvar av det föregående materialet som kan påverka den nya mätningen.

### 5.1.2 Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten

Gränsen för kranvattnets permittivitet sattes till en procentavvikelse från det destillerade vattnets permittivitet. Detta då det krävs att egenskaperna hos kranvattnet efterliknar det destillerade vattnets egenskaper för att de ska antas vara likvärdiga. Anledningen till att konduktivitetens gräns var fem procent och inte en procent som för permittiviteten, var för att konduktiviteten låg mellan 0 och 0.4 S/m vilket gör att en procents intervall inte gör någon avsevärd skillnad, samtidigt som DAK-TL2s mätningar ansågs vara osäkra. Vid mätning av kranvatten och destillerat vatten, visade det sig att kranvattnet var inom det godkända intervallet för permittiviteten. Däremot för konduktiviteten låg kranvattnet utanför intervallet, dock bara för de allra lägsta frekvenserna. I och med att kranvattnet låg precis utanför gränsen och att det enbart gällde för några enstaka frekvenser, bedömdes ändå konduktiviteten att ligga inom godtagbara gränser.

Detta medförde ett beslut om att framtida mätningar skulle genomföras med kranvatten i stället för destillerat vatten. Beslutet betydde att de begränsade resurserna av destillerat vatten som tillhandahölls, inte påverkade tillvägagångssättet för huvudmätningarna i avbildningssystemet. Viktigt att poängtera är dock att det enbart går att ersätta destillerat vatten mot kranvatten i detta fall, och alltså inte generellt sett. Detta då enbart vatten från en specifik kran har testats, det går därför inte att garantera att samma resultat kan fås överallt. Därför rekommenderas det att undersöka kranvattnets dielektriska egenskaper innan det byts ut mot destillerat vatten, om destillerat vatten ej är tillgängligt i tillräckliga volymer.

### 5.1.3 Geltillverkning

Vid tillverkningen av gelen var det viktigt att se till så att soptunnan den göts efter hade jämn yta, så att även gelen blev jämn. Detta för att garantera att tjockleken var densamma runt hela systemet, så att absorptionen kunde antas vara lika överallt. När gelblandningen sedan hade stelnat blev det till en början en del luftbubblor. Genom att se till så att inget skum var kvar på ytan under uppvärmingen samt att omrörningen skedde vid botten i stället för vid ytan, kunde dessa minimeras. När omrörningen skedde vid ytan rörde nämligen luft ner i blandningen och skapade luftbubblor. Att minimera luftbubblor är viktigt för att inte försämra stabiliteten i gelen samt för att se till att gelen är homogen, så att samma egenskaper kan antas för hela materialet.

Utifrån teori nämnd i tidigare avsnitt, samt utifrån figur 4.7 och figur 4.8 beslutades det att gelen med en salthalt på 6.8% skulle användas. Detta resulterade i en ungefärlig permittivitet på 65-70 F/m och en konduktivitet på 12 S/m. En permittivitet på 65-70 F/m hamnar inom 20% intervallet, som var rekommenderat av skaparen av algoritmen. Detta intervall motiveras genom Fresnels ekvation D.1, beskriven i Appendix D. Vilken beskriver hur impedansen av de olika materialen inte får skilja sig för mycket för att undvika reflekterade vågor. Att undvika reflekterade vågor är nödvändigt för gelen då syftet med denna är att låta vågorna absorberas i materialet, i stället för att reflektera tillbaka vid gränsytan.

I detta experiment användes en soptunna som form med en fast diameter. Det hade varit intressant att även testa med en annan form med mindre diameter för att få en tjockare gel som potentiellt hade kunnat absorbera mer.

Efter upprepade misslyckanden att gjuta gelen på grund av läckage vid tejp, framgick det att gelen behövde svalna innan den hölls ner i bildsystemet. Genom att låta gelen svalna till 50 °C kunde tiden som tejp behövde agera som barriär minimeras. Detta resulterade i att gelen blev tillräckligt viskös på kortare tid i bildsystemet och på så sätt minimerades läckage av vätska.

### 5.1.4 Inital testning av absorptionsmaterial

Utifrån mätningarna sågs att skummaterialet inte gav särskilt bra resultat, medan de två mätningarna från gelen, både inplastad och icke-inplastad gel, gav ungefär samma resultat. Plastfolien som gelen plastades in i för att inte kontaminera omkringliggande vatten, hade därmed ingen påverkan på reflektion och transmission. Dessa resultat visade därmed på att plastfolien kan användas i kombination med gelen utan att påverka mätningarna. Dock uppmättes sämre resultat om plastfolien ej var placerad direkt emot gelen då luftbubblor uppstod. Det är därmed viktigt att se till så att plastfolien lägger sig slätt mot gelen, för att ej påverka reflektion och transmission negativt. För att motverka uppkomsten av luftbubblor och säkerställa en jämn yta mellan gelen och plastfolien, skulle en åtgärd kunna vara att hålla ner lite vatten mellan gelen och plasten. Genom att göra på detta sätt kan luftbubblorna pressas ut och därmed medföra att plastfolien ligger slätt mot gelen.

Då dämpningen av mikrovågorna inte blev särskilt mycket bättre för skummaterialet än när endast vatten användes, samt att skummaterialet kontaminerade vattnet togs efter denna mätning beslut om att inte använda skummaterialet vidare under projektet. Dock visade det sig att skummaterialet fungerade bra för frekvenser vid cirka 850 MHz. Detta hade kunnat innebära att skummaterialet hade kunnat användas för just denna frekvens med förutsättningen att en bra metod utvecklas för att förhindra kontamineringen av vattnet.

### 5.1.5 Fantomtillverkning

Vid mätningarna i avbildningssystemet var det viktigt att säkerställa att fantomens placering var densamma under flera mätningar, eftersom dessa behöver vara både upprepningsbara och jämförbara. Med hjälp av markeringen av mittpunkten, kunde en felkälla i mätningarna reduceras, som annars hade kunnat ha en stor inverkan på resultatet.

Permittiviteten och konduktiviteten för grå och vit hjärnsubstans varierar beroende på frekvens. Att återskapa exakt samma frekvensberoende för fantomen är därmed mycket svårt. Därför valdes medianen på intervallen för de dielektriska egenskaperna, för att utifrån detta bestämma ett önskat värde för permittiviteten och konduktiviteten. Det är viktigt att notera att fantomen därför inte nödvändigtvis följer hjärnans dielektriska egenskaper för alla frekvenser.

### 5.1.6 Undersökning av kontaminering av vatten

Efter undersökning av kontaminering av vatten visade resultaten att gelen kontaminerade vattnet i stor utsträckning. Detta gällde både för såväl inplastad och icke-inplastad gel. Permittiviteten förändras inte avsevärt, däremot gav kontamineringen en ökning av konduktiviteten för såväl den inplastade som den icke-inplastade gelen. Att plasta in gelen gav alltså inte någon förbättring jämfört med icke-inplastad gel. Kontaminering av vatten kommer innebära att mindre mängd energi överförs till fantomen.

Anledningen till att den inplastade gelen inte gav bättre resultat än icke-inplastad gel, var för att förseglingen av gelen inte var ideal då plasten ej fäste i sig själv och inte heller höll tätt. Därav läckte substans från gelen ut i vattnet trots försök till förseglingsåtgärder. Hade det gått att försegla gelen helt genom att exempelvis fylla på med vatten, vilket nämnts tidigare, hade detta eventuellt kunnat skydda vattnet från kontaminering och då behållt värdena på strax över 0 S/m. Däremot hade inte kontamineringen av vattnet nått värden över hjärnans konduktivitet under första dagen, enligt figur 4.6, vilket innebär att om mätningarna hade genomförts kort in på att systemet fyllts med vatten hade fler mikrovågor kunnat gå in i fantomen, än om mätningarna genomfördes först efter ett dygn.

## 5.2 Experiment och numerisk simulering

Nedan diskuteras resultat från mätningar där en VNA kopplas upp till avbildningssystemet samt resultat från den numeriska simuleringen och bildrekonstruktionen.

### 5.2.1 Mätningar i avbildningssystemet

För att kunna samla in data, utan att missa viktiga temperaturförändringar hos fantomen. Gjordes en initial mätning med tidtagarur för att notera hur lång tid det tar för fantomen att minska med en grad celsius, vilket som minst var fem sekunder. Därav valdes insamlingstiden för pythonskriptet att spara data till just fem sekunder. Med samma metod kontrollerades även hur lång tid det tog för fantomen att minska i temperatur från 50-24 °C, vilket noterades till cirka 900 sekunder. Med dessa noteringar valdes den totala insamlingstiden till 900 sekunder. Detta säkerställde att all viktig data blev nedsparat, utan att viktiga temperaturförändringar missades under avsvälningen.

I figur 4.16 och 4.14 kan det noteras att det finns ett samband mellan hur spridningsparametrarna avtar i takt med att temperaturen i tanken sjunker. Det innebär att signalen attenueras mindre för högre temperaturer än för låga. Det går även att notera 'spikar' i signalen, dessa störningar förklaras genom att en person vidrörde antennkablarna under dessa tillfällen och bidrog med minskad kvalitet av mätningarna.

Resultatet från mätningarna i avbildningssystemet med den numeriska simuleringen visade sig ge en korrelation mellan signalavtagandet och avsvälningen. Detta påvisar att man kan med hjälp av spridningsparametrar avgöra hur materialet minskar i temperatur. Dock var det totala signalavtagandet från  $t=0$  till  $t=900$  endast cirka 1 dB. Denna skillnad är såpass liten att det troligtvis inte blir möjligt att konstruera värmekartor då signalavtagandets intervall är för lågt. Dock är denna figur ett medelvärde av alla antenners transmission och reflektion vilket innebär att även de felaktiga antennernas signaler bidrar. Hade detta experiment kunnat göras om med fungerande utrustning hade kanske denna attenuering varit bättre och värmekartor hade då kunnat produceras.

### 5.2.2 Numerisk simulering

Under konstruktion av avbildningssystemet och fantom i CST behövdes vissa förenklingar göras. Exempel på en sådan förenkling är att fantomen modellerades som en cylinder medan fantomen i verkligheten inte har en helt uniform botten vilket kan ses i figur 3.4. Dessutom är exakt plasttyp för tumörbehållaren okänd vilket gör att de dielektriska egenskaperna för denna kanske inte stämmer helt överens med verkligheten.

När de dielektriska egenskaperna från DAK-TL2 skulle överföras till CST valdes frekvensberoendet att tas med i stället för att exempelvis ta ett medelvärde. Anled-

ningen till detta är för att mätningarna genomförs för ett frekvensintervall mellan 400-1200 MHz där de dielektriska egenskaperna varierar. För att få så noggranna simuleringar som möjligt, för att kunna jämföras med mätningarna valdes därför även frekvensberoendet att tas med.

Resultaten från simuleringarna för den första modellen är högst tvivelaktiga då de framstår som nästintill identiska. Det innebär att det finns fel i CST modellen vilket har resulterat i detta. Exakt vad som var fel är dock svårt att säga. Med de givna resultaten går det alltså inte att påvisa ytterligare prestanda av gelen vilket var förhoppningen.

Pågrund av de identiska resultaten, skapades en ny simuleringsmodell. Denna modell visade bättre resultat, där man kan se att de flesta mätningar följer till viss del den simulerade mätningen. Anledningen till att vår uppmätta data inte följer den simulerade datan bättre är troligtvis pågrund av de olika samplingsintervallerna som använts. Där den simulerade datan innehåller mer samplingspunkter och ger därmed ett mer exakt resultat, vilket även leder till att de två graferna skiljer sig från varandra mer.

Vid användandet av den andra modellen, kan man även konstatera vilka antenner som har haft dålig prestanda under projektets gång. Man kan se tydligt på reflektionskoefficienterna för S9,9, S13,13 och S14,14 att de antennerna inte fungerar optimalt, när man jämför med den numeriska simuleringen. Detta misstänktes sedan innan, men blev konstaterat vid denna mätning.

### 5.3 Bildrekonstruktion

På grund av att den genererade datan från mätningarna inte gav helt tillfredsställande resultat från vissa antenner blev heller inte bildrekonstruktionen lyckad då det ej gick att rekonstruera bilder från den uppmätta datan.

Rekonstruktionsalgoritmen hann endast köras på den första modellen. Denna modell visade sig vara felaktig vilket ledde till att den inte kunde generera några bilder från den simulerade datan. Vid mer tid hade försök även genomförts på den andra modellen som blev mer lyckad, eventuellt hade bilder då kunnat genererats.

### 5.4 Metodkritik

I både simuleringen och experimentet har många förenklingar gjorts, vilket inte skapar helt jämförbara resultat med verkligheten.

Vid mätning av permittivitet och konduktivitet har som tidigare nämnt DAK-TL2 använts. Detta system har dock inte fungerat optimalt under projektets gång och har inte alltid givit helt trovärdiga resultat. Kalibrering har inför varje ny mätomgång gjorts, men resultaten har ändå varierat i kvalitè vilket gör att mätningar som

gjorts med detta system inte är helt tillförlitliga.

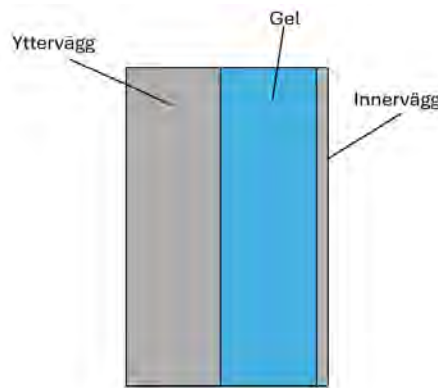
Eftersom gelerna har testats med hjälp av DAK-TL2 och dess tjocklek varierat, kan resultaten vara svåra att jämföra. Genom att ha ett standardiserat mått hade samma tjocklek kunnat fås på gelerna, vilket hade kunnat göra resultaten mer tillförlitliga och jämförbara. Mot slutet av projektet testades ett sätt att genomföra detta, genom att låta gelen stelna i ett standard mått med en begränsad volym. Detta är en förbättring som hade kunnat göras om ett liknande projektet genomförs.

## 5.5 Framtidsavsnitt

Utifrån tidigare nämnda resultat visar gelen goda möjligheter att fungera som ett absorptionsmaterial för mikrovågstermometri. Dock visade det sig att gelen kontaminerar vattnet i avbildningssystemet både vid de inplastade-och icke-inplastade försöken som gjordes då det under projektets gång inte hittades ett bra sätt att försluta plasten på. Dessutom är det viktigt att undvika att luftbubblor mellan gel och plast uppkommer, då detta har negativ påverkan på reflektion och transmission och därmed även påverkar rekonstruktionen. Att hitta ett sätt att kunna plasta in gelen på utan att luftbubblor uppstår samt så att det omkringliggande vattnet ej kontamineras är därmed en förutsättning för att gelen ska vara ett alternativ.

En annan möjlighet för att minimera risken att gelen med relativt hög salthalt kontaminerar vattnet hade varit att bygga gelen i lager, där lagret mot väggen har hög salthalt och gelen i kontakt med vattnet har den lägsta salthalten. Detta hade gjort att permittiviteten närmast vattnet hade varit högre och därmed medföra en lägre reflektion mellan vattnet och gelen, samt mellan gelens lager. På så sätt hade vågorna eventuellt absorberats mer i gelen på grund av lagrens permittivitetsmatchning och i sin tur möjligtvis leda till bättre resultat.

Att gjuta gelen på utsidan av avbildningssystemet hade även varit ett intressant alternativ för att eventuellt effektivisera gjutning av gel och undvika skada på antenner. Dock är det nuvarande avbildningssystemets väggar tjocka och hade i nuläget bidragit med mycket spridda vågor. Ett alternativ är att konstruera ett nytt avbildningssystem. I figur 5.1 visas en enkel skiss av hur väggarna i systemet kan vara konstruerat. Den nya konstruktionen har två väggar, en mycket tunn innervägg som har samma funktion som plastfolien beskriven tidigare och en tjockare yttervägg. Denna modell har fördelarna att gjutning av gel effektiviseras då ingen ytterligare form behövs. Tjockleken av gelen är även konsekvent mellan varje gjutning. Vattnet i kommer även inte att bli kontaminerad av gelen. Däremot kan denna konstruktion leda till en ökad mängd reflekterade vågor men även att tjockleken av gelen inte blir justerbar.



**Figur 5.1:** Sidovy av avbildningssystem med dubbla väggar.

Ett stort problem för projektet var att säkerställa att antennerna inte var böjda eller skadade inför mätningarna. Detta var svårt då gjutningen av gel i avbildningssystemet utgjorde en risk, där de trånga utrymmet i avbildningssystemet ökade chansen att antennerna vidrördes. En förbättring som skulle kunna förebygga detta problem hade kunnat ske på två sätt. Det första och enklaste sättet hade varit att ta bort antennerna från avbildningssystemet vid gjutningen av gel för att därmed minska risken att antennerna skadas under gjutningens gång. Detta hade även förenklat gjutningen av gelen och tagit bort eventuella felkällor vid skada av antennerna. En alternativ metod, som även den troligtvis hade funkat i praktiken är att skapa ett skyddande hölje runt antennerna, som därmed minskar risken att antenner skulle böjas under gjutningsfasen. Dessa förebyggande åtgärder hade kunnat göra stor skillnad för resultatet, då felkällorna från antennerna hade minskats.

Gelen visade sig kontaminera vattnet över tid samt var inte hållbar i stadga då den torkade ut. Att utvärdera andra absorptionsmaterial för att utveckla systemet kan därför vara ett bra alternativ i stället för gelen om en bra metod för förvaring av gel och förslutning av plastfolie runt inte kan hittas.

# 6

## Slutsats

I detta avsnitt kommer slutsatser kring förberedelser inför mätningar, experiment och numerisk simulering samt bildrekonstruktion att presenteras.

### 6.1 Förberedelser inför mätningar

I avsnittet nedan kommer slutsatser kring de förberedelser som gjordes inför mätningarna att presenteras. Dessa inkluderar slutsatser kring felsökning och kalibrering, destillerat vatten eller kranvatten, geltillverkning och vilket absorptionsmaterial som fungerade bäst.

#### 6.1.1 Felsökning och kalibrering för mätningar

Felsökningarna som gjordes inför mätningarna var nödvändiga för att kunna utsluta att inga kablar var sönder samt att antennerna kunde ta emot och skicka mikrovågor. Dock märktes under felsökningen att såväl antennerna som kablarna hade bristfällig kvalitet som kunde komma att påverka resultaten. Åtgärder togs för att se om antennerna kunde förbättras, däremot medförde inte detta några signifikanta skillnader. Om nya antenner och kablar funnits hade de gamla ersatts för att säkerställa fungerande material.

#### 6.1.2 Jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten

Vid jämförelse av dielektriska egenskaper mellan kranvatten och destillerat vatten visar resultaten att kranvatten är ett rimligt substitut till destillerat vatten vid detta arbete, då dessa egenskaper ger ett mått på hur väl ett ämne absorberar och reflekterar mikrovågor. Vid de efterföljande mätningarna kunde kranvatten därför användas i stället för destillerat vatten.

#### 6.1.3 Geltillverkning

Efter många försök lyckades projektgruppen skapa en gel som var tillräckligt robust för att inte gå sönder vid användning och som inte hade luftbubblor som störde mätningarna. Gelen var enkel att gjuta fast i avbildningssystemet med hjälp av den återanvända soptunnan som form, och satt stabilt även under mätningarna då formen plockats bort.

Hur gelen skulle tillverkas för bästa utformning och dielektriska egenskaper tog ett tag att lära, då många faktorer spelade in. Exempelvis påverkade både gelens temperatur vid insättningen i avbildningssystemet hur den blev samt hur gelen tillverkades påverkade mängden luftbubblor som bildades. Gelen uppfyllde efter flertalet försök målen som sattes inför projektet, men krävde mycket mer tid än förväntat.

#### **6.1.4 Initial testning av absorptionsmaterial**

Efter testerna som genomfördes för att jämföra skummaterialet och gelen, noterades att gelen fungerade som ett bra absorptionsmaterial. Därmed togs beslutet att det mest effektiva absorptionsmaterialet är gelen och det beslutades att inte testa skummaterialet i det stora experimentet med avbildningssystemet.

Tester genomfördes även för att se om gelen skulle kunna omslutas av ett tunt lager plast utan att påverka absorptionsförmågan hos gelen. Efter resultaten presenterade i avsnitt 4.1.5, konstaterades det att det inte var någon avsevärt stor skillnad på inplastad respektive icke-inplastad gel och att det därför är en metod som hade kunnat användas om en bra förslutning av plasten hittas.

#### **6.1.5 Undersökning av kontaminering av vatten**

Vid undersökning av kontaminering av vatten visade det sig att vattnet blev kontaminerat oavsett om gelen var inplastad eller inte, och därmed var de enklare att utelämna plasten vidare i projektet, då plasten även innebar problem med luftbubblor i gränssytan mellan de två materialen.

### **6.2 Experiment och numerisk simulering**

Nedan presenteras slutsatser från de genomförda experimenten och numeriska simuleringarna under projektet.

#### **6.2.1 Mätningar i avbildningssystemet**

Från resultaten som presenteras i figurerna 4.18a och 4.18b syns en stor skillnad mellan de olika antennerna. Skillnaden uppstår på grund av antenner och annan utrustning med bristande kvalitet. Om liknande experiment upprepas bör rimligtvis utrustningen utvärderas igen, alternativt bytas ut för att ge ett mer fördelaktigt resultat. I och med att experimentet inte gav några användbara resultat, kan slutsatsen inte dras att gelen fungerar som absorptionsmaterial för denna tillämpning eller inte.

### 6.2.2 Numerisk simulering

Den simulerade datan för den första modellen visade inga tillfredsställande resultat, där de inte påvisas någon skillnad oavsett om gelen eller fantomen var borta i avbildningssystemet.

Vid den numeriska simuleringen med den andra modellen blev resultaten bättre, där vi kunde se en korrelation mellan avsvälningen och hur reflektionskoefficienterna ändrades över tid. Det visade sig även tydligt vilka antenner som var felaktiga i avbildningssystemet och bidrog med felaktig data till resultatet. Detta påvisar att den numeriska simuleringen fungerade.

## 6.3 Bildrekonstruktion

Inga slutsatser kan dras av rekonstruktionsalgoritmen då inga bilder har kunnat genererats eftersom mätdata var för dålig.

# 7

## Samhälleliga och etiska aspekter

Då detta projekt är en byggsten till ett system som inom framtiden förhoppningsvis ska kunna implementeras i världen, måste hänsyn tas till etiska och samhälleliga aspekter. I detta ingår både att studera delar som måste tas i beaktning för att inte göra skada men även vilka fördelar som projektet kan medföra i framtiden.

### 7.1 Etiska aspekter

En viktig beaktning i hypertermibehandling är uppvärmning av frisk vävnad, så kallade hotspots. Vid felövervakning kan irreversibla skador på frisk vävnad uppstå. Det är alltså viktigt att säkerställa att rätt åtgärder och mätningar gjorts för att minska riskerna. Det är därmed avgörande att kontinuerligt kunna mäta temperaturen över hela huvudet under behandlingen för att dessa följder ej ska ske [35].

### 7.2 Samhälleliga aspekter

Hypertermi med hjälp av magnetresonanstomografi (MR) används idag i stor utsträckning för värmebehandling av cancerceller [36]. Trots att det är en effektiv metod är den väldigt dyr och tar upp dyrbara platser till en redan fullbokad MR-maskin. MR är även en långsam metod som gör att insamlingen av data inte kan användas för realtidsmätning [9]. Vid framgångsrika resultat inom mikrovågshypertermi hade det förhoppningsvis kunnat leda till att en ny standard för cancerbehandlingar införs. Detta hade potentiellt kunnat medföra mindre kostnad för vården och kortare vårdköer för patienterna, vilket i längden hade kunnat gynna både samhället och ekonomin.

Användning av mikrovågshypertermi i kombination med de andra behandlingsmetoderna för huvud- och nackcancer hade potentiellt kunnat medföra att såväl stråldos som cytostatikamängden hade kunnat minska [37]. Eftersom det är stråldosen och cytostatikan som ofta leder till de sena komplikationerna, skulle en minskad mängd av dessa även kunna reducera allvarlighetsgraden samt antalet komplikationer patienterna drabbas av. Många av de barn som genomgår behandling för huvud- och nackcancer får såväl neurologiska- som kognitiva biverkningar såsom epilepsi, hjärntrötthet och motoriska svårigheter [38]. Dessa biverkningar resulterar ofta i att de drabbade barnen är i behov av extra stöd i skolan eller sjukskrivning på grund av minskad arbetsförmåga [39]. Om cancerbehandling med mikrovågshypertermi hade kunnat bli en ny klinisk standard hade detta alltså kunnat innebära att mängden

stråldos och cytostatika kunnat minskas men fortfarande uppnå samma effekt av den terapeutiska behandlingen [8]. Detta hade på sikt kunnat medföra färre uppföljningsbesök och mindre behov av hjälp i det dagliga livet. Behandling av cancer med mikrovågshypertermi hade därmed framför allt kunnat gynna patienten som får en bättre livskvalitet, men även samhället då mindre kostnader behöver läggas på vården samt att vårdköerna till en redan fullbokad MR maskin hade minskats.

# Källförteckning

- [1] Socialstyrelsen och Cancerfonden, "Cancer i siffror - populärvetenskapliga fakta om cancer 2023", 8, 2023. Åtkomstdatum: 26 mars 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.socialstyrelsen.se/globalassets/sharepoint-dokument/dokument-webb/statistik/cancer-i-siffror-2023.pdf>.
- [2] "Huvud- och halscancer - RCC". Åtkomstdatum: 01 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.cancercentrum.se/samverkan/cancerdiagnoser/huvud-och-hals/>.
- [3] "Överleva barncancer till ett rimligt pris," Ki.se, 2016. <https://ki.se/forskning/overleva-barncancer-till-ett-rimligt-pris> (accessed May 07, 2024).
- [4] "Cytostatika", Cancerfonden. Åtkomstdatum: 01 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.cancerfonden.se/om-cancer/behandlingar/cytostatikabehandling>.
- [5] G. C. Barnett m.fl., "Normal tissue reactions to radiotherapy", *Nat Rev Cancer*, vol. 9, nr 2, s. 134–142, feb. 2009, doi: 10.1038/nrc2587.
- [6] S. Cousins, N. S. Blencowe, och J. M. Blazeby, "What is an invasive procedure? A definition to inform study design, evidence synthesis and research tracking", *BMJ Open*, vol. 9, nr 7, s. e028576, juli 2019, doi: 10.1136/bmjopen-2018-028576.
- [7] C. Tydings, K. V. Sharma, A. Kim, och P. S. Yarmolenko, "Emerging hyperthermia applications for pediatric oncology", *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 163–164, s. 157–167, jan. 2020, doi: 10.1016/j.addr.2020.10.016.
- [8] P. B. Elming m.fl., "Hyperthermia: The Optimal Treatment to Overcome Radiation Resistant Hypoxia", *Cancers (Basel)*, vol. 11, nr 1, s. 60, jan. 2019, doi: 10.3390/cancers11010060.
- [9] Ghaderi Aram, M., Beilina, L., Dobsicek Trefna, H. (2020). Microwave thermometry with potential application in non-invasive monitoring of hyperthermia. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 28(5): 739-750. <http://dx.doi.org/10.1515/jiip-2020-0102>.
- [10] ' G. Yildiz et al., "Antenna Excitation Optimization with Deep Learning for Microwave Breast Cancer Hyperthermia," *Sensors*, vol. 22, no. 17, pp. 6343–6343, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22176343>. '.
- [11] J. Haveman, P Sminia, J. Wondergem, van, and M. Hulshof, "Effects of hyperthermia on the central nervous system: What was learnt from animal studies?," *International journal of hyperthermia*, vol. 21, no. 5, pp. 473–487, Aug. 2005, doi: <https://doi.org/10.1080/02656730500159079>.

- 
- [12] H. P. Kok m.fl., "Heating technology for malignant tumors: a review", *Int J Hyperthermia*, vol. 37, nr 1, s. 711–741, 2020, doi: 10.1080/02656736.2020.1779357.
- [13] V. Rieke and Kim Butts Pauly, "MR thermometry," *Journal of magnetic resonance imaging*, vol. 27, no. 2, pp. 376–390, Jan. 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/jmri.21265>.
- [14] G. Schaefers och A. Melzer, "Testing methods for MR safety and compatibility of medical devices", *Minim Invasive Ther Allied Technol*, vol. 15, nr 2, s. 71–75, 2006, doi: 10.1080/13645700600640865.
- [15] V. Komarov, S. Wang, and J. Tang, "Permittivity and Measurements," *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Apr. 2005, doi: <https://doi.org/10.1002/0471654507.eme308>.
- [16] G. Brodie, "Modeling the very broad band dielectric properties of water," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 55, no. 1, pp. 80–89, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1877243>.
- [17] "Why does distilled water not conduct electricity, whereas rain water does?", *Toppr Ask*. Åtkomstdatum: 07 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.toppr.com/ask/question/why-does-distilled-water-not-conduct-electricity-whereas-rain-water/>.
- [18] A. Manickavasagan och H. Jayasuriya, Red., *Imaging with Electromagnetic Spectrum: Applications in Food and Agriculture*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-54888-8.
- [19] H. Young and R. Freedman, "University physics with modern physics", PEARSON EDUCATION LIMITED, 2019-10-04.
- [20] P. Batti, M. Nises och P. Tekes, "Undersökning av materialegenskapers inverkan på mikrovågsuppvärmningen av grafit. Tillgänglig vid: <https://diva-portal.org/smash/get/diva2:1561168/FULLTEXT01.pdf>.
- [21] "permittivitet - Uppslagsverk - NE.se". Åtkomstdatum: 26 januari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l>
- [22] "konduktivitet - Uppslagsverk - NE.se". Åtkomstdatum: 07 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l>
- [23] G. Giannoukos, M. Min, och T. Rang, "Relative complex permittivity and its dependence on frequency", *World Journal of Engineering*, vol. 14, nr 6, s. 532–537, jan. 2017, doi: 10.1108/WJE-01-2017-0007.
- [24] G. Chen, J. Stang, M. Haynes, E. Leuthardt, och M. Moghaddam, "Real-Time Three-Dimensional Microwave Monitoring of Interstitial Thermal Therapy", *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 65, nr 3, s. 528–538, mar. 2018, doi: 10.1109/TBME.2017.2702182.
- [25] M. Shafiemehr, "Non-invasive thermometry for microwave hyperthermia - Evaluation of MW-thermometry", 2015, Åtkomstdatum: 01 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/225674>.
- [26] "What Are Vector Network Analyzers | VNAs Explained". Åtkomstdatum: 01 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.tek.com/en/documents/primer/what-vector-network-analyzer-and-how-does-it-work>.

- [27] D. R. Holt, "Scattering parameters representing imperfections in precision coaxial air lines," *Journal of research of the National Bureau of Standards*, vol. 94, no. 2, pp. 117–117, Mar. 1989, doi: <https://doi.org/10.6028/jres.094.015>.
- [28] M. Haynes och M. Moghaddam, "Vector Green's function for S-parameter measurements of the electromagnetic volume integral equation", i 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), juli 2011, s. 1100–1103. doi: 10.1109/APS.2011.5996473.
- [29] "DAK-TL2 - SPEAG, Schmid Partner Engineering AG". Åtkomstdatum: 25 april 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://speag.swiss/products/dak/dak-tl-2/>.
- [30] A. Andryieuski, S. M. Kuznetsova, S. V. Zhukovsky, Y. S. Kivshar, och A. V. Lavrinenko, "Water: Promising Opportunities For Tunable All-dielectric Electromagnetic Metamaterials", *Sci Rep*, vol. 5, nr 1, s. 13535, aug. 2015, doi: 10.1038/srep13535.
- [31] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*. Reading, Massachusetts ; Wokingham, England: Addison-Wesley Pub, 2014.
- [32] A. T. Mobashsher and A. M. Abbosh, "Three-Dimensional Human Head Phantom With Realistic Electrical Properties and Anatomy," *IEEE antennas and wireless propagation letters/Antennas and wireless propagation letters*, vol. 13, pp. 1401–1404, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/lawp.2014.2340409>.
- [33] "Hjärntumör", Hjärnfonden. Åtkomstdatum: 17 april 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.hjarnfonden.se/om-hjarnan/diagnoser/hjarntumor/>.
- [34] Y. Lu, B. Li, J. Xu, och J. Yu, "Dielectric properties of human glioma and surrounding tissue", *Int J Hyperthermia*, vol. 8, nr 6, s. 755–760, 1992, doi: 10.3109/02656739209005023.
- [35] J. Wiersma, N. van Wieringen, H. Crezee, och J. D. P. van Dijk, "Delineation of potential hot spots for hyperthermia treatment planning optimisation", *Int J Hyperthermia*, vol. 23, nr 3, s. 287–301, maj 2007, doi: 10.1080/02656730701218914.
- [36] H. Odéen och D. L. Parker, "Magnetic resonance thermometry and its biological applications – Physical principles and practical considerations", *Prog Nucl Magn Reson Spectrosc*, vol. 110, s. 34–61, feb. 2019, doi: 10.1016/j.pnmrs.2019.01.003.
- [37] "Värme från mikrovågor mot hjärntumörer hos barn", IngaBritt och Arne Lundbergs Forskningsstiftelse. Åtkomstdatum: 01 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.lundbergsstiftelsen.se/2022/hana-dobsicek-trefna/>.
- [38] "Neurologiska och kognitiva biverkningar – centrala nervsystemet (CNS) - RCC Kunskapsbanken". Åtkomstdatum: 01 februari 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://kunskapsbanken.cancercentrum.se/diagnoser/langtidsuppfoljning-efter-barncancer/vardprogram/neurologiska-och-kognitiva-biverkningar-centrala-nervsystemet-cns/>.
- [39] T. M. Remes m.fl., "Neurocognitive impairment, employment, and social status in radiotherapy-treated adult survivors of childhood brain tumors", *Neurooncol Pract*, vol. 8, nr 3, s. 266–277, jan. 2021, doi: 10.1093/nop/npab004.

- [40] procent, language=swe, note=Y. Lu, B. Li, J. Xu, och J. Yu, "Dielectric properties of human glioma and surrounding tissue", *Int J Hyperthermia*, vol. 8, nr 6, s. 755–760, 1992, doi: 10.3109/02656739209005023. .
- [41] PubChem, "Sodium Chloride". Åtkomstdatum: 17 april 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5234>.

# A

## Geltillverkning

Gelen konstruerades enligt följande recept:

- 1 liter vatten
- 10g Agar
- Salt

Nedan presenteras tillvägagångsättet för tillverkning av gel.

1. Mät upp alla ingredienser och häll i en kastrull.
2. Placera en termometer i blandningen och var noga med att tippen på termometern inte nuddar kastrullens botten för att ge felaktiga temperaturmätningar.
3. Värm upp blandningen på en kokplatta under kontinuerlig omrörning till 95°C.
4. Stäng av kokplattan men fortsätt omrörningen i sex minuter.
5. Låt blandningen svalna till 50°C under stundvis omrörning.
6. Häll blandningen i önskad form.
7. Slå ut eventuella bubblor försiktigt mot bordet.
8. Låt gelen stelna.

# B

## Saltmängd i gel

Då den önskade permittiviteten är 70 F/m användes saltkoncentrationen  $C=1M$ [40].

- Önskad permittivitet: 70 F/m
- Saltkoncentration(C): 1M
- Volym(V): 500mL=0.5L
- Substansmängd (n): n mol

$$C = n/V \rightarrow n = C \cdot V$$

$$n = 1M \cdot 0.5L = 0.5mol$$

Omvandling av mol till gram med molmassan(M)=58.44g/mol för NaCl[41]:

$$m = n \cdot M = 0.5mol \cdot 58.44g/mol = 29.22g$$

# C

## Saltmängd i tumör

Permittiviteten 58.5 F/m ligger mitt på intervallet 71.5-45.5 F/m vilket motsvarar saltkoncentrationen 1.5M vid temperaturen 35 grader som ungefär är mitten på den tänka uppvärmning 50-21 grader. [40].

- Önskad permittivitet: 58.5 F/m
- Saltkoncentration(C):1.5M
- Volym(V): 100ml=0.1L
- Substansmängd (n): n mol

$$C = n/V \rightarrow n = C \cdot V$$

$$n = 1.5M \cdot 0.1L = 0.15mol$$

Omvandling av mol till gram med molmassan(M)=58.44g/mol för NaCl[41]:

$$m = n \cdot M = 0.15mol \cdot 58.44g/mol = 8.766g$$

# D

## Fresnels Ekvation

Fresnels Ekvation beskriver förhållandet av reflektion och transmission av elektromagnetiska vågor då vågen infaller på en gränssyta mellan två medium.[31]

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{D.1})$$

$Z_i$  är impedansen av de olika material och är definierad som

$$Z_i = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

där  $\mu$  och  $\epsilon$  är permeabilitet respektive permittivitet för den olika medierna.

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK (E2)

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**