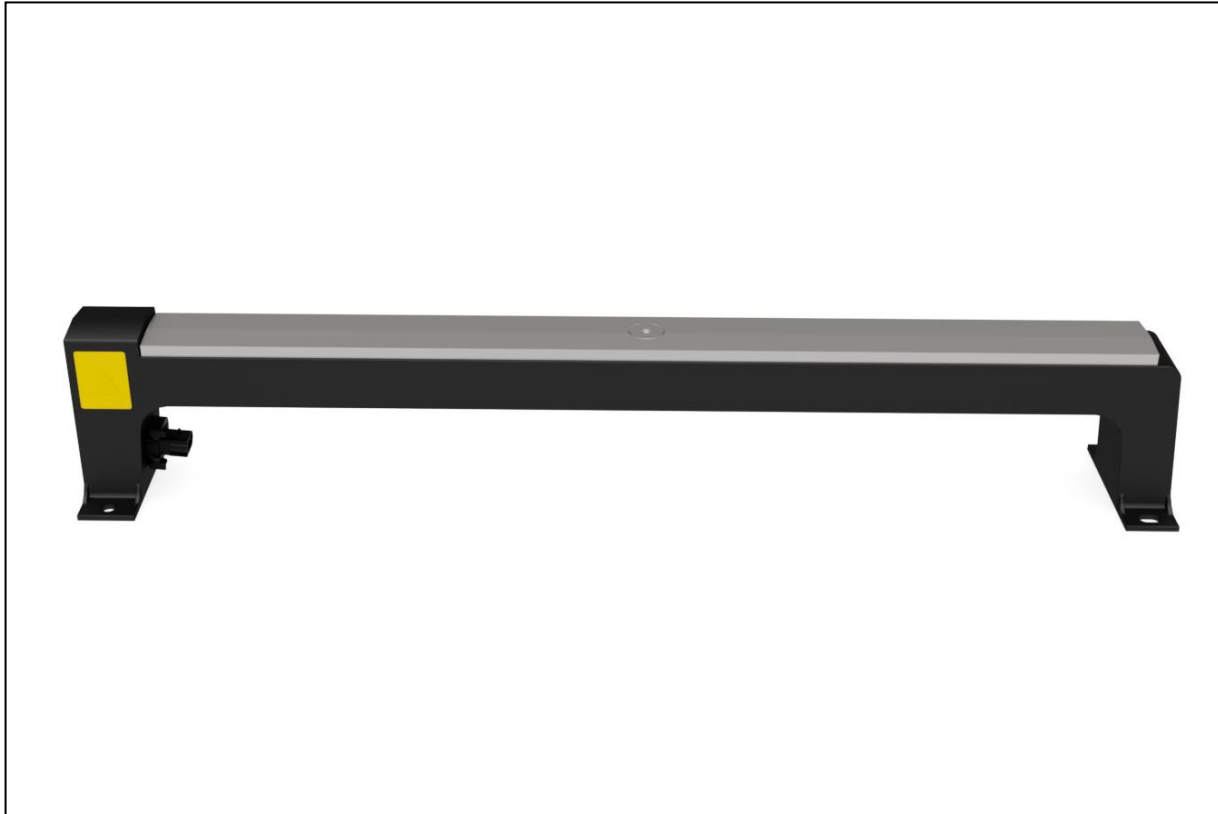




CHALMERS



Laddningsskena av aluminium för laddning av eldrivna bussar

Aluminum charging rail for charging electric buses

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik (180 hp)

Stipe Baric

INSTITUTIONEN FÖR
INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2020

www.chalmers.se

EXAMENSARBETE 2020:01

Laddningsskena av aluminium för laddning av eldrivna bussar

Aluminum charging rail for charging electric buses

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik (180 hp)

Stipe Baric

Institutionen för industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020

Laddningsskena av aluminium för laddning av eldrivna bussar

Aluminum charging rail for charging electric buses

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik (180 hp)

STIPE BARIC

© Stipe Baric, Sverige 2020

Examensarbete 2020:01

Institutionen för industri- och materialvetenskap

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:

Laddningsskena för eldrivna bussar

Tryckeri /Institutionen för industri- och materialvetenskap

Göteborg, Sverige 2020

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Mål	1
1.4 Avgränsningar	1
1.5 Metod	2
2. Problemformulering	2
2.1 Nuvarande konstruktion	2
2.1.1 Produktspecifikation	3
2.1.2 Geometriska egenskaper	4
2.1.3 Materialegenskaper	6
2.2 Vanliga felkällor för metaller	6
2.2.1 Krypning och krypmekanismer	6
2.2.2 Nötning och korrosion	6
2.2.3 Utmattning	7
2.2.4 Oxidation	8
3. Analys och beräkning	8
3.1 Undersökning av aluminiumlegeringar	9
3.2 Undersökning av pläteringsalternativ	10
3.3 Beskrivning av FEM och EMS	11
3.4 Problemdefinition	11
3.4.1 Provning av nya koncept på dagens kopparskena	13
3.4.2 Geometriska egenskaper för kabelskon	15
3.5 FEM-modellering	15
3.5.1 Genomförande	15
<i>Redogörelse av randvillkor:</i>	20
<i>Modellträd:</i>	21
4. Resultat	29
4.1 Resultat för dagens kopparskena	29
<i>Magnetostatic analysis för kopparskenan:</i>	30
<i>Transient magnetic analysis för kopparskenan:</i>	34
4.2 Resultat för aluminiumskenan med samma mått som för dagens kopparskena	37
<i>Materialtabell för aluminiumskenan:</i>	37

<i>Magnetostatic analysis för aluminiumskenan med höjd på 10 mm:</i>	38
<i>Transient magnetic analysis för aluminiumskenan med höjd på 10 mm:</i>	42
4.3 Resultat för den valda aluminiumskenan	45
<i>Magnetostatic analysis för aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm:</i>	45
<i>Transient magnetic analysis för aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm:</i>	49
4.4 Resultatjämförelse.....	52
4.5 Vikt- och kostnadsanalys	53
5. Slutsats och framtida arbete	54
Referenser	55
Internetkällor	55
Tryckta källor	57
Bildkällor	57
Bilagor	
Bilaga 1: Gantt-schema	
Bilaga 2: Offert	

Sammanfattning

På uppdrag av AQ Engineering undersöks i detta arbete möjligheterna och förutsättningarna att byta material från koppar till aluminium för en laddningsskena som används till att ladda eldrivna bussar. Det huvudsakliga syftet med arbetet är att hitta en lämplig aluminiumlegering som skall kunna konkurrera med dagens kopparkonstruktion med likvärdig prestanda. På så vis hoppas man reducera vikten på laddningsskenan och minska kostnaden. Det här examensarbetet innefattar bland annat en undersökning av olika aluminiumlegeringar och pläteringsalternativ. Stor fokus läggs på simuleringar med syfte att undersöka aluminiumskenas fysikaliska egenskaper och beteende under de laster som den utsätts för då bussen laddas. Modellen byggdes upp i SolidWorks och simuleringarna utfördes i programmet Electromagnetic simulation (EMS). Arbetet presenterar en lämplig aluminiumlegering och ytbehandling som genom simuleringar visar prov på en liknande prestanda som dagens kopparalternativ.

Abstract

On behalf of AQ Engineering, this work investigates the possibilities and conditions for switching material from copper to aluminum for a charging rail used to charge electric buses. The main purpose of the work is to find a suitable aluminum alloy that can compete with today's copper construction with equivalent performance. In this way, it is hoped to reduce the weight of the rail and reduce the cost. This thesis includes an examination of various aluminum alloys and clad alternatives. Great focus is placed on simulations with the aim of investigating the physical properties and behavior of the aluminum rail under the loads it is exposed to when the bus is charged. The model was built up in SolidWorks and the simulations were carried out in the Electromagnetic simulation (EMS) program. The work presents an appropriate aluminum alloy and surface treatment which, through simulations, shows a similar performance to today's copper alternative.

Förord

Det här arbetet är en del av högskoleingenjörsutbildningen i maskinteknik med inriktning konstruktion på institutionen industri- och materialvetenskap, grundläggande nivå, 15 hp. Examensarbetet utfördes mellan september och november 2019 hos AQ Engineering AB i Torslanda, Göteborg. Examinator är Åsa Fasth Berglund, biträdande professor vid avdelningen produktionssystem på institutionen industri- och materialvetenskap.

Först och främst vill jag tacka min examinator Åsa Fasth Berglund för all hjälp. Jag är tacksam mot min uppdragsgivare Erik Ohlson som gav mig chansen att jobba med detta projekt. Jag vill även tacka min handledare Joel Lundberg tillsammans med övriga anställda på AQ Engineering för visat intresse och deras bidrag gav värdefull information under arbetes gång.

1. Inledning

Detta kapitel redogör bakgrund, syfte, avgränsningar och metod för det utförda examensarbetet.

1.1 Bakgrund

AQ Engineering AB är ett företag som arbetar med att utveckla kompletta system främst till fordonsindustrin men även till företag inom andra branscher. AQ Engineering vill undersöka möjligheten att tillverka en laddningsskena, som används till att ladda eldrivna bussar, av aluminium istället för koppar. Anledningen till detta är att man på så vis hoppas kunna reducera vikten på laddningsskenan och minska kostnaden.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att analysera möjligheterna och förutsättningarna att byta material från koppar till aluminium utan att påverka prestandan allt för mycket. Förhoppningen med arbetet är att hitta en aluminiumlegering som skall kunna konkurrera med dagens kopparkonstruktion.

1.3 Mål

Mål för examensarbetet:

- Studie av designmöjligheter/geometriförändringar som uppstår/möjliggörs när aluminium används istället för koppar
- Vikt- och kostnadsanalys
- Dimensionering av aluminiumskena för att uppnå liknande prestanda som dagens kopparkonstruktion med avseende på termiska egenskaper
- Undersökning av olika aluminiumlegeringar
- Undersökning av pläteringsalternativ för aluminium

1.4 Avgränsningar

För att förtydliga målet och förenkla arbetet kommer det som är listat nedan inte inkluderas i arbetet även om detta också är av intresse för uppdragsgivaren att undersöka närmare.

- Studie av erforderligt åtdragningsmoment, förspänning, efteråtdragning, etc.
- Fästmetoder
- Utmattningsanalys av kopparskena jämfört med aluminiumskena

1.5 Metod

Ett Gantt-schema upprättades över de aktiviteter och arbetsmoment som ingick i arbetet. Detta användes sedan för att stämma av att examensarbetet följde tidsplanen, se *Bilaga 1* nedan. I den inledande fasen av arbetet gjordes en litteraturstudie om materialen aluminium och koppar för att få en större förståelse och ökad kunskap om de två materialen. För att förenkla analysen och arbetet togs endast ett fåtal relevanta aluminiumlegeringar i beaktande, främst de som redan används inom industrin för samma eller liknade ändamål. Beräkningar och simuleringar gjordes i CAD-programmet SolidWorks med hjälp av ett tilläggsprogram som heter Electromagnetic simulation (EMS), det är ett elektromagnetiskt simuleringsprogram.

2. Problemformulering

Detta kapitel presenterar dagens konstruktion och de viktigaste problemen som kan uppkomma för en sådan konstruktion.

2.1 Nuvarande konstruktion

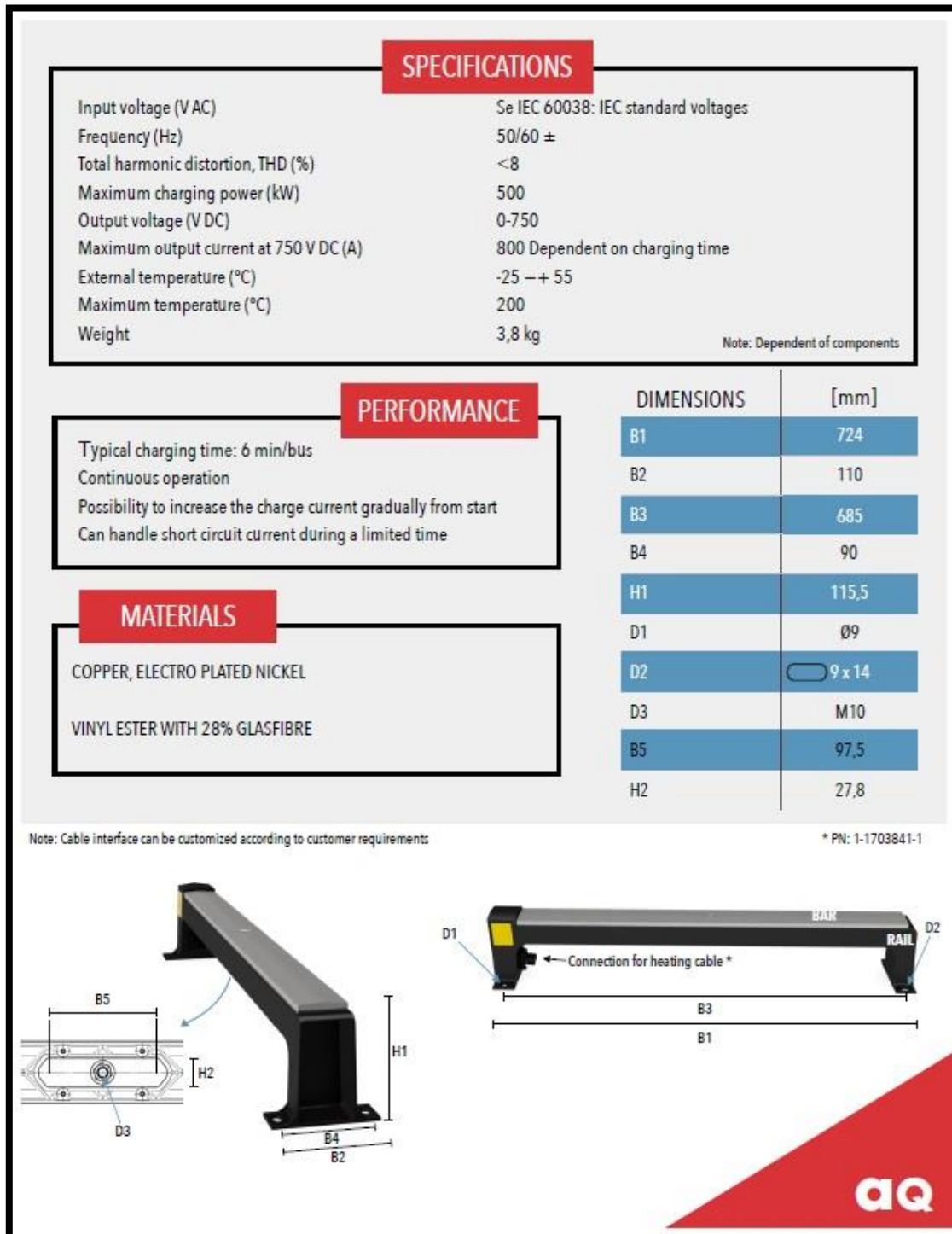
Den nuvarande konstruktionens strömskenor är av nickelpläterad koppar och används som elektrisk ledare för att ladda elektriskt drivna bussar. Bussen laddas upp på en hållplats eller en laddningsstation, genom att en strömavtagare fälls ner som utgörs av två kontaktskenor som ansluts genom kontakt till fyra laddningsskenor. Vid laddningen belastas laddningsskenorna med en tryckkraft på 150 N vardera [21,22], se Figur 1.



Figur 1. Strömavtagare i kontakt med laddningsskenorna. (OPPCharge,2019)

2.1.1 Produktspecifikation

I Figur 2 nedan ser man produktspecifikationen för dagens laddningskena.

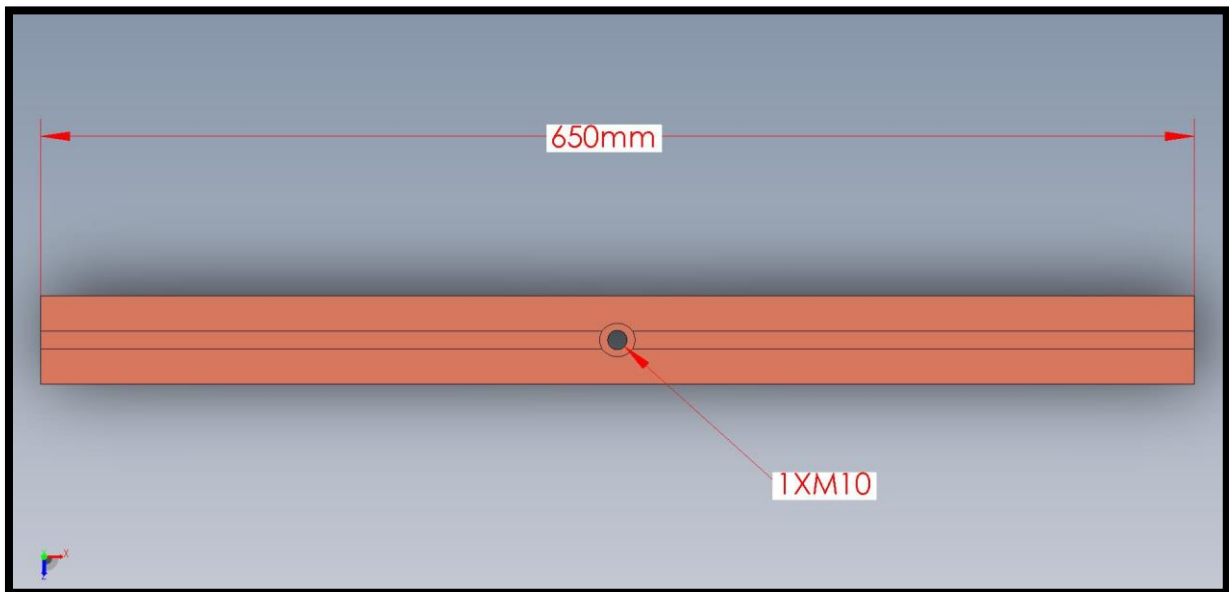


Figur 2. Produktspecifikation. (AQ Engineering, 2019)

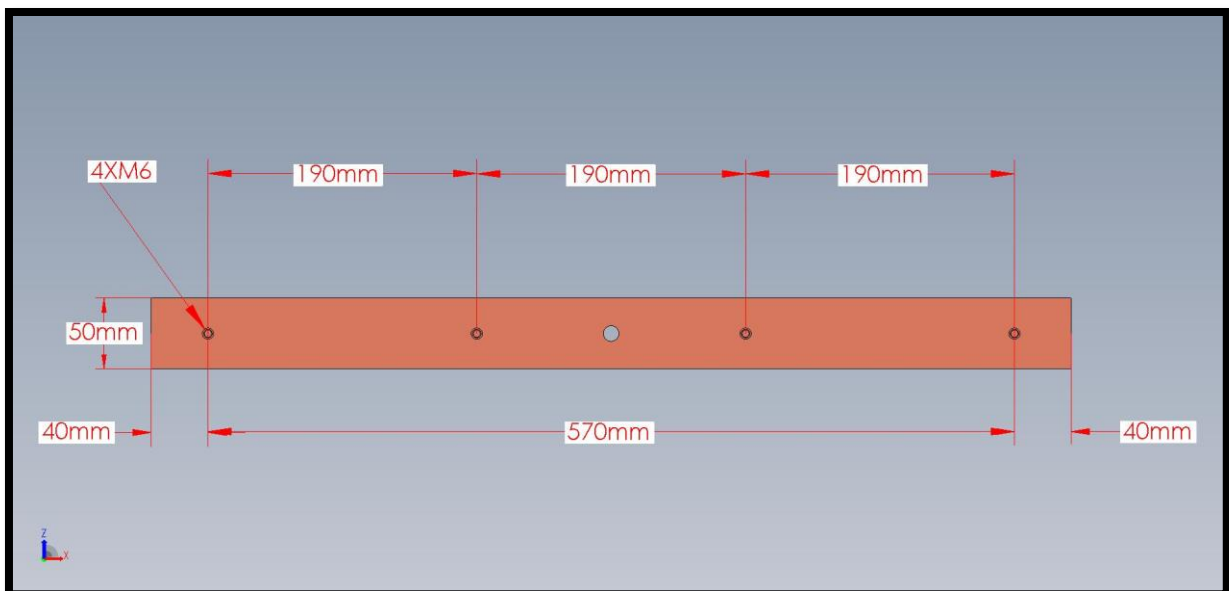
2.1.2 Geometriska egenskaper

Nedan illustreras de geometriska egenskaperna för dagens strömskena, se Figur 3–Figur 6.

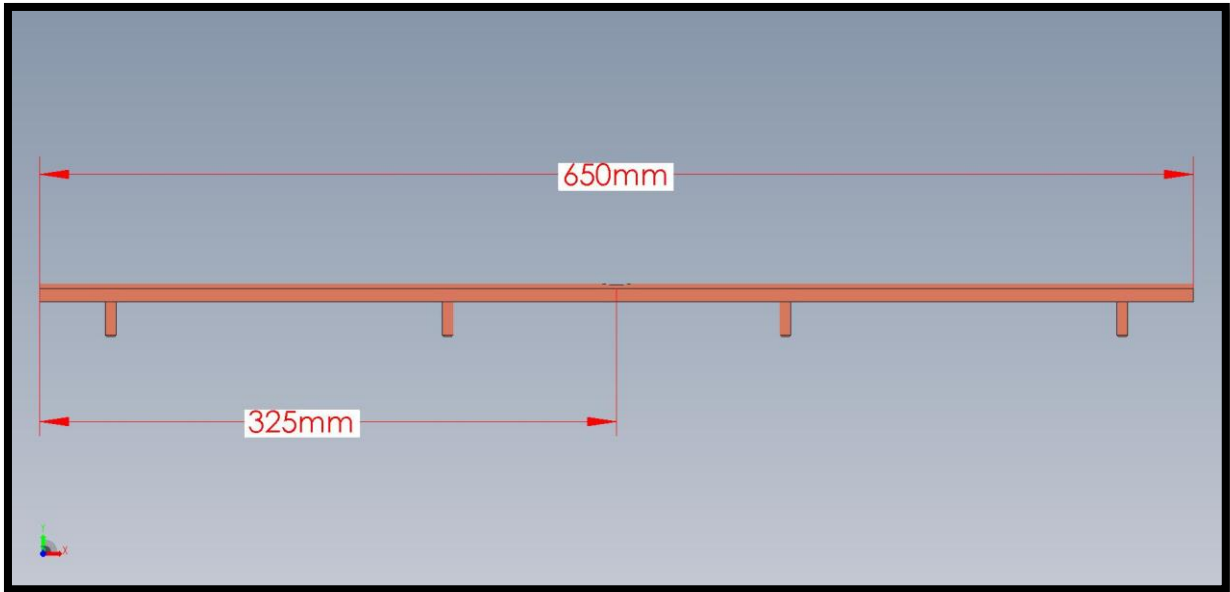
Modellen är konstruerad i CAD-programmet SolidWorks och är en omkonstruktion av den faktiska modellen som ursprungligen skapats i CAD-programmet CATIA V5 av konstruktörer på AQ Engineering.



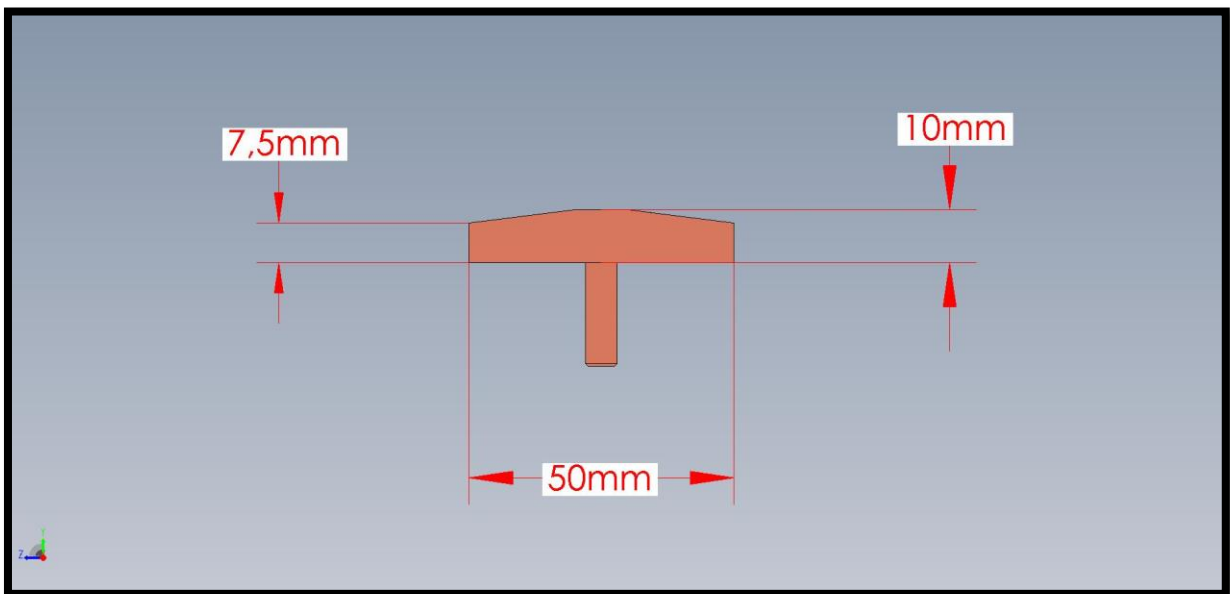
Figur 3. Topp-vy av strömskenan.



Figur 4. Botten-vy av strömskenan.



Figur 5. Front-vy av strömskenan.



Figur 6. Höger-vy av strömskenan.

2.1.3 Materialegenskaper

Strömskenan är tillverkad av kopparlegeringen CW008A och stödskenan är tillverkad av vinylester med glasfiber. Vinylester används i konstruktioner där hög temperaturbeständighet eller hållfasthet krävs [3]. Stödskenan utgör den bärande delen av konstruktionen, se Figur 2 ovan.

Framställningen av strömskenan sker med tillverkningsmetoden dragning, en plastisk bearbetningsmetod där stång-, tråd- eller rörformat material dras genom en dragskiva, och då får en ändrad tvärsektion [26]. Strömskenan dras till en kopparplattstång. Vid strömöverföring är kopparplattstång en produkt som i huvudsak används som elektrisk ledare i exempelvis ställverk, transformationsstationer, matarverk och batterier [1].

CW008A är en syrefri kopparlegering som används i applikationer där hög elektrisk ledningsförmåga krävs. Eftersom legeringen är syrefri går det att svetsa och löda [1], se Figur 3 och Figur 4 ovan, där visas placeringarna av fyra fastsvetsade M6-koppargångor på strömskenas undersida.

2.2 Vanliga felkällor för metaller

I detta avsnitt beskrivs kort olika fenomen som kan uppstå för metaller vid mekanisk användning. Fenomen som tas upp är krypning, nötning, utmattning, korrosion och oxidation.

2.2.1 Krypning och krypmekanismer

I många sammanhang används material vid höga och varierande temperaturer. Den mest påtagliga begränsningen för användning av material vid hög temperatur är smälttemperaturen. Krypning är ett fenomen som innebär deformation hos vissa material under mekanisk belastning, deformationen påverkas av tid, last och aktuell temperatur [4]. Fenomenet är starkt temperaturberoende där krypmekanismer startar vid temperaturer 30–40 % av smälttemperaturen för metaller. Vid konstruktion av maskiner och komponenter är det viktigt att välja rätt material med låg kryp-deformation. Aluminium i applikationer kring 100 °C ligger inom området där krypfenomen uppstår, vid låg temperatur behåller aluminium sin hållfasthet och duktilitet [25].

2.2.2 Nötning och korrosion

Nötning uppstår när material glider mot varandra. Det medför bl.a. slitage och förlust av material som påverkas av t.ex. yttryck, glidhastighet, materialegenskaper, hårdhet och temperatur [5].

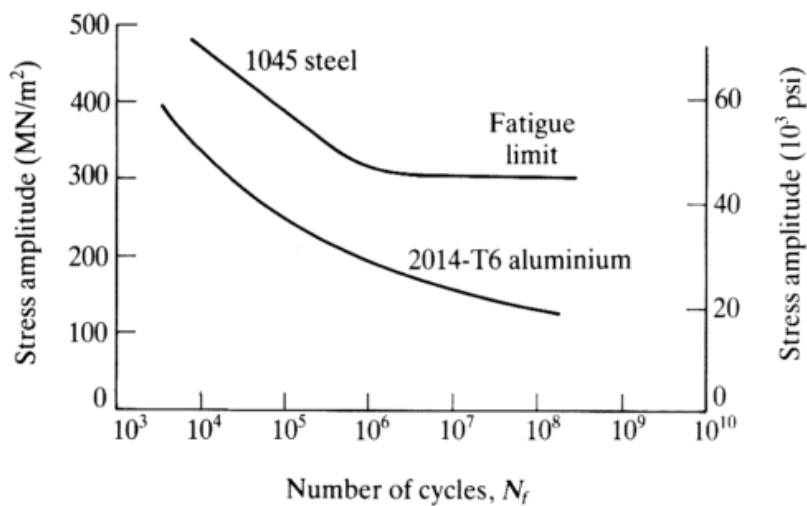
Korrosion är en kemisk reaktion mellan ett material och den omgivande miljön. En av de vanligaste typerna av korrosion är galvanisk korrosion. Denna typ av korrosion uppstår när en mindre ädel metall kommer i kontakt med en ädlare metall, t.ex. om aluminium kommer i kontakt med koppar, kommer aluminiumet att brytas ner [6], se Figur 7 nedan.



Figur 7. Aluminium utsatt för galvanisk korrosion. (Alumeco,2019)

2.2.3 Utmattning

Utmattning beskriver försvagning av ett materials hållfasthet då ett material eller en komponent utsätts för låga/höga laster som vid ett tillräckligt antal lastväxlingar leder till sprickbildning och i ett senare skede till utmattningsbrott. Aluminium uppvisar ingen tydlig utmattningsgräns, istället anges oftast den spänning som ger utmattningsbrott efter ett definierat antal lastväxlingar [25], se Figur 8.



Figur 8. Utmattningskurvor för stål och aluminium, observera att aluminium inte uppvisar någon tydlig utmattningsgräns. (eFunda,2019)

2.2.4 Oxidation

När aluminium exponeras för syre bildas det ett hårt och motståndskraftigt oxidskikt som skyddar mot korrosion. Detta oxidskikt har tyvärr en negativ inverkan på strömöverföringen, då den försämrar den elektriska ledningsförmågan hos aluminiumet. Oxidskiktet bör därför avlägsnas helt om aluminium skall användas som material för en elektrisk ledare. Ett sätt att behandla aluminiumet mot oxidation är genom att smörja in materialet redan i fabrik med ett speciellt kontaktfett. Detta fett innehåller ett kornigt strävt material som kallas korund. Korund är en mineral bestående av aluminiumoxid. När fettets har applicerats på materialet utsätter man i nästa steg aluminiumet för högt tryck, det höga trycket orsakar en slipeffekt hos de korundpartiklarna som i sin tur bryter ned oxidskiktet på aluminiumet. Fettet förhindrar även att fukt och syre tränger in [7, 8].

3. Analys och beräkning

Detta kapitel presenterar analys- och beräkningsdelen för examensarbetet. Analysen innehåller undersökning av aluminiumlegeringar och av pläteringsalternativ för aluminium. Beräkningsdelen redogör framtagandet av en ny konstruktion i aluminium istället för koppar, där beräkningsmetoden FEM kort förklaras och programmet EMS beskrivs. Vidare presenteras genomförandet av FEM-modelleringen.

3.1 Undersökning av aluminiumlegeringar

I Tabell 1 nedan sammanställdes en materialtabell med sex olika aluminiumlegeringar och en kopparlegering, som är dagens kopparlegering. Data för aluminiumlegeringarna hämtades från Alumecos webbsida. Alumeco är ett internationellt handelsföretag som tillhandhåller aluminium och koppar till metallindustrin. Tabell 1 nedan visar legeringarnas materialegenskaper, där bl.a. den elektriska konduktiviteten kategoriseras som antingen dålig, bra, mycket bra eller utmärkt. Bearbetningsmetoder kategoriseras också antingen som ”Ok” vilket avser att det är möjligt att utföra särskild bearbetning. ”Nej” avser att det inte går överhuvudtaget. Övriga spalter avser materialegenskaper för samtliga legeringar.

Enligt tabellen är aluminiumlegeringen AW6060 det bäst lämpade materialvalet för den eventuellt nya strömskenan, eftersom den innehar högst elektrisk konduktivitet av samtliga aluminiumlegeringar samt uppfyller alla andra krav som dagens kopparlegering [2, 9, 10, 11, 24].

Tabell 1. Materialtabell för samtliga valda legeringar.

Al-legeringar	AW1050A	AW2007	AW5005	AW5754	AW6060	AW6082	CW008A
Elektrisk konduktivitet %IACS	Mycket bra 59,5	Dålig 34	Mycket bra 52	Dålig 32,5	Mycket bra 54	Bra 45,4	Utmärkt min 100
Utvidningskoefficient $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$	23,5	23,5	23,5	23,7	23,4	24	17,3
Elasticitetsmodul KN/mm ²	69	72	70	70	70	70	117
Smältpunkt	650 °C	510 °C	630 °C	595 °C	610 °C	555 °C	1083 °C
Profil	Plåt, band	Stänger	Plåt	Plåt	Stänger	Stänger	Stänger
Minsta böjradie	1–2 x T	-	min 2 x T	1–2 x T	Min 5 x T	Min 6 x T	Upp till 10mm R = 1 x T 11–25 mm R = 1,5 x T
Böjning	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Nej	Ok
Borrning	inte lämpligt	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Svetsning	Ok	inte lämpligt	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Skärning	<6mm skärning >vattenskränning	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Skruvfästning	inte lämpligt	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

3.2 Undersökning av pläteringsalternativ

I Tabell 2 nedan sammanställdes en tabell med olika pläteringsalternativ. Tabellen visar legeringarnas användningsområde, för- och nackdelar, ytbehandlingsmetod, pris och materialegenskaper. Priset kategoriseras som antingen lågt, mellanhögt eller högt. Enligt Tabell 2, är nickel det lämpligaste alternativet jämförelsevis med de två andra legeringarna, eftersom nickel har näst högst elektrisk konduktivitet, är relativt billig, erhåller högst hårdhet och är applicerbar för de flesta metallerna. För att verifiera att nickel är ett bra alternativ för nickelplätering av aluminium så kontaktades ett ytbehandlingsföretag från Göteborg som heter FerroProtect, som är specialister på ytbehandling av aluminium. Enligt Vd:n Kristian Löwhagen är förnickling av aluminium en av de vanligaste ytbehandlingsmetoderna när man vill kombinera ett korrosionsskydd med hög ytjämnhet samt motverka galvanisk korrosion som inträffar när olika metaller kommer i kontakt med varandra. De erbjuder och föredrar kemisk förnickling framför elektrolytisk förnickling, eftersom kemisk förnickling ger helt jämnt ytskikt överallt, till skillnad från elektrolytisk förnickling, där hänsyn behöver tas till konstruktionens geometri. Ett prispförslag presenterades och landade på 60 kr/detalj för en konstruktion med mått som för dagens kopparskena [12, 19, 20].

Tabell 2. Pläteringstabell för metaller.

Legering	Nickel (Ni)	Silver (90Ag 10Cu)	Tenn (Sn)
Användningsområde och fördelar	Används vanligtvis som underbeläggning, förhindrar spridning av korrosion och avlägsnar porer	Hög elektrisk konduktivitet, används vanligtvis för elektriska kontakter	Låg kostnad, enkelt att löda, går att använda i applikationer med hög strömöverföring
Nackdelar	Bildar oxider, beläggningar med hög hållfasthet eller sprödhet kan reducera utmattnings livslängden	Låg smälttemperatur, bildar sulfider och oxider, intermetallisk	Oxider, intermetallisk, metallmorrhårning
Applicering	Koppar, aluminium och stål mm.	Koppar, silver och stål mm.	Koppar och stål
Ytbehandlingsmetod	Elektroplätering Kemisk förnickling Plätering PVD	Plätering	Elektroplätering Plätering Varmförzinkning
Hårdhet	150–750 HV beroende på process och tjocklek	65–100 HV	~ 30 HV
Maxtemperatur	125 °C	125 °C	150 °C för vissa bilapplikationer
Elektrisk konduktivitet %IACS	18	86	14
Pris	Mellanhögt	Högt	Lågt

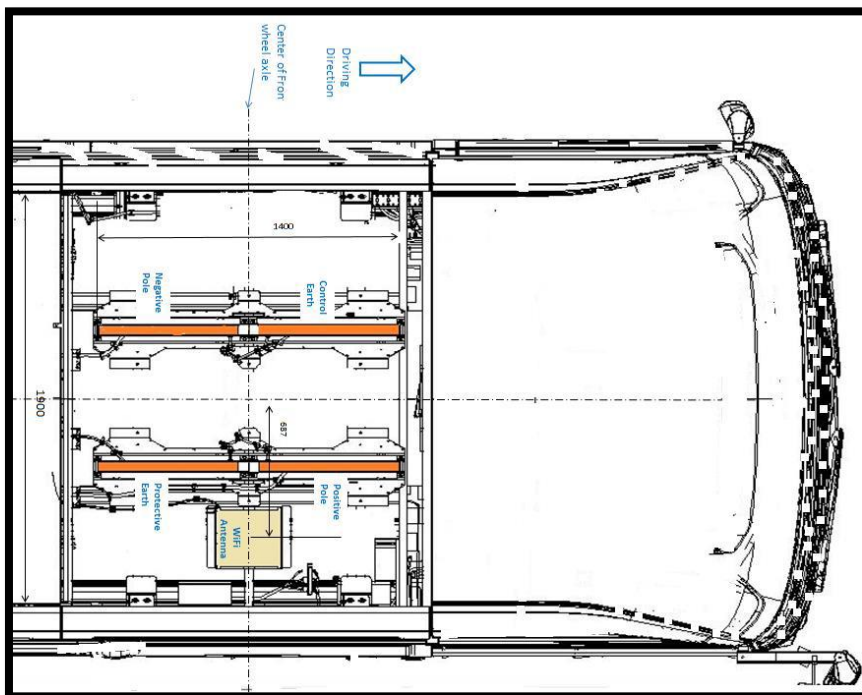
3.3 Beskrivning av FEM och EMS

EMS är ett beräkningsprogram som grundar sig på finita elementmetoden (FEM). FEM är en numerisk metod för att approximativt lösa partiella differentialekvationer (PDE).

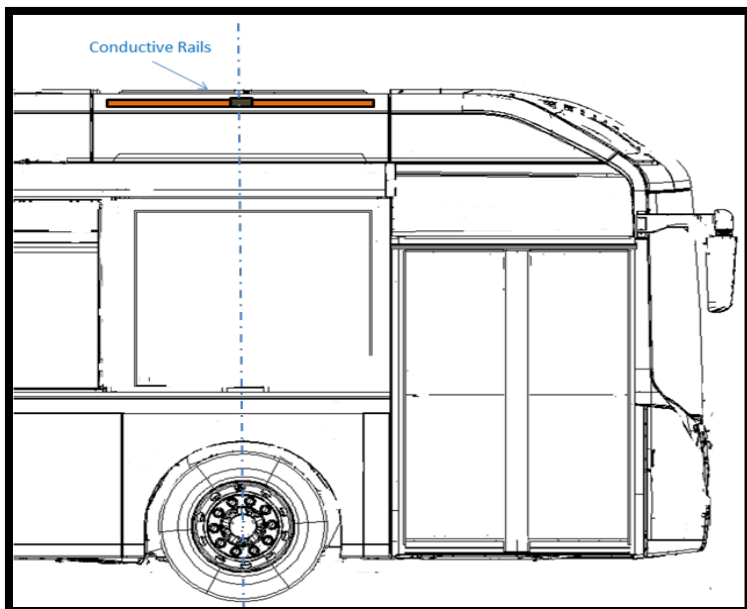
Komplicerade modeller kan lösas approximativt genom att det system av PDE som beskriver det fysikaliska problemet omformuleras till ett numeriskt stabilt ekvationssystem. Generellt bygger metoden på att ett område delas in i så kallade finita element kopplade till noder, vilka sedan beräknas var för sig och en approximativ lösning tas fram för varje element. Det berörda området bildar ett så kallat finita elementnät annars kallat för mesh. Den approximativa lösningen i varje element definieras m.h.a. noder. Noggrannheten på lösningen beror bl.a. på hur många element det finns och storleken på elementen [15, 16]. I EMS kan man bl.a. beräkna förlängning, töjning, spänning, resistans, värmefflöde, temperatur och reaktionskraft. Det är ett program med fokus på tillämpningar inom elektrofysik som t.ex. elektromagnetism, elkraftsteknik och elektricitet men också hållfasthetslära. I programmet EMS kan man utföra olika typer av analyser vad gäller elektro-, termo- och hållfasthetstillämpningar. Det går även och kombinera de olika analyserna med varandra, vilket gör programmet idealiskt för problem som inkluderar alla de nämnda tillämpningarna [16, 18]. I kapitel 3.5 ges utförligare beskrivning av analyserna och analysmetoden.

3.4 Problemdefinition

Dagens konstruktion av laddningsskenan används som elektrisk ledare för laddning av elektriskt drivna bussar. På bussen sitter det fyra laddningsskenor på taket centrerade vid framaxeln av bussen, se Figur 9 och Figur 10 nedan.

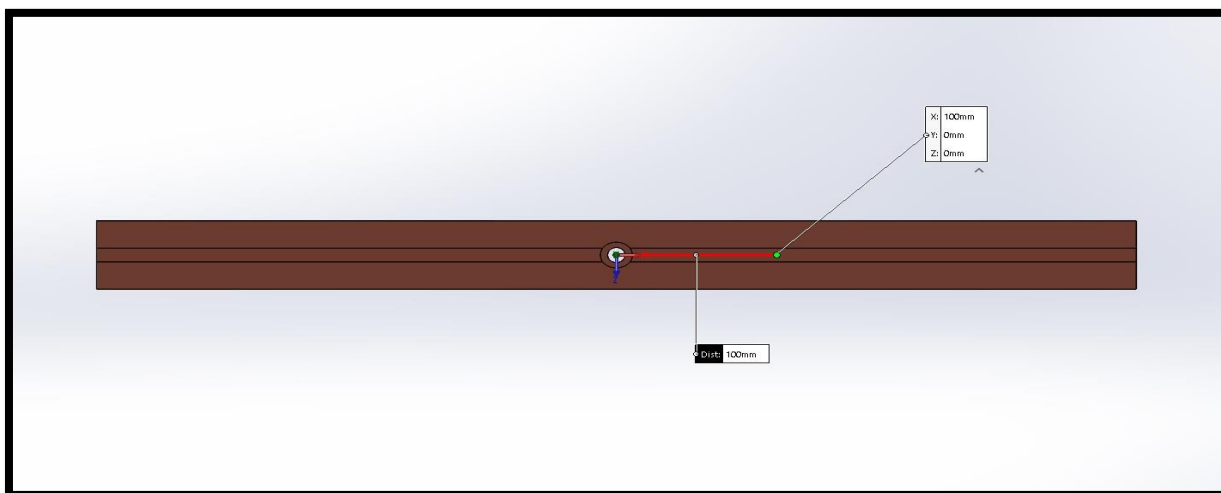


Figur 9. Topp-vy av bussen. (OPPCharge,2019)



Figur 10. Sido-vy av bussen. (OPPCharge,2019)

Varje laddningsskena belastas vid laddning med en tryckkraft på ungefär 150 N vilket motsvarar cirka 15 kg [21, 22]. Belastningen av laddningsskenan sker på ovasidan av skenan med ett spann mellan (0–100) mm till höger om skenans centrum. Den varierar beroende på hur chauffören som kör bussen positionerar sig mot strömvtagaren. För att förenkla problemupställningen har flera antaganden gjorts, bl.a. betraktas tryckkraften som en punktkraft och avståndet från strömskenas centrum till var kraften påförs sätts till 100 mm, se Figur 11.



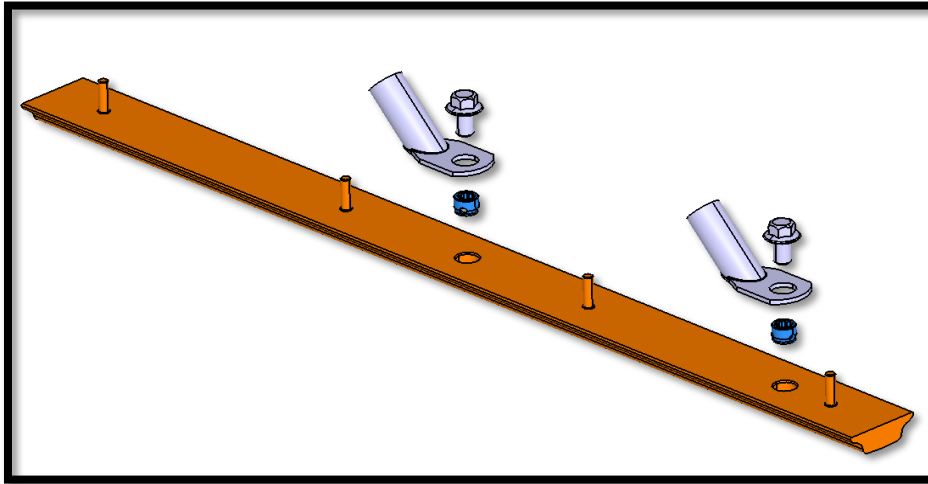
Figur 11. Topp-vy strömskena, avståndet från mitten till var kraften påförs.

Strömmen som leds genom laddningsskenan varierar beroende på laddningstiden, enligt Figur 2 ovan är den typiska laddningstiden för bussarna sex minuter. Maximal laddningseffekt är på 500 kiloWatt (kW) med varierande voltstyrka från 0–750 Volt. Maximal strömstyrka ligger på 800 DC Ampere (A) beroende på laddningstiden vid 750 Volt.

3.4.1 Provning av nya koncept på dagens kopparskena

Det har utförts skarpa prov på dagens kopparskena med nya koncept. Kopparskenan har bl.a. provats som den är konstruerad idag, men med en enklare omkonstruktion där det finns två M10-skruvhål istället för ett, se Figur 12 nedan och jämför med Figur 3 ovan.

I Figur 12 visas placeringarna av två kabelskor på 120 mm^2 som är fästa med skruvförband på strömskenans undersida. En kabelsko är en form av kontakdon för elkablar, de används i det här fallet för att transportera vidare strömmen till bussens batterier. Kabelskorna som används här är av tennpläterad koppar och kabeln är av ren koppar med termoplastisolering.

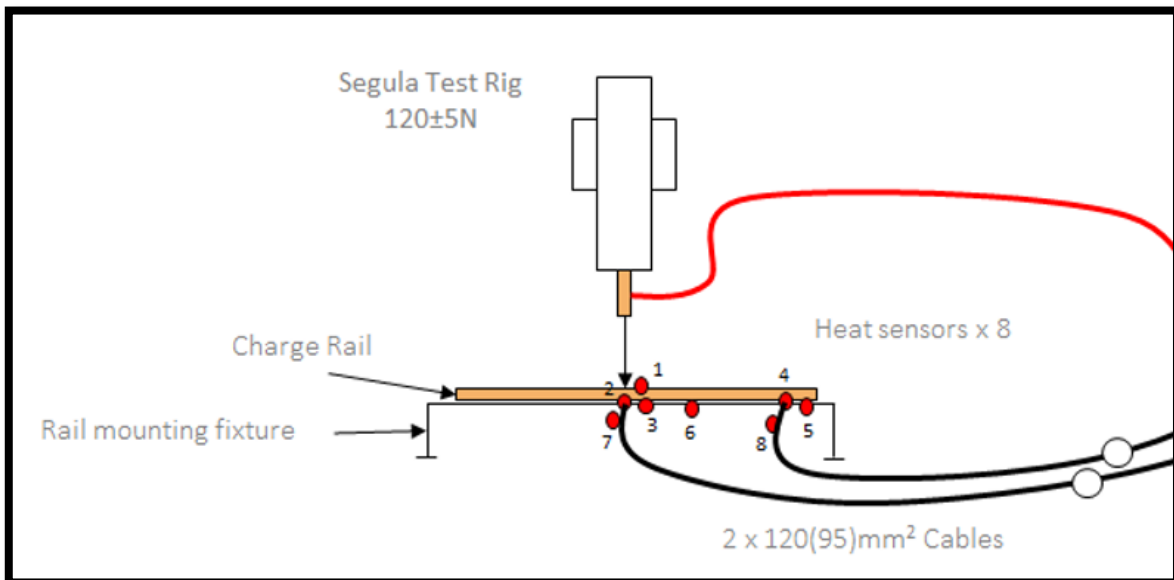


Figur 12. Omkonstruktion av dagens kopparskena. (AQ Engineering,2019)

Proven som utfördes på dagens kopparskena gick ut på att ”stresstesta” skenan vid hög strömstyrka med tryckbelastning på $120 \pm 5 \text{ N}$ där laddningen sker under DC 1000 A i en timme. Det placerades flera värmesensorer på skenan och kabelskorna. Efter avslutat prov mättes temperaturerna på samtliga punkter där värmesensorerna hade placerats, se Tabell 3 där C4, C7 avser nya koncept och T.D avser dagens konstruktion, se även Figur 13.

Tabell 3. Temperaturkaraktistik för dagens kopparskena samt nya koncept. (AQ Engineering,2019)

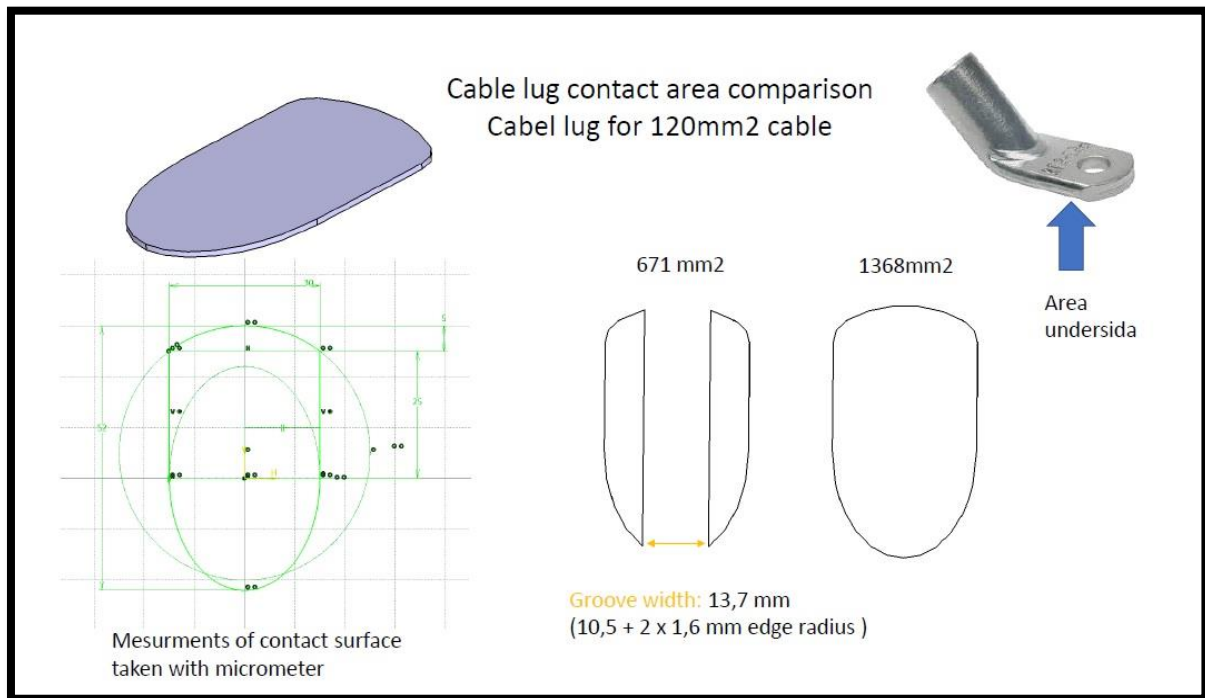
		Both with 120 cable			
*Cool down	40min	58min			
Sensor	C.7 700 1h	C.4 700 1h		Sensor position	
1	52	42		Top rail surface next to electrode Middle	
2	52	42		On top of cable lug shoe Middle	
3	56	38		Bottom rail surface next to cable lug Middle	
4	44	33		On top of cable lug shoe Side	
5	50	38		Bottom rail surface next to cable lug Side	
6	54	44		Heating cable chanal around middel	
7	50	45		One cm up from where isolation start Middle	
8	46	38		One cm up from where isolation start Side	
* After 1h 700A + 15 min 1000A					
		Both with 120 cable			
**Cool down	1h:11min	1h			
Sensor	C.7 1000 1h	T.D 1000 1h		Sensor position	
1	84	88		Top rail surface next to electrode Middle	
2	88	88		On top of cable lug shoe Middle	
3	92	98		Bottom rail surface next to cable lug Middle	
4	68	68		On top of cable lug shoe Side	
5	74	76		Bottom rail surface next to cable lug Side	
6	80	84		Heating cable chanal around middel	
7	80	78		One cm up from where isolation start Middle	
8	66	72		One cm up from where isolation start Side	
** After 1h 1000A					



Figur 13. Testrigg som användes vid provning av dagens kopparskena samt nya koncept. (AQ Engineering,2019)

3.4.2 Geometriska egenskaper för kabelskon

Nedan i Figur 14 visas de geometriska egenskaperna för kabelskon som användes vid de fysiska testerna som nämnts ovan, för dagens kopparskena.



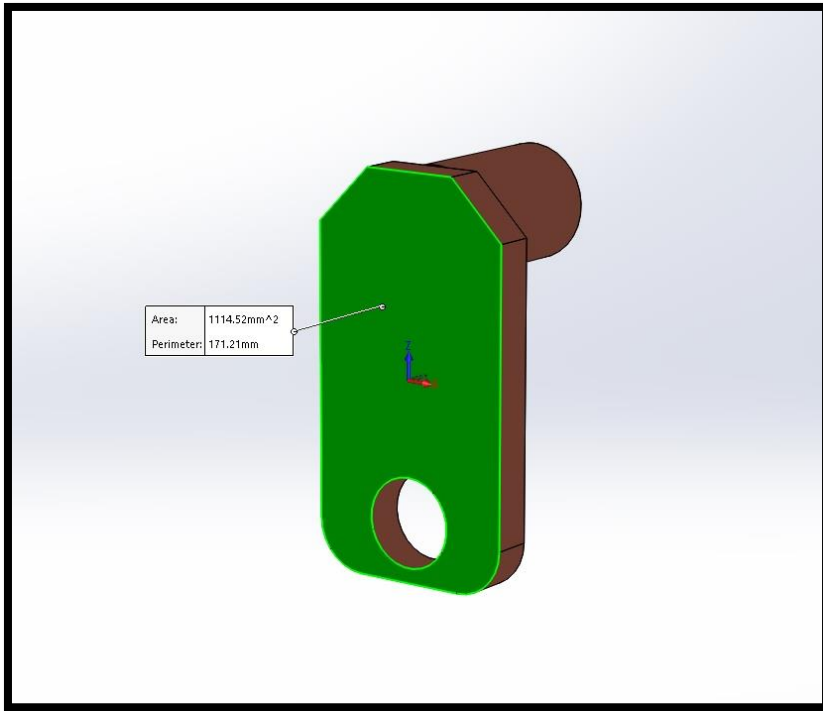
Figur 14. Geometriska egenskaper för kabelskon. (AQ Engineering,2019)

3.5 FEM-modellering

Detta avsnitt redogör framtagningen av FEM-modellen. FEM-modellen bygger på de underlag som presenterats i kapitel 3.4 Problemdefinition, se ovan. Ett liknade test återskapades i programmet EMS och resultatet jämfördes med resultatet från Tabell 3 T.D.

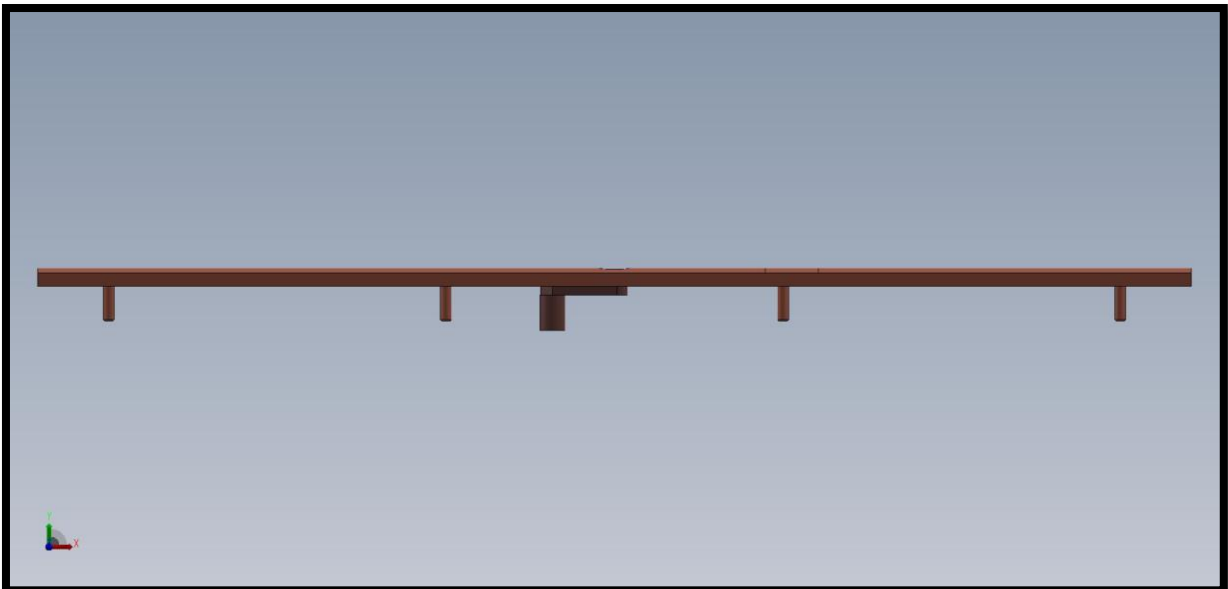
3.5.1 Genomförande

En solidmodell av kopparskenan konstruerades i CAD-programmet SolidWorks och en solidmodell av kabelskon. Kabelskon som konstruerades i CAD-programmet SolidWorks är en approximerad 3D-modell av den riktiga kabelskon. Deras areor skiljer sig något i storlek, för 3D-modellen är arean 1114,52 mm², se Figur 15, och för den riktiga kabelskon är arean 1368 mm² och det utan ett M10-skruvhål inkluderat.

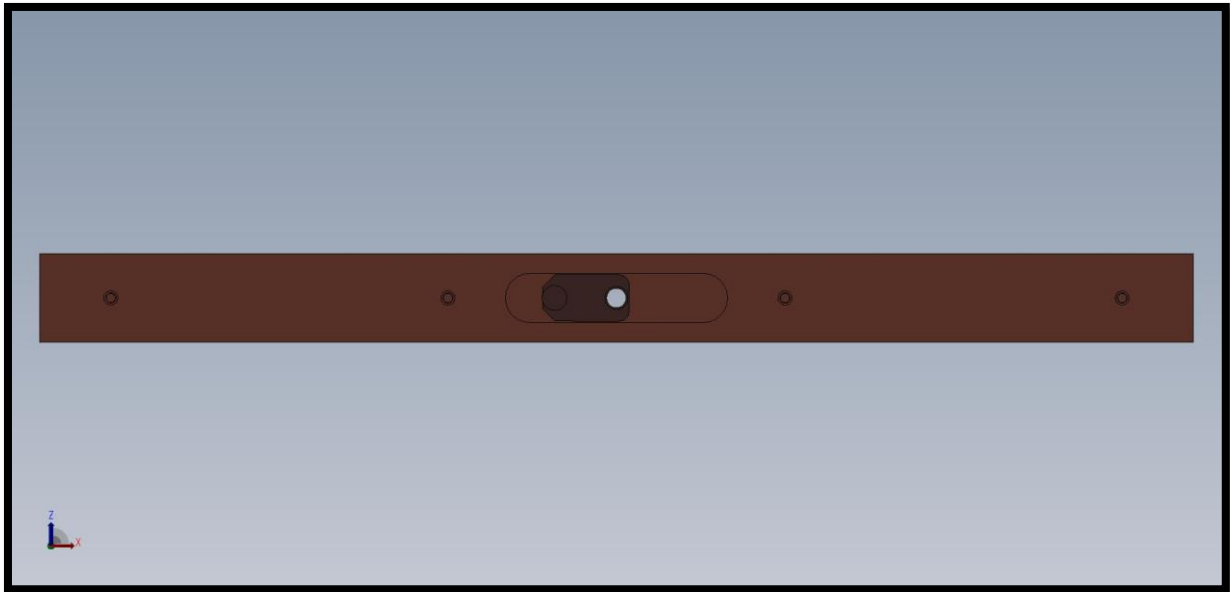


Figur 15. Area av kabelsko.

För att kunna utföra studier i programmet EMS så behöver en assembly-fil skapas i CAD-programmet SolidWorks. En assembly är en hopsättning av en eller flera solida modeller. Kabelskon monteras ihop med strömskenan vid skruvhålet, se Figur 16 och Figur 17 nedan.



Figur 16. Front-vy, kabelsko monterad ihop med strömskenan.



Figur 17. Botten-vy, kabelsko monterad ihop med strömskenan.

I programmet EMS utfördes en magnetostatisk analys. Magnetostatik beskriver exempelvis hur magneter med konstanta magnetfält, t.ex. permanentmagneter växelverkar med varandra och med externa magnetfält, där magnetfälten beskriver krafterna mellan magneter och strömförande elektriska ledare. Dessa magnetiska fält är tidsberoende och beror endast av deras riktning. I magnetostatisk analys beräknas magnetiska fält antingen för en permanentmagnet eller för en stationär likströmsledare. Beräkningarna som utförs kommer ifrån Maxwells ekvationer [13,14, 29] och är följande:

$$\nabla \times H = J_s \quad (1)$$

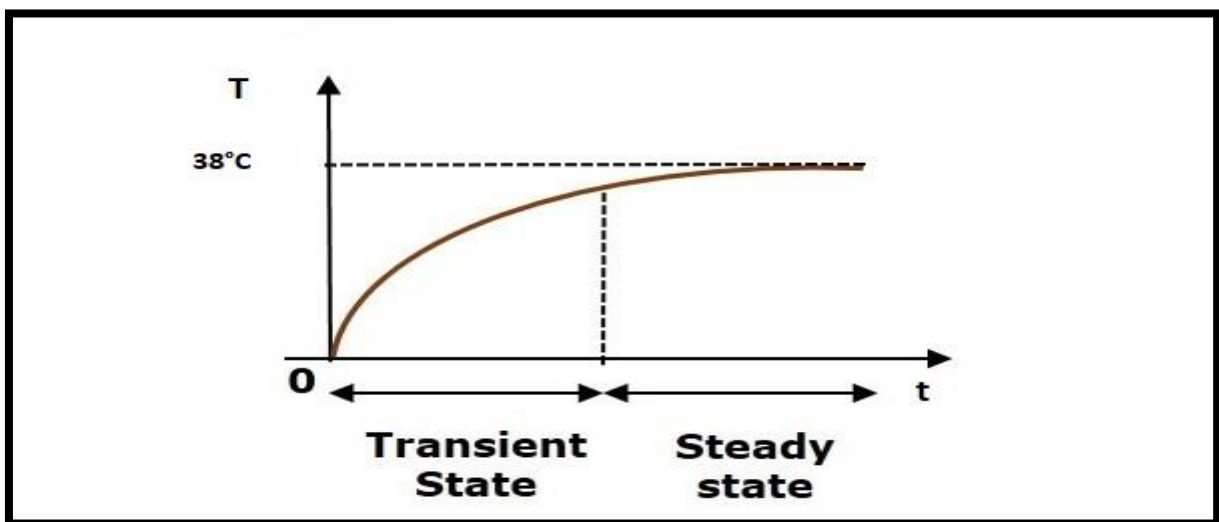
$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

Första ekvationen är Amperes lag och den andra ekvationen säger att det inte finns några magnetiska laddningar.

- H: magnetiskt fält [A/m]
- J_s : elektrisk strömtäthet [A/m^2]
- B: magnetiskt flöde [Wb]

För magnetostatisk analys behöver hänsyn tas till materialegenskaper. Där det gäller att definiera om ett material är antingen isotropt, d.v.s. har lika egenskaper i alla riktningar eller anisotropt, har olika egenskaper i olika riktningar. Ortotrop har tre vinkelräta riktningar med olika egenskaper i varje riktning eller om materialet är en permanentmagnet, behåller det sina magnetiska egenskaper över lång tid. Denna analys begränsas även av ett randvillkor: det krävs att det definieras minst en normal flödesriktning på en yta som ett randvillkor. De ytor som väljs blir begränsande endast till normalriktningen, de tangentiella flödesriktningarna blir lika med "noll" på de ytorna som väljs som normal. För en magnetostatisk studie gäller termisk analys, "thermal analysis", vilket innefattar att man kan beräkna temperatur, värmeledningstäthet och temperaturgradient. Temperaturgradienten anger i vilken riktning

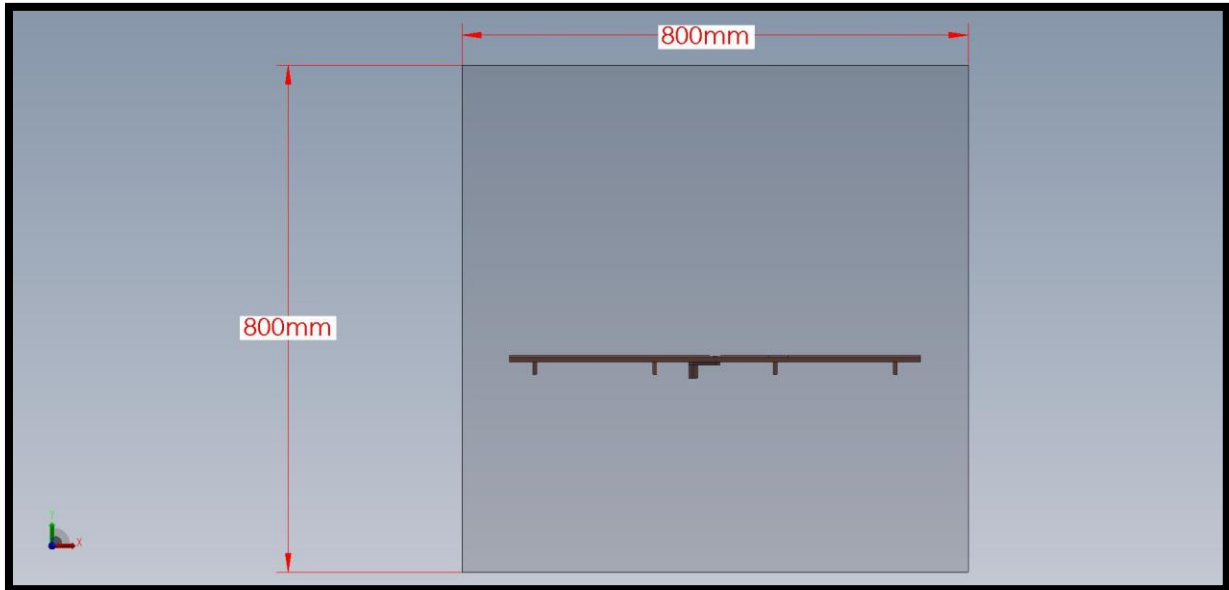
temperaturen ökar mest och hur stor ökningen är per längdenhet. Analysen kan utföras för två olika förhållanden antingen under ett steady state (stabilt tillstånd) eller transient state (övergångstillstånd). För en steady state analys ligger intresset endast i att känna till en kropps termiska förhållanden när den når ett tillstånd av termodynamisk jämvikt. Det är alltså inte intressant att veta tiden det tar att nå detta tillstånd. Vid termodynamisk jämvikt är den termiska energin som kommer in i varje punkt i modellen lika med den termiska energin som lämnar den. En viktig materialegenskap som måste beaktas vid en steady state analys är termisk konduktivitet, d.v.s. materialets förmåga att leda värme. För en transient state analys till skillnad från steady state, så ligger intresset här i att känna till den termiska förändringen för modellen som en funktion av tiden. Den beskriver förenklat tidsförloppet mellan början av en händelse och ett stabilt tillstånd. Exempel när man vrider på vattnet i en dusch så är vattnet först kallt innan det blir varmt förutsatt att man har vridit på kranen till varmt, slutligen når vattnet en stabil temperatur, den stabila temperaturen är vad som kallas för steady state [16, 28], se Figur 18 som exempel.



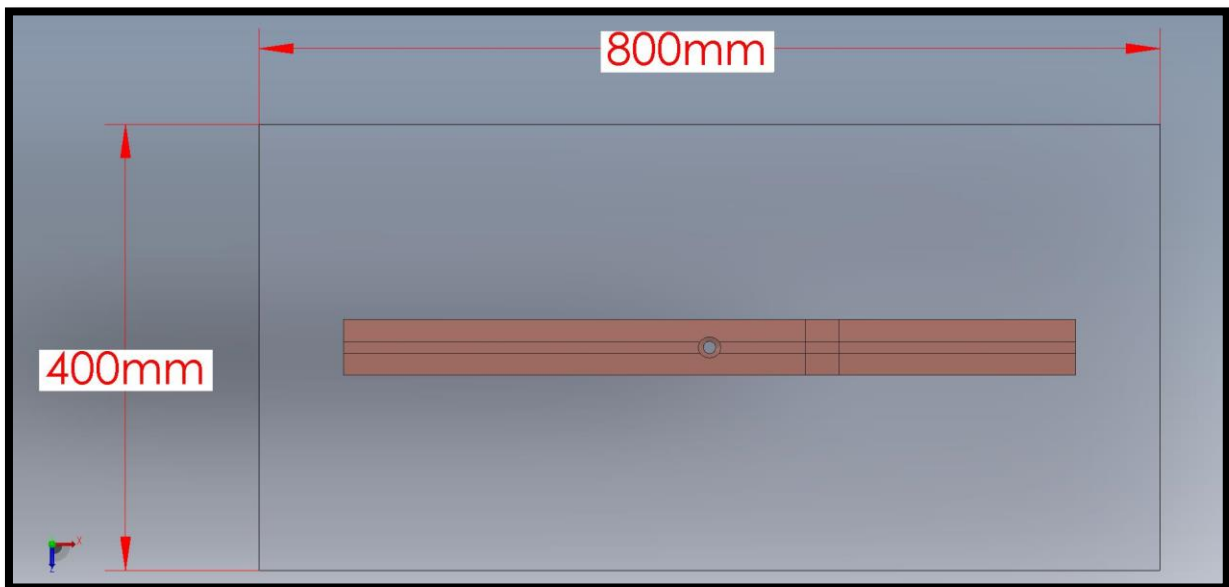
Figur 18. Steady state och transient state graf, stabil temperatur vid 38 °C.

Materialegenskaper som är viktiga för en transient state analys är termisk konduktivitet, densitet och specifik värmekapacitet, begynnelsestemperatur för omgivningen, lösningstid och tidsökning. Lösningstiden avser hur länge simuleringen pågår och tidsökningen avser vid vilka tidsögonblick beräkningarna skall göras. I en magnetostatisk studie är det även möjligt att utföra en hållfasthetsanalys, "structural analysis". Denna analys innefattar beräkning av mekaniska spänningar, materialets deformation, töjningar och reaktionskrafter. Det två ovannämnda analyserna thermal och structural analysis går att kombinera tillsammans i en studie för magnetostatisk analys. Det går alltså att ta hänsyn till elektrisk ström, elektrisk spänning, belastning, temperatur och tid under samma förlopp. För att påbörja en magnetostatisk analys eller allmänt en elektromagnetisk analys behöver ett medium modelleras, i detta fall, luft, eftersom elektromagnetiska fält som bildas av enheten utvidgar och sträcker sig över sådana luftområden. Detta medium av luft skall representera värmetransporten (konvektion) mellan de olika komponenterna och dess omgivning [16,17]. Konvektion uppstår när en gas eller en fluid strömmar förbi ytan av en fast kropp och bortför värme från en varm yta eller tillför värme till en kall yta [28]. Detta luftmedium lades till i assemblyn som gjordes tidigare för kopparskenan och kabelskon, se Figur 16 och Figur 17 ovan. Luftmediet skapades först som en solidrektangel, sedan användes en funktion i CAD-

programmet SolidWorks som heter "cavity" och betyder hålighet. Med hjälp av denna funktion kunde ett hålrum skapas för den solida rektangeln. Följaktligen placerades strömskenan ihopmonterad med kabelsko i mitten av den ihåliga rektangeln, se Figur 19 och Figur 20. Enligt EMS guide så spelar det ingen roll hur stort luftmedium som skapas, så länge den inte överlappar med konstruktionen som befinner sig i luftmodellen [16].



Figur 19. Front-vy, luftmedium med kabelsko och strömskena.



Figur 20. Topp-vy, luftmedium med kabelsko och strömskena.

Noggrannheten på lösningen kan också ställas in. Vid hög noggrannhet sätts slumpfelsvärdet till $1e^{-6}$, slumpfelsvärdet är det maximala acceptabla felet för programmet EMS iterativa-lösare. Om modellen är väldefinierad så kommer EMS iterativa-lösare att köra flera iterationer tills den når ett fel som är mindre än slumpfelsvärdet. Om den inte kan nå ett värde mindre än slumpfelsvärdet så kommer programmet stoppas och sluta köras [16]. I nästa steg definierades materialen för respektive komponent. För strömskenan med kopparlegeringen

CW008A behövdes en egen materialtabell skapas, eftersom det saknades i programmet EMS, se Tabell 4. För luftmediet och kabelskon valdes materialen direkt från programmets materialbibliotek, för kabelskon valdes ren koppar och för luftmediet luft.

Tabell 4. Materialegenskaper för strömskenan med kopparlegering CW008A.

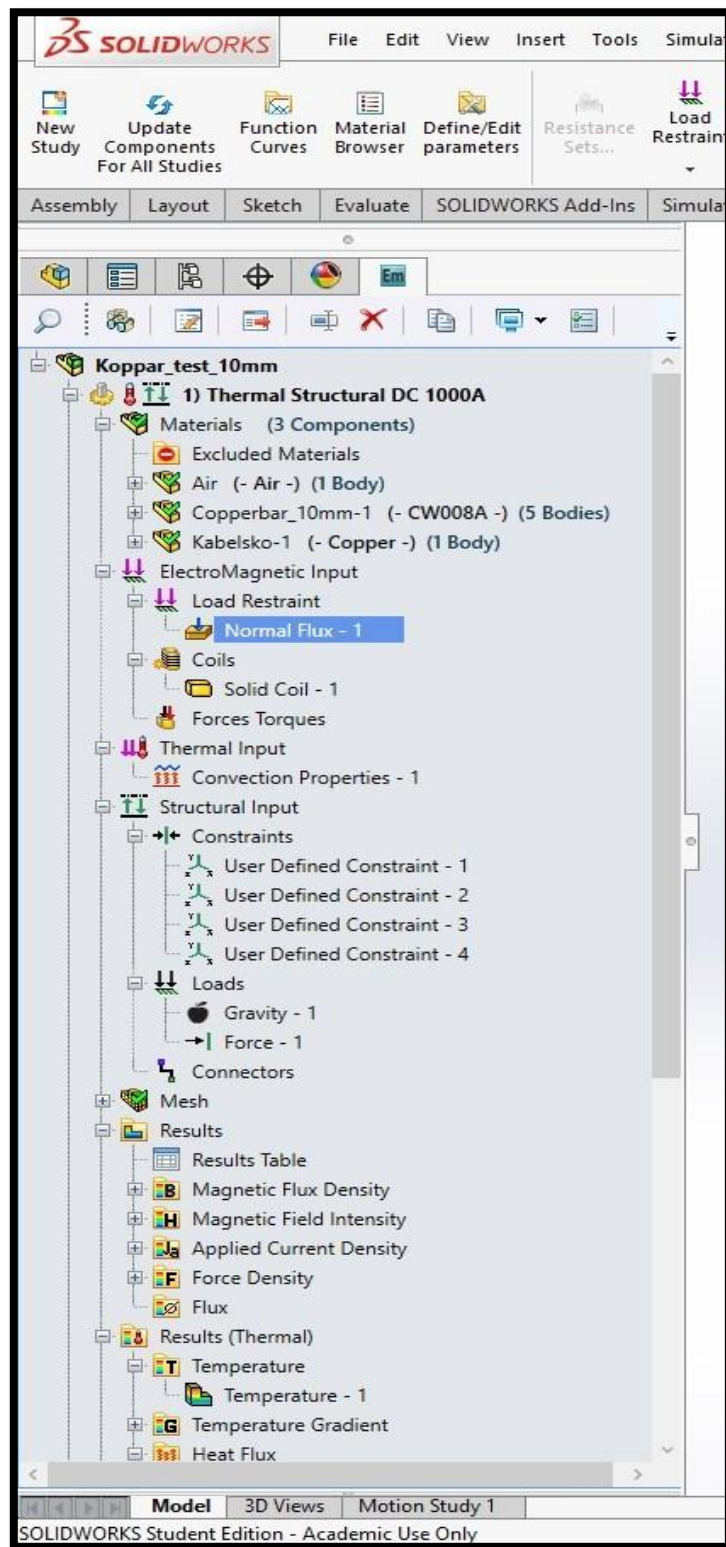
Materialdata		
Egenskap	Typ	Värde
Elektrisk konduktivitet	Isotropt	59 600 000 (Mho/m)
Relativ permeabilitet	Isotropt	0,999991
Magnetisering	Icke permanent magnetisering	
Värmeledning	Isotropt	398 (W/m*K)
Elasticitetsmodul	Isotropt	128 GPa
Poissons tal	Isotropt	0.35
Densitet	Isotropt	8950 (Kg/m ³)
Värmeutvidgningstal	Isotropt	1.73e ⁻⁵ (1/K)
Specifik värmekapacitet	Isotropt	388 (J/Kg*k)
Sträckgräns	Isotropt	200 MPa
Draggräns	Isotropt	310 MPa
Kompressionsgräns	Isotropt	200 MPa

I nedanstående Figur 21 visas modellträdet för FEM-modellen i programmet EMS. I början av modellträdet under fliken materials kan man se hur alla komponenter har fått tillvalda material såsom beskrivits ovan. Under flikarna electromagnetic input, thermal input, structural input och loads definieras randvillkoren för modellen. Randvillkor är krav som man sätter för differentialekvationer för att kunna få fram en entydig lösning. Exempel på ett randvillkor som man sätter i programmet EMS är när man definierar den elektriska och magnetiska omgivningen för modellen. Resultaten man sen får av analysen beror helt på hur man har definierat och satt randvillkoren. I electromagnetic input definieras randvillkor för den elektriska och magnetiska omgivningen och randvillkor för antingen elektrisk solidledare eller spole. I thermal input definieras randvillkor för temperatur, konvektion, värmeflödestäthet, specifik värmekapacitet och strålning. I structural input definieras randvillkor för fixeringar av modellen. I loads definieras randvillkor för last, gravitation, tryck, moment, centrifugalkraft och temperaturlast [16, 17]. Under fliken mesh definieras det finita elementnätet.

Redogörelse av randvillkor:

Först definierades randvillkor för electromagnetic input där randvillkor sattes för den elektriska och magnetiska omgivningen för modellen, se Figur 22 nedan.

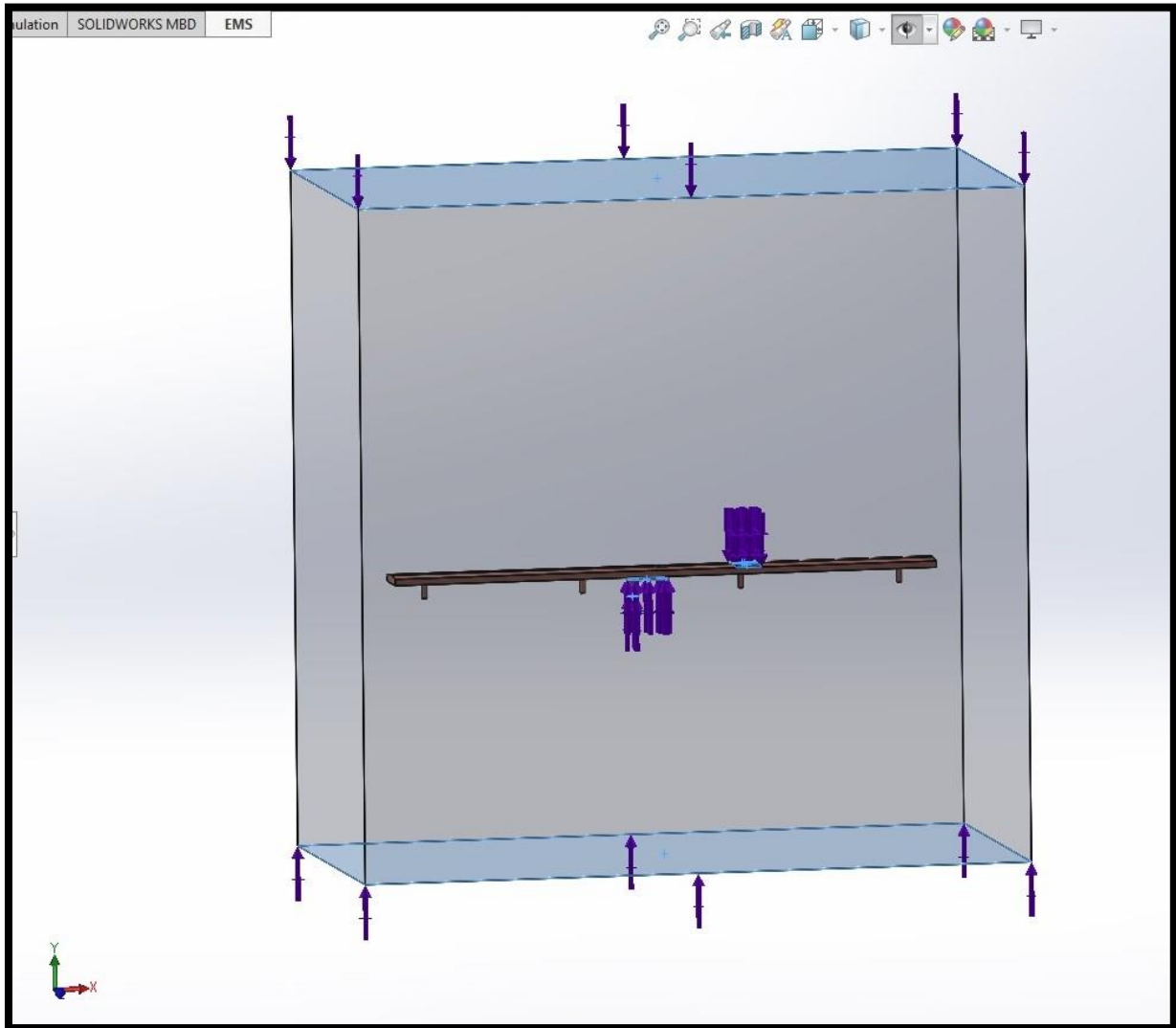
Modellträd:



Figur 21. Modellträdet för FEM-modellen

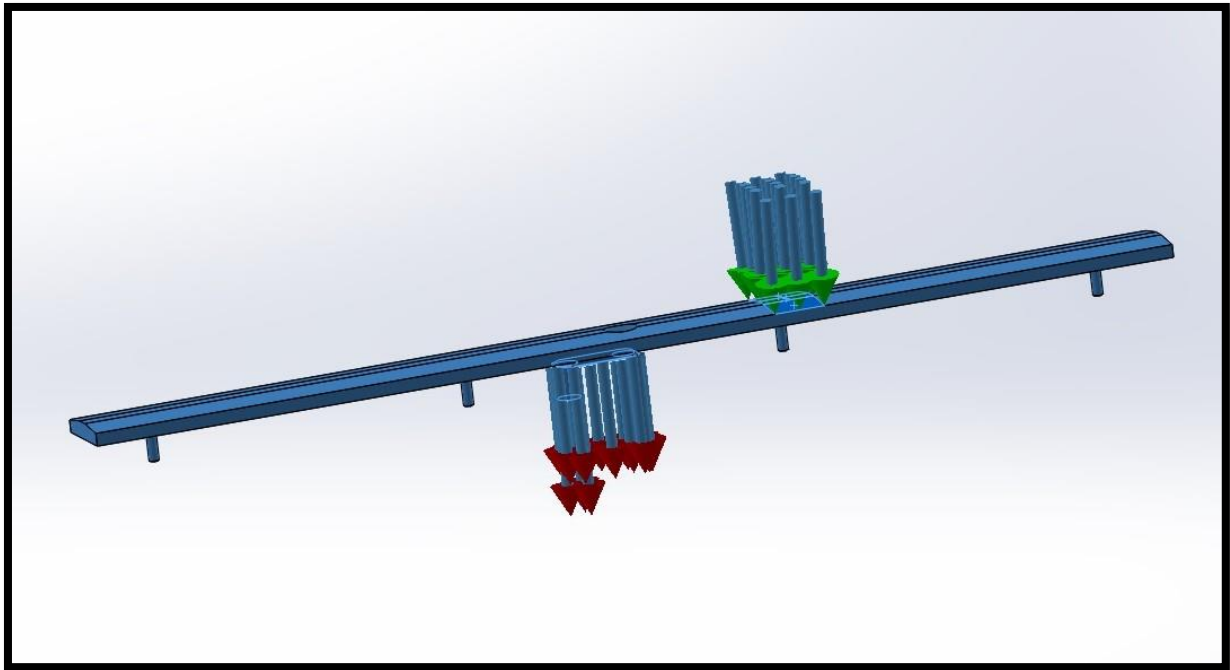
Här valdes normalflux (normal flödestäthet) på ytor där den elektriska strömmen både uppkommer och avtar. Inloppet av strömmen sker på kopparskenas ovansida, där tryckkraften på 150 N påförs som tidigare beskrivits i kapitel 2.1 och kapitel 3.4. Programmet begränsas av att det inte går att välja en kraft eller punkt som en yta, därför behövde en "spline line" läggas

till i 3D-modellen för kopparskenan. Det innebär att det går att skapa virtuella ytor eller linjer på modellen som en form av avgränsning. Vidare sker utloppet av strömmen via kabelskon och där valdes två ytor som utgående ström, d.v.s. undersidan av kabelskon och undersidan av den lilla cylindern tillhörande kabelskon. Även två ytor på luftmediet valdes, d.v.s. undersidan och ovasidan av luftmediet, eftersom det också bildas elektriska och magnetiska fält via luften i normalens riktning.



Figur 22. Randvillkor för den elektriska och magnetiska omgivningen.

Sedan definierades randvillkor för coils tillhörande electromagnetic input se, Figur 21 ovan. Här definierades randvillkor för två solida elektriska ledare, d.v.s. för kopparskenan och kabelskon, även här sattes randvillkor för både ingående och utgående ström. Strömmen definieras som likström med strömstyrka på 1000 A och på samma sätt som innan väljs ytorna där strömmen uppkommer och avtar, se Figur 23 nedan.



Figur 23. Randvillkor för två solida elektriska ledare.

Det saknas en riktig formel för beräkning av elektrisk resistans för likström i en solid elektrisk ledare. I EMS approximeras resistansen m.h.a. finita elementmetoden. I övrigt finns det en formel för beräkning av elektrisk resistans för en likströmsspole [16], enligt:

$$Resistans = 4 * N * L(\sigma * \pi * d^2) \quad (3)$$

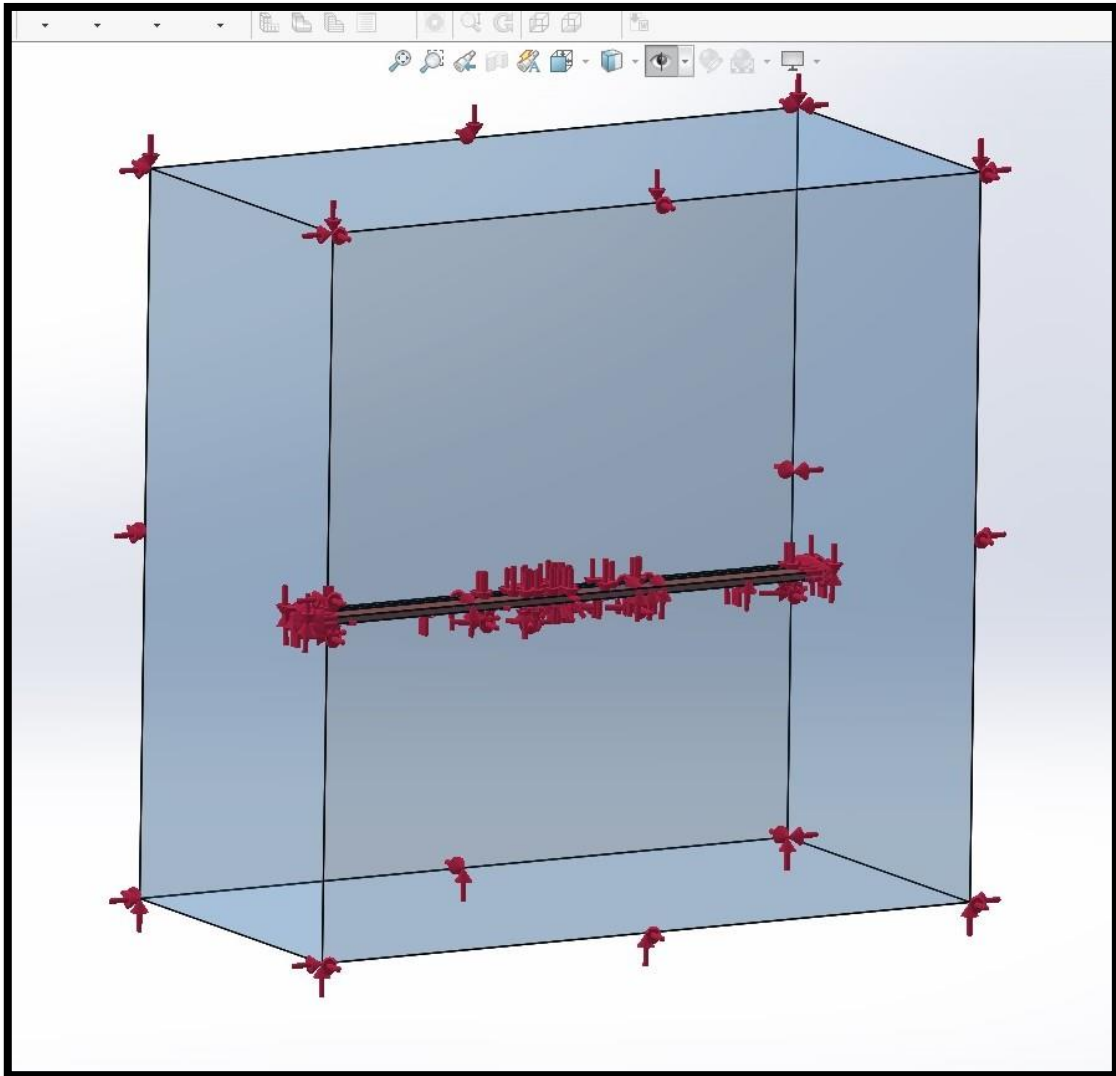
- N: antal trådvarv [-]
- L: totala längden av tråden [m]
- Sigma: elektriska ledningsförmågan hos tråden [1/(Ohm*m)]
- d: tråddiameter [m]

Ett randvillkor för konvektion definierades för "thermal input". Konvektion sker för hela luftmediet och på alla ytor av kopparskenan samt kabelskon, se Figur 24 nedan.

Begynnelsestemperaturen sattes till 300 Kelvin motsvarande cirka 27° Celsius, vilket motsvarar för luft ett värmeövergångstal på cirka 10 (W/m² *k). Ekvationen som tillämpas i EMS för beräkning av konvektion är Newtons lag för värmeöverföring [16, 23] enligt följande:

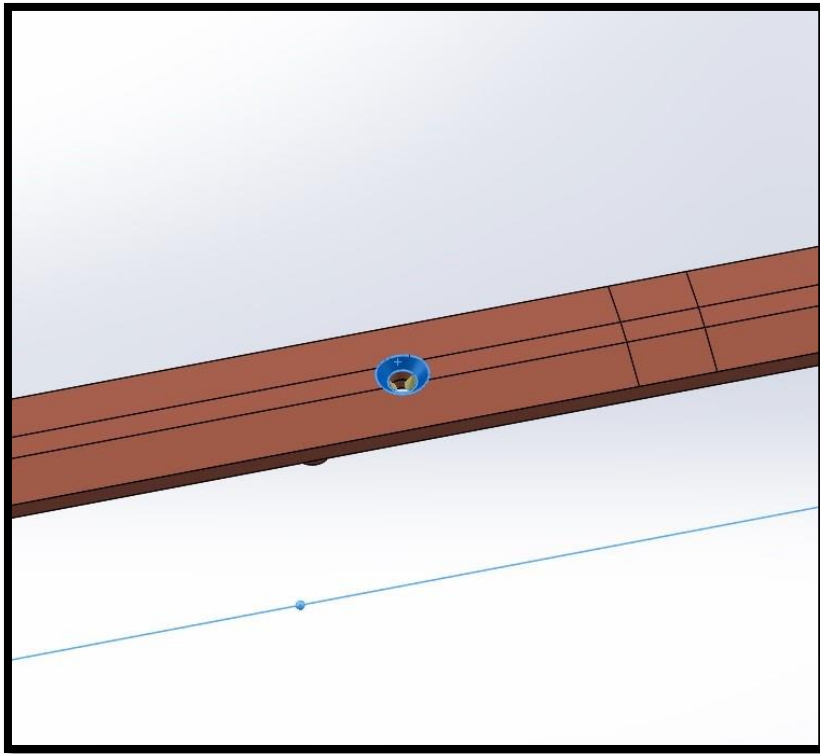
$$\frac{dQ}{dt} = A * h * dT \quad (4)$$

- Q: värme flöde [W]
- A: aktuella arean [m²]
- h: värmeövergångstalet [W/m² *k]
- dT: förändringen av temperaturen, (T_{varm} - T_{kall}) [K]

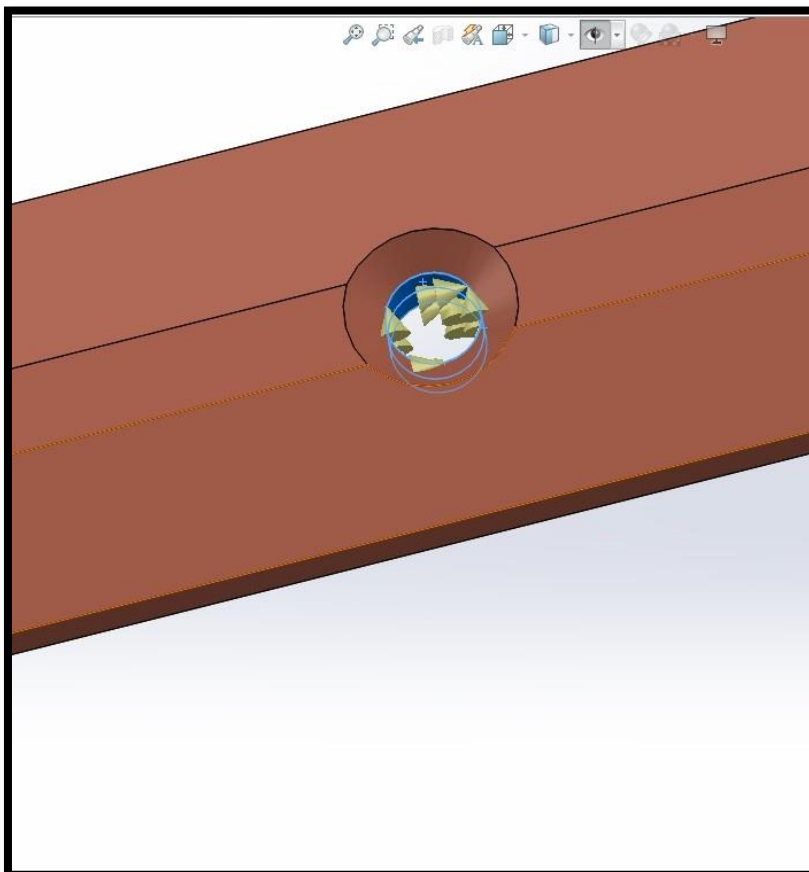


Figur 24. Randvillkor för konvektion av modellen.

I structural input definierades randvillkor för fixeringen av modellen. Det bestämdes fyra randvillkor totalt. Dessa randvillkor definierades som `user_defined_constraint`, vilket innebär att användaren själv väljer i vilket led en yta ska låsas. Det görs antingen i x-, y- eller z-riktning. Första och andra randvillkoret bestämdes för det mittersta M10-skruvhålet på kopparskenan samt för det genomgående hålet mellan kopparskenan och kabelskon. Toppytan av hålet för strömskenan låstes i z-riktning och det genomgående hålet mellan kopparskenan och kabelskon låstes i x- och y-riktning. Fastlåsnigen symboliserar en skruv som sitter fast inspänd, där skruvskaften utgörs av första randvillkoret och det andra randvillkoret utgörs av gängen som går genom både strömskenan och kabelskon, se Figur 25 och Figur 26 nedan.

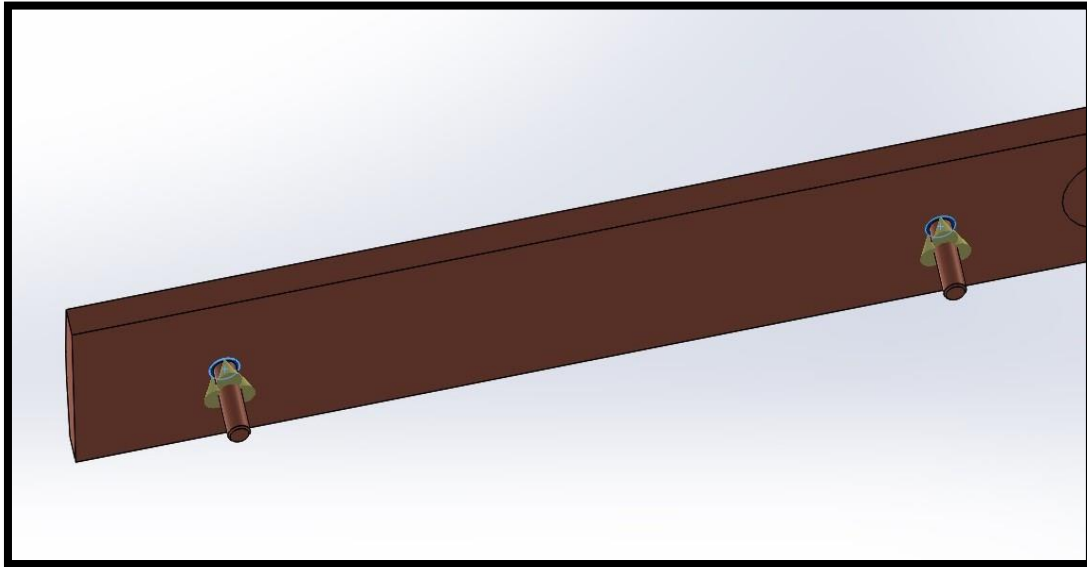


Figur 25. Första randvillkoret för endast kopparskenan.

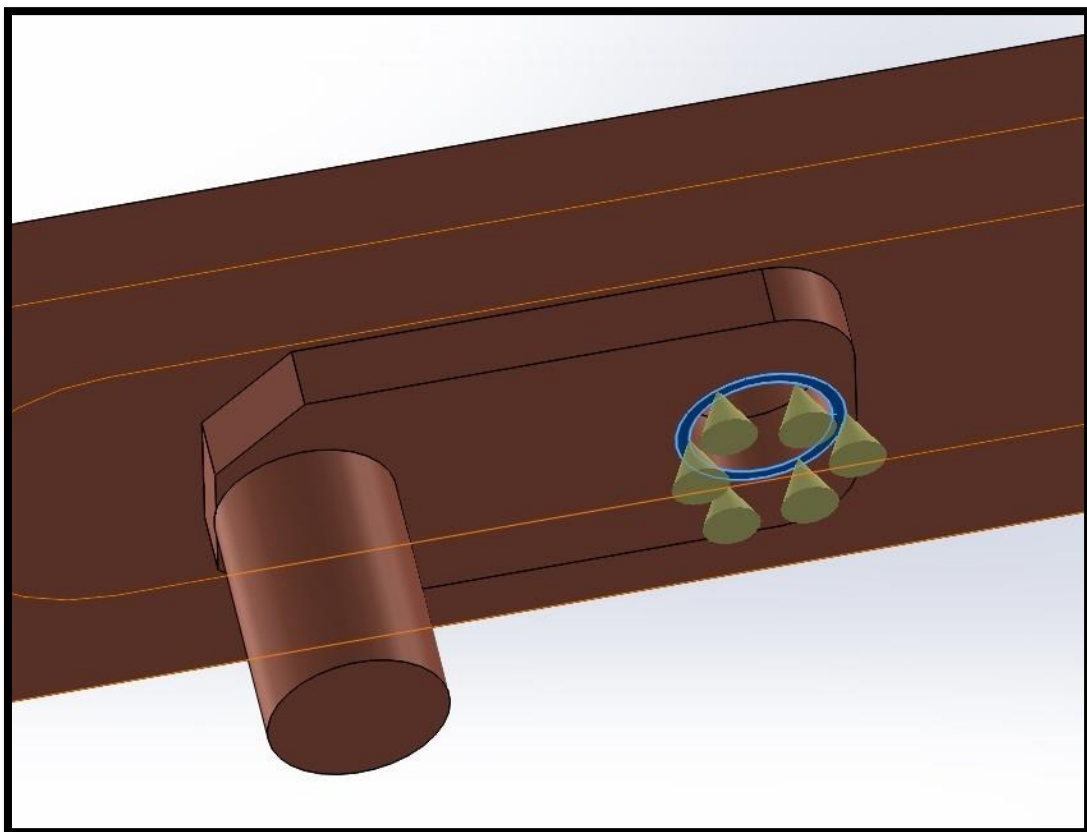


Figur 26. Andra randvillkoret för både kopparskenan och kabelskon.

Tredje randvillkoret definierades för de fyra M6-gängorna som finns fastsvetsade på kopparskenans undersida. Runt om gängornas svetsar skapades fyra plana ytor som symboliserar fyra muttrar som är låsta i z-riktningen och håller upp kopparskenan på plats. Samma sak gjordes för det fjärde randvillkoret. Där skapades en plan yta runt om kabelskons skruvhål som symboliserar en mutter tillhörande M10-skruven som går genom kopparskenan och kabelskon, se Figur 27 och Figur 28.

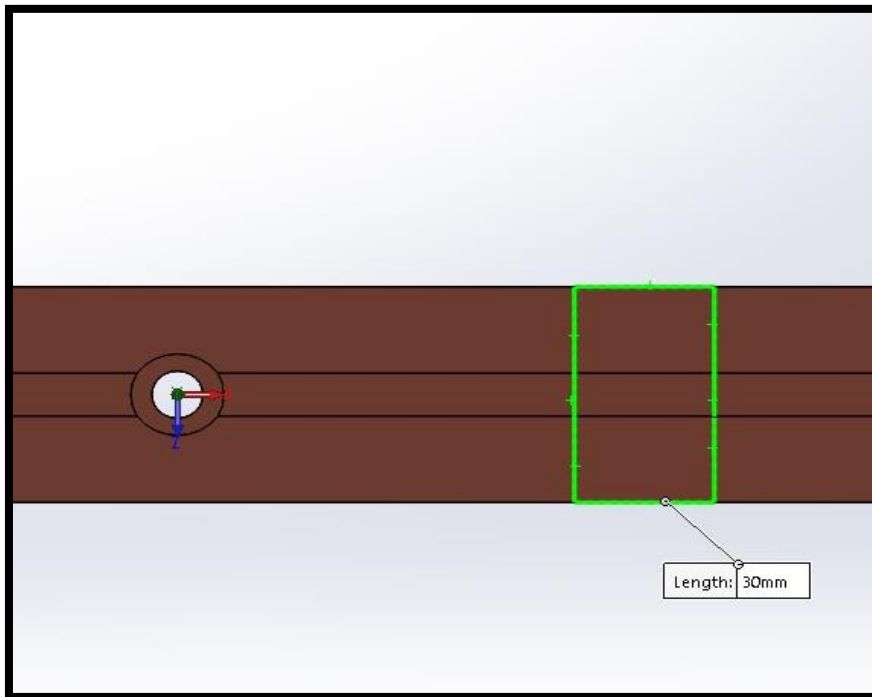


Figur 27. Tredje randvillkoret för fyra muttrar som är förbundna med M6-gängorna.



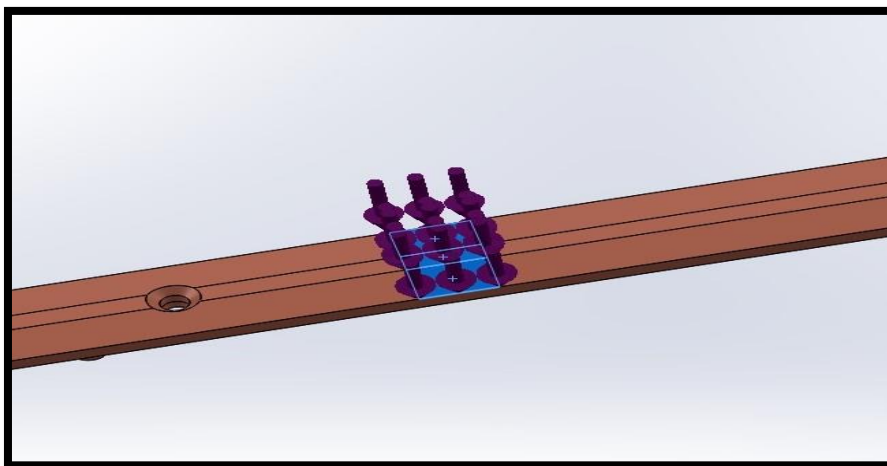
Figur 28. Fjärde randvillkoret för muttern som håller kabelskon och kopparskenan på plats.

I loads_definierades randvillkor för lastfallet och egenvikten för komponenterna. För lastfallet behövde en yta skapas för att möjliggöra placeringen av lasten på kopparskenan, då det inte gick att placera lasten i endast en punkt. En begränsad yta på 1500 mm^2 skapades. Denna yta är tänkt att symbolisera ytan på tryckskenan som kommer i kontakt med strömskenan vid laddning, se Figur 29.



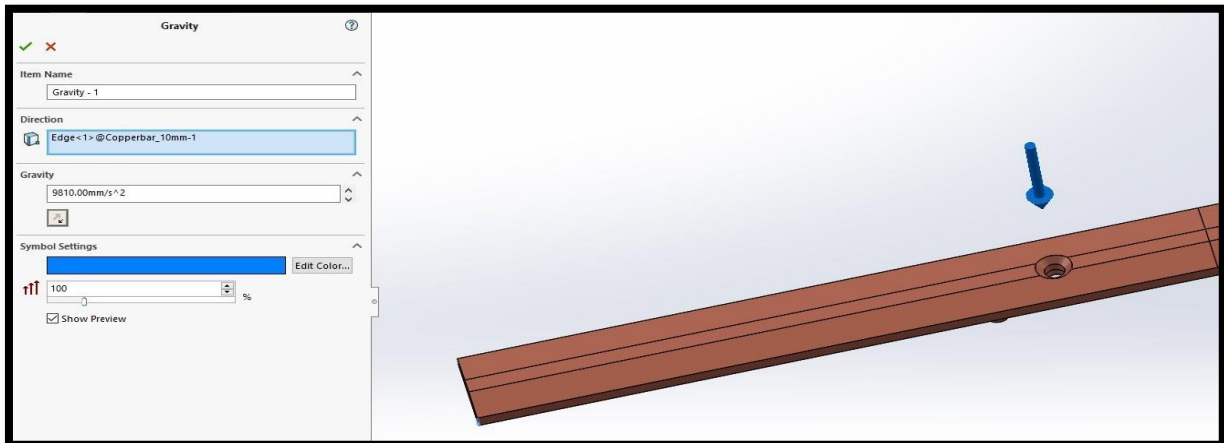
Figur 29. Areal där lasten påförs vid laddning.

Lasten definierades som en jämnt utbredd last över den nya ytan med en total kraft på 150 N, se Figur 30. Den utbredda lasten multiplicerat med arean den verkar på ger den totala punktlast som applicerades [27].



Figur 30. Randvillkor för lasten.

Egenvikten för komponenterna definierades genom att införa tyngdacceleration för modellen. Tyngdaccelerationen sattes till $9,81 \text{ m/s}^2$, se Figur 31.



Figur 31. Randvillkor för egenvikten av komponenterna.

När alla randvillkor definierats för modellen så skapades slutligen det finita elementnätet (meshen). Totalt har sex olika elementnät använts för modellen i den magnetostatiska analysen. För varje finita elementnät som skapades förfinades rutnätet, d.v.s. elementstorleken minskades och antalet element ökade för modellen. I regel gäller för FEM-modellering ju fler element modellen delas upp i desto större noggrannhet. Resultaten bedöms oftast utifrån konvergens, d.v.s. att de numeriska värdena som räknas fram uppnår ett relativt fixt värde oberoende av elementstorleken och antalet element för modellen [15, 16]. När resultaten väl konvergerade erhöles en korrekt FEM-modell. Utgångsgeometrin för aluminiumskenan var densamma som för dagens kopparskena. Därefter itererades flera modeller fram tills att en modell med likvärdig prestanda som för dagens kopparskena erhöles. Det gjordes på enklast sätt genom att begränsa geometriförändringen endast till höjden, då strömskenan är begränsad av stödskenan till bredden och längden. Det resulterade i att en aluminiumskena med en höjd på 13,5 mm blev den modell som motsvarade dagens kopparskena med minsta möjliga geometriförändring. Efter detta gjordes en "transient magnetic analysis". Denna analys bygger på samma teori som den föregående men skiljer sig på så vis att här testas modellen som en funktion av tiden och att endast thermal analysis går att genomföra för denna typ av studie. Beräkningarna som utförs i denna analys härleddes också till Maxwells ekvationer [16] och är följande:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (5)$$

Ekvation 5 ovan beskriver att om magnetiska fält varierar över tid kommer de i sin tur att generera elektriska fält [13]. Samma randvillkor som för magnetostatisk analys sammanställdes här med undantaget för randvillkoren för structural input och loads, då det inte går att utföra en structural analysis för denna typ av analys. Eftersom denna analys är tidsberoende behöver begynnelsestemperaturen för omgivningen, lösningstid och tidsökning anges [16, 17]. Begynnelsestemperaturen sattes till 300 K, lösningstiden ställdes in till en timme, tidsökningen sattes till sex minuter och strömmen definierades som likström 1000 A.

4. Resultat

Detta kapitel presenterar resultaten av FEM-modellen. Vidare sammanställs en tabell för vikt och kostnad för respektive modell.

4.1 Resultat för dagens kopparskena

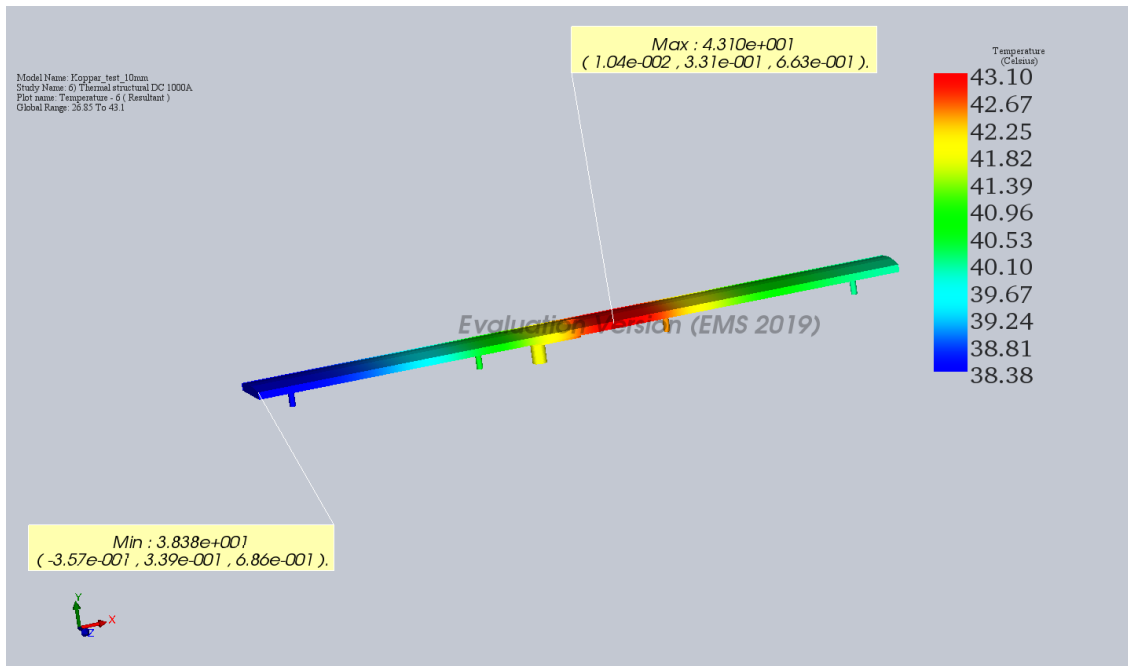
Resultaten för dagens kopparskena presenteras i figurer, där endast det förfinade finita elementnätet kommer illustreras, d.v.s. det finita elementnätet med minsta elementstorlek och med flest antal element, se Tabell 5.

Tabell 5. Värdetabell för samtliga finita elementnät som användes för alla modeller.

Modell	Elementstorlek [mm]	Toleransstorlek [mm]	Antal element	Antal noder
Solidmodell	41,6	0,0416	193 585	33 318
-"	38,4	0,0384	237 458	40 840
-"	35,2	0,0352	294 010	50 507
-"	28,8	0,0288	439 917	75 429
-"	25,6	0,0256	569 962	97 537
-"	22,4	0,0224	780 678	133 402

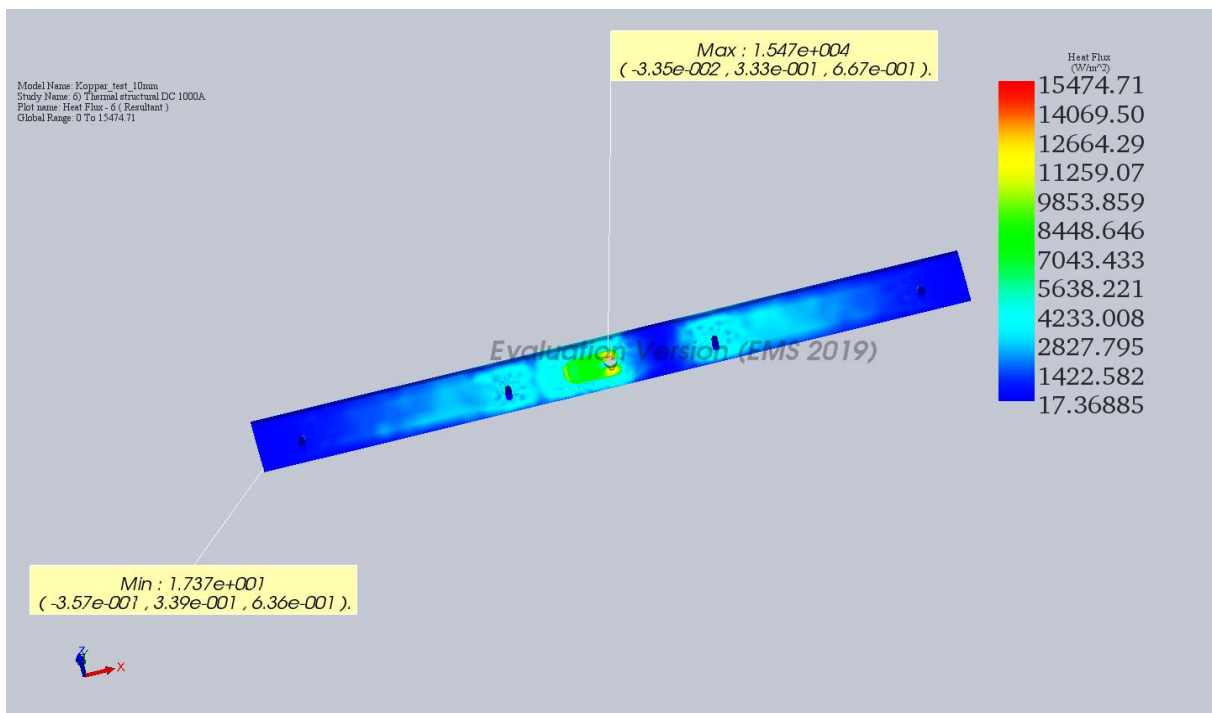
Magnetostatic analysis för kopparskenan:

Resultat i form av temperatur för kopparskenan och kabelskon. Högsta temperaturen för kopparskenan uppgår till 43,1 °C och erhålls i ett område vid M10-skruvhållet av kopparskenans ovansida där tryckkraften påförs, se Figur 32.



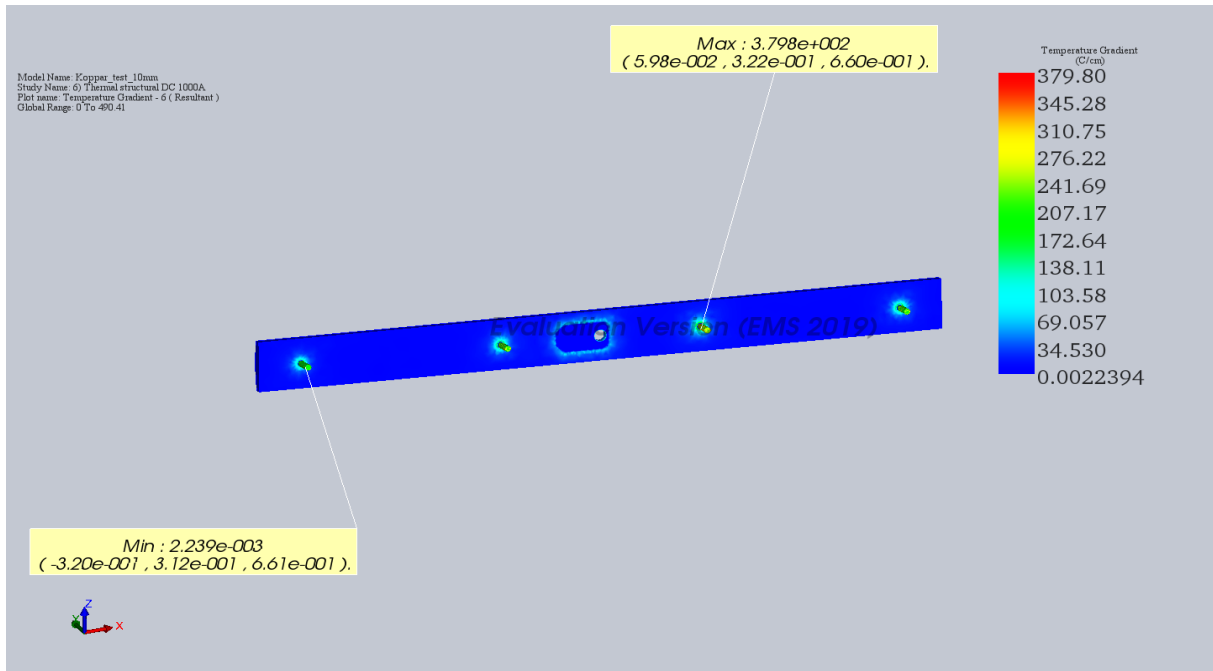
Figur 32. Temperaturkaraktistik för kopparskenan och kabelskon.

Resultat i form av värmeflödestäthet för kopparskenan. Största värmeflödestätheten erhålls vid kopparskenans undersida kring M10-skruvhållet, där kabelskon och kopparskenan sitter ihop. Den största värmeflödestätheten uppgår till cirka 15,47 kW/m², se Figur 33.



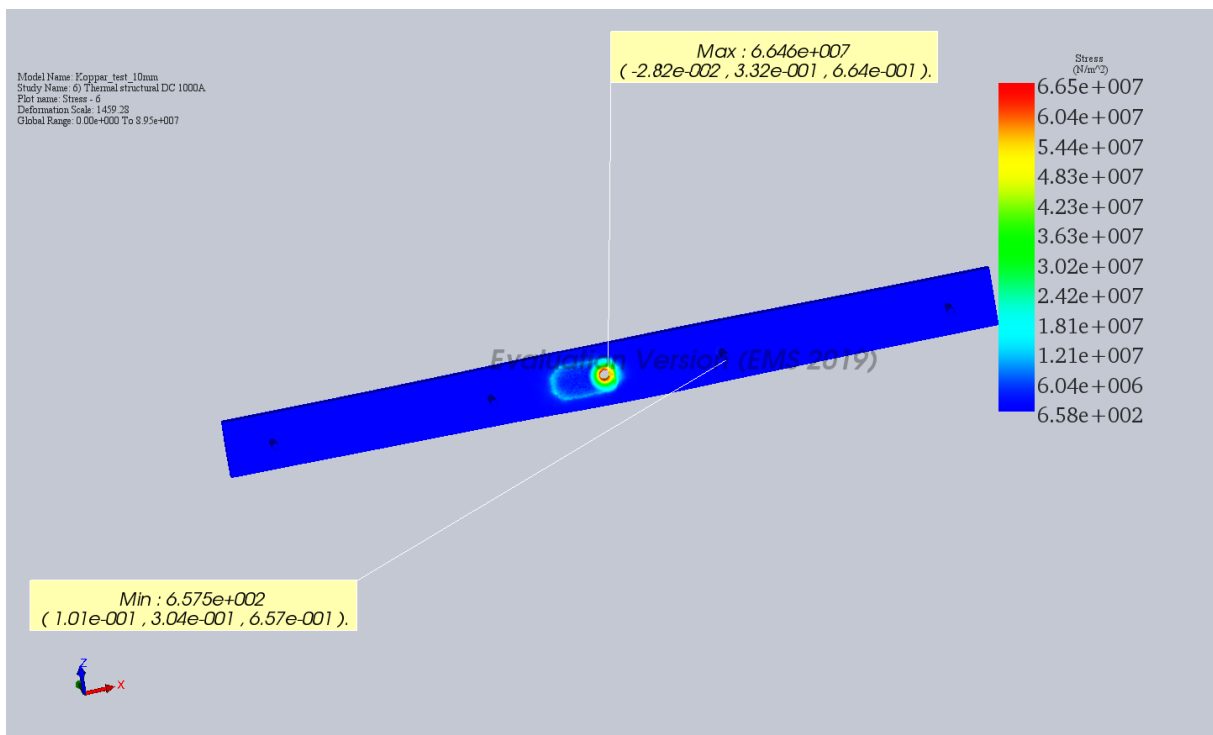
Figur 33. Värmeflödestäthetskaraktistik för kopparskenan.

Resultat i form av temperaturgradient för kopparskenan. Den högsta temperaturgradienten hittas vid koppargängen som ligger precis under det ställe där tryckkraften påförs och där laddningen sker. Den uppgår till 379,8 °C/cm, se Figur 34.



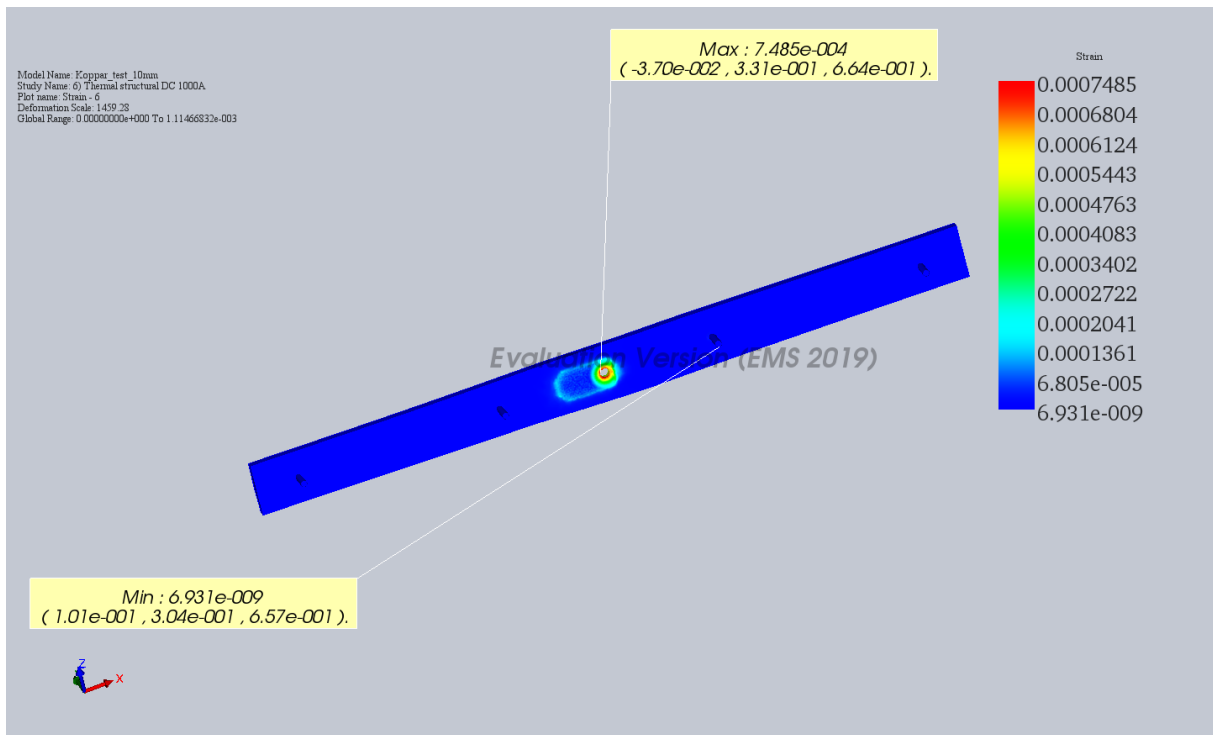
Figur 34. Temperaturgradientkaraktistik för kopparskenan.

Resultat i form av mekanisk spänning för kopparskenan. Största spänningen lokaliseras vid M10-skruvhållet för kopparskenan och uppgår till 66,5 MPa, se Figur 35.



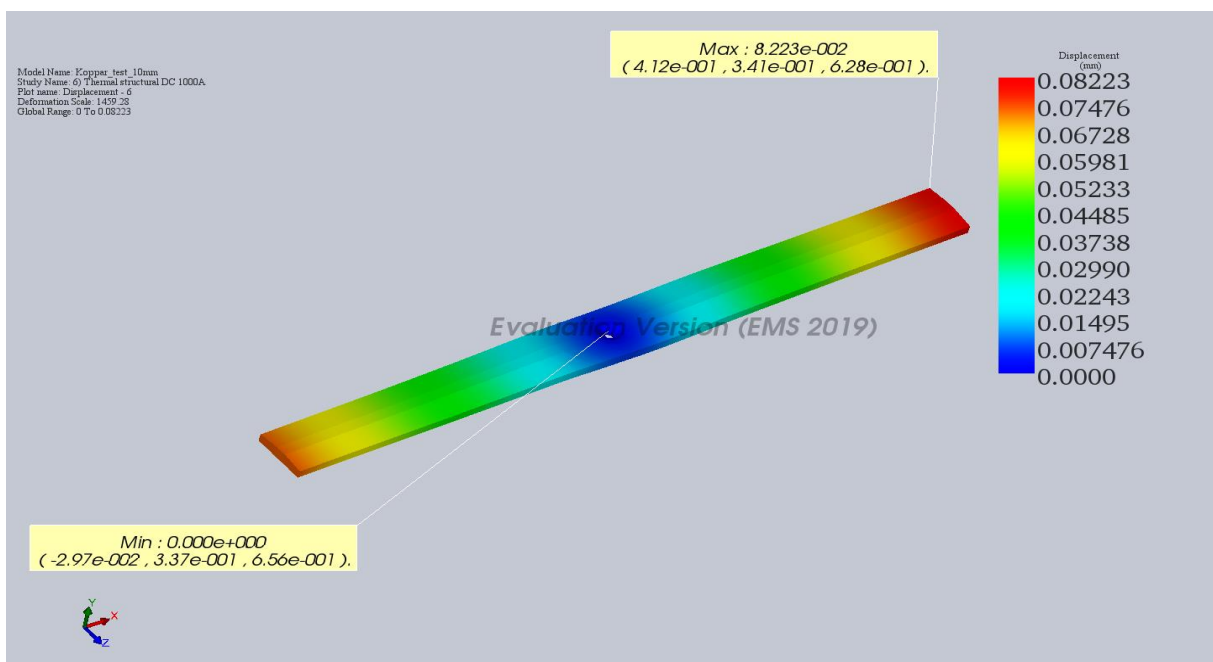
Figur 35. Mekanisk spänningskaraktistik för kopparskenan.

Resultat i form av töjning för kopparskenan. Största töjningen lokaliserar också här vid M10-skruvhålet för kopparskenan och uppgår till 748,5 $\mu\text{m}/\text{m}$, se Figur 36.



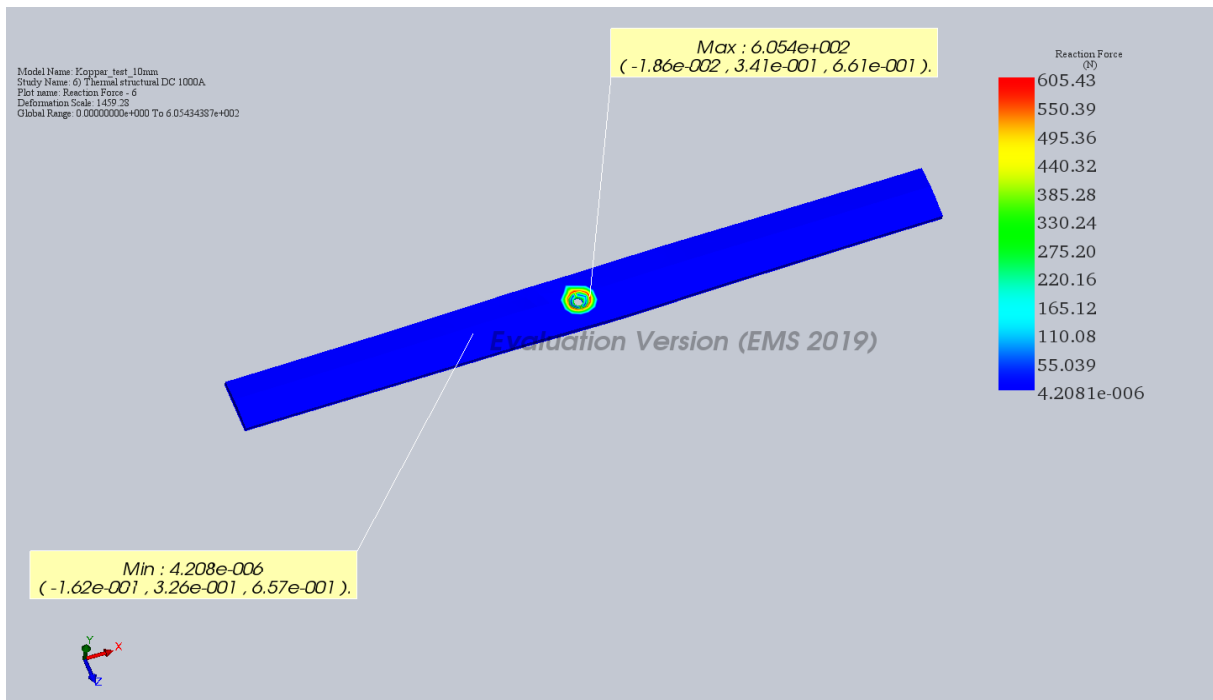
Figur 36. Töjningskaraktistik för kopparskenan.

Resultat i form av längdförändring för kopparskenan. Största längdförändringen av kopparskenan sker längst ut vid ändarna, framförallt vid den högra änden som ligger närmast det ställe där tryckkraften påförs och där laddningen sker. Den största längdförändringen av kopparskenan uppgår till 82,23 μm , se Figur 37.



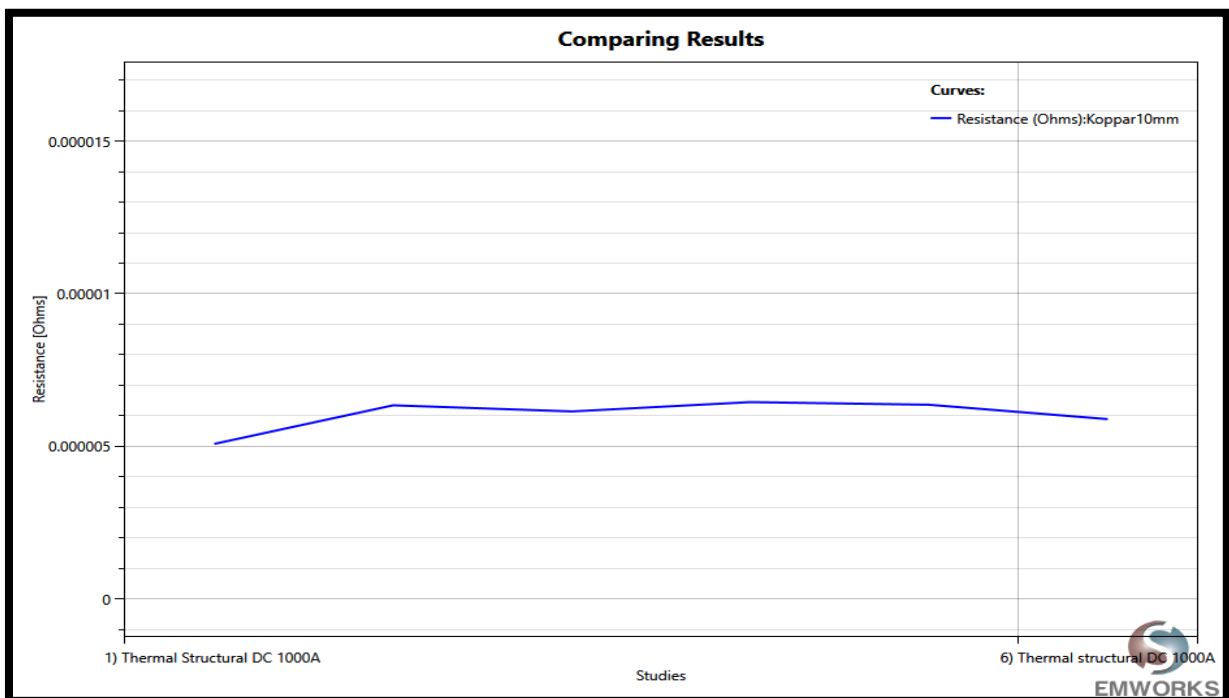
Figur 37. Längdförändringskaraktistik för kopparskenan.

Resultat i form av reaktionskraft för kopparskenan. Som i fallet gällande största töjningen och största spänningen för kopparskenan, så sker den största reaktionskraften vid M10-skruvhållet. Den uppgår till 605,43 N, se Figur 38.



Figur 38. Reaktionskraftskarakteristik för kopparskenan.

Resultat i form av resistansen hos kopparskenan för alla sex finita elementnät. Resistansen konvergerar ungefär vid 6 μohm (mikro-ohm), se Figur 39.

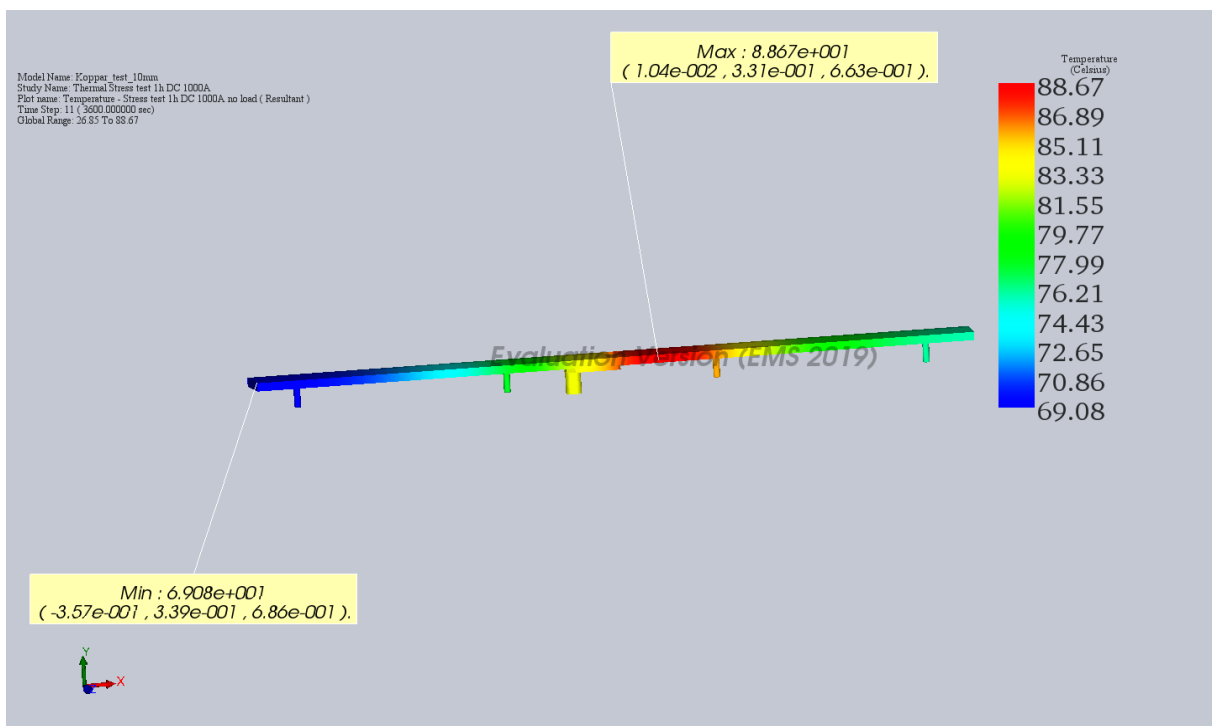


Figur 39. Resistansen hos kopparskenan för samtliga sex finita elementnät som skapades för modellen.

Transient magnetic analysis för kopparskenan:

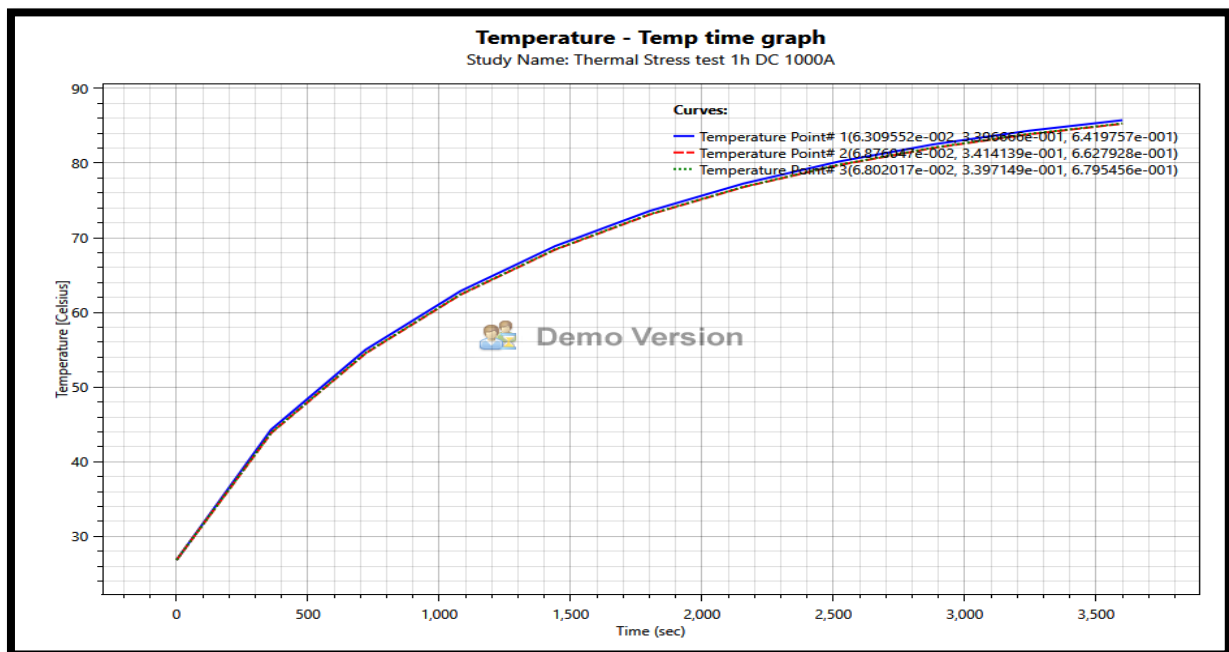
För denna analys varierade resultaten mycket beroende på vilken elementstorlek som valdes på det finita elementnätet och vilken tidsökning som ställdes in för modellen. Det fanns ingen tydlig konvergens mellan de sex olika finita elementnäten för respektive modell. För finita elementnät med elementstorlek på 22,4 mm och 19,2 mm erhöles nästan helt samma resultat med vad som erhöles för det skarpa provet. Snabbast resultat uppnåddes för en mesh med elementstorlek på 22,4 mm och en tidsökning på 3600 sekunder. För en tidsökning mindre än 60 sekunder och högre än 3600 sekunder så erhöles återigen ojämna resultat vid en jämförelse mellan de sex olika finita elementnäten. Därav valdes det finita elementnätet med elementstorlek på 22,4 mm och en tidsökning på 3600 sekunder som inställningslösning för denna typ av analys.

Resultat i form av temperatur för kopparskenan och kabelskon. Högsta temperaturen för kopparskenan uppgår till 88,67 °C och högsta temperaturen för kabelskon uppgår ungefär till (83,33–86,89) °C, se Figur 40. Dessa maxtemperaturer mäter likvärdigt med maxtemperaturerna som erhöles för det skarpa provet vid ungefär samma område, se Figur 13 och Tabell 3 ovan.

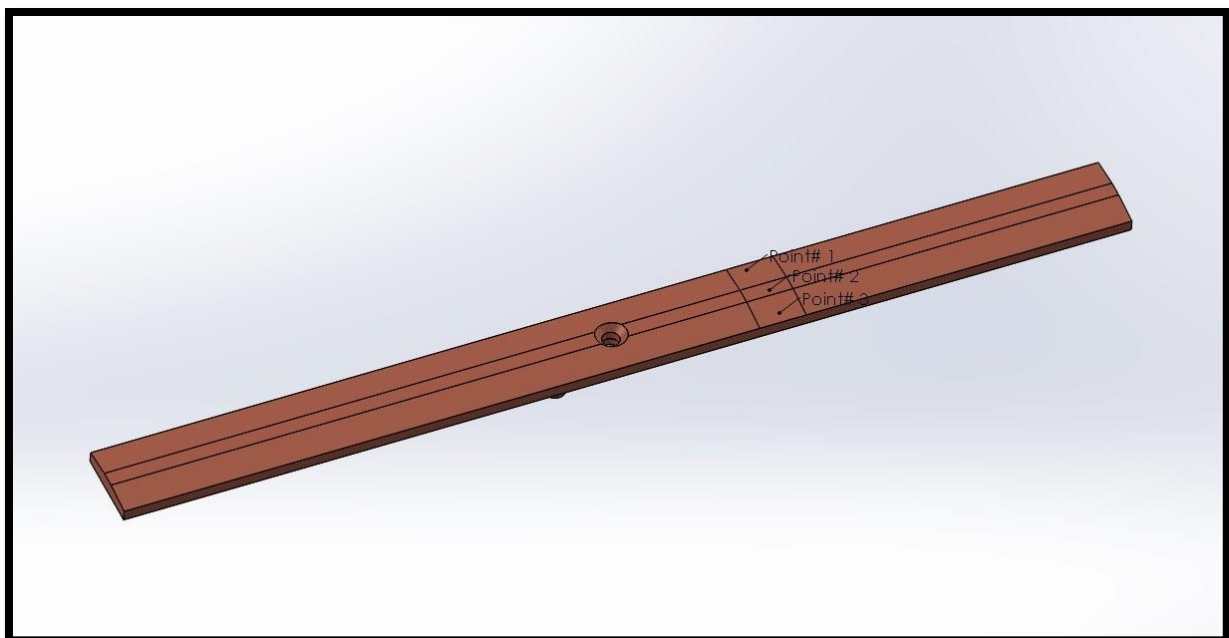


Figur 40. Temperaturkaraktistik för kopparskenan och kabelskon under 1h DC 1000A.

Resultat i form av temperaturen som en funktion av tiden. I Figur 41 visas en graf på hur temperaturen varierar över tiden för tre punkter som har valts på den begränsade ytan där laddningen sker, se Figur 42.

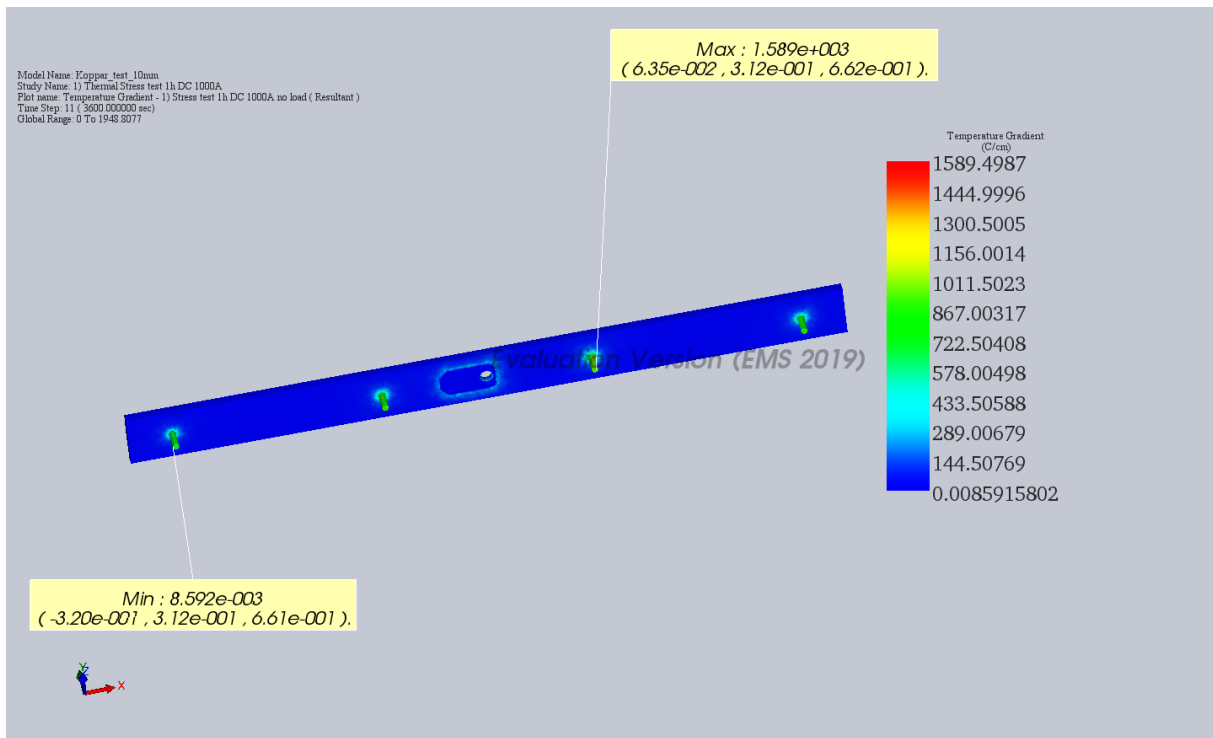


Figur 41. Graf på hur temperaturen varierar över tiden för de tre valda punkterna på kopparskenan.



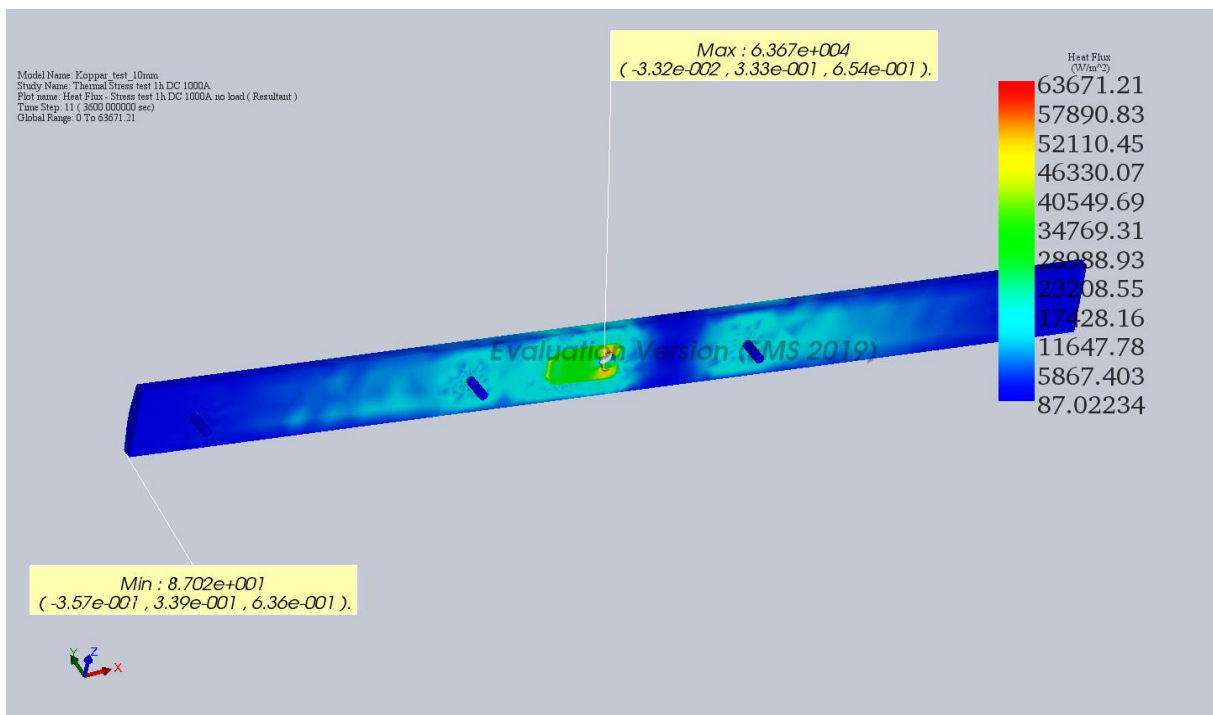
Figur 42. Figur på var de tre punkterna valdes på kopparskenan.

Resultat i form av temperaturgradient för kopparskenan. Högsta temperaturgradienten uppgår till cirka 1589,5 °C/cm och lokaliserar sig vid koppargången som ligger precis under det område där laddningen sker, se Figur 43.



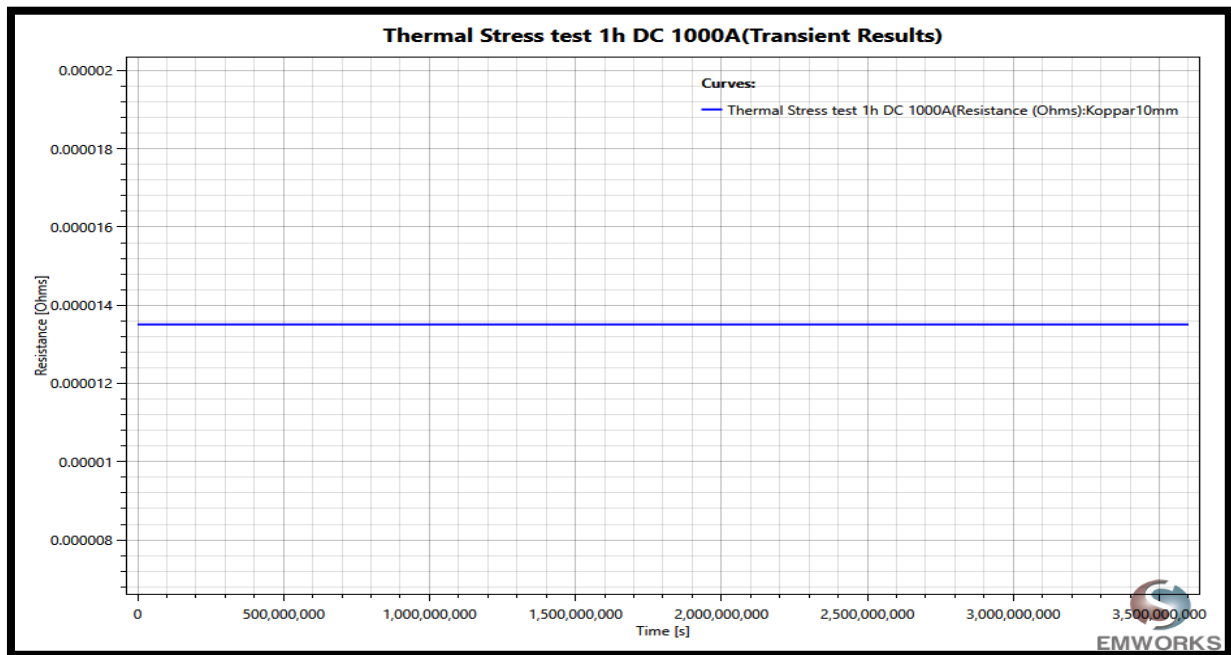
Figur 43. Temperaturgradientkaraktistik för kopparskenan under 1h DC 1000A.

Resultat i form av värmeflödestäthet för kopparskenan. Största värmeflödestätheten erhålls vid kopparskenans undersida kring M10-skruvhållet. Den största värmeflödestätheten uppgår till cirka 63,67 kW/m², se Figur 44.



Figur 44. Värmeflödestäthetskaraktistik för kopparskenan under 1h DC 1000A.

Resultat i form av resistansen hos kopparskenan för en mesh med elementstorlek på 22,4 mm. Resistansen uppgår till 13,6 μohm (mikro-ohm), se Figur 45.



Figur 45. Resistansen hos kopparskenan för en mesh med elementstorlek på 22,4mm.

4.2 Resultat för aluminiumskenan med samma mått som för dagens kopparskena

Resultaten för aluminiumskenan med samma mått som för dagens kopparskena presenteras precis på samma sätt som det gjordes för kopparskenan innan. Däremot kommer det inte ges någon beskrivning av var samtliga storheter lokaliseras eftersom de sker på exakt samma ställen som det gjorde för kopparskenan.

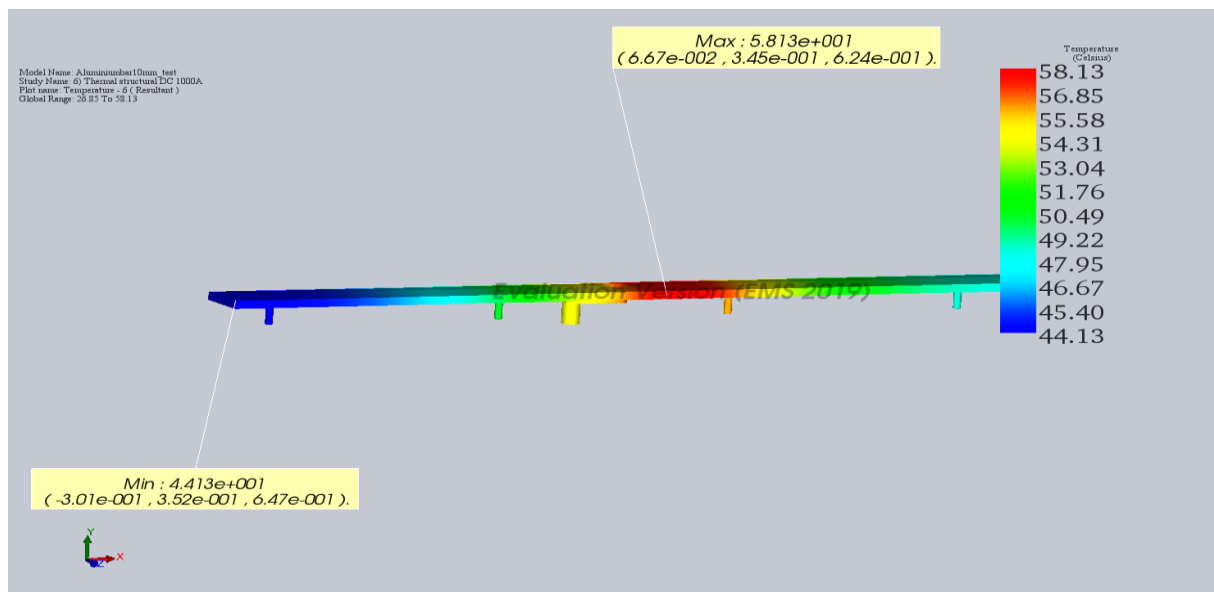
Materialtabell för aluminiumskenan:

Tabell 6. Materialegenskaper för strömskenan med aluminiumlegeringen AW6060.

Materialdata		
Egenskap	Typ	Värde
Elektrisk konduktivitet	Isotropt	32 000 000 (Mho/m)
Relativ permeabilitet	Isotropt	1
Magnetisering	Icke permanent magnetisering	
Värmeledning	Isotropt	209 (W/m*K)
Elasticitetsmodul	Isotropt	70 GPa
Poissons tal	Isotropt	0.33
Densitet	Isotropt	2700 (Kg/m ³)
Värmeutvidgningskoefficient	Isotropt	2,34e ⁻⁵ (1/K)
Specifik värmekapacitet	Isotropt	898 (J/Kg*k)
Sträckgräns	Isotropt	120 MPa
Draggräns	Isotropt	160 MPa
Kompressionsgräns	Isotropt	200 MPa

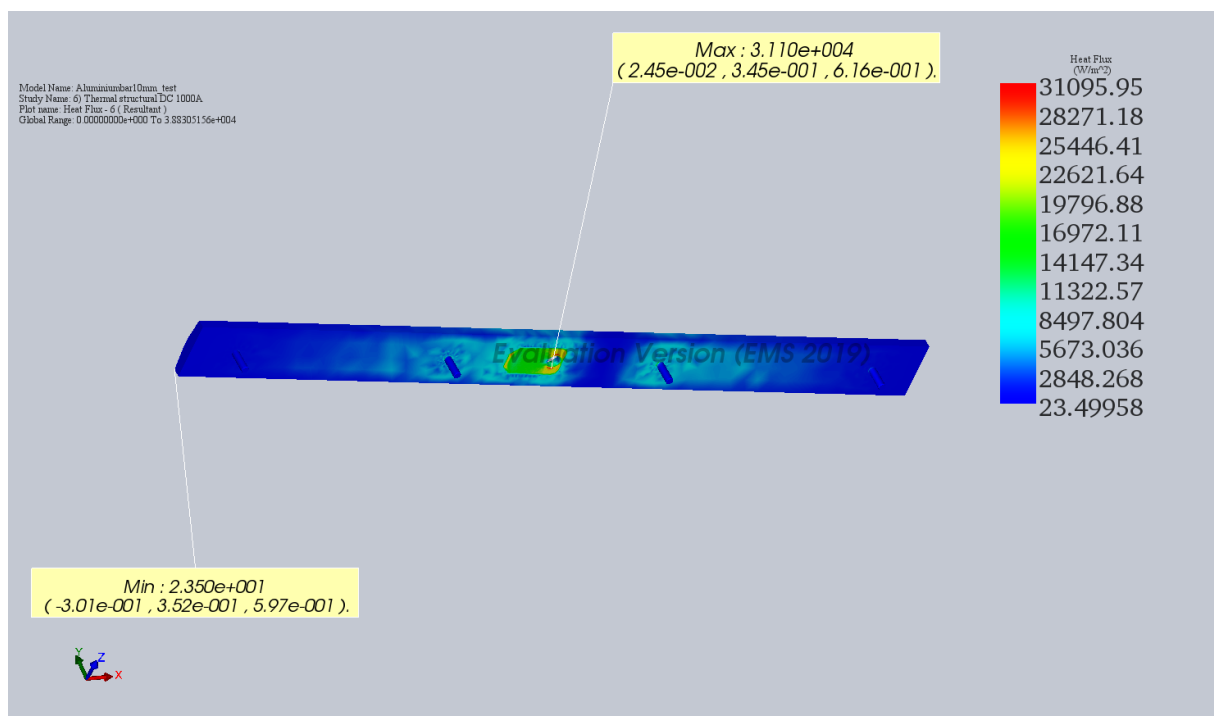
Magnetostatic analysis för aluminiumskenan med höjd på 10 mm:

Resultat i form av temperatur för aluminiumskenan och kabelskon. Högsta temperaturen uppgår till 58,13 °C, se Figur 46.



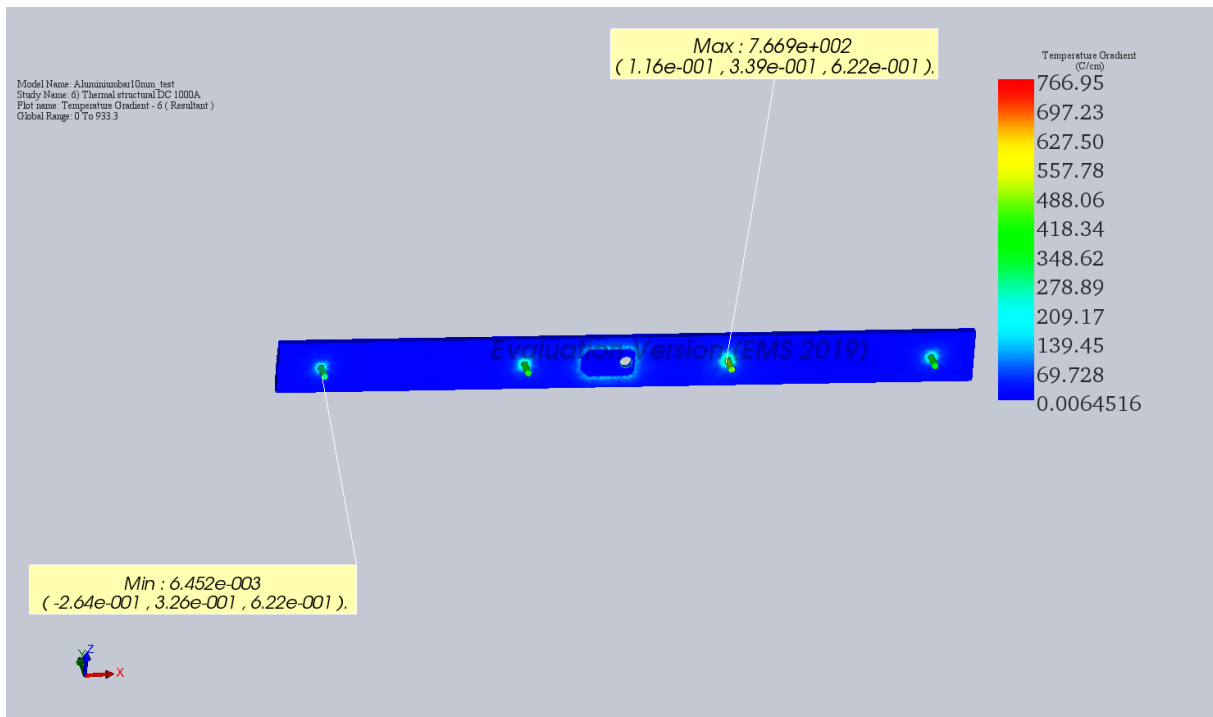
Figur 46. Temperaturkaraktäristik för aluminiumskenan och kabelskon.

Resultat i form av värmevärdetäthet för aluminiumskenan. Största värmevärdetätheten uppgår till 31,1 kW/m², se Figur 47.



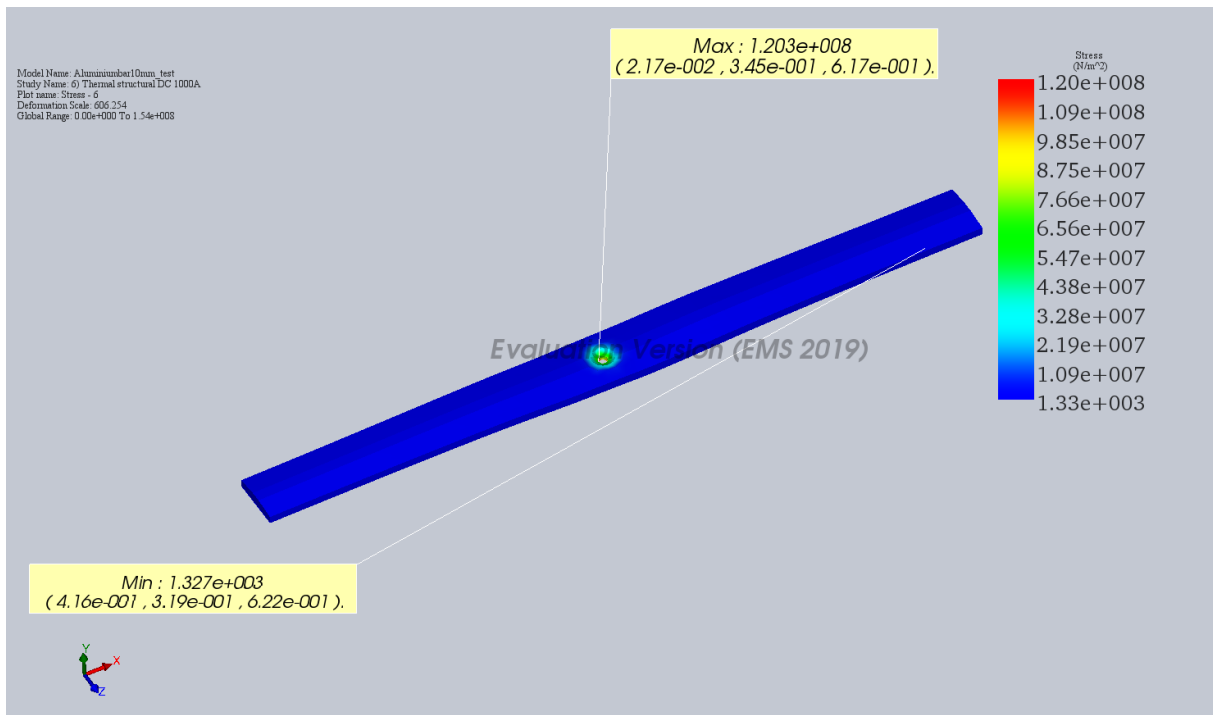
Figur 47. Värmevärdetäthetskaraktäristik för aluminiumskenan.

Resultat i form av temperaturgradient för aluminiumskenan. Högsta temperaturgradienten uppgår till 766,95 °C/cm, se Figur 48.



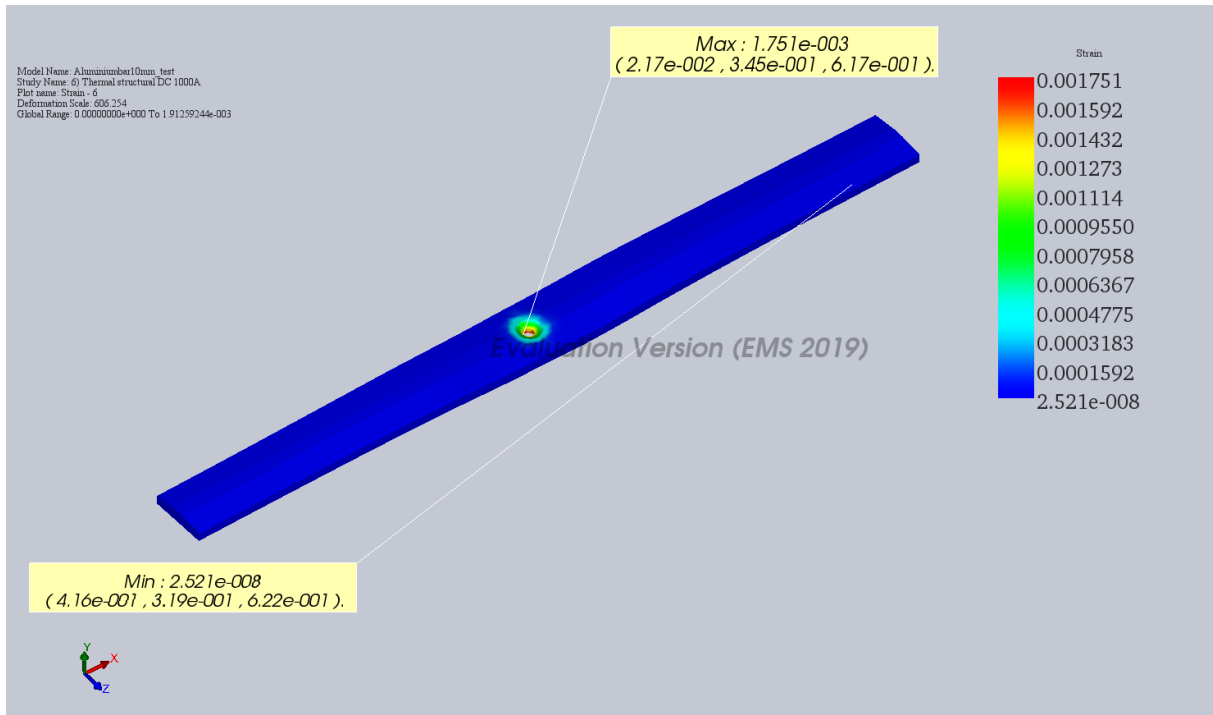
Figur 48. Temperaturgradientkaraktistik för aluminiumskenan.

Resultat i form av mekanisk spänning för aluminiumskenan. Största spänningen uppgår till 120 MPa vilket motsvarar sträckgränsen för materialet, se Tabell 6 ovan. Detta är något man helst vill undvika sätt ur ett konstruktionsperspektiv, då konstruktionen löper stor risk att deformeras där den största spänningen inträffar, se Figur 49.



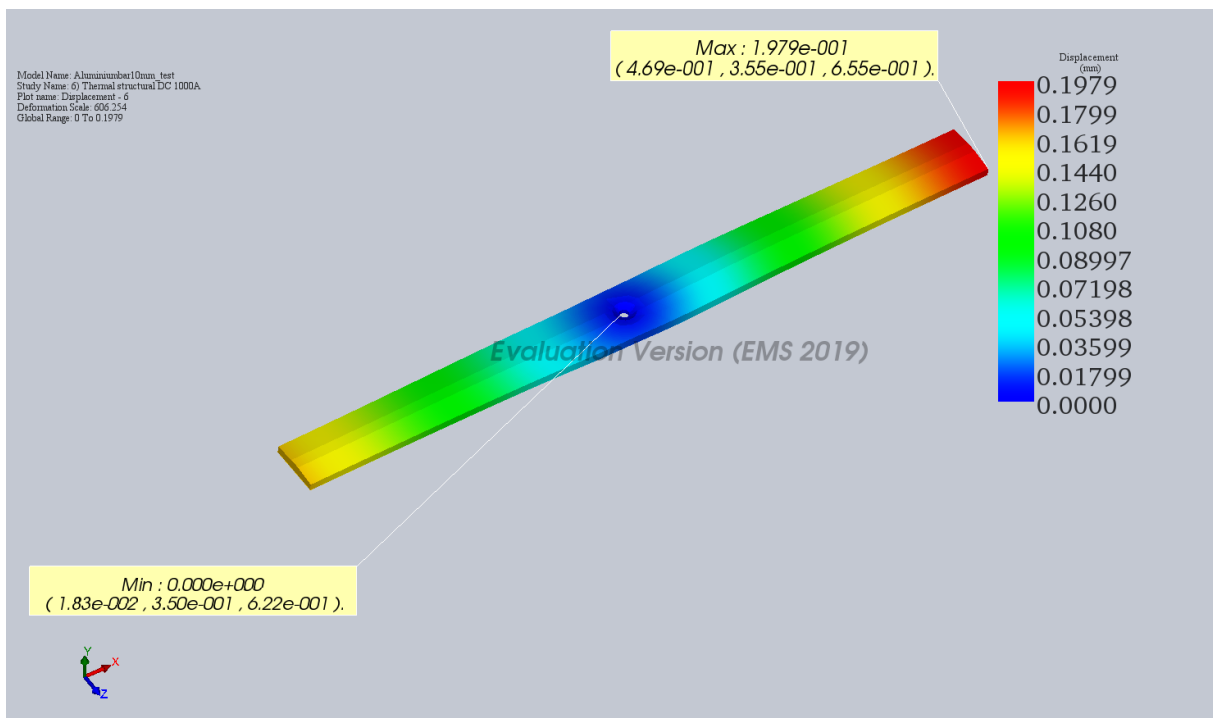
Figur 49. Mekanisk spänningskaraktistik för aluminiumskenan.

Resultat i form av töjning för aluminiumskenan. Största töjningen uppgår till 1751 $\mu\text{m}/\text{m}$, se Figur 50.



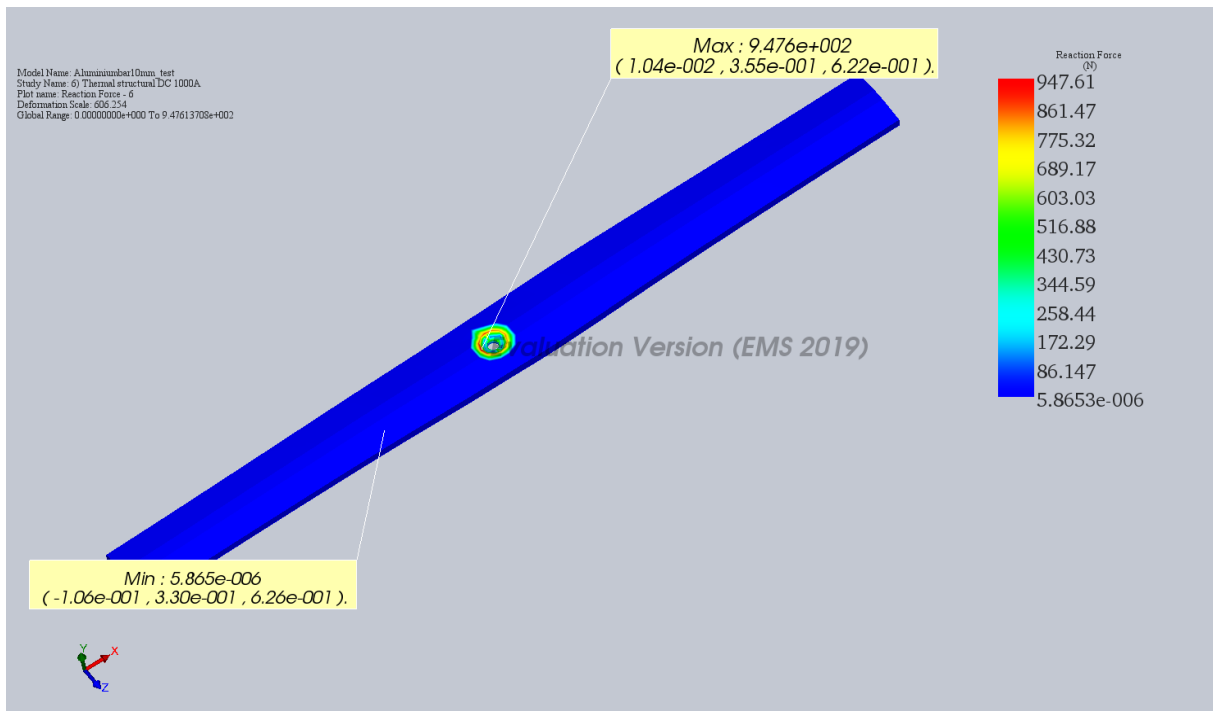
Figur 50. Töjningskaraktäristik för aluminiumskenan.

Resultat i form av längdförändring för aluminiumskenan. Största längdförändringen uppgår till 197,9 μm , se Figur 51.



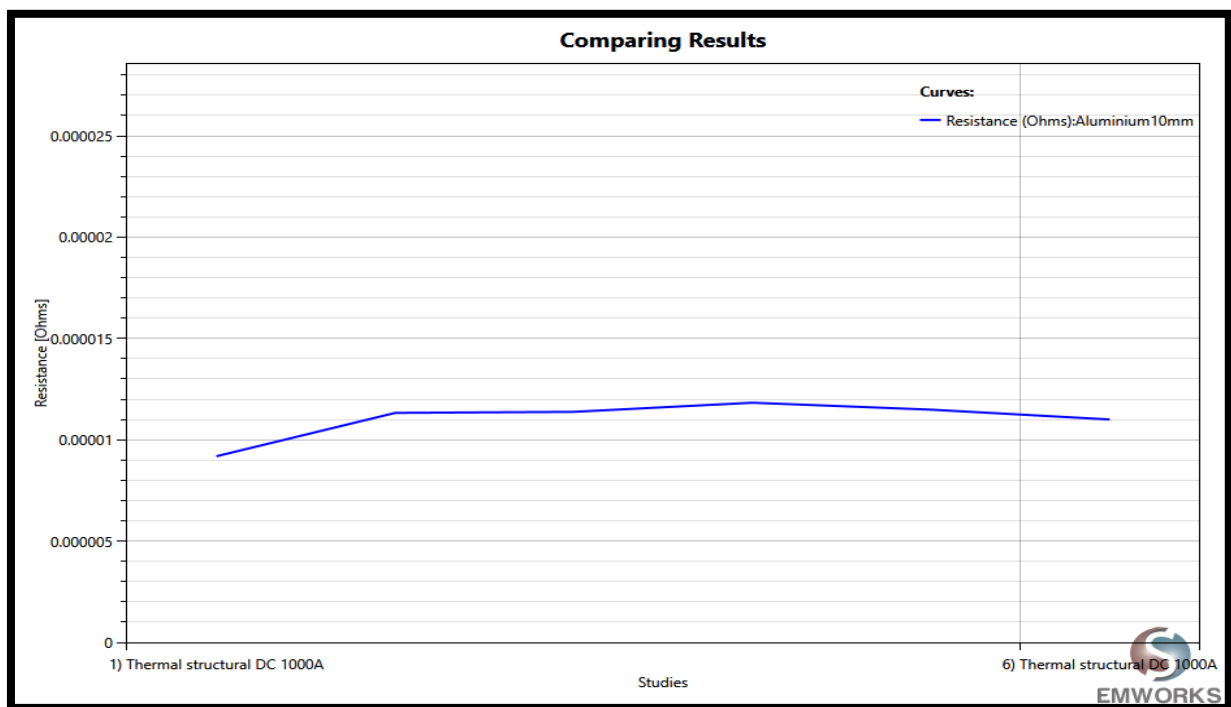
Figur 51. Längdförändringskaraktäristik för aluminiumskenan.

Resultat i form av reaktionskraft för aluminiumskenan. Största reaktionskraften uppgår till 947,61 N, se Figur 52.



Figur 52. Reaktionskraftskarakteristik för aluminiumskenan.

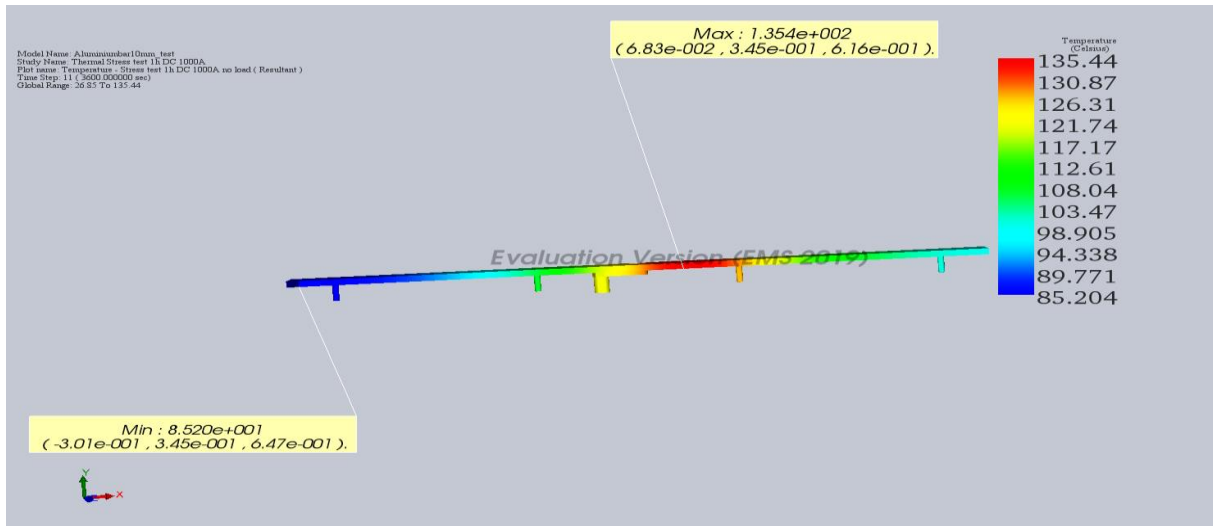
Resultat i form av resistansen hos kopparskenan för alla sex finita elementnät. Resistansen konvergerar ungefär vid 11 µohm (mikro-ohm), se Figur 53.



Figur 53. Resistansen hos aluminiumskenan för samtliga sex finita elementnät som skapades för modellen.

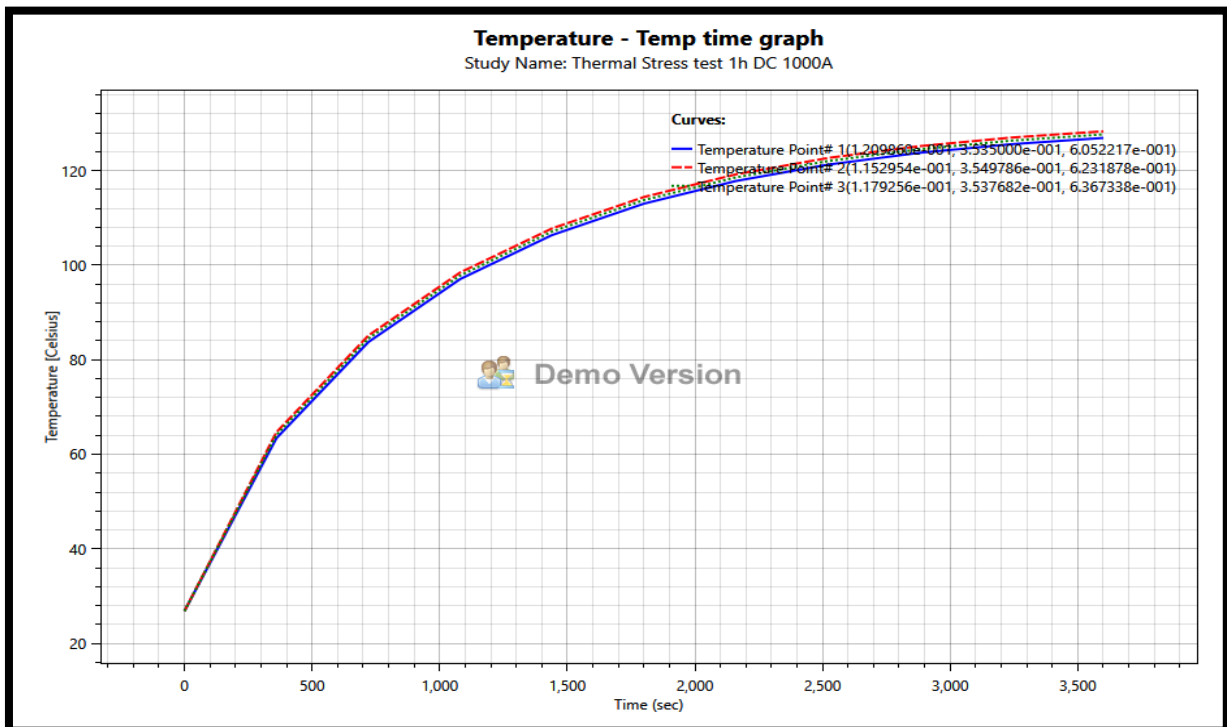
Transient magnetic analysis för aluminiumskenan med höjd på 10 mm:

Resultat i form av temperatur för aluminiumskenan och kabelskon. Högsta temperaturen för kopparskenan uppgår till 135,44 °C och högsta temperaturen för kabelskon uppgår ungefär till (121,74–126,31) °C, se Figur 54. Dessa temperaturer hamnar högt över temperaturerna som erhöles för kopparskenan, särskilt högt ligger den för aluminiumskenan där temperaturen hamnar över den tillåtna gränsen för aluminium där krypfenomenen börjar göra sig gällande, se kapitel 2.2.1 ovan igen.

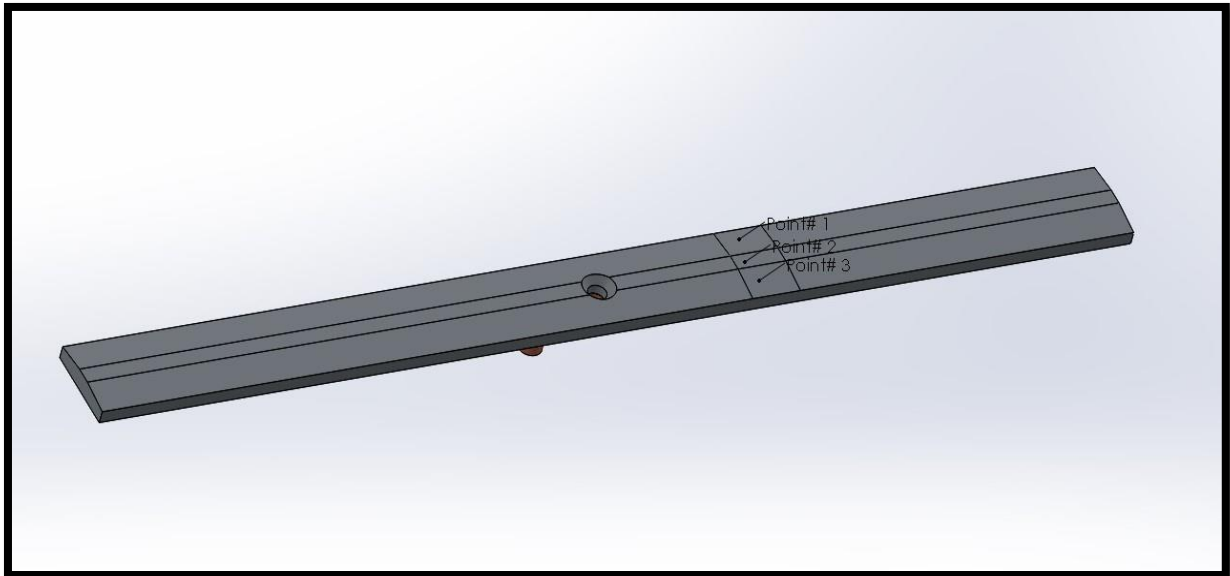


Figur 54. Temperaturkaraktäristik för aluminiumskenan och kabelskon under 1h DC 1000A.

Resultat i form av temperaturen för aluminiumskenan som en funktion av tiden. I Figur 55 visas en graf på hur temperaturen varierar över tiden för tre punkter som har valts på den begränsade ytan där laddningen sker, se Figur 56 nedan.

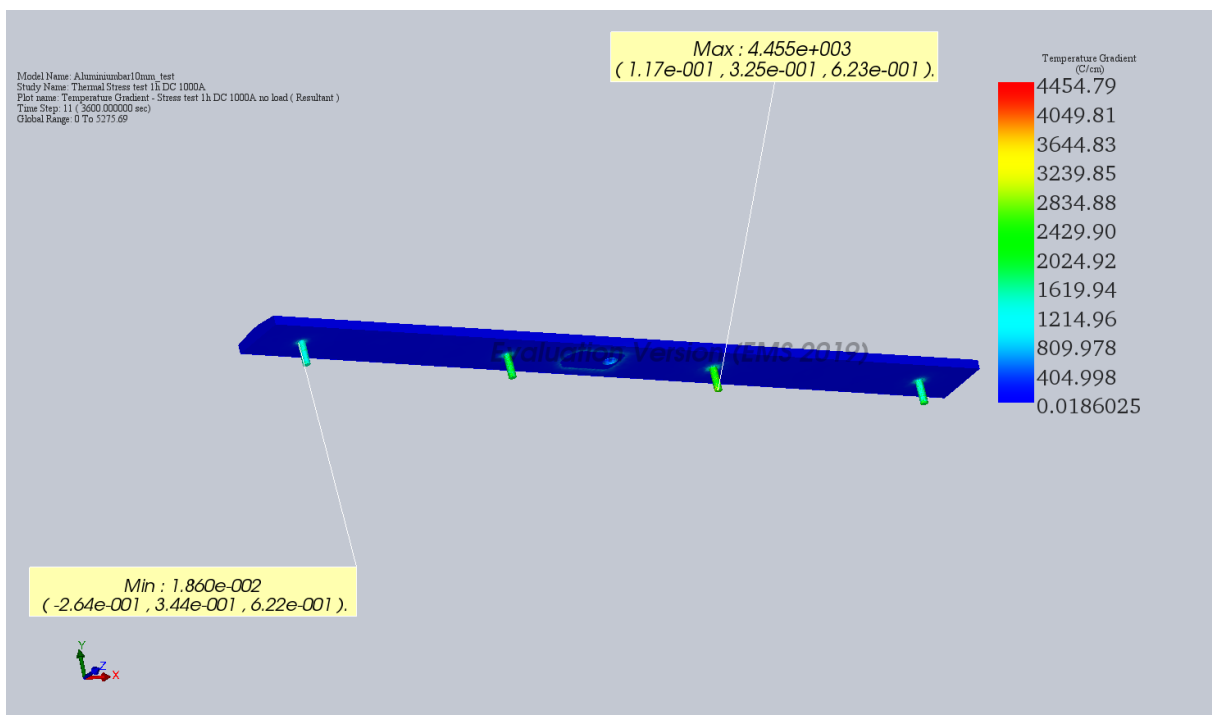


Figur 55. Graf på hur temperaturen varierar över tiden för de tre valda punkterna på aluminiumskenan.



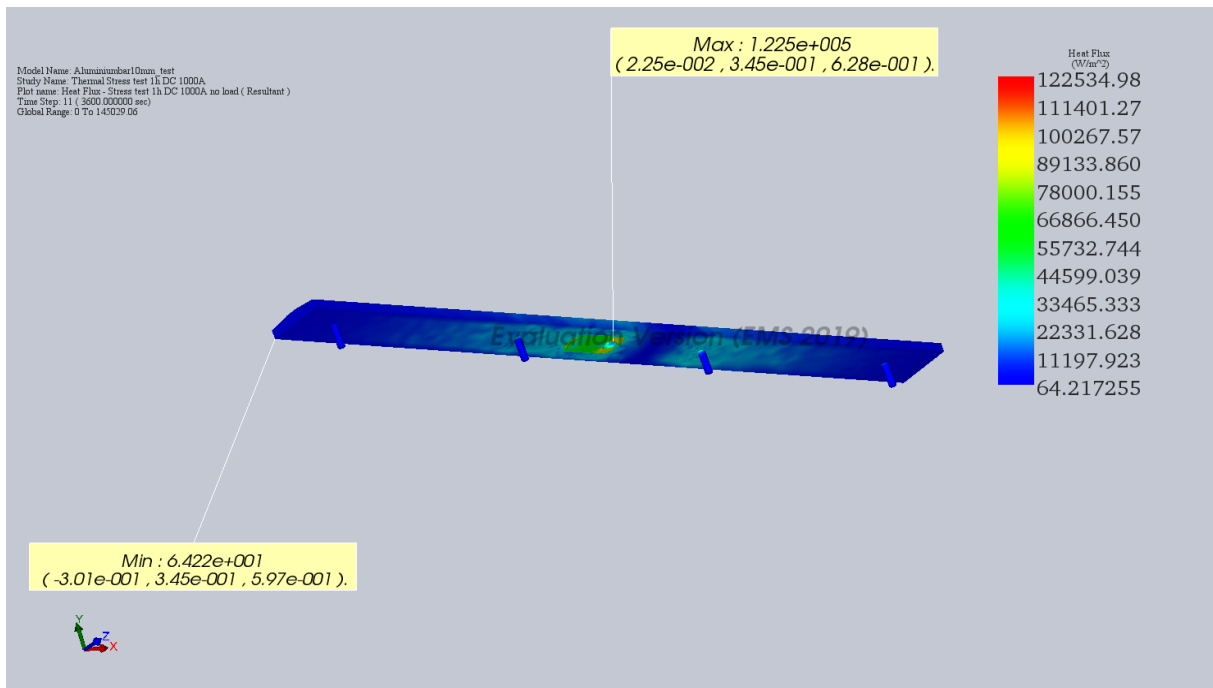
Figur 56. Figur på var de tre punkterna valdes på aluminiumskenan.

Resultat i form av temperaturgradient för aluminiumskenan. Högsta temperaturgradienten uppgår till cirka 4454,8 °C/cm, se Figur 57.



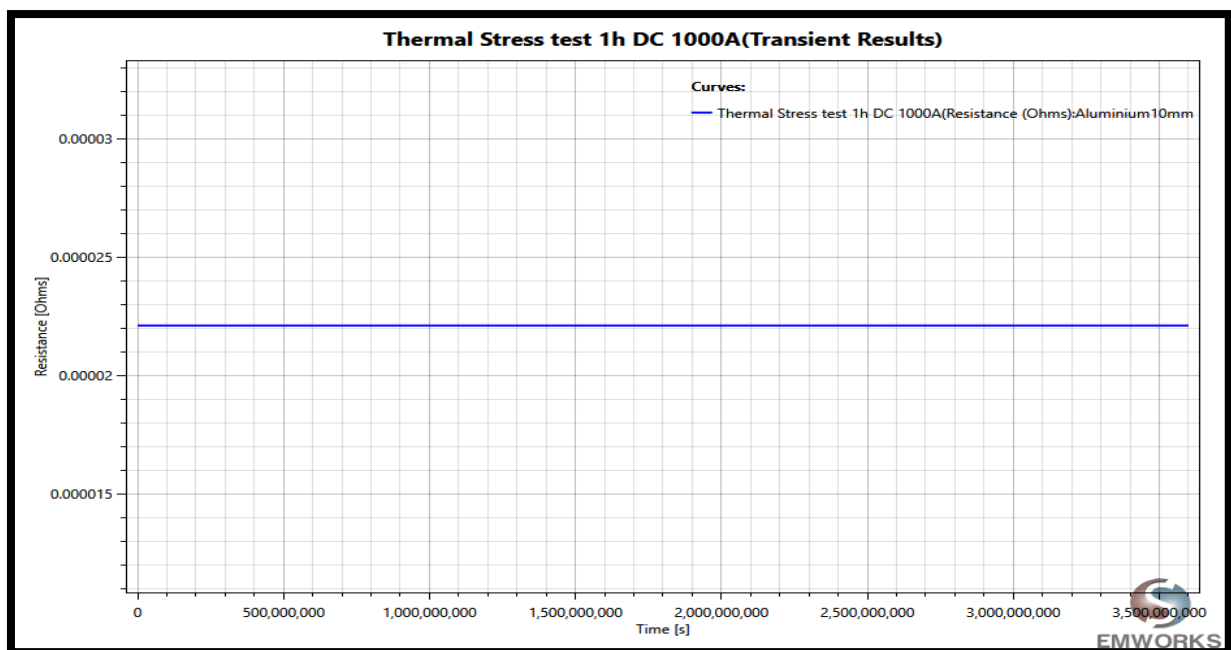
Figur 57. Temperaturgradientkaraktistik för aluminiumskenan under 1h DC 1000A.

Resultat i form av värmeledningstäthet för aluminiumskenan. Största värmeledningstätheten uppgår till 122.53 kW/m², se Figur 58.



Figur 58. Värmeledningstäthetskaraktäristik för aluminiumskenan under 1h DC 1000A.

Resultat i form av resistansen hos aluminiumskenan för en mesh med elementstorlek på 22,4 mm. Resistansen uppgår till cirka 20,1 µohm (mikro-ohm), se Figur 59.



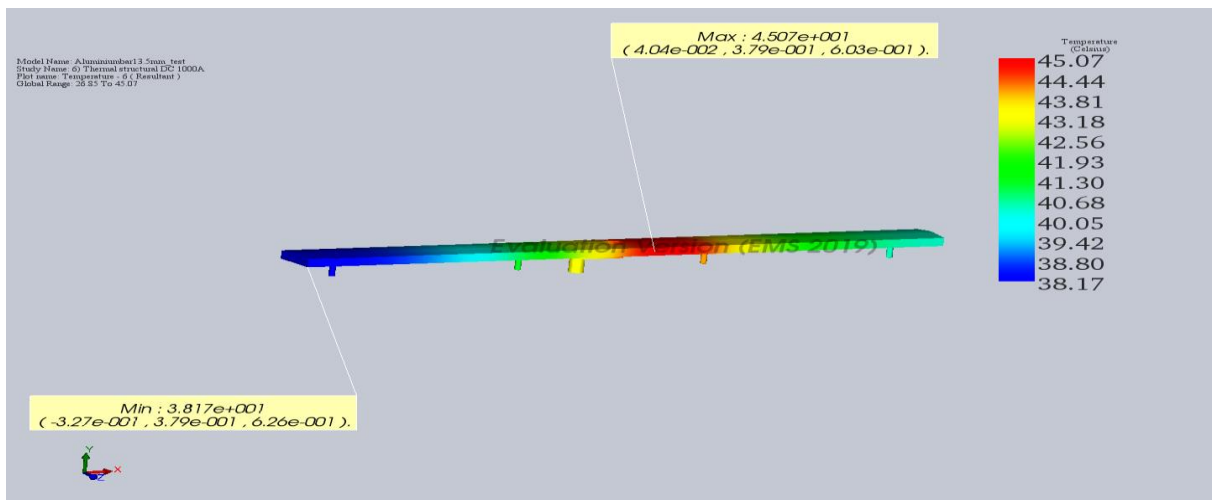
Figur 59. Resistansen hos aluminiumskenan för en mesh med elementstorlek på 22,4 mm.

4.3 Resultat för den valda aluminiumskenan

Resultaten för den valda aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm presenteras på samma sätt som för aluminiumskenan med höjd på 10 mm.

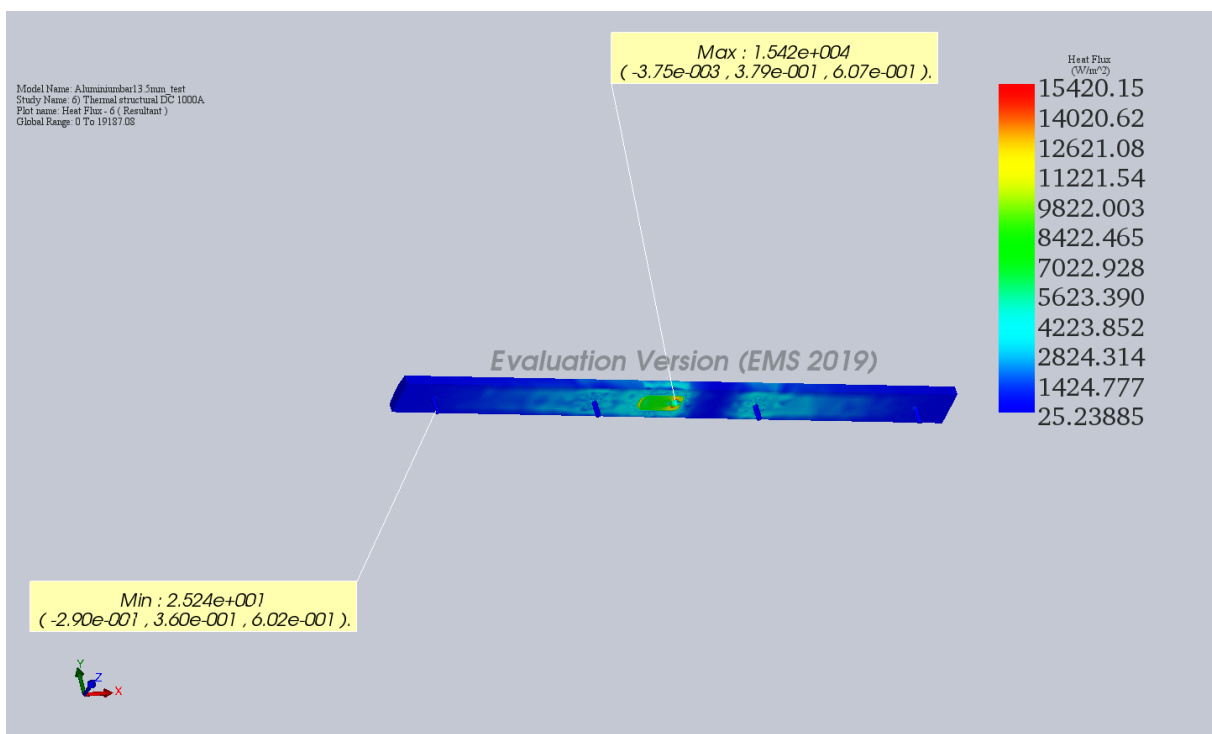
Magnetostatic analysis för aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm:

Resultat i form av temperatur för aluminiumskenan och kabelskon. Högsta temperaturen uppgår till 45,07 °C, se Figur 60.



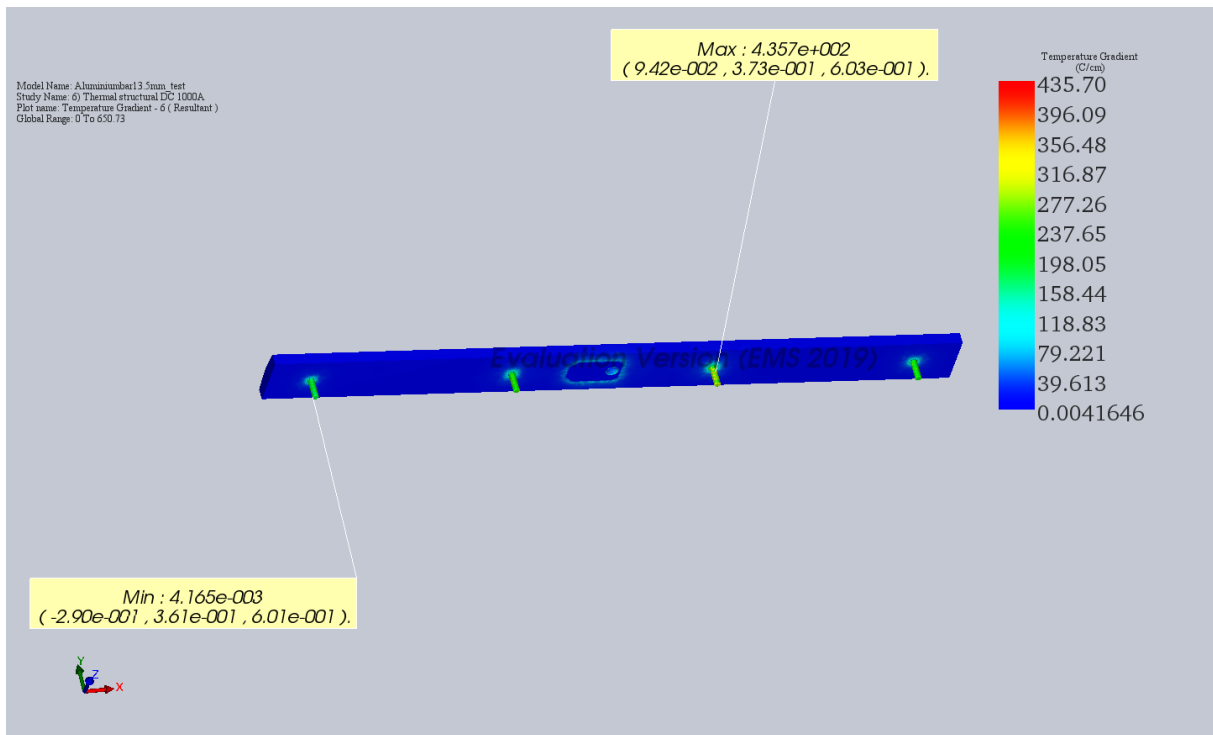
Figur 60. Temperaturkaraktäristik för aluminiumskenan och kabelskon.

Resultat i form av värmeflödestäthet för aluminiumskenan. Största värmeflödestätheten uppgår till 15,42 kW/m², se Figur 61.



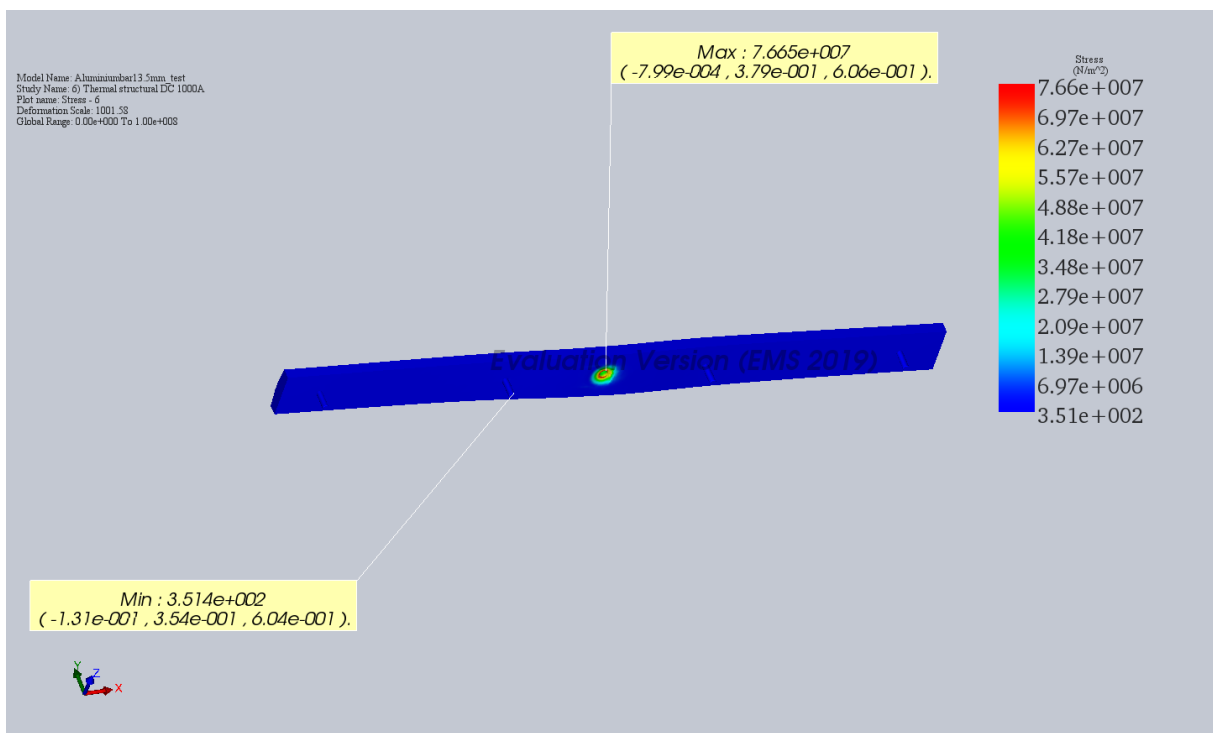
Figur 61. Värmeflödestäthetskaraktäristik för aluminiumskenan.

Resultat i form av temperaturgradient för aluminiumskenan. Högsta temperaturgradienten uppgår till 435,7 °C/cm, se Figur 62.



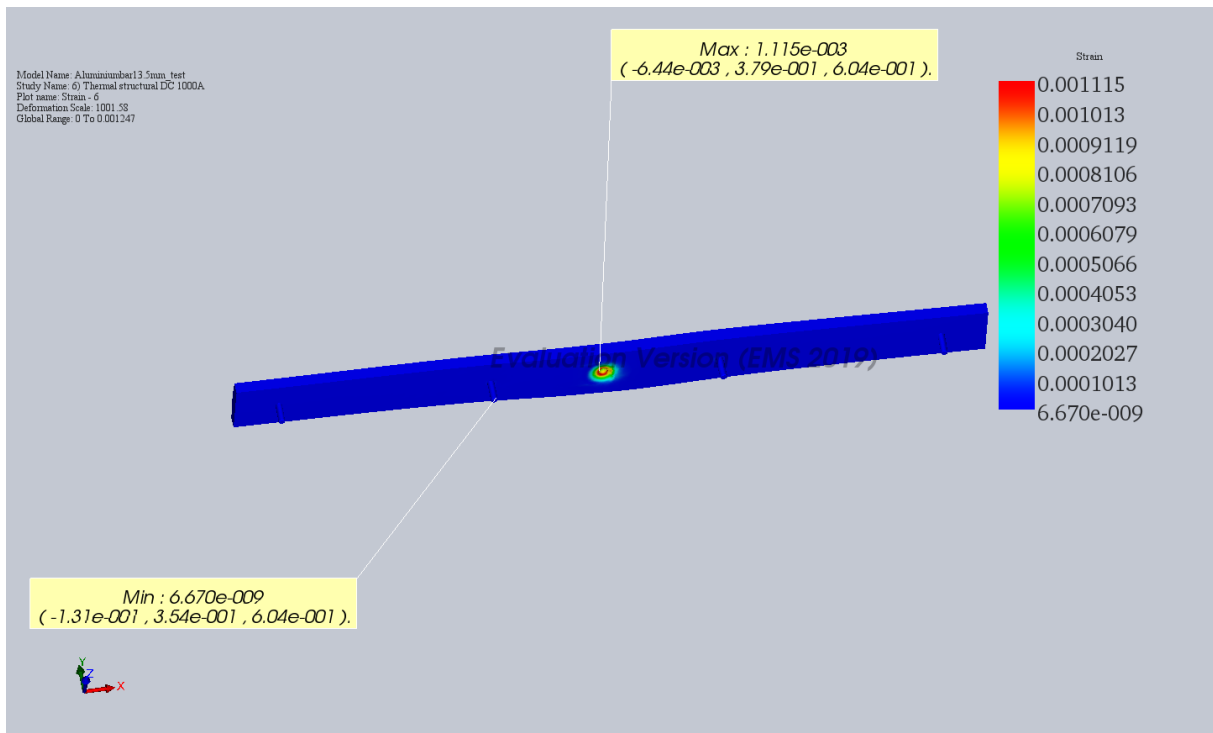
Figur 62. Temperaturgradientkaraktistik för aluminiumskenan.

Resultat i form av mekanisk spänning för aluminiumskenan. Största spänningen uppgår till 76.6 MPa, se Figur 63.



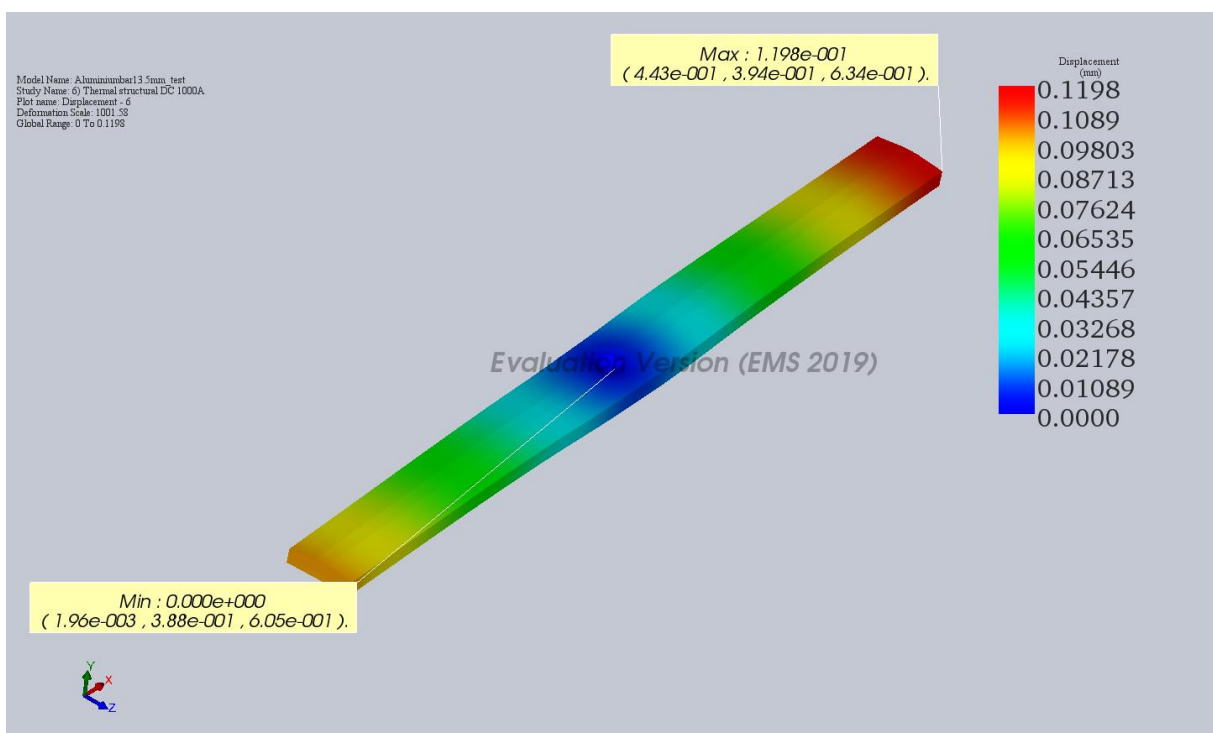
Figur 63. Mekanisk spänningskaraktistik för aluminiumskenan.

Resultat i form av töjning för aluminiumskenan. Största töjningen uppgår till 1115 $\mu\text{m}/\text{m}$, se Figur 64.



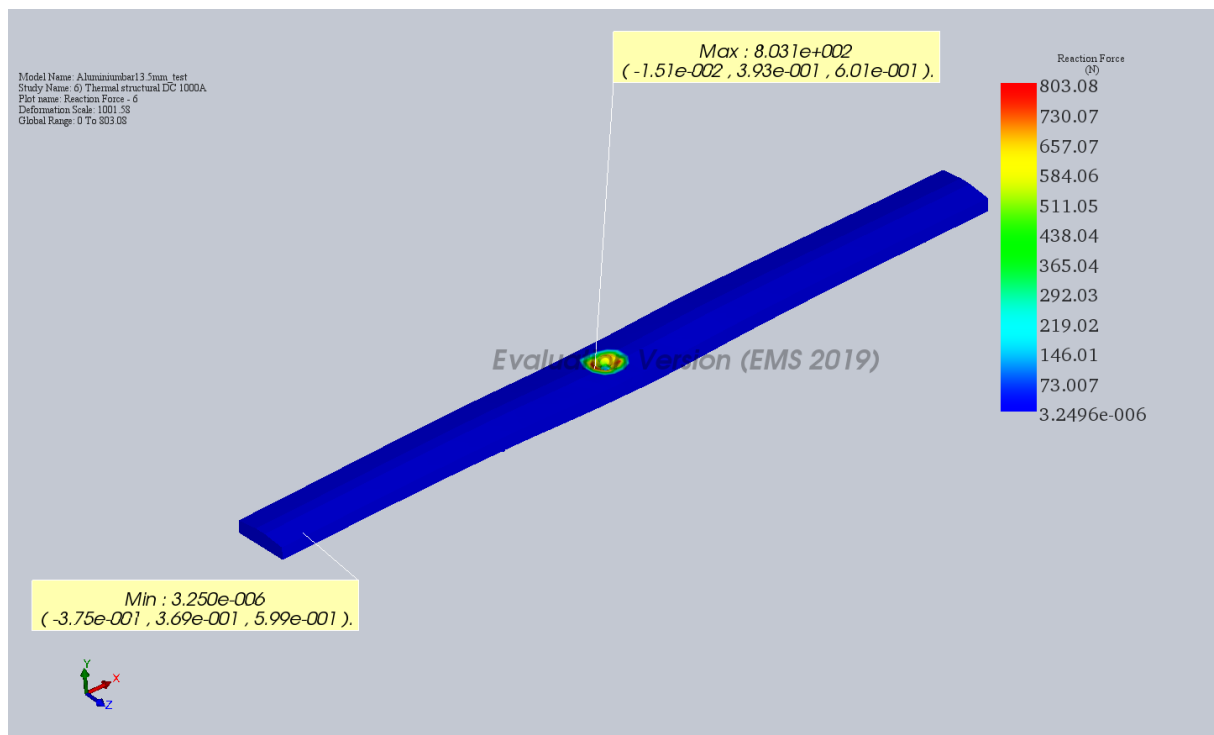
Figur 64. Töjningskaraktäristik för aluminiumskenan.

Resultat i form av längdförändring för aluminiumskenan. Största längdförändringen uppgår till 119,8 μm , se Figur 65.



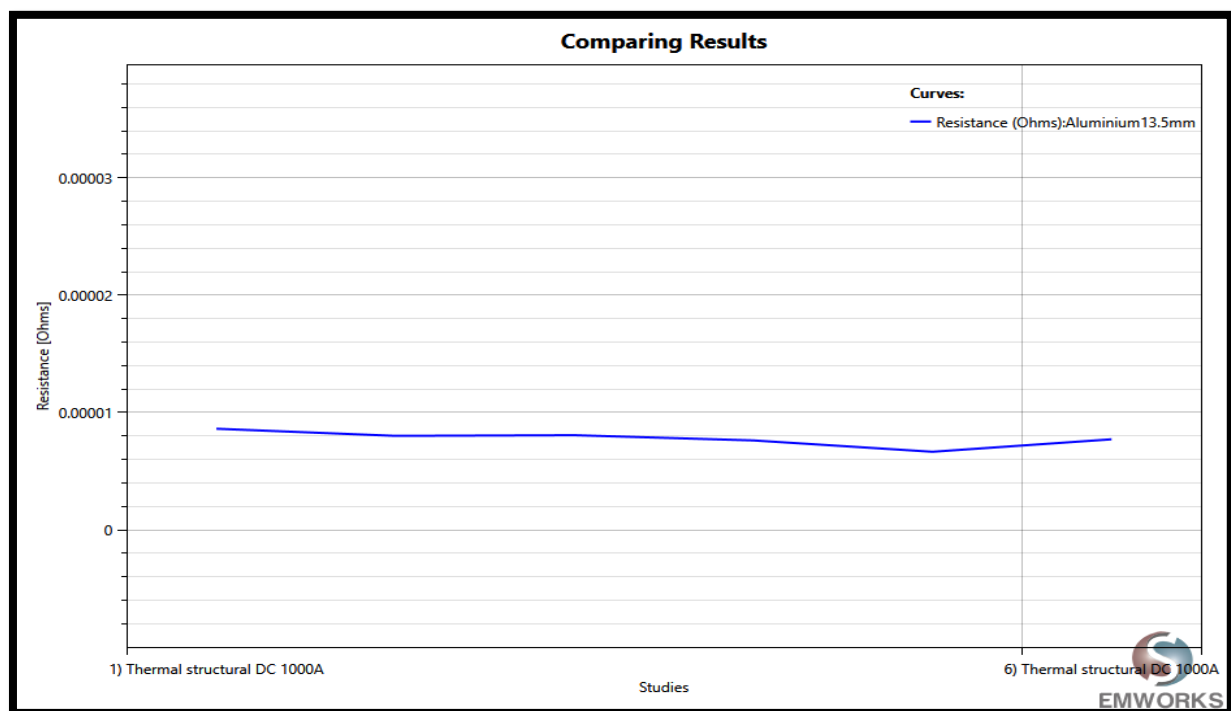
Figur 65. Längdförändringskaraktäristik för aluminiumskenan.

Resultat i form av reaktionskraft för aluminiumskenan. Största reaktionskraften uppgår till 803,08 N, se Figur 66.



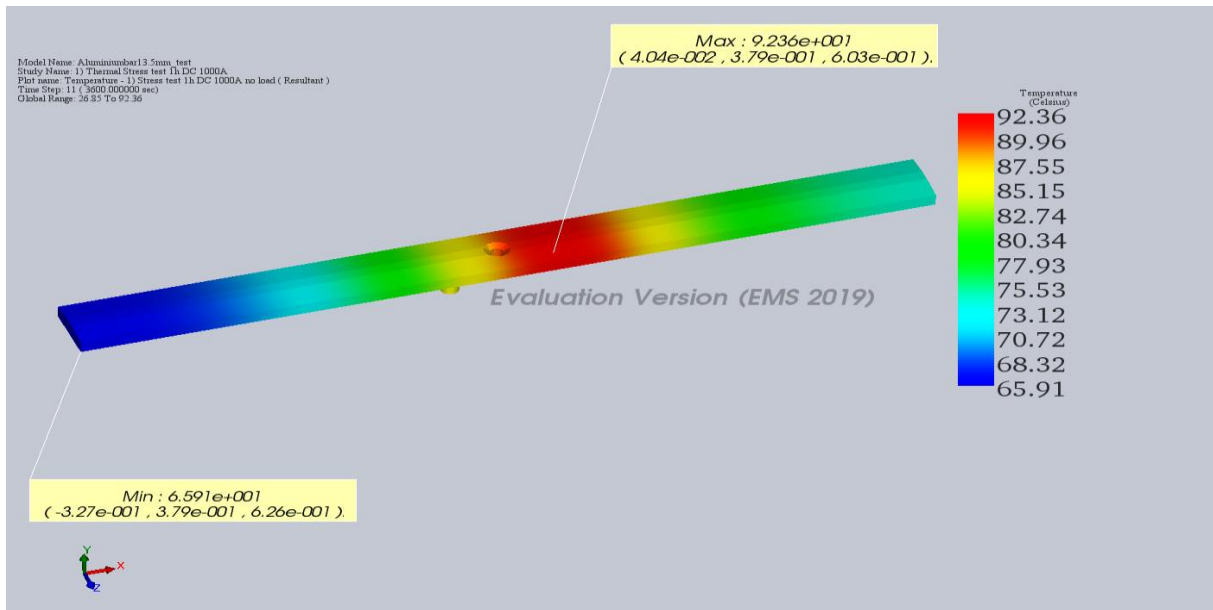
Figur 66. Reaktionskraftskarakteristik för aluminiumskenan.

Resultat i form av resistansen hos aluminiumskenan för alla sex finita elementnät. Resistansen konvergerar ungefär vid 8 µohm (mikro-ohm), se Figur 67.



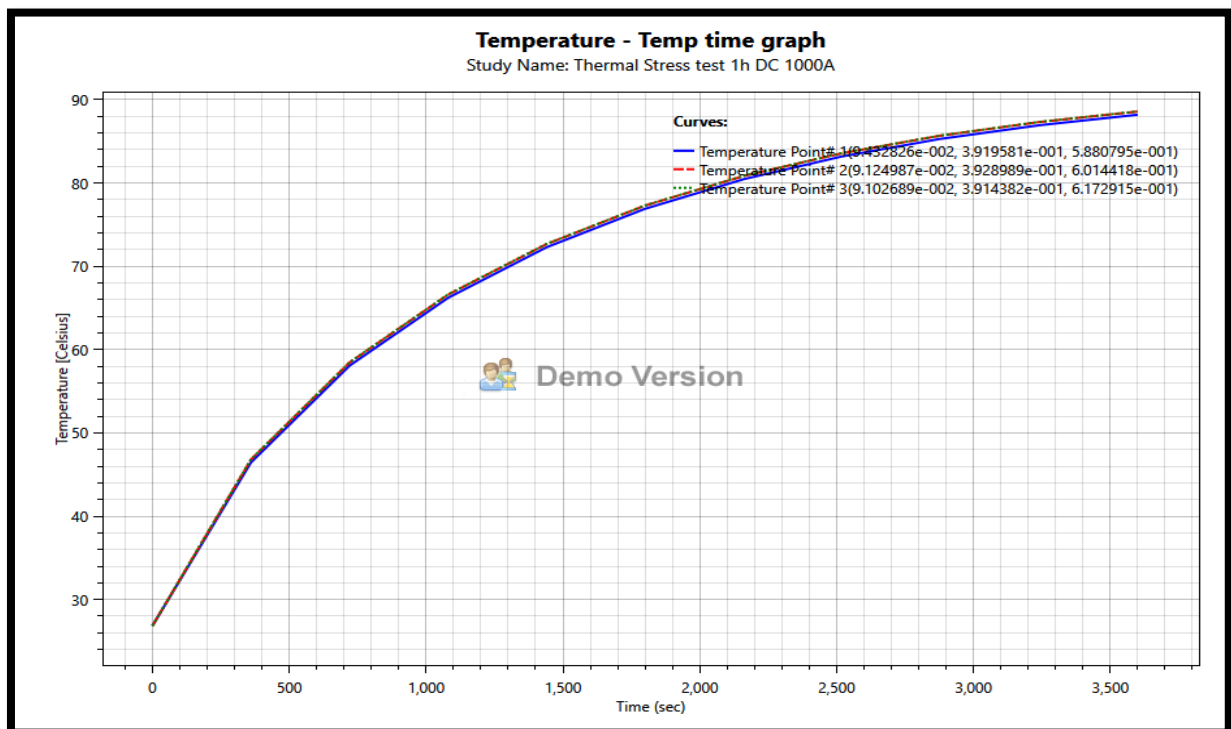
Figur 67. Resistansen hos aluminiumskenan för samtliga sex finita elementnät som skapades för modellen.

Transient magnetic analysis för aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm:
 Resultat i form av temperatur för aluminiumskenan och kabelskon. Högsta temperaturen för aluminiumskenan uppgår till 92,36 °C och högsta temperaturen för kabelskon uppgår ungefär till (85,15–87,55) °C, se Figur 68.

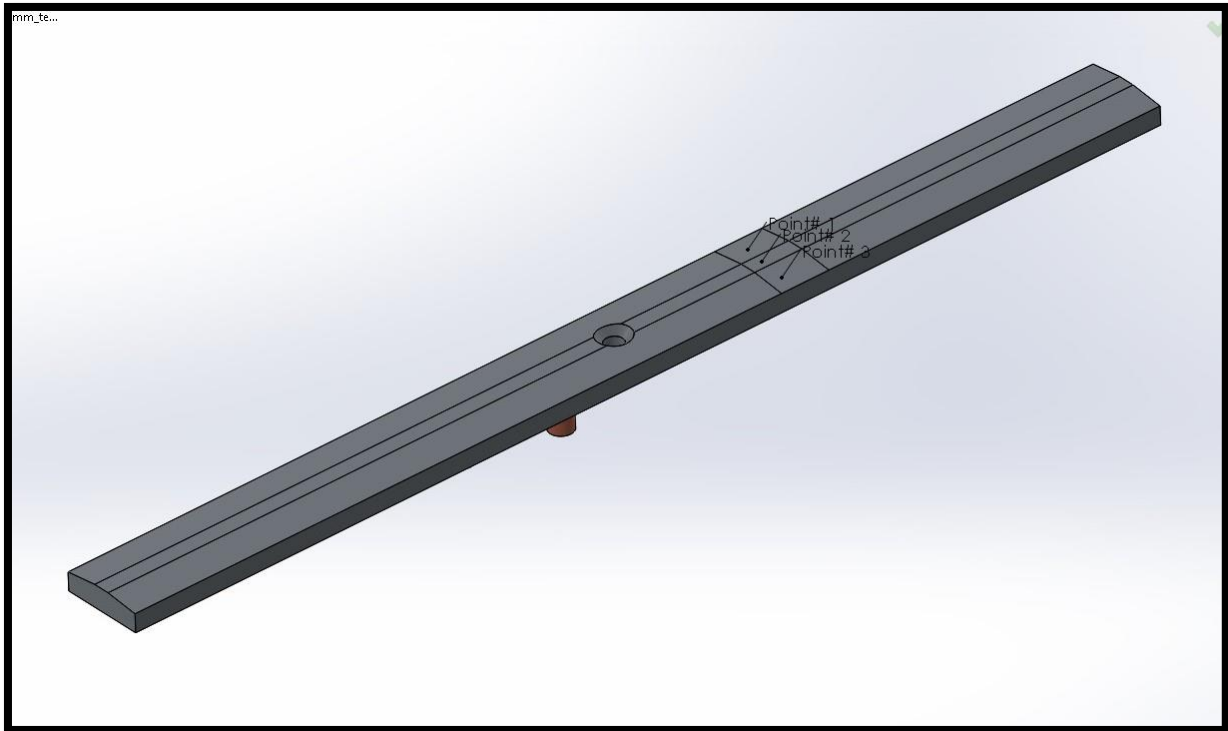


Figur 68. Temperaturkaraktäristik för aluminiumskenan och kabelskon under 1h DC 1000A.

Resultat i form av temperaturen för aluminiumskenan som en funktion av tiden. I Figur 69 visas en graf på hur temperaturen varierar över tiden för tre punkter som har valts på den begränsade ytan, där laddningen sker, se Figur 70 nedan.

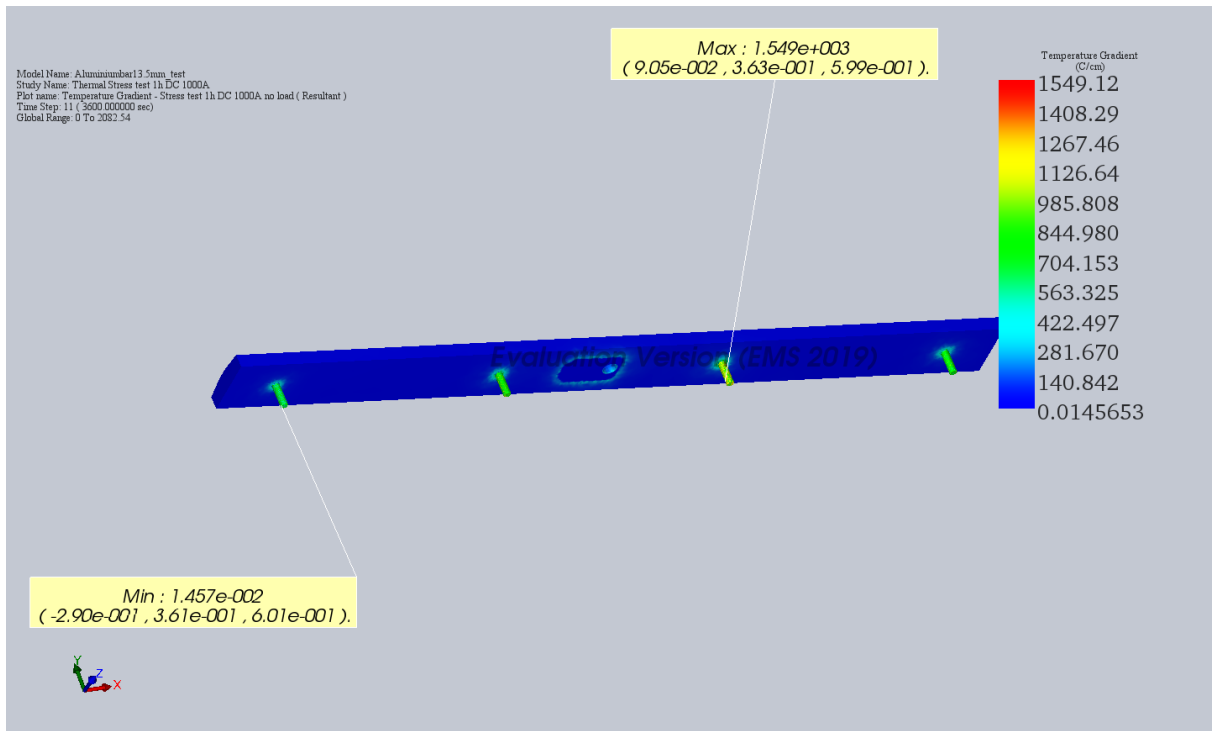


Figur 69. Graf på hur temperaturen varierar över tiden för de tre valda punkterna på aluminiumskenan.



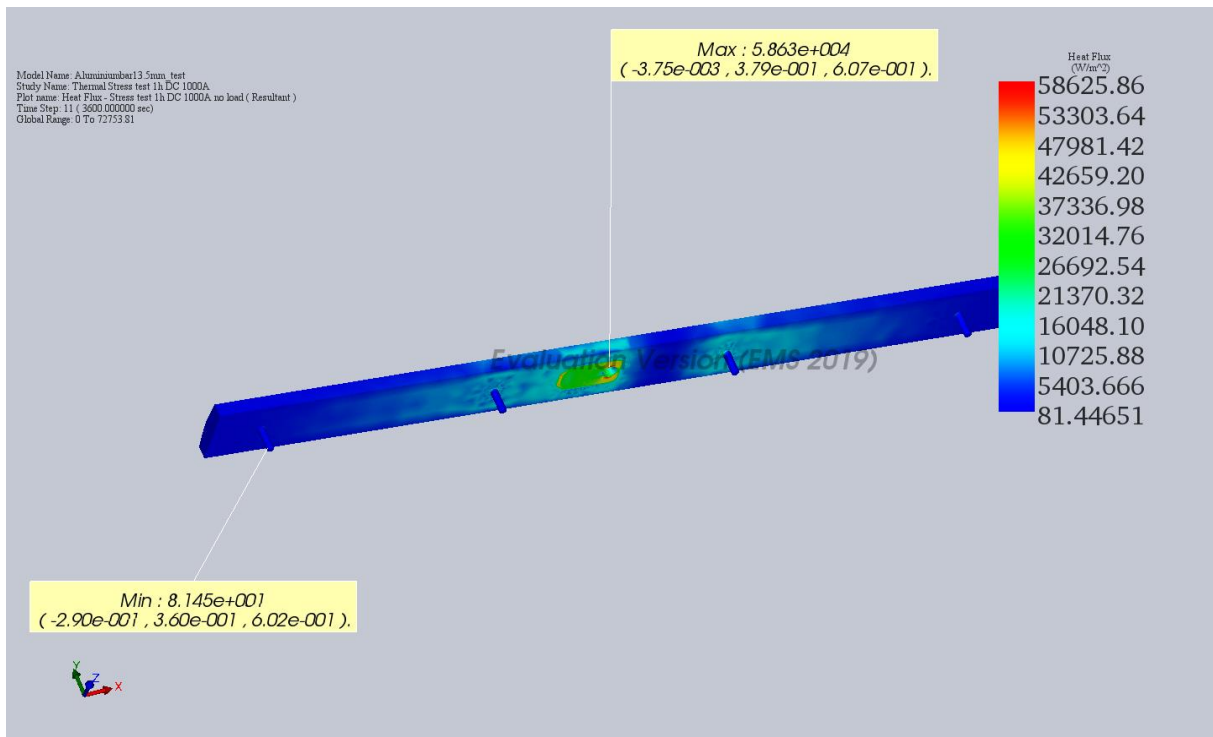
Figur 70. Figur på var de tre punkterna valdes på aluminiumskenan.

Resultat i form av temperaturgradient för aluminiumskenan. Högsta temperaturgradienten uppgår till cirka 1549,12 °C/cm, se Figur 71.



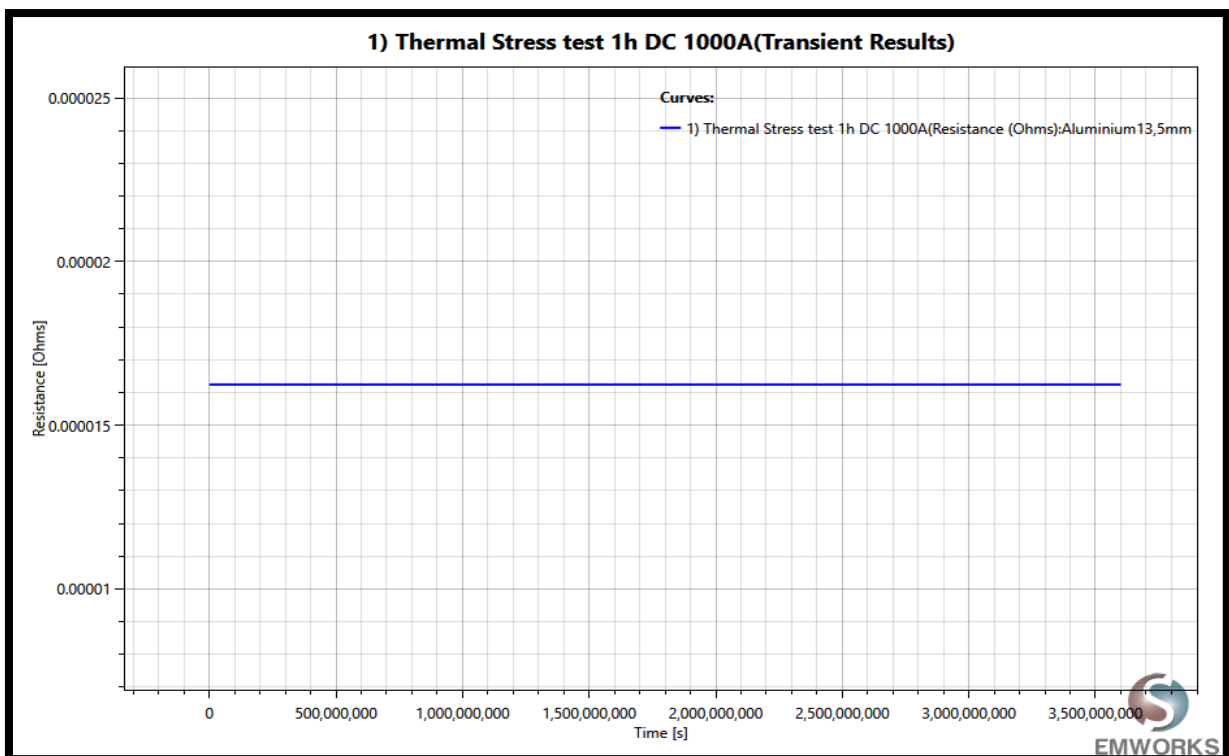
Figur 71. Temperaturgradientkaraktistik för aluminiumskenan under 1h DC 1000A.

Resultat i form av värmeflödestäthet för aluminiumskenan. Största värmeflödestätheten uppgår till 58,625 kW/m², se Figur 72.



Figur 72. Värmeflödestäthetskaraktäristik för aluminiumskenan under 1h DC 1000A.

Resultat i form av resistansen hos aluminiumskenan för en mesh med elementstorlek på 22,4 mm. Resistansen uppgår till cirka 16,2 µohm (mikro-ohm), se Figur 73.



Figur 73. Resistansen hos aluminiumskenan för en mesh med elementstorlek på 22,4 mm.

4.4 Resultatjämförelse

I detta avsnitt sammanställs ovanstående resultat från avsnitt 4.1–4.3 i två tabeller. Tabell 7 presenterar resultaten för magnetostatic analysis och Tabell 8 presenterar resultaten för transient magnetic analysis.

Tabell 7. Resultatjämförelse för magnetostatic analysis.

Modell	T_{\max}	Φ_{\max}	∇T_{\max}	$\sigma_{\max}vM$	ϵ_{\max}	δ_{\max}	F_{\max}	$R_{\text{konvergens}}$	Konvergens
Kopparskena	43,1 °C	15,47 kW/m ²	379,8 °C/cm	66,5 MPa	748,5 µm/m	82,23 µm	605,43 N	6 µohm	Ja
Al-skena 10 mm	58,13 °C	31,1 kW/m ²	766,95 °C/cm	120 MPa	1751 µm/m	197,9 µm	947,61 N	11 µohm	Ja
Al-skena 13,5 mm	45,07 °C	15,42 kW/m ²	435,7 °C/cm	76,6 MPa	1115 µm/m	119,8 µm	803,08 N	8 µohm	Ja

Tabell 8. Resultatjämförelse för transient magnetic analysis.

Modell	T_{\max}	∇T_{\max}	Φ_{\max}	R	Konvergens
Kopparskena	88,67 °C	1589,5 °C/cm	63,67 kW/m ²	13,6 µohm	Nej
Al-skena 10 mm	135,44 °C	4454,8 °C/cm	122,53 kW/m ²	20,1 µohm	Nej
Al-skena 13,5 mm	92,36 °C	1549,12 °C/cm	58,625 kW/m ²	16,2 µohm	Nej

Resultaten från Tabell 7 visar att flera materialegenskaper förbättrades för aluminiumskenan när höjden ökade från 10 mm till 13,5 mm. Bl.a. har den kritiska maximala spänningen på 120 MPa reducerades till 76,6 MPa som motsvarar en procentuell minskning med cirka 36,2 %. Den största längdförändringen har minskat från 1751 µm/m till 1115 µm/m som motsvarar en procentuell minskning med 36,3 %. Värmeöverföringen har reducerats från 31,1 kW/m² till 15,42 kW/m² som motsvarar en procentuell minskning med cirka 50 %. Resistansen har minskat från 11 µohm till 8 ohm som motsvarar en procentuell minskning med 27,3 %.

Resultaten från Tabell 8 visar att den maximala temperaturen minskade från 135,44 °C till 92,36 °C för aluminiumskenan när höjden ökade från 10 mm till 13,5 mm. Det motsvarar en procentuell minskning med 31,8 %. Högsta temperaturskillnaden mellan kopparskenan och aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm uppgår nu endast till 3,69 °C, jämförelsevis kopparskena med aluminiumskena med höjd på 10 mm där temperaturskillnaden är 46,77 °C. Resistansen hos aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm minskade med cirka 20 % jämförelsevis med aluminiumskenan med höjd på 10 mm. Utifrån dessa resultat visar det sig att aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm erhåller en likvärdig prestanda som dagens kopparskena.

4.5 Vikt- och kostnadsanalys

I detta avsnitt sammanställdes en tabell för vikt och kostnad för samtliga modeller. Kostnaden för de olika modellerna är baserad utifrån en offert från Alumeco, se *Bilaga 2* nedan. Vikt och tvärsnittsarea för respektive modell beräknades enkelt fram i CAD-programmet SolidWorks m.h.a. två funktioner ”mass properties” och ”measure”.

Tabell 9. Vikt- och kostnadsjämförelse

Modell	Vikt	Tvärsnittsarea	Legering	Kostnad/material	Kostnad/nickelplätering
Kopparskena	2625,29 gram	450 mm ²	CW004 A CW008 A	750,00 SEK/st	60 SEK/st
Al-skena 10 mm	791,99 gram	450 mm ²	AW-6060 AW-6082	500,00 SEK/st	60 SEK/st
Al-skena 12 mm	966,97 gram	550 mm ²	AW-6060 AW-6082	500,00 SEK/st	60 SEK/st
Al-skena 13,5 mm	1098,21 gram	625 mm ²	AW-6060 AW-6082	500,00 SEK/st	60 SEK/st
Al-skena 15 mm	1229,45 gram	700 mm ²	AW-6060 AW-6082	500,00 SEK/st	60 SEK/st

Resultaten från Tabell 9 visar att kostnaden för aluminiumlegering med en höjd på 10–15 mm inte skiljer i priset, då priset är fast på 500 SEK/detalj. Detsamma gäller för nickelplätering av respektive modell eller legering, även i detta fall är priset fast: 60 SEK/detalj. För den valda aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm uppgår vikten till cirka 1,1 kg med tvärsnittsarea på 625 mm² och den totala kostanden uppgår till 560 SEK/detalj. För dagens kopparskena uppgår vikten till cirka 2,63 kg med tvärsnittsarea på 450 mm² och den totala kostanden uppgår till 810 SEK/detalj. Utifrån dessa resultat ser man att vikten har reducerats från 2,63 kg till 1,1 kg som motsvarar en procentuell minskning med 58,2 %. Tvärsnittsarean ökade från 450 mm² till 625 mm² som motsvarar en procentuell ökning med 38,9 %. Den totala kostnaden har minskat från 810 SEK/detalj till 560 SEK/detalj som motsvarar en kostnadsminskning med 30,9 %. Utifrån dessa resultat visar det sig att den valda aluminiumskenan med höjd på 13,5 mm är både billigare och lättare än dagens kopparalternativ.

5. Slutsats och framtida arbete

I detta kapitel presenteras kort slutsatser och rekommendationer ges för eventuellt framtida arbeten.

Rapporten uppfyller i sin helhet syftet och målen för arbetet, se kapitel 1.2–3. En aluminiumladdningsskena med minsta möjliga geometriförändring har tagits fram och verifierats genom simuleringar som tyder på en liknande prestanda som dagens kopparsalternativ. En lämplig aluminiumlegering har fastställts och ett lämpligt pläteringsalternativ har presenterats. Vikten och kostanden för den föreslagna strömskenan av aluminium har både reducerats och minskats vid en jämförelse med dagens kopparskena.

Arbetet har lagt en bra grund för framtida utveckling. Det vore intressant att undersöka utmattningsegenskaperna för aluminiumskenan och kopparskenan för att jämföra förväntad livslängd. Det är också av intresse att undersöka olika fästmetoder och skruvförband för aluminiumskenan.

Referenser

Internetkällor

- [1] Alumeco. (2019). Koppar, Stänger, Plattstång, CW008A. Hämtad 20190920 från <https://www.alumeco.se/koppar/stanger/plattstaang/10-x-50-mm/p/838/24555>
- [2] Alumeco. (2019). Aluminium, Stänger, Plattstång, AW-6060. Hämtad 20190920 från <https://www.alumeco.se/aluminium/profiler/stanger/plattstaang/plattstaang/en-aw-6060/50-x-10-mm/p/559/14255>
- [3] JAN O. MATTSON. (2015). Produktprogram. [PDF]. Hämtad 20190920 från <http://www.janomattsson.se/attachment.php?module=pages&id=20>
- [4] Nationalencyklopedin. (2019). Krypning. Hämtad 20191002 från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/krypning>
- [5] Nationalencyklopedin. (2019). Nötning. Hämtad 20191002 från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/n%C3%B6tning>
- [6] Alumeco. (2019). Korrosion av aluminiumytor. Hämtad 20191003 från <https://www.alumeco.se/kunskap-teknik/allmaent/korrosion-av-aluminiumytor>
- [7] HELUKABEL. (2015). Aluminium som ledarmaterial. Hämtad 20191010 <https://www.helukabel.com/se/tjaenster/nyheter/2015/aluminium/materialegenskaper/aluminium-materialegenskaper.html>
- [8] Alumeco. (2019). Oxidskikt. Hämtad 20191010 från <https://www.alumeco.se/kunskap-teknik/allmaent/oxidskikt?s=0>
- [9] Alumeco. (2019). Använda legering. Hämtad 20191012 från <https://www.alumeco.se/kunskap-teknik/data-aluminium/anvaenda-legering?s=0>
- [10] Alumeco. (2019). Aluminium egenskaper. Hämtad 20191012 från <https://www.alumeco.se/kunskap-teknik/data-aluminium/aluminium-egenskaper?s=0>
- [11] Alumeco. (2019). Mekaniska egenskaper. Hämtad 20191014 från <https://www.alumeco.se/kunskap-teknik/mechaniska-egenskaper?s=0>
- [12] Materion, (2011). Surface coating of copper alloy strip for electrical connector applications. [PDF]. Hämtad 20191019 från <https://materion.com/-/media/files/alloy/tech-briefs/at0017-0311---tech-briefs---surface-coating-of-copper-alloy-strip.pdf>

- [13] Forssén, C. (2018). FFM234, Klassisk fysik och vektorfält – Föreläsninganteckningar. [PDF]. Hämtad 20191023 från <http://fy.chalmers.se/subatom/cforssen/vektorfalt/11-elektromagnetism/html/11-elektromagnetism-bs.html>
- [14] Lunds universitet, kärnfysik. (2009). FAFA30, FAF108, Beräkningar i naturvetenskap och teknik – Föreläsninganteckningar. [PDF]. Hämtad 20191027 från http://www.nuclear.lu.se/fileadmin/atomfysik/Education/Mandatory_courses/FAFA30_Fysik_foer_BI/FAF108_lecture4_2009.pdf
- [15] Faleskog, J. (2013). FEM för ingenjörstillämpningar – OH-material till föreläsningarna. [PDF]. Hämtad 20191028 från https://www.kth.se/social/upload/50f599fef2765447f4dc8adf/OH_All_FEM_vt2013.pdf
- [16] EMWORKS. (2019). EMS 2019 User Guide. [PDF]. Hämtad 20191002 från https://www.emworks.com/portal/download/ems/solidworks/2019/EMS_UserGuide_2019.pdf
- [17] EMWORKS. (2019). EMS 2019 Tutorials. [PDF]. Hämtad 20191002 från https://www.emworks.com/portal/download/ems/solidworks/2019/EMS_Tutorials_2019.pdf
- [18] EMWORKS. (2019). The Magnetic and Electric Field Modeling and Simulation. Hämtad 20191002 från <https://www.emworks.com/product/ems>
- [19] FerroProtect. (2019). Kemisk förnickling. Hämtad 20191014 från <https://www.ferroprotect.se/kemisk-f%c3%b6rnickling>
- [20] Fintlings. (2019). Förnickling och förkromning. Hämtad 20191014 från <http://www.fintlings.se/nicr.htm>
- [21] OPPCharge. (2019). OPCharge Specification 2nd edition 20190421. [PDF]. Hämtad 20190920 från <https://www.oppcharge.org/dok/OPPCharge%20Specification%202nd%20edition%2020190421.pdf>
- [22] OPPCharge. (2019). Comparissin OppCharge EN 61851-1-23. [PDF]. Hämtad 20190920 från <https://www.oppcharge.org/dok/Comparisson%20OppCharge%20EN%2061851-1%20-23.pdf>
- [23] Jernkontorets energihandbok. (2019). Värmeöverföring, värmeledning och konvektion. Hämtad 20191025 från <https://www.energihandbok.se/varmeoverforing>
- [24] Aalco. (2019). 6060 – Datashett, T5 Extrusions Hämtad 201910103 från http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6060-T5--Extrusions_144.ashx

Tryckta källor

- [25] Willy Leijon. (2014). Materiallära. (15.uppl.). Stockholm: Liber.
- [26] Hågeryd, L., Björklund, S. & Lenner, M. (2002). Modern Produktions teknik Del 1. (2.upp.). Stockholm: Liber.
- [27] Dahlberg, T. (2001). Teknisk hållfasthetslära. (3.upp.). Lund: Studentlitteratur.
- [28] Beckman, O., Grimvall, G., Kjällerström, B. & Sundström, T. (2005). Energilära. (4.upp.). Stockholm: Liber
- [29] Bergström, L., Johansson, E., Nilsson, R., Alphonse, R. & Gunnvald, P. (2005). Heureka! Fysik för gymnasieskolan kurs B. (1.upp.). Stockholm: Natur och kultur

Bildkällor

Figur 1. OPPCharge. (2019). Figur 1 Example of Infrastructure mounted ACD. [PDF]. Hämtad 20190920 från

<https://www.oppcharge.org/dok/Comparisson%20OppCharge%20EN%2061851-1%20-23.pdf>

Figur 7. Alumeco. (2019). Typiskt exempel på aluminium utsatts för galvanisk korrosion. [Bild]. Hämtad 20191003 från

<https://www.alumeco.se/kunskap-teknik/allmaent/korrosion-av-aluminiumytor>

Figur 8. eFunda. (2019). The S-N Curve. [Bild]. Hämtad 20190920 från

https://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/fatigue/fatigue_highcycle.cfm

Figur 9, 10. OPPCharge. (2019). 1 Top View of bus roof front section highlighting conductive rails and Wi-Fi antenna & 2 Side View of bus roof front section highlighting conductive rails. [PDF]. Hämtad 20190920 från

<https://www.oppcharge.org/dok/OPPCharge%20Specification%202nd%20edition%2020190421.pdf>

Figur 2, Figur 13 och Figur 14 samt Tabell 3 är figurer som jag fått del av uppdragsgivaren. Övriga figurer är egna bilder som tagits fram under arbetes gång.

Bilaga 2: Offert



Alumeco Sverige AB · Marieholmsgatan 56 · S-415 02 Göteborg
Chalmers Tekniska Högskola AB
Fakturaservice, KST 30500
SE-412 96 Göteborg
Att.: Stipe Baric

Offert

Dokumentnummer:
310546321
Referensnummer/Datum:
Offert Alu + Koppar
Skickas:
Dag 25.10.2019
Kundnummer:
310910
Giltighetsperiod:
23.10.2019 till 24.10.2019
Vår referens:
CNY / Tel.: 0370-33 32 93
E-mail: cny@alumeco.se
Utskriftsdatum:
24.10.2019

Varumottagare
Chalmers Tekniska Högskola AB
Fakturaservice, KST 30500
SE-412 96 Göteborg

Vi tackar för er Förfrågan och offererar som följer:

Pos.	Material	Kvantitet	Pris	Enhet	Summa(SEK)
0010	50x10mm EN AW-6060 L:650mm	1 st	500,00	SEK/st	500,00 A
	Ställkostnad				220,00 A
	Sågtolerans: +3/-0mm				
0020	50x12mm EN AW-6082 L:650mm	1 st	500,00	SEK/st	500,00 A
	Ställkostnad				220,00 A
	Sågtolerans: +3/-0mm				
	OBS! AW6082 ej denna dimension i AW6060				
0030	50x15mm EN AW-6060 L:650mm	1 st	500,00	SEK/st	500,00 A
	Ställkostnad				220,00 A
	Sågtolerans: +3/-0mm				
0040	50x10mm CW004A L:650mm	1 st	750,00	SEK/st	750,00 A
	Ställkostnad				220,00 A
	Sågtolerans: +3/-0mm				
	Ej CW008A på lager i denna dimension				
Summa positioner					3.130,00
Frakt					590,00 A
Utgående moms 25,00%					3.720,00
930,00 A					
Slutsumma					4.650,00

Emballage: Debiteras utifrån åtgång

Alumeco Sverige AB · Marieholmsgatan 56 · S-415 02 Göteborg · www.alumeco.se · mail@alumeco.se
Org nr. 556529-9590 · Vi innehar F-skattebevis · Växel +46 10-476 10 00 · Order +46 10-4761010 · Fax +46 31-58 24

Göteborg
Marieholmsgatan 56
S-415 02 Göteborg

Jönköping
Gnejsvägen 2
S-553 03 Jönköping

Lund
Företagsvägen 44
S-227 61 Lund

Växjö
Hammerdalsvägen 3
S-352 46 Växjö

Stockholm
Vretenvägen 8 4TR
S-171 54 Solna

Gnosjö
Kungsgatan 4
S-335 31 Gnosjö



ISO 9001
certifierad



Chalmers Tekniska Högskola AB
Fakturaservice, KST 30500
SE-412 96 Göteborg

Dok.nr.
310546321

Utskriftsdatum
24.10.2019

Sida
2 / 5

Leveransvillkor: DDP frakt debiteras Göteborg (Incoterms 2010)
Transportbolag: Schenker AB 795
Betalningsvillkor: 14 dagar netto

Ovanstående offert är baserad på vidhäftade försäljnings- och leveransvillkor. Villkoren gäller under förutsättning om att vi erhåller godkänd kredit från vårt kreditförsäkringsbolag.

Vi ser fram emot er order och står gärna till tjänst med ytterligare upplysningar.

Med vänlig hälsning
Alumeco Sverige AB

Christer Nyqvist

A Normal / hög moms.

Alumeco Sverige AB · Marieholmsgatan 56 · S-415 02 Göteborg · www.alumeco.se · mail@alumeco.se
Org nr. 556529-9590 · Vi innehar F-skattebevis · **Växel** +46 10-476 10 00 · **Order** +46 10-4761010 · **Fax** +46 31-58 24

Göteborg
Marieholmsgatan 56
S-415 02 Göteborg

Jönköping
Gnejsvägen 2
S-553 03 Jönköping

Lund
Företagsvägen 44
S-227 61 Lund

Växjö
Hammerdalsvägen 3
S-352 46 Växjö

Stockholm
Vretenvägen 8 4TR
S-171 54 Solna

Gnosjö
Kungsgatan 4
S-335 31 Gnosjö



ISO 9001
certifierad



CHALMERS