CHALMERS

Effekterna av termiska egenskaper hos asfaltsmaterial på temperaturförändringen

The effects of thermal properties of asphalt materials on the temperature change

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik

SIMON SVELANDER

MATTIAS TUREFELDT

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Effekterna av termiska egenskaper hos asfaltsmaterial på temperaturförändringen

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

Simon Svelander
Mattias Turefeldt

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2022

Effekterna av termiska egenskaper hos asfaltsmaterial på temperaturförändringen

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Simon Svelander

Mattias Turefeldt

© SIMON SVELANDER & MATTIAS TUREFELDT, 2022

Examensarbete ACEX20
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2022

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Geoteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2022

Effekterna av termiska egenskaper hos asfaltsmaterial på temperaturförändringen

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

SIMON SVELANDER

MATTIAS TUREFELDT

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Geoteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Med ett ökat behov av transporter av varor och människor blir vägarnas hållbarhet och bärighet mer och mer viktiga. Under sommarmånaderna kan asfalten nå mycket höga temperaturen vilket inte bara påverkar dess livslängd, men även omgivningen och brukarna. Under vintern kan isbildning på vägarna äventyra säkerheten för förare och fotgängare och i vissa leda till att sprickor bildas i asfalten. Tidigare studier visar på att asfaltens yttemperatur kan påverkas asfaltsmaterialets termiska egenskaper justeras. Målet med denna studie var att analysera hur asfaltens termiska egenskaper påverkar vägens yttemperatur, med hjälp av endimensionella, numeriska analyser utförda i COMSOL Multiphysics.

Under litteraturstudiens gång inhämtades väderdata, de termiska egenskaperna och de geometriska förutsättningarna, vilket var grunden till alla indata som användes i den numeriska analysen. Innan den skapade modellen kunde utnyttjas utfördes en validering av modellen, vilket går ut på att jämföra fältmätdata med simuleringsresultat. Vidare utfördes en känslighetsanalys för att se hur olika termiska egenskaper påverkar temperaturen hos asfaltsbeläggningar.

Resultaten visade att större ändringar för emissivitet och absorptionsförmåga har stor inverkan på yttemperaturen. Simuleringarna visade att värmeledningsförmågan hade ett litet inflytande på temperaturen jämfört med de andra termiska egenskaperna. Ett relevant resultat från de numeriska analyserna var att då absorptionsförmåga och emissivitet undersöktes utifrån extrempunkterna inom räckvidden, blev utfallet att differensen i högst uträknade temperatur skiljde sig med 14°C, vilket är en betydande temperaturskillnad för yttemperaturen hos asfaltsytan.

Nyckelord: asfalt, isbildning, yttemperatur, absorptionsförmåga, emissivitet, värmeledningsförmåga, numerisk analys

The effects of thermal properties of asphalt materials on the temperature change

Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering

SIMON SVELANDER

MATTIAS TUREFELDT

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Geology and Geotechnics
Geotechnics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

With increasing need of transportation of goods and people, the sustainability of our road surfaces becomes more and more important. During the summertime, asphalt material can reach very high temperature which can affect not only the road's life span, but also its environment and users. During the winter, ice formation can cause the asphalt to crack and jeopardize the safety of drivers and pedestrians. Previous studies show that surface temperature can be affected when certain thermal properties are modified. The aim of this study was to analyze how the thermal properties of asphalt affects the surface temperature of road and pavement structure, by conducting a one dimensional numerical analysis in COMSOL Multiphysics.

During the literature study, weather data, the thermal properties and geometric conditions were collected, which was the basis for all input data used in the numerical analysis. Before the model could be utilized, a validation of the model was performed, which involves comparing field measurement data with simulation results. Furthermore, a sensitivity analysis was performed to see how different thermal properties impact the temperature of different asphalt pavements.

The results showed that major changes in emissivity and absorptivity have a significant impact on the surface temperature. The simulations showed that the thermal conductivity had a small influence on the temperature compared to the other thermal properties. A relevant result from the numerical analyzes was that when absorptivity and emissivity were examined based on the extreme values within the range, the result showed that the difference in highest calculated temperature varied by 14°C, which is a significant temperature difference for the surface temperature of the asphalt concrete.

Key words: asphalt, ice formation, surface temperature, absorptivity, emissivity, thermal conductivity, numerical analysis

Innehåll

SAMMANFATTNING V
ABSTRACT VI
INNEHÅLL VII
FÖRORD IX
FÖRKORTNINGAR & BETECKNINGAR X

1 INLEDNING 1
1.1 Syfte 2
1.2 Avgränsningar 2

2 TEORI 3
2.1 Termiska egenskaper 3
2.1.1 Värmeledningsförmåga 3
2.1.2 Specifik värmekapacitet 3
2.1.3 Termisk diffusivitet 4
2.1.4 Absorptionsförmåga 4
2.1.5 Emissivitet 4
2.1.6 Mätningar av termiska egenskaper hos asfaltsbetong 4
2.2 Utformning av vägkonstruktioner 5
2.2.1 Utformning av överbyggnad 5
2.2.2 Krav på vägar 6
2.2.3 Klimatzoner 7
2.2.4 Trafiklaster 8
2.2.5 Material och tjocklek för olika vägtyper 8
2.3 Asfaltsbeläggningar 10
2.3.1 Tät asfaltbetong 10
2.3.2 Stenrik asfaltbetong 10
2.3.3 Asfaltgrus 11
2.3.4 ABb 11
2.4 Modellering 11
2.5 Värmebalans 12
2.6 Analysmetoder 13

3 METOD 15
3.1 Utformning av modell 15
3.2 Verifiering av modell 16

4 RESULTAT 19
4.1 Väderdata 19
4.2 Beräkningsfall 22

4.2.1 Motorväg 22
4.2.2 GC-väg 24
4.2.3 Bro 25
4.3 Känslighetsanalys 27
4.3.1 Motorväg 27
4.3.2 GC-väg 32
4.3.3 Bro 38
4.3.4 Extrempunkter 44

5 SLUTSATS & DISKUSSION 46

6 KÄLLHÄNVISNING 48

Förord

Denna analyserande studie är skriven vid institutionen för Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik på Chalmers tekniska högskola, samt hos Statens Väg-och Transportforskningsinstitut (VTI). Arbetet är en del av kursen ACEX20 som innefattar 15 högskolepoäng. Vårt intresse för vägkonstruktioner uppstod i samband med att vi läste kurser inom geoteknik, infrastruktur och projekteringsmetodik, under det sista läsåret av vår utbildning.

Vi vill ge ett stort tack till vår handledare Raheb Mirzanamadi, han stöttade oss i att ge vårt examensarbete tydliga riktlinjer, samt Rahebs spetskompetens inom området gav oss möjligheten att ställa många frågor och utveckla våra kunskaper om ämnet. Ett stort tack till alla härliga anställda på VTI som gav oss ett varmt välkomnande. Vi är även tacksamma att VTI gav oss möjligheten att studera på Göteborgskontoret under arbetets gång.

Göteborg, maj 2022

Simon Svelander & Mattias Turefeldt

Förkortningar & Beteckningar

Förkortningar:

GC-väg – Gång- och cykelväg
ABT – Tät asfaltbetong
ABS – Stenrik asfaltbetong
ABb – Asfaltbetong bindlager
AG – Asfaltsgrus

Beteckningar:

λ – Värmeledningsförmåga
q – Värmeflöde
C_p – Specifik värmekapacitet
α – Absorptionsförmåga
ε – Emissivitet
σ – Stefan-Boltzmanns konstant
ρ – Densitet
T – Temperatur

1 Inledning

Sveriges ständigt utvecklande vägnätverk har varit en konsekvens av ökade resor och urbanisering av befolkningen. Landets asfaltsbelagda ytor blir fler och fler med åren för att underlätta resor och transporter av människor och varor. Asfaltens kvalitet och beständighet får med det en stor betydelse i människors vardagsliv när man kör bil, cyklar, promenerar eller åker kollektivt.

Asfaltens historia i Sverige sträcker sig från tidigt 1920-tal då den första oljeasfalten importerades till följd av den ökade biltrafiken. 15 år senare var ungefär 200 mil av det allmänna vägnätet belagt med antingen asfalt eller tjära i något slag. Samtidigt som utvecklingen av belagda vägar ökade stadigt utökades även det allmänna nätverket från 62 000 km år 1910 till 98 000 km 1970, och fram till idag har det allmänna vägnätet sett ungefär likadant ut. Grunderna för den beläggningsteknik som togs fram på 1930-talet stod sig kvar i ungefär sextio år innan trafikbelastningen blev för hög för den gamla teknikens vägar och bindlager infördes i det nya regelverket på 1990-talet (Asfaltsboken, 2018).

Idag sträcker sig Sveriges vägar sammanlagt runt 570 000 km över hela landet, och en majoritet av denna är asfaltsbelagd (SCB, 2005). För att upprätthålla en hög standard på dagens asfaltmaterial krävs det då att hänsyn tas gentemot dess omgivning. Temperaturvariationer kan ha stor negativ påverkan på hållfasthet, livslängd och trafiksäkerhet. Under sommaren kan underlaget uppnå mycket höga temperaturnivåer vilket resulterar i att vägmaterialet slits ner mycket fortare och vid högtrafikerade vägar kan plastiska deformationer uppstå. I enstaka fall kan värmen även bidra till halka när bindemedel tränger upp till ytan på nylagda vägar (Trafikverket, 2020). Under vinterns låga temperaturer kan ytlagret spricka till följd av köld- och frostskador och vid snöfall och isbildning på väglaget ökar även halkrisken på vägarna. Även metoderna för avsmältning av isen kan som resultat förbättras. Kan man höja temperaturen på asfalten på vintern, kan man undvik att använda salt på vägarna som bidrar till korrosion på vägarna och negativa miljöeffekter på omgivningen (Mirzanamadi et al., 2018).

Med klimatförändringarna kommer man ständigt med tiden att behöva vidta nya åtgärder för att kontrollera temperaturen hos asfalten. Klimatförändringar kommer främst att märkas av i de nordligare regionerna i Sverige under vintern. I Sverige beräknas vi få varmare och torrare förhållanden under sommaren, under en längre tid. På vintern kommer de extrem kalla perioderna bli kortare och färre och blir i stället mildare och nederbördsrikare (Naturvårdsverket, 2022). Temperaturökningarna över hela landet kan komma att innebära att klimatzonsindelningen enligt Trafikverkets definition förändras för en mer jämnt fördelad temperaturskillnad över hela landet (Klimatanpassning, 2019).

De termiska egenskaperna hos asfaltmaterialet är avgörande faktorer för hur en vägbeläggning reagerar på omgivningen. Dessa skiljer sig från de olika beståndsdelarna som används i asfaltsmaterialet, som främst är krossat stenmaterial och bindemedel (Svevia, 2021). De olika materialens termiska egenskaper som ska undersökas i den här rapporten är värmeledningsförmåga, värmekapacitet, absorptionsförmåga, diffusivitet och emissivitet.

Problematiken med höga temperaturskillnader i asfalt har tidigare tagits upp i en rad olika rapporter, bland annat av J.Chen, et al. (2016) som skrev om UHI-effekten i stadsmiljö. UHI, eller Urban Heat Island, är när solstrålningen i tätbebyggd miljö bidrar till ökade temperaturer i omgivning och på ytor på grund av väg-och konstruktionsmaterialets reflexionsförmåga och värmeledningsförmåga. Resultaten visade på att både ökad reflexionsförmåga genererade högre yttemperaturer dagtid och lägre nattetid. Å andra sidan bidrog ökad värmeledningsförmåga till högre yttemperaturer nattetid och lägre dagtid. Denna studie påvisade hur svårt det är att kringgå värmealstringen från asfalt, framför allt i tätbebyggda områden.

I vår rapport undersöks tre olika vägtyper, motorväg, gång- och cykelbana och bro. De olika förutsättningarna för vägbeläggningarna låg till grund av valet av dem, där deras uppbyggnader skiljer sig men även deras respektive omgivning och fysiska påfrestningar. Simuleringarna genomfördes i COMSOL Multiphysics där olika modeller för respektive överbyggnader skapades. Indata bestod av termiska egenskaper och formler från litteraturstudier, klimatdata och överbyggnadsdesign från Stockholms Stad och Trafikverket.

1.1 Syfte

Målet med projektet är att analysera hur asfaltens termiska egenskaper påverkar temperaturen hos olika asfaltbeläggningar med hjälp av simuleringar utförda i COMSOL Multiphysics. Där kommer tre olika typer av vägunderlag granskas: motorväg, GC-väg och bro. De huvudsakliga materialegenskaperna som undersöks är värmeledningsförmåga, absorptionsförmåga och emissivitet.

1.2 Avgränsningar

Arbetet avgränsades genom att endast en typ av utformning valdes för de olika vägtyperna motorväg, gång- och cykelbana och bro. Inga egna mätningar gjordes utan all indata som behövdes för simuleringarna hämtades in från litteraturstudien. Modellen validerades med data från ett område på Europaväg E18. Den meteorologiska data som hämtades begränsades geografiskt till Stockholm.

2 Teori

Detta kapitel tar upp de termiska egenskaper som studeras, utformning av överbyggnader och asfaltbeläggningar, kraven som ställs med hänsyn till klimat och trafiklaster, de olika asfaltbetongerna och den numeriska modellen.

2.1 Termiska egenskaper

Värmeväxlingen i material som sten, berg och jord sker oftast genom ledning, konvektion och strålning. För att förstå vad som ligger till grund för hur bra dessa mekanismer presterar krävs en förståelse av de termiska egenskaperna hos materialet. Värmeväxlingen påverkas i hög grad av materialets egenskaper och omgivningens förutsättningar (SGI, 1991). I denna sektion presenteras de fem termiska egenskaper värmeledningsförmåga, värmekapacitet, termisk diffusivitet, absorptionsförmåga och emissivitet, hos asfaltsmaterial och hur de påverkar temperaturen.

.

2.1.1 Värmeledningsförmåga

Asfaltbetong är ett sammansatt material som består av bindemedlet bitumen, stenmaterial och tillsatsmedel. Bitumen är ett material som fäster lätt till andra ytor vilket gör att bindemedlet har en stor inverkan på egenskaperna för asfaltbetong. Utifrån ett mikroperspektiv är asfaltbetong ett heterogent material som består av en oregelbunden blandning av bindemedel, stenmaterial och fyllnadsmaterial. Däremot har asfaltbetong en isotropisk struktur på makronivå, där beståndsdelarna är homogent fördelade i massan (Mirzanamadi et al., 2018). Ekvationen för värmeledningsförmåga ges i formen:

$$\lambda = \frac{qL}{\Delta T}$$

där λ (W/(m*K)) står för värmeledningsförmågan, q(W/m^2) är värmeflödet och L (m) är tjockleken av provet, slutligen är ΔT (K) temperaturen mellan två sidor av provet.

Värmeledningsförmågan i en asfaltsblandning påverkas främst av tre faktorer: porositet, stenmaterialet och mängden bitumen. Bitumen har i vanliga fall mycket lägre värmeledningsförmåga än krossmaterialet som används i asfalt. I tätare asfaltsblandningar, exempelvis ABT, används mindre fraktioner och högre halt bitumen, vilket gör att slutprodukten får lägre värmeledningsförmåga än en asfaltsblandning med större fraktioner. Bitumenämnet fungerar då som en hinna runt krossmaterialet och minskar värmeledningsförmågan (W. Highter & D. Wall, 1984).

2.1.2 Specifik värmekapacitet

Specifik värmekapacitet är också en viktig parameter för denna studie, eftersom det beskriver den värmeenergi som går åt för att höja temperaturen hos en kropp med en grad (Per Gunnar Burström, 2007). Detta kan bero på materialets massa och densitet och trycket som det utsätts för. Värmekapaciteten kommer vara relevant när temperaturen hos olika typer av asfaltbeläggningar undersöks. I praktiken är det den

specifika värmekapaciteten som används som indata då den beskriver värmekapacitet per kilogram för ett visst material. Den betecknas med C_p och enheten är $J/(kg \cdot K)$.

2.1.3 Termisk diffusivitet

Termisk diffusivitet beskriver ett materials förmåga att leda värme med hänsyn till dess förmåga att lagra värme (Z-X. Zhang, 2016). Detta betyder att ett material som har hög termisk diffusivitet leder värme snabbare än ett material med låg diffusivitet. Ökad densitet hos materialet kommer leda till att diffusiviteten minskar och vice versa. Formeln för diffusivitet beskrivs som:

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

där λ [W/m*K] är värmeledningsförmågan, ρ [kg/m^3] är materialets densitet och c [J/kg*K] är materialets specifika värmekapacitet.

2.1.4 Absorptionsförmåga

Absorptionsförmågan avgör hur mycket strålning som absorberas av ett material. När ett material når 100 % absorption reflekteras inget ljus tillbaka, oavsett våglängd eller infallsvinkel. Detta fenomen kallas på engelska för ”blackbody”. Nylagd asfalt tenderar att ha en hög grad absorption, runt 0.9, främst tack vare bindemedlet bitumens mörka färg. Med tiden ljusnar i vanliga fall färgen och asfalten får som resultat lägre absorption. Absorptionsförmågan är enhetslös och sätts mellan 0–1 (Thermal engineering, 2019).

2.1.5 Emissivitet

Emissivitet är motsatsen till absorption och är den strålningen som reflekteras tillbaka från en yta och påverkas på samma sätt starkt av materialets yta och färg. Andra faktorer som påverkar är strålningens våglängd och ytans temperatur. Likt absorptionsförmågan är emissivitet enhetslös och ges mellan 0–1. Kännedom om en ytas emissivitet är viktigt för att göra noggranna mätningar av värmeöverföring. Eftersom emissivitet från en materialyta beror på kemiska och fysiska egenskaper kan det vara svårt att uppskatta. Därför är det vanligt att det görs en modifiering med hjälp av en beläggning av exempelvis svart färg med hög emissivitet (NPL, 2021).

2.1.6 Mätningar av termiska egenskaper hos asfaltsbetong

Emissiviteten och absorptionsförmågan hos asfalt kan vara svår att bestämma då de avgörande faktorerna är många, bland annat grovhet, materialval, temperatur och våglängd. Mirzanamadi et al. (2017) presenterade tidigare gjorda mätningar från vägbeläggningen på motorvägen E18 där värdena på emissivitet sträckte sig från 0,81-0,96 och absorptionsförmåga 0,6-0,96.
Mirzanamadi et al. (2018) undersökte de termiska egenskaperna hos tre olika asfaltsprov, ABT11, ABS11 och AG22 med hjälp av en numerisk modell. Valideringen av den numeriska analysen gjordes experimentellt med hjälp av så kallad TPS-teknik som innebär att placera en smal, värmeledande dubbelspiral mellan

två likadana cylindriska prov om 100 mm diameter x 60 mm, där sedan spiralen både tillför värme och mäter upp temperaturen genom materialet.

Tabell. 1. Termiska egenskaper och densitet hos olika asfaltsblandningar (Mirzanamadi et al., 2018)

	ABT11	ABS11	ABS16	AG22	ABb22
Densitet [kg/m^3]	2617	2421	2415	2582	2577
Värmeledningsförmåga [W/m*K]	1,38	1,86	2,24	2,28	1,44
Specifik värmekapacitet [MJ/m^3*K]	2,2	2,1	2,05	2,28	822
Diffusivitet [m^2/s]	0,63 *10^{-6}	0,89*10^{-6}	1,01*10^{-6}	0,63*10^{-6}	0,69*10^{-6}

Enligt Mirzanamadi et al. (2017) visade det sig att värmeledningsförmågan hade stor betydelse på asfaltens yttemperatur. Syftet med deras rapport var att undersöka hur man kunde minska isbildning på vägarna med hjälp av ett hydroniskt rörsystem begravt i asfalten. Deras undersökning gjordes endast med hänsyn till slitlagret och resultaten visade på en minskning av behovet av värme från rören med ökad värmeledningsförmåga. Det vill säga att när värmeledningsförmågan ökade, minskade yttemperaturen på asfalten. Chen et al. (2016) beskriver också värmeledningsförmågan som en huvudsaklig orsak till temperaturändringar på asfaltytan. En ökad värmeledningsförmåga i asfalten bidrog till en temperaturminskning över hela vägkroppen.
Absorptionsförmågan hos asfalt har även den en direkt korrelation till temperaturökningen då absorption innebär att fånga in solinstrålningen och på så sätt värma upp asfalten. Fem värden för absorption användes mellan 0,6 och 0,96. för att analysera hur detta påverkade det tillförda energibehovet från hydroniska rören för att motverka isbildning. Resultatet visade på att hala förhållanden på vägarna minskade med 29 timmar på ett år då värdet ökade från 0,6 till 0,96.
Mirzanamadi et al. (2017) visar tester att emissiviteten kan variera från 0,81–0,98. I rapporten valdes fyra emissivitetsvärden ut: 0,81, 0,9, 0,95 och 0,98. i syfte att, på samma sätt som ovan, analysera energibehovet för de hydroniska rören. I detta fall visade resultaten att effekterna av en ökning från 0,81 till 0,98 blev en ökning på 63 timmar hala förhållanden under ett år.

2.2 Utformning av vägkonstruktioner

I detta avsnitt studeras överbyggnaders utformning och olika typer av asfaltbeläggningar. Vidare undersöks vilka krav som ställs vid vägkonstruktion och klimatzoner med koppling till tjälrisk. Dimensionering av trafiklaster med hjälp av standardaxlar studeras också.

2.2.1 Utformning av överbyggnad

Den principiella uppbyggnaden av en överbyggnad består av ett skyddslager, förstärkningslager, obundet bärlager, bindlager och slitlager. Beroende på vilken typ av väg som skall dimensioneras kommer de ingående materialen och tjockleken på dessa variera. Med utgångspunkt från grunden består en överbyggnad av ett skyddslager som skall se till att överbyggnaden blir tillräckligt tjock. Beroende på

materialet i undergrunden och underbyggnaden kan det finnas risk för tjäle och därmed måste det vara tillräckligt stort avstånd till vägytan. Skyddslagret skyddar överbyggnaden från terrassytan, som utgör den gräns mellan över- och underbyggnad. Ovanpå skyddslagret placeras ett förstärkningslager vars uppgift motsvarar bärlagrets. Förstärkningslagret belastas inte i lika stor utsträckning på grund av avståndet till ytan, och därmed kan ett material med mindre krav användas. Detta lager kan byggas upp med krossat berg eller naturmaterial med mindre än 30% helt okrossat material. (Trafikverket, 2020)

Bärlagret för en överbyggnad är vanligtvis uppdelat i två olika lager, ett bundet bärlager och ett obundet. Bärlagrets uppgift är att ta upp och distribuera trafiklasten. Det bundna lagret stabiliseras med bitumen eller cement och det obundna lagret består av packat stenmaterial. Det översta lagret är det som kallas slitlager. Detta lager består vanligtvis av någon typ av asfaltmassa som anpassas till den vägtyp som det ska användas till. Slitlagret har funktionella krav på bland annat hållfasthet, nötningsresistens och deformationsresistens.
Asfaltbeläggningar deformeras av tung trafik, därför passar det att använda betongbeläggningar som ett alternativt slitlager då en väg trafikeras av tunga fordon. På lågtrafikerade väger består ofta slitlagret av ett grusslitlager. Det är en billigare beläggning men kräver mer underhåll. Ett grusslitlager löper risk för snabbare nednötning där potthål och en veckad vägbana blir som följd. (VTI, 2020). Figuren nedan illustrerar ingående lager för en överbyggnad.

Figur 1: Asfaltslager i en vägöverbyggnad.

2.2.2 Krav på vägar

I TRVK Väg hittar man kraven som ställs av Trafikverket på hur utformningen av en väg ska följas, där krav på bärförmåga, tillåten trafik, säkerhet, diken och avvattningssystem och överbyggnadslager presenteras. (Trafikverket, 2011)

När en ny väg ska dimensioneras krävs det att man tar hänsyn till en rad faktorer för att få en så hållbar slutprodukt som möjligt. Jordmaterialet, klimatet, trafiklaster och årsdygnstrafik (ÅDT) blir avgörande vid utformning av en vägöverbyggnad. Vidare kan man använda den informationen när man väljer ut vilken asfalt som är bäst lämpad och hur lagerstrukturen för hela vägkroppen ska se ut.

Jordmaterialet kan sträcka sig från berg till lera. En överbyggnad på berg kräver inte lika mycket förstärkning för att motverka sättningar och skred som en konstruktion på lera skulle göra. För konstruktion på lera krävs att ett grovkornigare lager läggs över

den lösa jordarten, vanligtvis ett förstärkningslager, där krafterna kan spridas ut för att på så sätt minska sättningarna i marken. I vissa fall används även ytterligare förstärkningar i form av exempelvis kalkcementpelare (Trafikverket, 2020).

2.2.3 Klimatzoner

Trafikverket har delat upp Sverige i fem olika klimatzoner med avseende på tjälrisk. Vid kalla temperaturer kan så kallad tjällyftning ske på vägarna då vattnet i och under vägen expanderar och spräcker vägmaterialet. För att åtgärda detta används oftast ett skyddslager under vägen mellan marken och förstärkningslager.

Figur 2: Klimatzonsindelningen i Sverige och det utvalda området för studien (Trafikverket, 2020).

Jordmaterialet delas upp i sex olika typer med hänsyn till deras tjälfarlighet och kornstorlek. Materialtyp 1 har en hög andel grov jord och mindre halt lera, silt och organisk jord. Detta resulterar i en låg tjälfarlighetsklass och risk för tjällyftning är i regel obefintligt. Materialtyp 6 har i stället en låg andel grov jord och mer lera silt och organiska jordar, och högre tjälfarlighetsklass och risk för tjällyftning (Trafikverket, 2011).

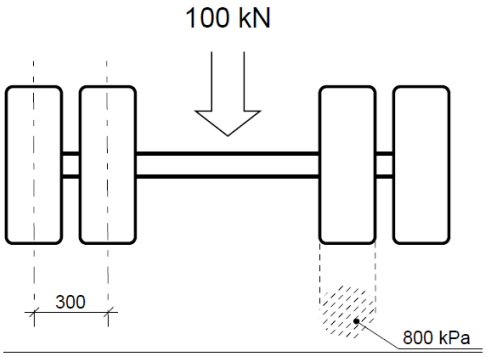
I den numeriska simuleringen används materialtyp 5, enligt TRVK Väg (Trafikverket, 2011). Den har den högsta tjälfarlighetsklassen till följd av den höga andelen finkorniga jordar, vilket gör den lämplig i dimensioneringssyfte.

Tabell 2: Klimatzonsindelningen i Sverige och det utvalda området för studien (Trafikverket, 2020).

Materialtyp	Finjord [vikt-%]	Ler [vikt-%]	Organisk jord [vikt-%]	Tjälfarlighetsklass
1	<10	-	<2	1
2	<15	-	<2	1
3	<30	-	<2	2
4	>40	>40	<2	3
5	>40	<40	<2	4

2.2.4 Trafiklaster

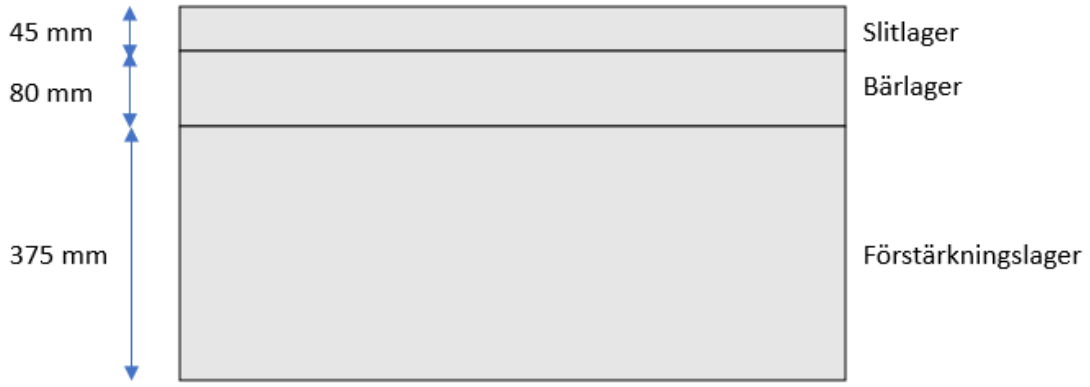
Trafiklaster beräknas med hjälp av så kallade standardaxlar. En standardaxel består av en axel med parmonterade hjul och en utbredd last på 100kN. Avståndet mellan centrum på hjulen i hjulparen är 300 millimeter och varje hjul har en cirkulär kontaktyta belastad med 800 kPa (Vägverket, 1994). Standardaxlar blir ett bra hjälpmedel för att beräkna den tjocklek som krävs på en överbyggnad då de största påfrestningarna på en väg kommer från trafiklaster.



Figur 3: Standardaxel enligt Trafikverkets definition (Vägverket, 1994).

2.2.5 Material och tjocklek för olika vägtyper

(i) GC-Väg



Figur 4: Lagerstruktur för asfalten hos en gång- och cykelbana. (Stockholms stad)

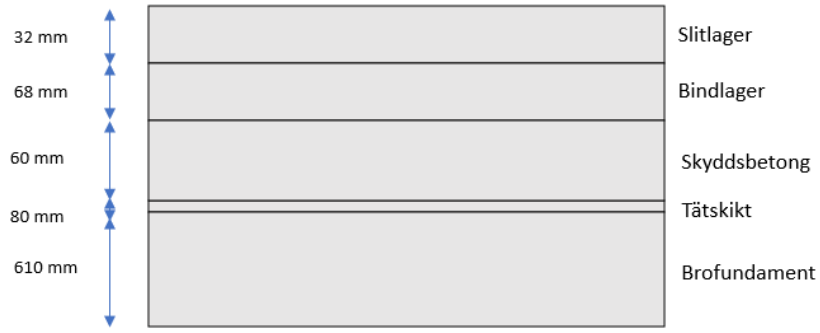
Gång- och cykelbanor utsätts inte för lika stora laster som en stadsgata eller motorväg. I normala fall belastas de vid enstaka tillfällen av exempelvis utryckningsfordon eller servicefordon, om högst 8 ton. För att ta hänsyn till detta dimensioneras den för en extremlast om 40 kN. Utöver extremlasten dimensioneras GC-vägen för en

trafikbelastning om 150 000 standardaxlar enligt DK2 i stället för normalfallet 500 000 standardaxlar för bilväg (Trafikverket, 2020). Tjockleken på GC-bana hämtas från Stockholms tekniska handbok med hänsyn till materialtyp 5.

Tabell 3: Komponenter och deras tjocklekar i asfaltskroppen på GC-bana. (Stockholms stad)

Lager	Asfaltbetong	Tjocklek [mm]
Slitlager	ABT8	45
Bärlager	AG22	80
Förstärkningslager	Bergkross	375

(ii) Bro



Figur 5: Lagerstruktur för asfalten hos en bro med betongfundament (Trafikverket, 1994).

Vid asfaltsbeläggning på bro behöver man inte ta hänsyn till markförhållandena på samma sätt som för GC-väg och motorväg. Det finns ingen kyla från marken som kan påverka överbyggnaden och jordartens bärighet ställs inte på prov, därför krävs inte ett förstärkningslager eller skyddslager. I stället kommer man ta hänsyn till vind som passerar under bron.

Brofundamentet består av en brobaneplatta av betong som tätas av antingen ett tätskikt och/eller direktgjuten slitbetong. Tätskiktet kan exempelvis bestå av en tätskiktsmatta. Därefter ska den bitumenbundna beläggningen bestå av ett bindlager och ett slitlager (Trafikverket, 2019).

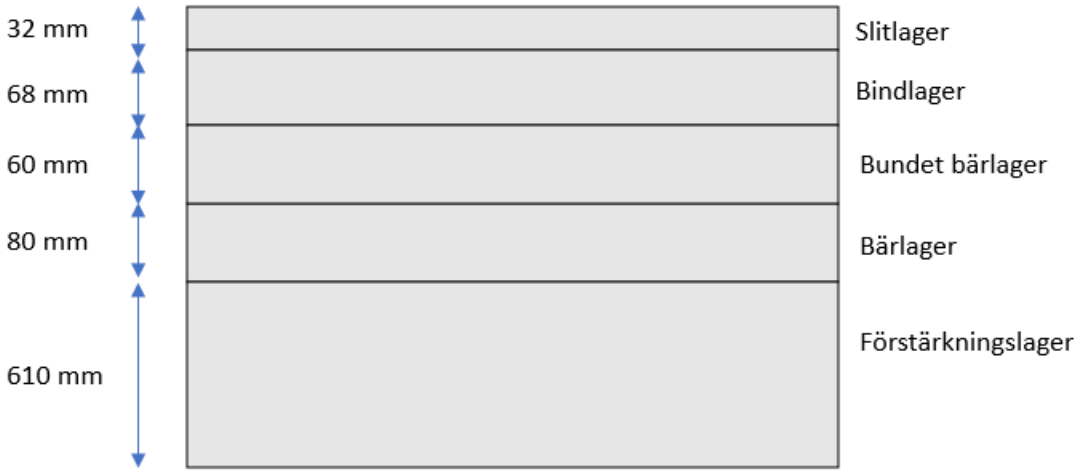
Tabell 4: *Komponenter och deras tjocklekar i asfaltskroppen på bro (Sveriges bygguniversitet, 2011).*

Lager	Materialtyp	Tjocklek [mm]
Slitlager	ABS11	70
Bindlager	ABb22	70
Skyddsbetong	Betong	100
Tätskikt + Betongplatta	Betong	170

(iii) Motorväg

Motorvägar dimensioneras för både tunga laster och högtrafik. Utöver slitlagret använder man sig även av ett bindlager och bundet bärlager undertill. De har i uppgift är att fördela trafiklasterna ovanifrån för att på så sätt minska risken för sprickbildning och deformationer (NCC, 2022). Förstärkningslagret anpassas efter vald materialtyp på underlaget (Stockholms Stad, 2021).

Figur 6: Lagerstruktur för asfalten hos en motorväg (Stockholms Stad, 2021).



Tabell 5: Komponenter och deras tjocklekar i asfaltskroppen på motorväg (Stockholms Stad, 2021).

Lager	Materialtyp	Tjocklek [mm]
Slitlager	ABS	32
Bindlager	ABb	68
Bundet bärlager	AG22	60
Bärlager	Bergkross	80
Förstärkningslager	Bergkross	610

2.3 Asfaltsbeläggningar

2.3.1 Tät asfaltbetong

Den asfalt som har beteckningen ABT syftar på en beläggningsmassa av tät asfaltbetong. Den är bestående av stenmaterial och bituminöst bindemedel. ABT är en allsidig beläggningstyp då den är lämpad för alla typer av vägar och klimatzoner. Möjligheten att byta bindemedelstypen är en förutsättning till att den kan användas i alla klimatzoner. Den fungerar till justeringslager, bindlager, bärlager och även slitlager. Tät asfaltbetong har en måttlig mängd grovt material i sammansättningen vilket bidrar till den relativt goda nötningsbeständigheten. ABT har varierande standardtyper där den maximala kornstorleken avgör namngivningen. ABT11 har då alltså som störst kornstorlek 11 mm i blandningen (Trafikverket, 1994).

2.3.2 Stenrik asfaltbetong

Stenrik asfaltbetong (ABS) är också en asfalt som inte är begränsad av vare sig klimatzon eller vägtyp. Både ABT och ABS har en tät sammansättning. Vad som

utmärker ABS är att den har en stor andel grovt stenmaterial vilket gör den motståndskraftig till nötning. Det innefattar både nötning mot dubbdäckstrafik och plastisk deformation av vägbanan. Av denna anledning används ABS på de delar av vägen där slitning av dubbdäck är stort och andra ytor där det är mycket slitage. Att hantera ABS kan innebära vissa svårigheter när det kommer till tillverkningen, det finns även risk för initiala friktionsproblem och den är svår att hantera för hand (Trafikverket, 1994).

2.3.3 Asfaltgrus

Asfaltgrus (AG) är användbart som bärlager till alla typer av strukturer och underlag. AG består av stenmaterial som har en kontinuerlig kornkurva och innehåller en liten mängd finmaterial med låg grad av bitumen. Fördelen med denna asfaltbeläggning är att den har en god stabilitet och är flexibel. Asfaltgrus presterar sämre när det kommer till vattenresistens och risk för separation. (Trafikverket, 1994).

2.3.4 ABb

ABb är en bindlagerbeläggning som ofta används när det ställs höga krav på deformationsresistens och styvhet. Plastisk deformation uppstår då asfaltsmaterialet omlagras vid tungtrafik. Då blir de största påfrestningarna på vägkroppen oftast under slitlagret. För att motverka detta används ett bindlager för att fördela lasterna ytterligare. Detta lager hamnar vanligtvis mellan slit- och bärlager för att bidra med stabilitet och varaktighet (Trafikverket, 2014).

2.4 Modellering

Modelleringen ska göras i COMSOL Multiphysics som är ett simuleringsverktyg som med hjälp av finita elementmetoden används för att analysera designen av produkter. Här kan moduler testas mot fysiska fenomen utifrån exempelvis värme, laster och energi. Programmet är grundat på finita elementmetoden som är en numerisk beräkningsmetod för att kunna approximera partiella differentialekvationer. Detta kan användas för att beräkna exempelvis hållfasthet eller temperatur på en produkt eller ett material (COMSOL, 2017).

Modellen kommer att vara endimensionell vilket innebär att vi inte kommer ta hänsyn till bredd på vägen utan kommer endast att se vägen uppifrån och ner längs en rät linje. Resultatet av detta blir att temperaturen analyseras längs med denna linje som representerar djupet på asfaltskroppen.

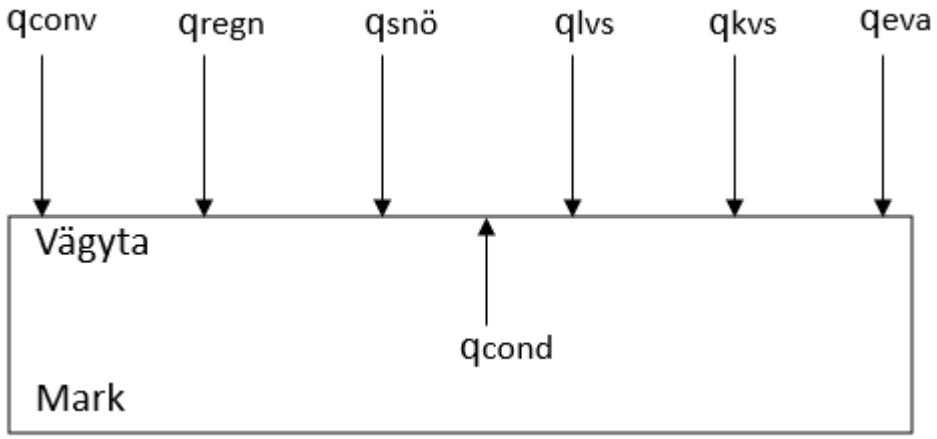
Indatan kommer bestå av meteorologiska data och de olika termiska egenskaperna för asfaltsblandningarna vi valt ut. Även formler från litteraturstudien kommer att läggas in manuellt.

Den meteorologiska datan består av sex parametrar över en fyraårig period från 1 januari 2017 till 31 december 2020 med mätningar tagna varje timme. Dessa sex parametrar är medeltemperatur, vindhastighet och riktning, daggtemperatur, global strålning, långvågsstrålning och relativ fuktighet. Denna data kommer sedan att användas i värmebalansen för att ta fram värmeöverföringskoefficienten h_c och värmeväxlingen mellan vägytan och luften. (R. Mirzanamadi et al., 2018)
Eftersom tre olika överbyggnader ska undersökas ska tre olika modeller skapas, en för respektive vägöverbyggnad, där den meteorologiska informationen kommer att förbli

densamma och endast materialens termiska egenskaper kommer skiljas åt. I bromodellen kommer vi ta hänsyn till vind som passerar under konstruktionen.

2.5 Värmebalans

För att kunna modellera hur termiska egenskaper påverkar vägytan är det viktigt att ha kännedom om värmebalansen. Figuren nedan illustrerar de värmeflöden som existerar för vägen.



Figur 7: Värmebalansen för väg.

Figuren ovan visar att värmeöverföringen sker på 7 olika sätt vid vägytan, vilket inkluderar: värme som leds från marken till ytan genom konduktion q_{kond} $[W/m^2]$, konvektiv värme från omgivande luft q_{konv} $[W/m^2]$, sensibel värme från regn q_{regn} $[W/m^2]$, sensibel värme från snö, $q_{snö}$ $[W/m^2]$, långvågsstrålning, q_{lvs} $[W/m^2]$, kortvågsstrålning, q_{kvs} $[W/m^2]$, och även latent värme från avdunstning och kondens $q_{avd/kon}$ $[W/m^2]$. Värmebalansen för vägytan kan därmed beräknas enligt:

$$q_{kond} + q_{konv} + q_{regn} + q_{snö} + q_{lvs} + q_{kvs} + q_{avd/kon} = 0$$

Enligt figuren är alla flöden riktade mot vägytan, vilket inte får förväxlas med att dessa alltid är positiva. Beroende på om det är ett positivt tecken (+) eller negativ (-) kommer energi antingen upptas eller avges (Mirzanamadi et al., 2018). Tabellen nedan visar de olika typerna av värmeöverföring vid vägytan och ingående ekvationer för varje process.

Tabell 6: Ekvationer för beräkning av värmebalans (R. Mirzanamadi et al., 2018).

Typ av värmeöverföring	Ekvation
Konduktiv värme	$q_{kond} = -\lambda \cdot \nabla T$
Konvektiv värme	$q_{konv} = h_c \cdot (T_{omgivning} - T_{yta})$
Sensibel värme från regn	$q_{regn} = \dot{m}_{regn} \cdot C_{p-regn} \cdot (T_{omgivning} - T_{yta})$
Sensibel värme från snö	$q_{snö} = \dot{m}_{snö} \cdot C_{p-snö} \cdot (T_{omgivning} - T_{yta})$

Långvågsstrålning	$q_{lvs} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{himmel}^4 - T_{yta}^4)$
Kortvågsstrålning	$q_{kvs} = \alpha \cdot I$
Avdunstning/kondensation	$q_{avd/kon} = h_e \cdot \beta(v_{omgivning} - v_s)$ där ($\beta = \frac{h_c}{\rho_a C_{pa}}$)

Där λ är värmeledningsförmågan, ∇T är temperaturskillnaden, $T_{omgivning}$ är luftens medeltemperatur, T_{yta} är vägytans temperatur, $\dot{m}$ är den totala massan av nederbörd som faller per sekund och kvadratmeter, C_p [J/kg*s] är den specifika värmekapaciteten, Ɛ [-] är emissiviteten, σ är Stefan-Boltzmanns konstant ($5.68 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2 ·K^4)), α [-]är absorptionsförmågan, I [W/m^2] är globalstrålningen, h_e [J/kg] är det avdunstade vattnets latentvärme, β [-] är fuktöverföringskoefficienten, ρ [kg/m^3] är densiteten, v_s [kg/m^3] är fuktigheten per volymenhet vid ytan och $v_{omgivning}$ [kg/m^3] är luftfuktigheten per volymenhet.

H_c som är den konvektiva värmeöverföringskoefficienten och beror på vindhastigheten räknas ut på följande sätt:

$H_c = 6 + 4 \cdot \text{v}$ (v < 5(m/s)) $H_c = 7.41 * \text{v}^{0,78}$ (v > 5(m/s))

H_e som är det avdunstande vattnets latentvärme beskrivs som:

$H_e = 2{,}5 \cdot 10^6$ (J/kg)

Därefter kunde formeln för T_{eq} räknas ut, med hjälp av h_{eq} , mer information går att läsa i Mirzanamadi et al. (2018):

$$T_{eq} = \frac{h_c \cdot T_{omgivning} + h_r \cdot T_{himmel} + \alpha \cdot I}{h_{eq}}$$

Eftersom denna studie inte tagit hänsyn till fukt försummades värmeeffekt från regn och snö. När den ekvivalenta temperaturen beräknades togs endast hänsyn till konvektion och strålning.

2.6 Analysmetoder

När en numerisk modell analyseras pratar man oftast om två olika metoder, jämviktstillstånd eller övergångstillstånd, ”steady state” och ”transient state”. När en undersökning utförs i jämviktstillstånd har man ett konstant flöde av den valda ingångsdatan. Om exempelvis temperaturens påverkan på ett material ska undersökas räknas det med en konstant temperatur under det valda tidsintervallet.

Undersöks i stället övergångstillståndet förutsätts att temperaturen förändras med tiden, och därav behöver enskilda mätningar göras med ett tätare intervall. Ett tätare intervall kan då i stället innebära mätningar varje timme, och inte mätningar vid endast start och slutpunkt (Hexagon, 2021).

Vid känslighetsanalysen ändrade endast en parameter i taget. Det vill säga att endast en av värmeledningsförmåga, absorptionsförmåga och emissivitet ändrades medan de två andra behöll sitt ursprungsvärde från litteraturen.

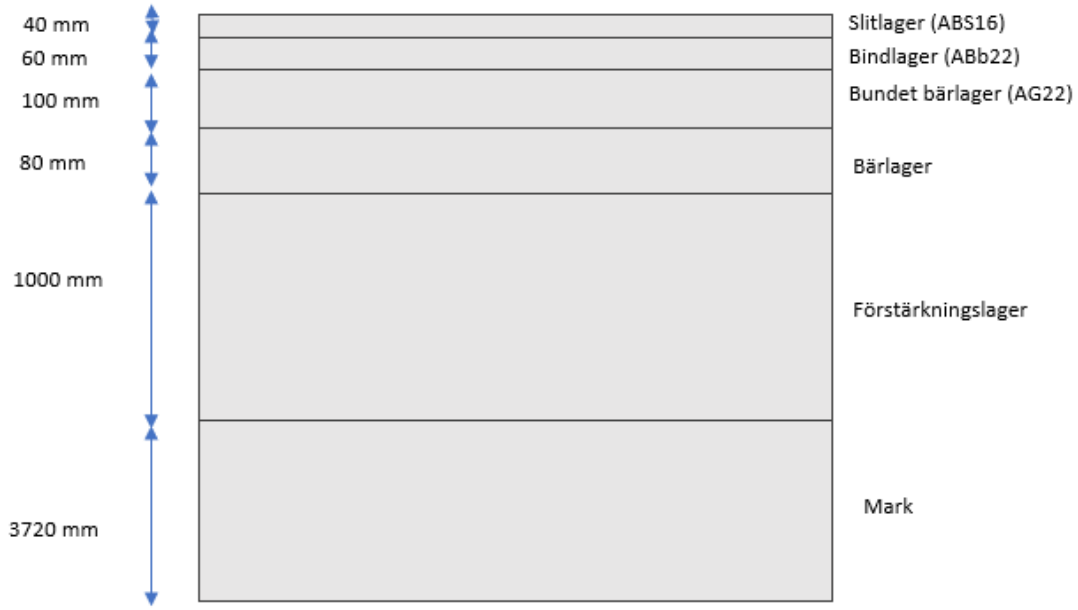
3 Metod

Simuleringarna som utfördes i COMSOL bestod alla av samma bas i form av data från SMHI, formler hämtades från Mirzanamadi et al. (2017) och de utvalda materialens termiska egenskaper.

Innan simuleringarna utfördes gjordes en validering med värden tagna från litteraturstudien. Material och tjocklekar hämtades från Mirzanamadi et al. (2017) och även värden för emissivitet, absorptionsförmåga och värmeledningsförmåga.

Därefter genomfördes simuleringarna och känslighetsanalysen för motorväg, GC-väg och bro.

3.1 Utformning av modell



Figur 8: Lagerstruktur för valideringen, (Mirzanamadi et al., 2017)

Den meteorologiska informationen laddades ner i form av Excel-filer från SMHI:s hemsida (SMHI, 2022). På hemsidan kan besökaren välja mellan 29 olika meteorologiska parametrar med mätningar som tagits i olika tidsintervall. De sex parametrarna som var relevanta för denna studie var lufttemperatur, relativ fuktighet, daggtemperatur, global strålning, långvågsstrålning och vindriktning och vindhastighet. Samtliga valdes med mätningar tagna varje timma.

När filerna laddats ner använde vi oss endast av mätningar från 1 januari 2017 till 31 december 2020. När parametrarna granskades upptäcktes att mätningar saknades vid vissa tidpunkter: detta kunde sträcka sig från en timma till 18 timmar. När dessa luckor hittades fylldes de ut med värdena från timmen eller timmarna precis innan, det vill säga om det saknades värden från fyra timmar mellan 12:00-16.00, 1 januari 2017 så fylldes de ut med värdena från 8:00-12:00, 1 januari 2017.
När alla timmar var utfyllda med ett värde lades de in i ett och samma Excel-dokument med alla parametrar.

Ekvationerna under avsnitt 2.5 användes sedan i Excel för att få ut värmeväxlingen mellan vägytan och omgivningen. Dessutom den konvektiva värmeöverföringskoefficienten h_c, vindhastighet vid höjden z,v_z, himmeltemperaturen, T_{himmel} , lufttemperaturen, $T_{omgivning}$, emissiviteten, Ɛ, h_r , h_{eq}, absorptionsförmågan, α och slutgiltiga yttemperaturen, T_{eq} .

Textdokument skapades för h_r, h_c, T_{himmel}, innan de infogades i COMSOL under parametrar. Även absorptionsförmågan och emissiviteten som är konstant hamnade under parametrar.

För överbyggnadsdesignen infogades först materialen för motorväg och respektive tjocklekar. Tjocklekarna hamnade under ”geometry” och materialen och deras termiska egenskaper under ”materials”. Värmeledningsförmåga, densitet och specifik värmekapacitet hämtades från tabellen under avsnitt 2.1.6.

Som en del av känslighetsanalysen ändrades:

- värmeledningsförmågan från dess ursprung till 1,0, 2,0 och 3,0 $[W/m \cdot K]$ på de 3 översta lagerna för att granska hur temperaturen påverkas.
- Emissiviteten ändrades från ursprungsvärdet 0,81 till 0,9, 0,95 och 0,98.
- Absorptionsförmågan ändrades från 0,78 och till 0,6, 0,85 och 0,96.

Endast ett värde ändrades i taget från ursprungsvärdena hämtade från litteraturen och alla resultat sammanställdes sedan i Excel-dokument.

Detsamma gjordes för GC-väg, där endast överbyggnadsdesignen skiljde sig. Vid simuleringen för bro ändrades dock både designen och den meteorologiska indatan. Här tog vi även hänsyn till vind som passerar under bron.

3.2 Verifiering av modell

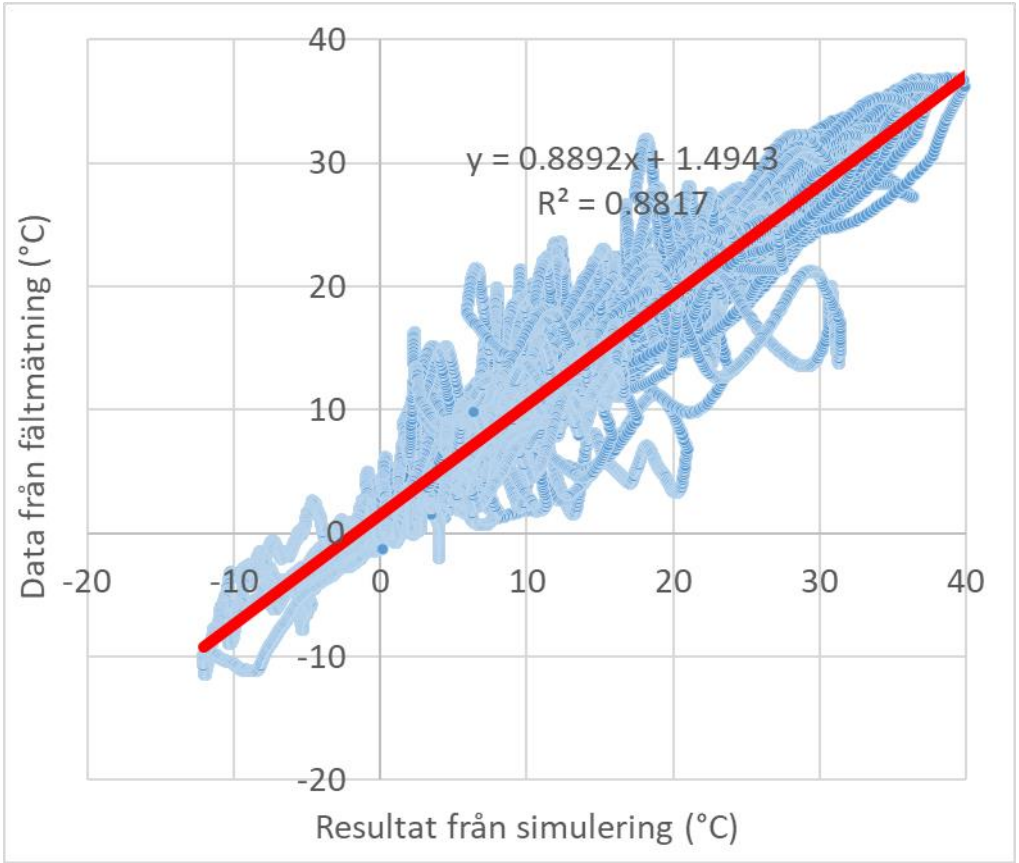
Verifiering av modellen gjordes med hjälp av värden erhållna från Mirzanamadi et al. (2017). Den COMSOL-fil som redan hade skapats kopierades så att vi hade en separat enbart för valideringen. Här användes samma tjocklekar, meteorologiska data och materialegenskaper för varje lager (värmeledningsförmåga, densitet och specifik värmekapacitet). Textfiler skapades med h_r, h_c, I, T_{sky} och $T_{ambient}$.

Den meteorologiska datan var uppmätt var tionde minut i stället för varje timme över en månad, så tidsomfång och tidsintervall ändrades alltså i programmet.
Materialegenskaperna som användes erhölls från samma dokument men tjocklekarna skiljde sig och därmed justerades.
Absorptionsförmågan valdes i valideringen till 0,78 [-] och emissiviteten till 0,81 [-]. Värden för absorptionsförmåga och emissivitet är baserade på ett genomsnittligt värde av den data som hämtades ur Mirzanamadi et al. (2017).

Värmeledningsförmåga, densitet och specifik värmekapacitet för varje lager följer i tabellen nedan. Den initiala temperaturen för valideringen beräknades utifrån ett medelvärde av den teoretiskt beräknade ekvivalenta temperaturen.

Tabell 7: Materialegenskaper och tjocklekar som användes i valideringen (R. Mirzanamadi et al., 2017).

Material	Tjocklek [mm]	Värmeledningsförmåga [W/m*k]	Densitet [kg/m^3]	Specifik värmekapacitet [J/kg*K]
Slitlager (ABS16)	40	2,24	2415	848
Bindlager (ABb22)	60	1,44	2577	822
Bundet bärlager (AG22)	100	1,51	2582	894
Bärlager (bergkross)	80	0,7	1700	900
Förstärkningslager (Bergkross)	1000	0,8	1400	900
Mark	3720	0,6	1300	600



Figur 9: Grafen visar korrelationen mellan fältmätdata och simuleringsresultat.

Figuren visar korrelation mellan fältmätningar och simuleringsresultat, med avseende till temperaturen vid 10 cm under ytan. Eftersom R^2 = 0,8817 innebär det att korrelation bekräftar trovärdigheten hos modellen. Det finns osäkerheter i exempelvis data för termiska egenskaper, jordmaterial och geometriska förutsättningar, vilket gör R^2 är mindre än 1. När temperaturen är 0°C visar det på mindre skillnader mellan fältdata och simuleringsresultat, vilket kan orsakas av solstrålningen och absorptionsförmågan hos asfalten.

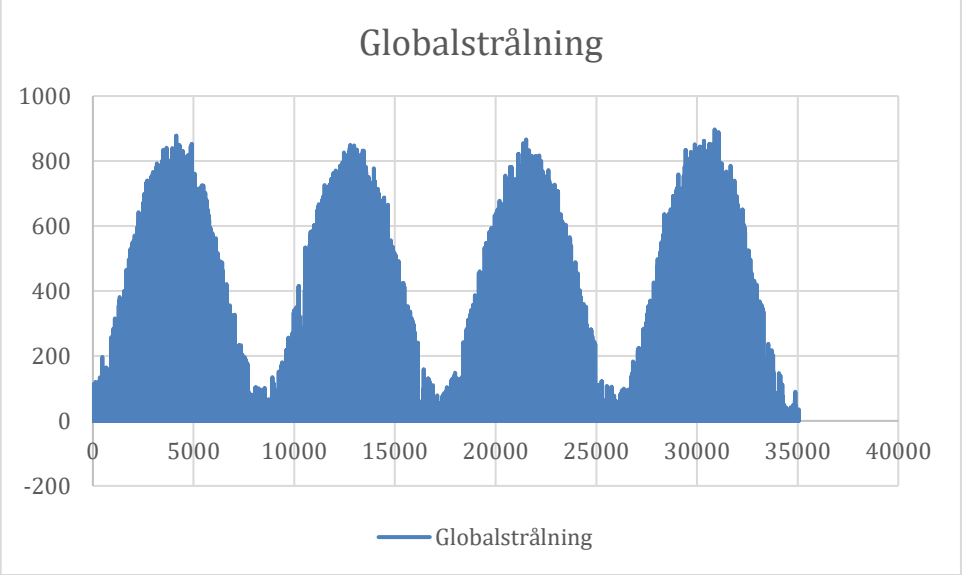
4 Resultat

I resultatet presenteras väderdatan, beräkningsfallen och känslighetsanalysen från simuleringarna för motorväg, GC-väg och bro. Resultaten illustreras i form av grafer och tabeller som beskriver hur yttemperaturen ändras över tid, max- och mintemperaturer samt hur många timmar yttemperaturen var under 0°C.

4.1 Väderdata

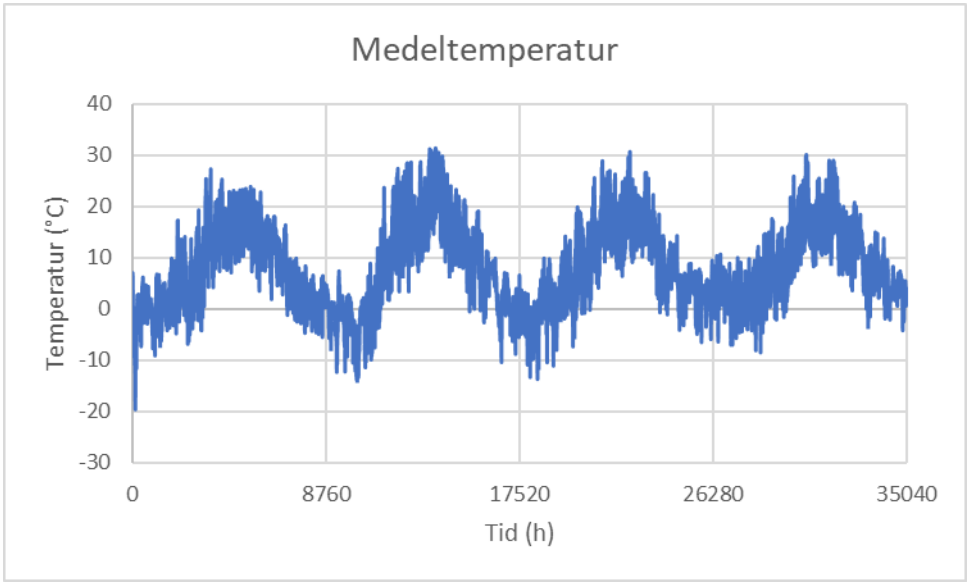
Den meteorologiska datan var uppmätt varje timme över en fyraårsperiod, från 2017-01-01, 00:00 – 2020-12-31, 23.59. Parametrarna som låg till grund för vår väderdata var, globalstrålning, medeltemperatur, vindhastighet och vindriktning, daggtemperatur, långvågsstrålning och relativ fuktighet. Med hjälp från denna data och formler från litteraturen kunde vi sedan även ta fram himmeltemperaturen.

I detta avsnitt presenteras grafer och tabeller på max- och mintemperaturer.

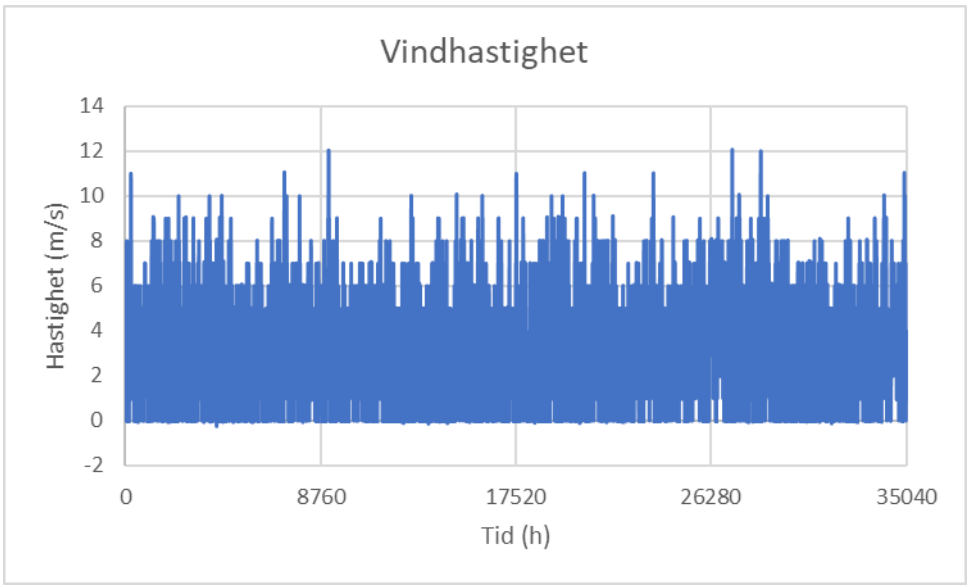


Figur 10: Globalstrålning i Stockholm mellan 2017-01-01 – 2020-12-31.

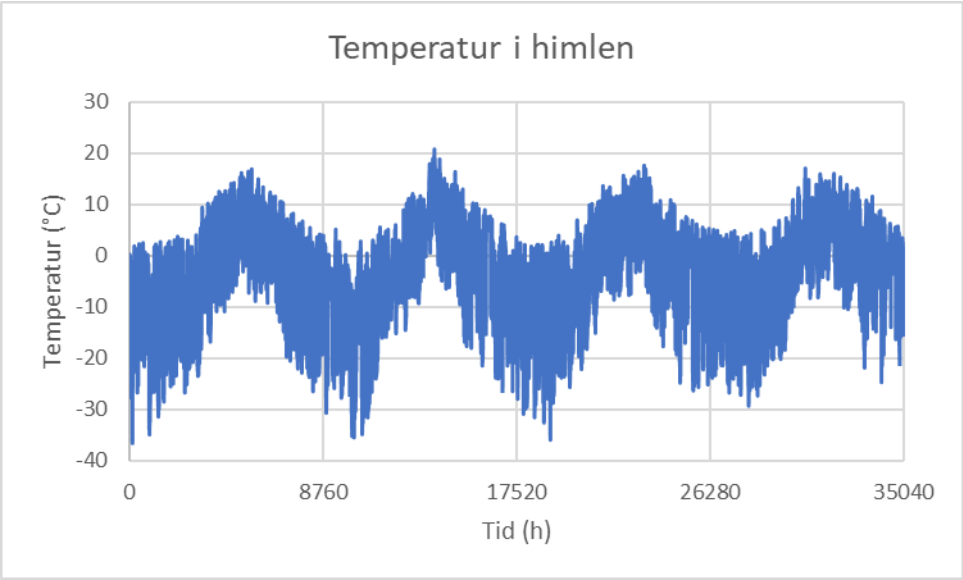
Globalstrålningen över Stockholm mellan den valda perioden presenteras ovan. Med globalstrålning menas den inkommande solstrålningen som träffar en yta horisontellt. Grafen visar att över en fyraårs-period har vi fyra toppar då den globala strålningen är som störst, vilket inträffar under sommarmånaderna, ca 4000 timmar in på året (SMHI,2021).



Figur 11: Medellufttemperatur i Stockholm mellan 2017-01-01 – 2020-12-31.



Figur 12: Vindhastighet i Stockholm mellan 2017-01-01 – 2020-12-31.



Figur 13: Himmeltemperaturen över Stockholm mellan 2017-01-01 – 2020-12-31.

Himmeltemperaturen beror av långvågsstrålningen och räknas ut med hjälp av Stefan-Boltzmanns konstant. I teorin är det den temperatur du skulle få om en infraröd temperaturmätare mot himmelen. Egentligen kan himmeltemperaturen bättre förklaras som ett snittvärde mellan temperaturen i den yttre troposfären och vid jordens yta (Albatayneh et al., 2020). Formeln för himmeltemperatur ges av:

$$T_{Himmel} = \left(\frac{lvs}{\sigma}\right)^{0.25}$$

Där lvs är långvågsstrålningen och σ är Stefan-Boltzmanns konstant.

Tabell 8: Medelvärden på fyra parametrar för åren 2017 - 2020.

	MEDEL			
	Globalstrålning (W/m^2)	Medeltemperatur (°C)	Vindhastighet (m/s)	Sky (°C)
2017	182,24	7,44	3,17	-4,04
2018	201,78	8,31	2,95	-3,58
2019	184,82	8,09	3,18	-3,38
2020	197,56	9,27	3,45	-3,17

Tabell 9: Maximumvärden på fyra parametrar för åren 2017 - 2020.

	MAX			
	Globalstrålning (W/m^2)	Medeltemperatur (°C)	Vindhastighet (m/s)	Sky (°C)
2017	871,91	27,30	11,00	17,25
2018	849,57	31,40	12,00	21,13
2019	866,44	30,70	11,00	17,95
2020	897,22	30,10	12,00	17,42

Tabell 10: Minimumvärden på fyra parametrar för åren 2017 - 2020. Minsta värde på globalstrålning och vindhastighet var 0.

	MIN			
	Globalstrålning (W/m^2)	Medeltemp (°C)	Vindhastighet (m/s)	Sky (°C)
2017		-19,60		-36,23
2018		-13,90		-35,03
2019		-13,70		-35,57
2020		-8,50		-28,95

4.2 Beräkningsfall

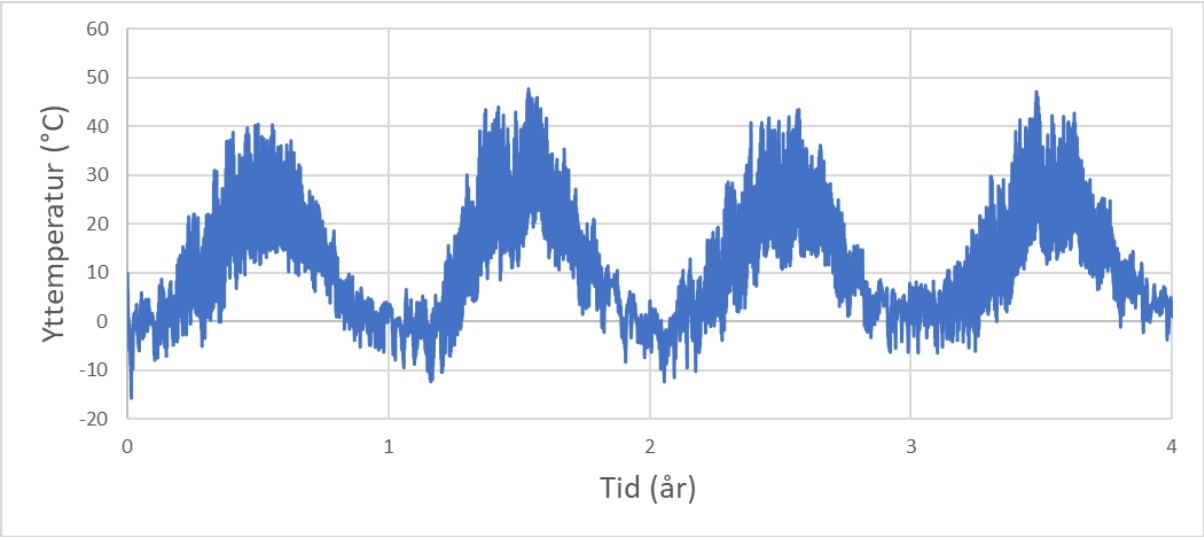
I detta avsnitt presenteras simuleringarna för motorväg, GC-väg och bro. För simuleringarna är emissivitet och absorptionsförmåga konstanta värden, 0,81 respektive 0,78. Väderdatan ovan och de olika asfaltsmaterialens termiska egenskaper låg till grund för de olika mätningarna av yttemperaturer.

Tabellerna nedan visar hur vägarna utformas, vilken asfalt som används och deras respektive värmeledningsförmåga, densitet och specifik värmekapacitet. Längre ner kan man se hur temperaturen på slitlagrets yta förändras över den valda perioden, vilka maximum och minimum temperaturer vi har för varje år och hur många timmar temperaturen är under 0 °C.

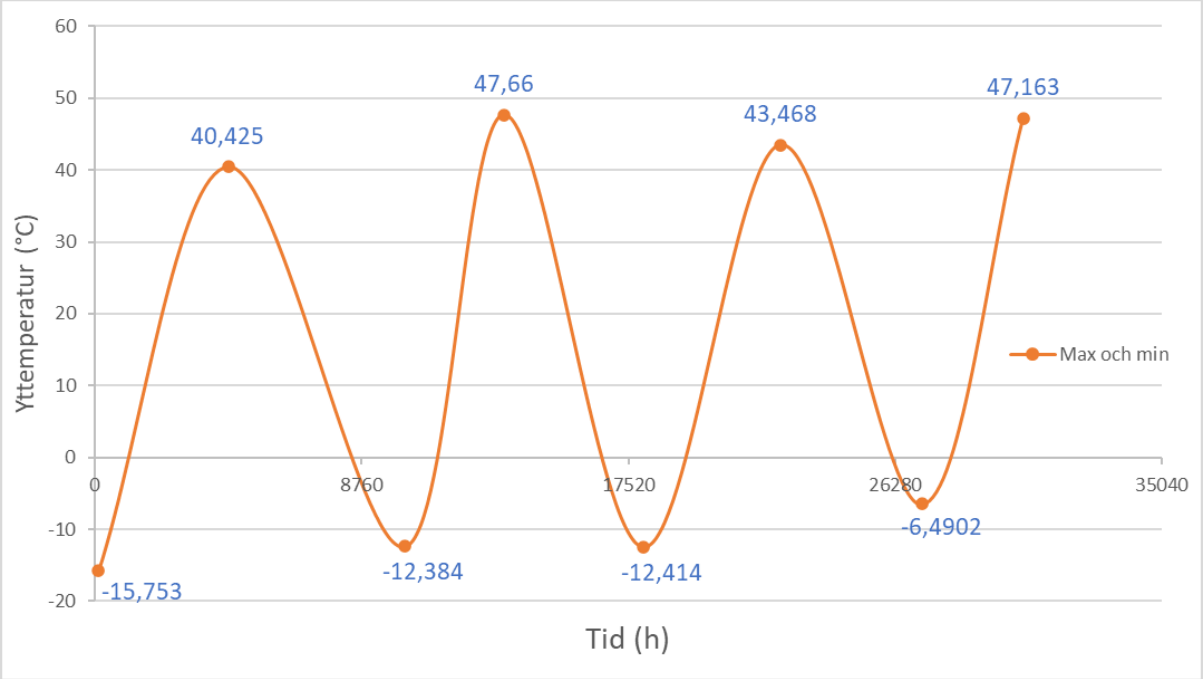
4.2.1 Motorväg

Tabell 11: Asfaltsmaterial och deras respektive tjocklekar och termiska egenskaper.

Material	Tjocklek [mm]	Värmeledningsförmåga $[W/m \cdot K]$	Densitet $[kg/m^3]$	Specifik värmekapacitet $[J/kg \cdot K]$
Slitlager (ABS)	32	2,24	2415	2050
Bindlager (ABb)	60	1,44	2577	822
Bundet bärlager (AG22)	60	2,28	2582	2280
Bärlager (bergkross)	80	0,7	1700	900
Förstärkningslager (bergkross)	610	0,8	1400	900
Mark	10	0,6	1300	600



Figur 14: Max- och mintemperaturer för varje dag under perioden.



Figur 15: Max- och min yttemperatur för varje år.

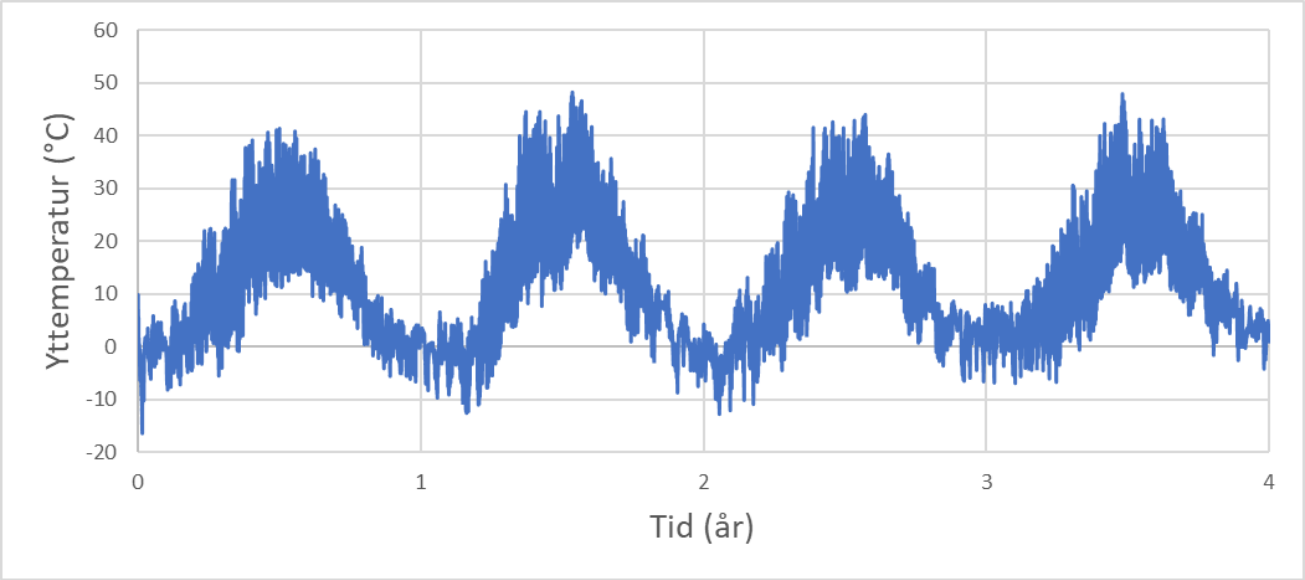
Tabell 12: Medel, max och min temperatur och antal timmar då yttemperaturen är under 0° C för varje år.

År	Medel (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Antal timmar då temp. <0°C
2017	9,870722	40,425	-15,753	1436
2018	11,15421	47,66	-12,384	2013
2019	10,49339	43,468	-12,414	1302
2020	11,86253	47,163	-6,4902	498

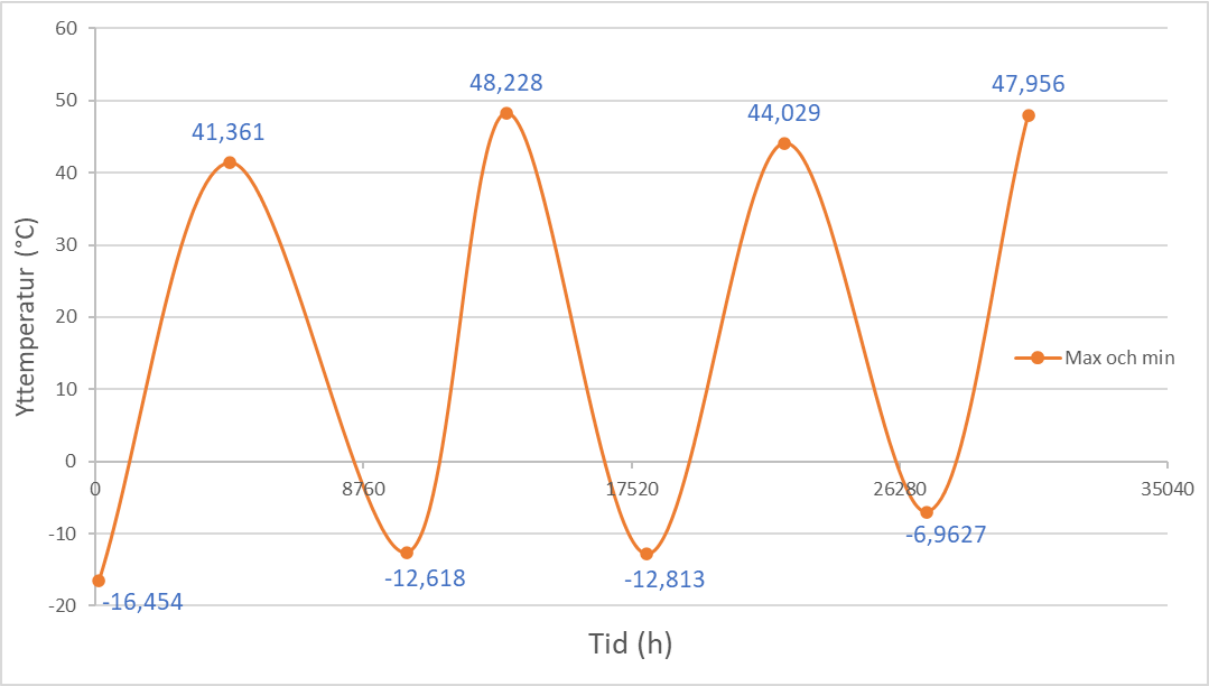
4.2.2 GC-väg

Tabell 13: Asfaltsmaterial och deras respektive tjocklekar och termiska egenskaper.

Material	Tjocklek [mm]	Värmeledningsförmåga [W/m · K]	Densitet [kg/m^3]	Specifik värmekapacitet [J/kg*K]
Slitlager (ABT8)	45	2,24	2415	848
Bärlager (AG22)	80	0,7	1700	900
Förstärkningslager	375	0,8	1400	900
Mark	3720	0,6	1300	600



Figur 16: Max- och mintemperaturer för varje dag under perioden.



Figur 17: Max- och min yttemperatur för varje år.

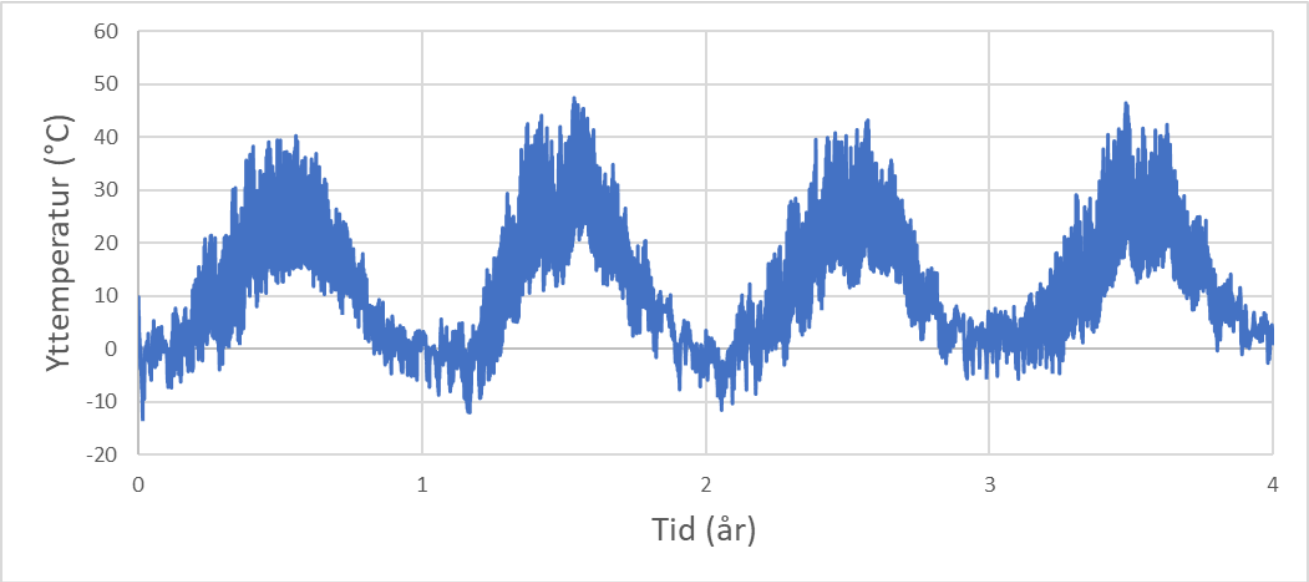
Tabell 14: Medel, max och min temperatur och antal timmar då yttemperaturen är under 0° C.

År	Medel (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Antal timmar då temp. <0° C
2017	9,83377	41,361	-16,454	1460
2018	11,12353	48,228	-12,618	2009
2019	10,46894	44,029	-12,813	1307
2020	11,84452	47,956	-6,9627	533

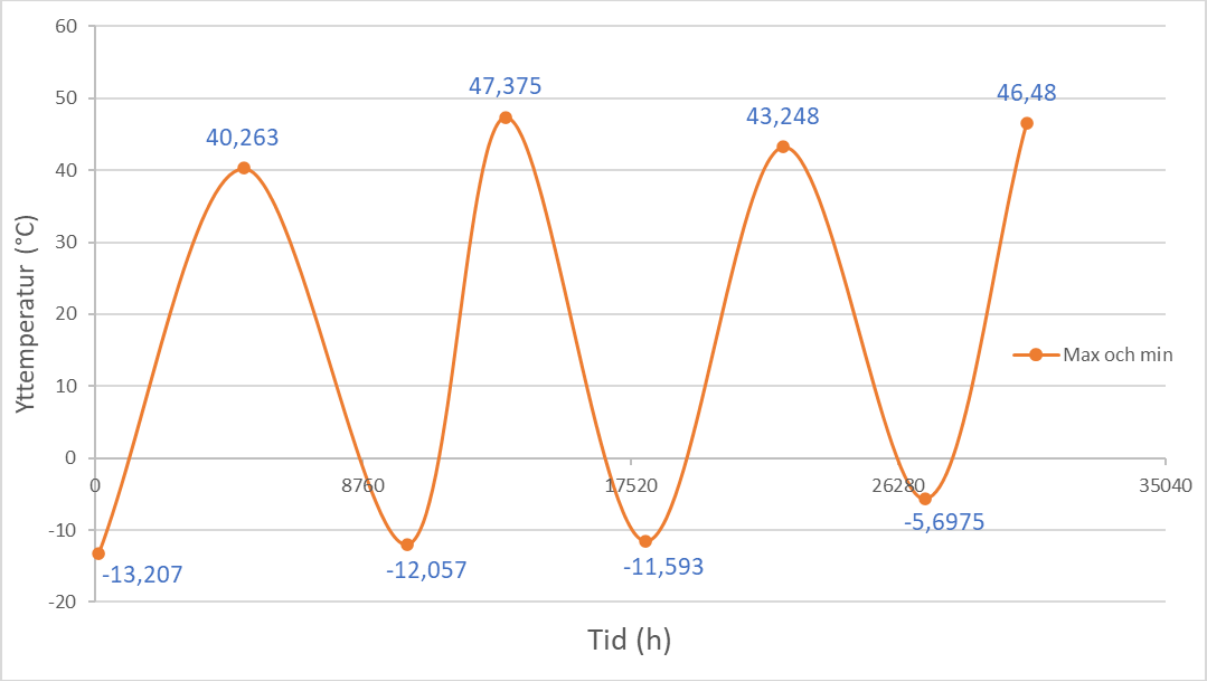
4.2.3 Bro

Tabell 15: Asfaltsmaterial och deras respektive tjocklekar och termiska egenskaper.

Material	Tjocklek [mm]	Värmeledningsförmåga [W/m · K]	Densitet [kg/m^3]	Specifik värmekapacitet [J/kg*K]
Slitlager (ABS11)	70	2,24	2415	848
Bindlager (ABb22)	70	1,44	2577	822
Skyddsbetong + tätskikt	100	2,4	2351	1040
Brofundament	170	2,4	2351	1040



Figur 18: Max- och mintemperaturer för varje dag under perioden.



Figur 19: Max och min yttemperatur för varje år.

Tabell 16: Medel-, max- och mintemperatur och antal timmar då yttemperaturen är under 0° C.

År	Medel (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Antal timmar då temp. <0° C
2017	9,882714	40,263	-13,207	1443
2018	11,17855	47,375	-12,057	2090
2019	10,4914	43,248	-11,593	1310
2020	11,89063	46,48	-5,6975	434

4.3 Känslighetsanalys

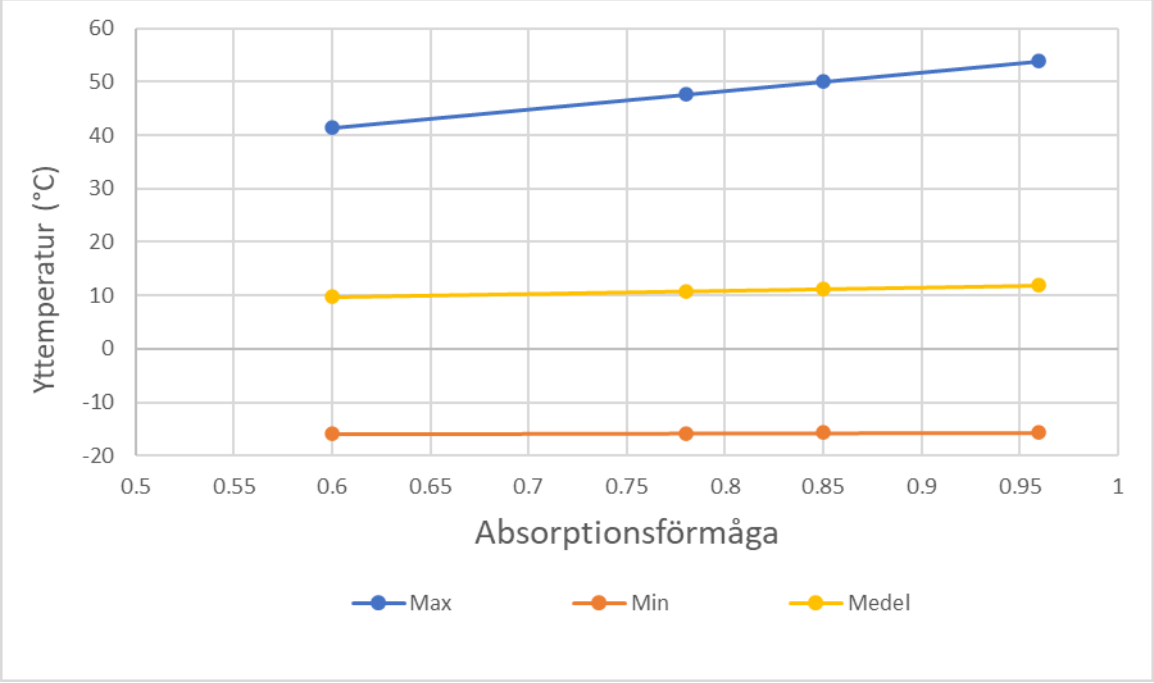
Känslighetsanalysen utfördes med värdena från avsnittet 4.2 som bas. Här ändrades värden på emissivitet, absorptionsförmåga och värmeledningsförmåga för att undersöka hur stor påverkan det hade på yttemperaturen.

Absorptionsförmågan analyserades med värdena 0,6, 0,78, 0,85 och 0,96 och emissiviteten med värdena 0,81, 0,9, 0,95 och 0,98. Värmeledningsförmågan analyserades med värdena 1,2 och 3 $W/m \cdot K$.

4.3.1 Motorväg

I detta avsnitt presenteras känslighetsanalysen för motorväg där grafer och tabeller illustrerar hur yttemperaturen påverkas när absorption, emissivitet och värmeledningsförmåga ändras.

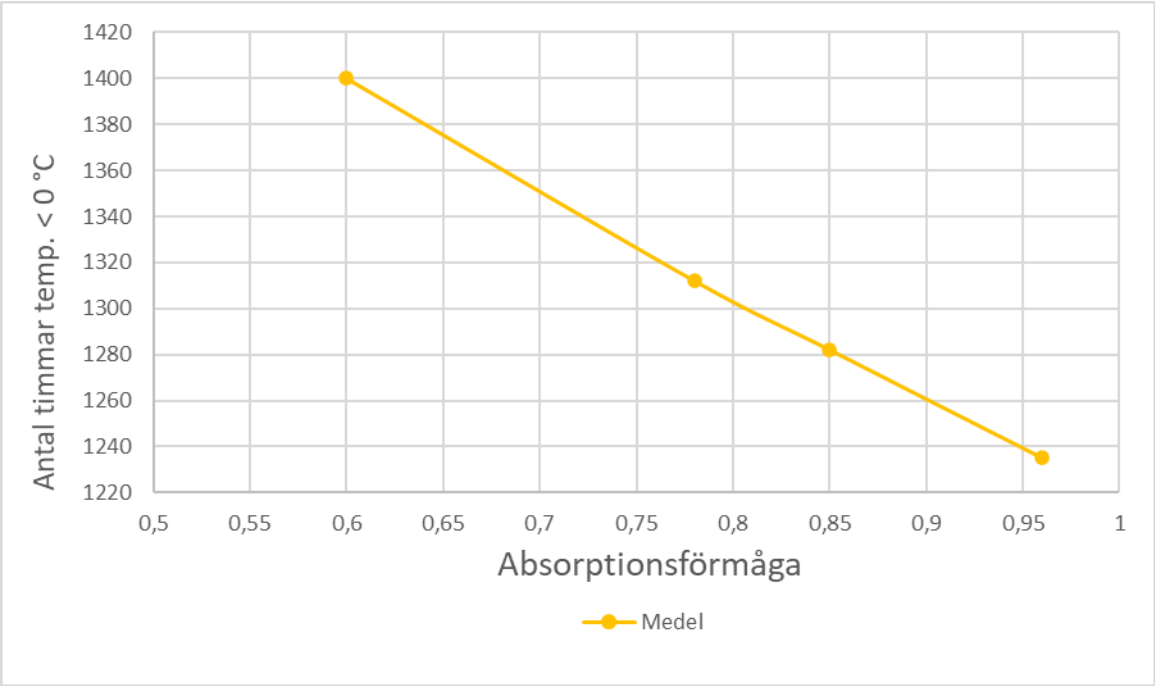
(i) Absorptionsförmåga



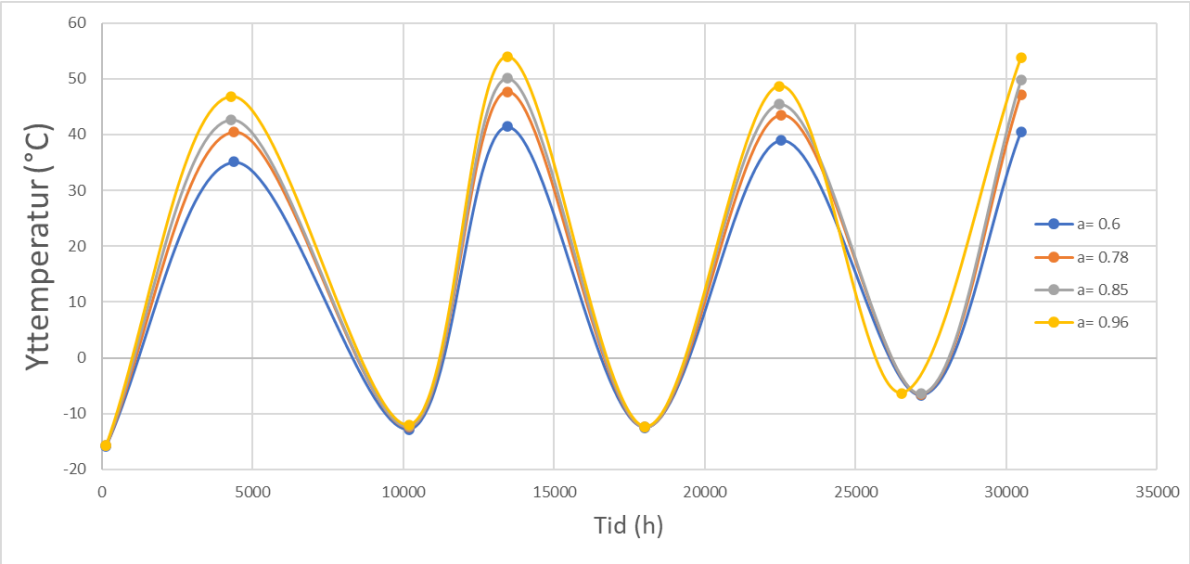
Figur 20: Graf på hur min-, max- och medeltemperatur varierar när absorptionsförmågan ändras.

Tabell 17: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när absorptionsförmågan ändras.

Absorptionsförmåga [-]	0,6	0,78	0,85	0,96
Max (°C)	41,40	47,66	50,09	53,91
Min (°C)	-15,81	-15,75	-15,73	-15,70
Medel (°C)	9,74	10,85	11,28	11,96
Antal timmar då temp. < 0°C	1400	1312	1282	1235

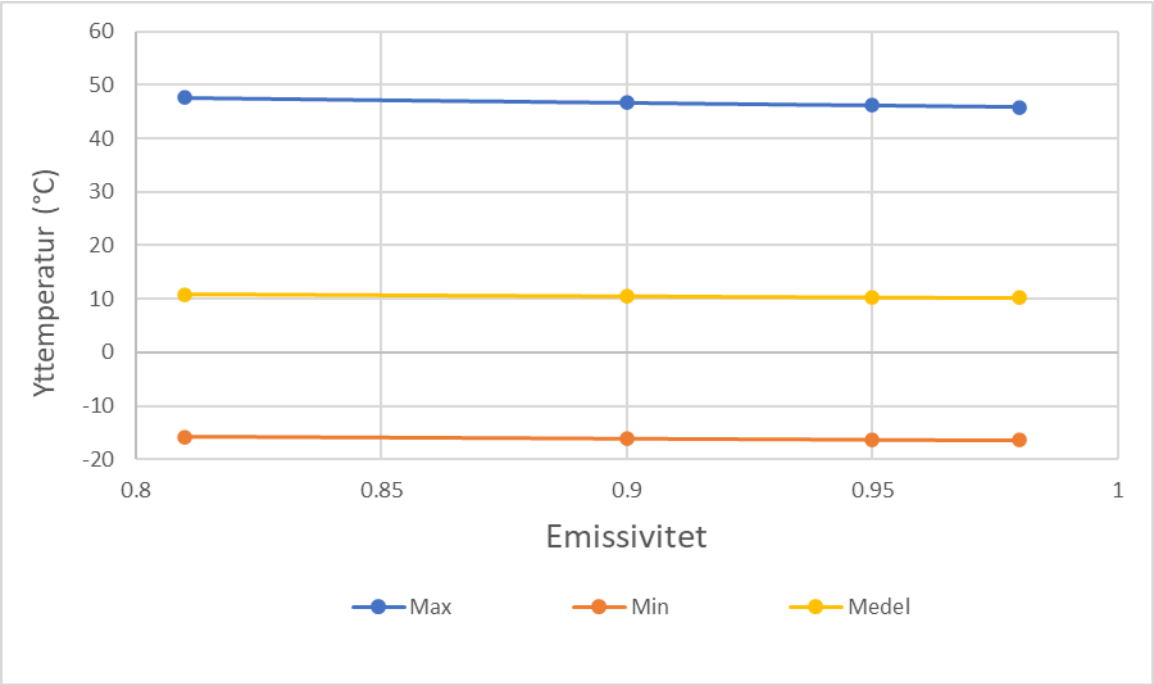


Figur 21: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras när absorptionsförmågan ändras.



Figur 22: Graf på hur min-, max- och medeltemperatur varierar när absorptionsförmågan ändras.

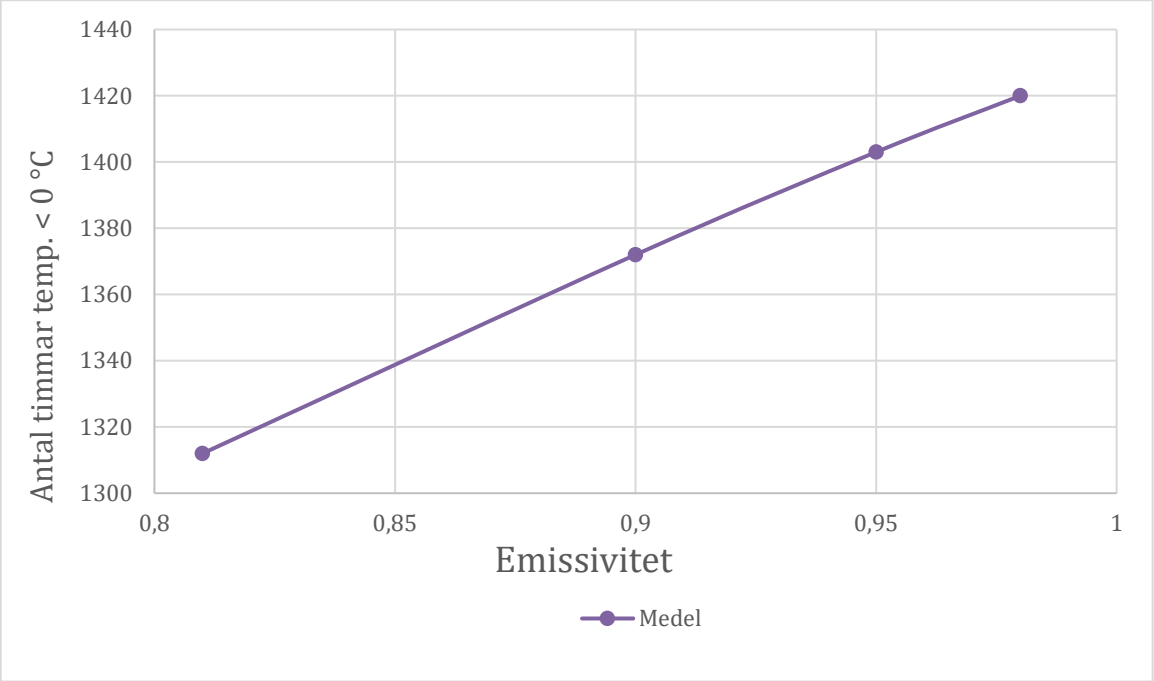
(ii) Emissivitet



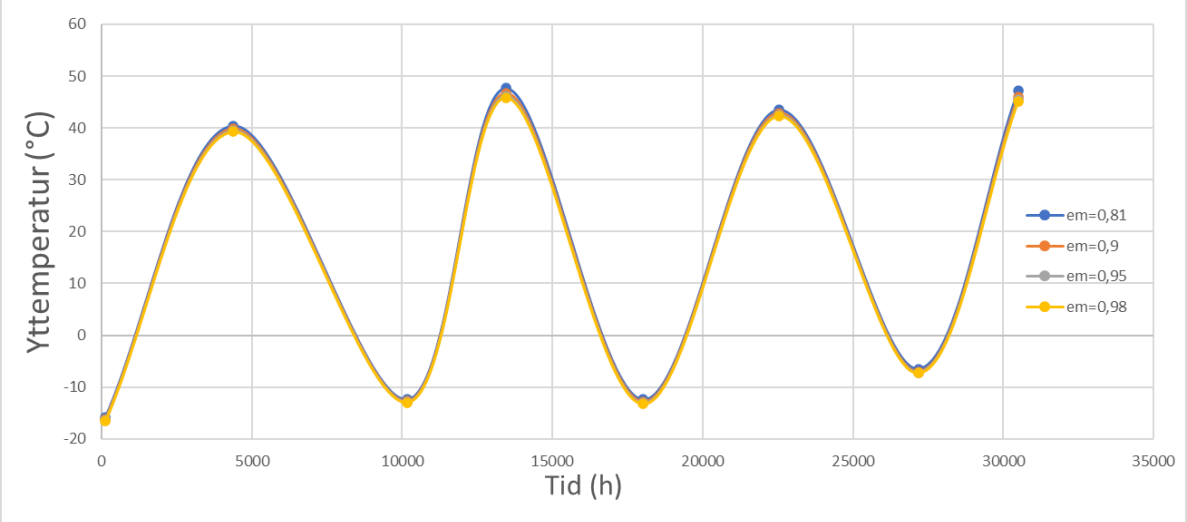
Figur 23: Sammanställning av samtliga värden för emissiviteten och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 18: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när emissiviteten ändras.

Emissivitet [-]	0,81	0,9	0,95	0,98
Max (°C)	47,66	46,70	46,19	45,89
Min (°C)	-15,75	-16,12	-16,32	-16,44
Medel (°C)	10,85	10,52	10,34	10,24
Antal timmar då temp. < 0	1312	1372	1403	1420

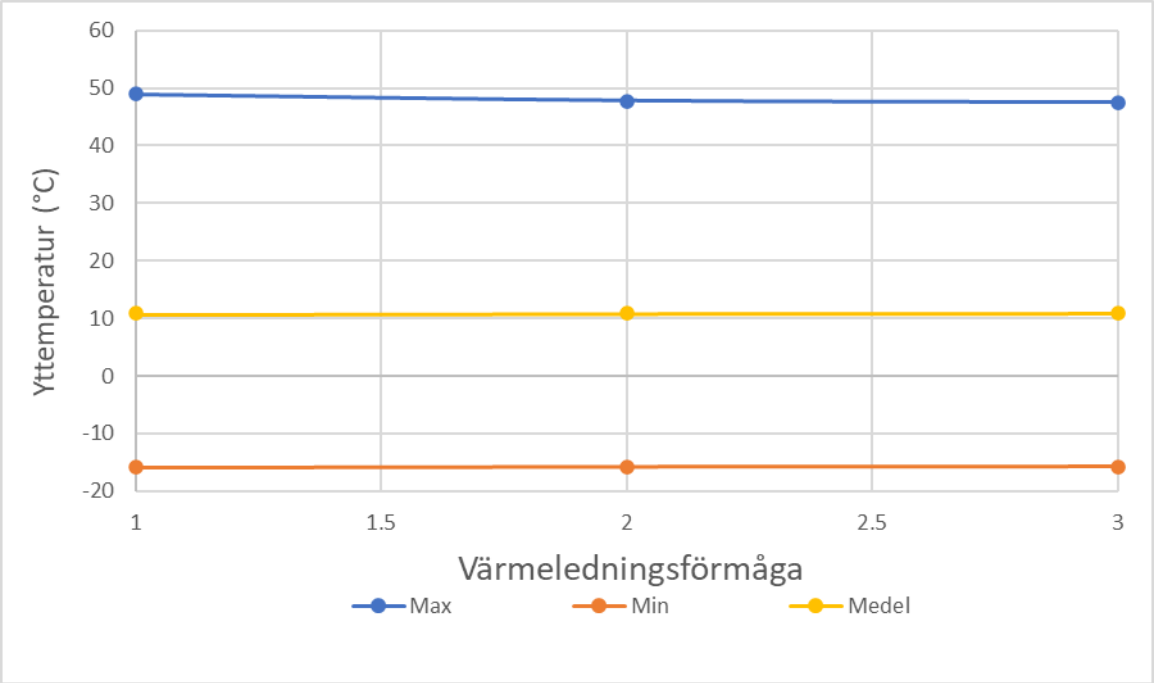


Figur 24: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras när emissiviteten ändras.



Figur 25: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när emissiviteten ändras.

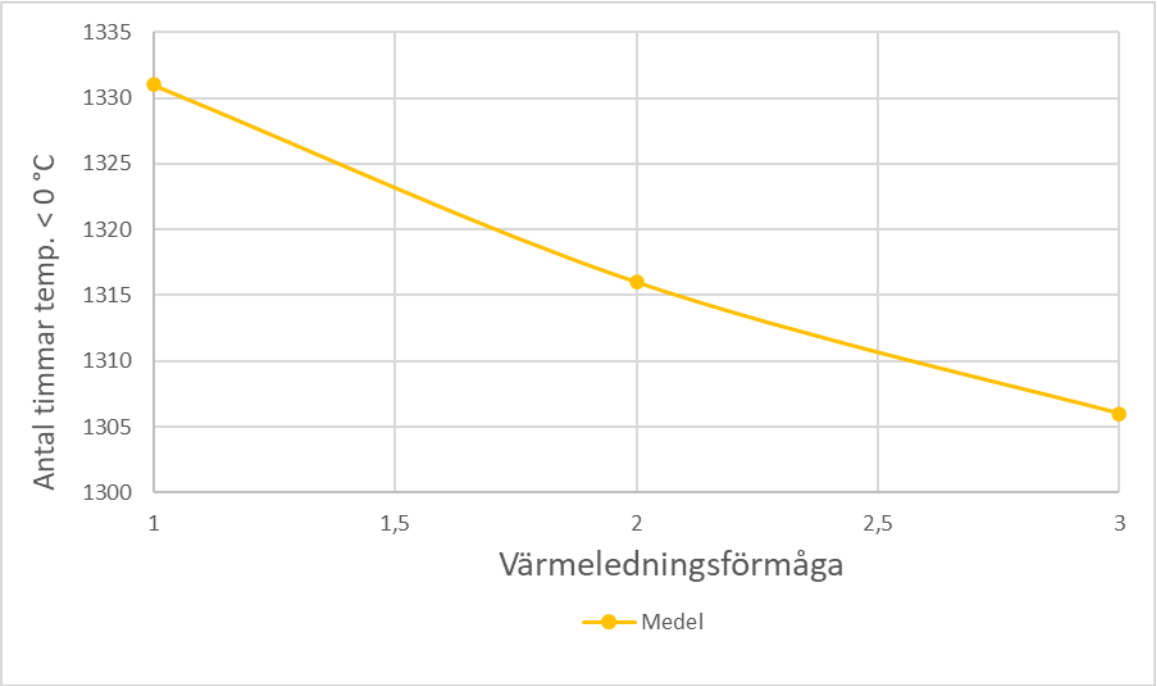
(iii) Värmeledningsförmåga



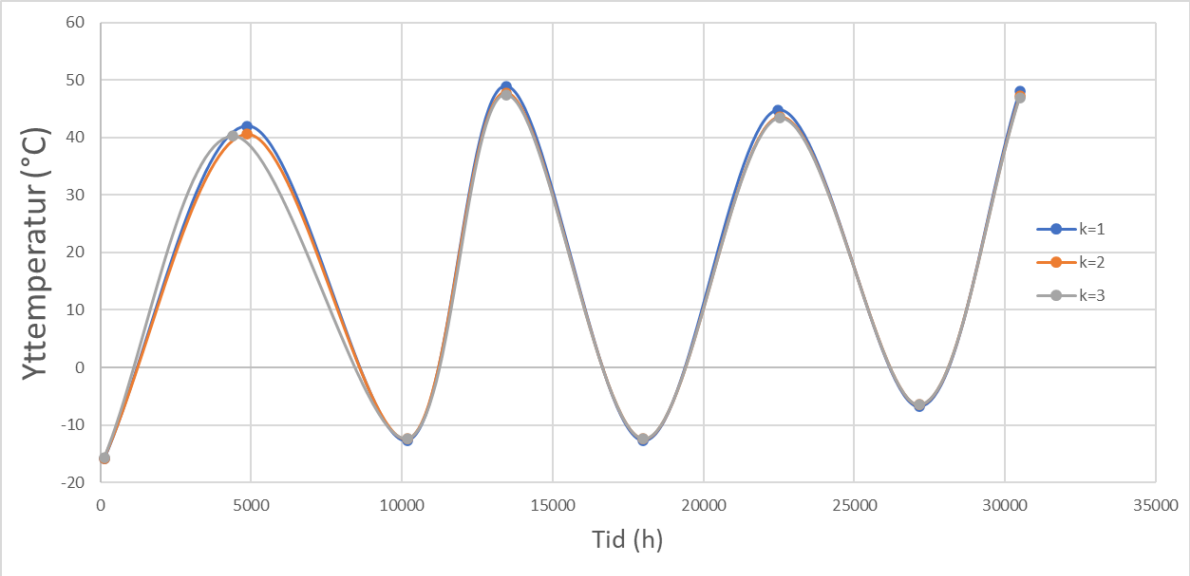
Figur 26: Sammanställning av samtliga värden för värmeledningsförmågan och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 19: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när värmeledningsförmågan ändras.

Värmeledningsförmåga $[W/m \cdot K]$	1	2	3
Max (°C)	48,92	47,78	47,46
Min (°C)	-15,89	-15,77	-15,72
Medel (°C)	10,81	10,84	10,85
Antal timmar då temp. < 0	1331	1316	1306



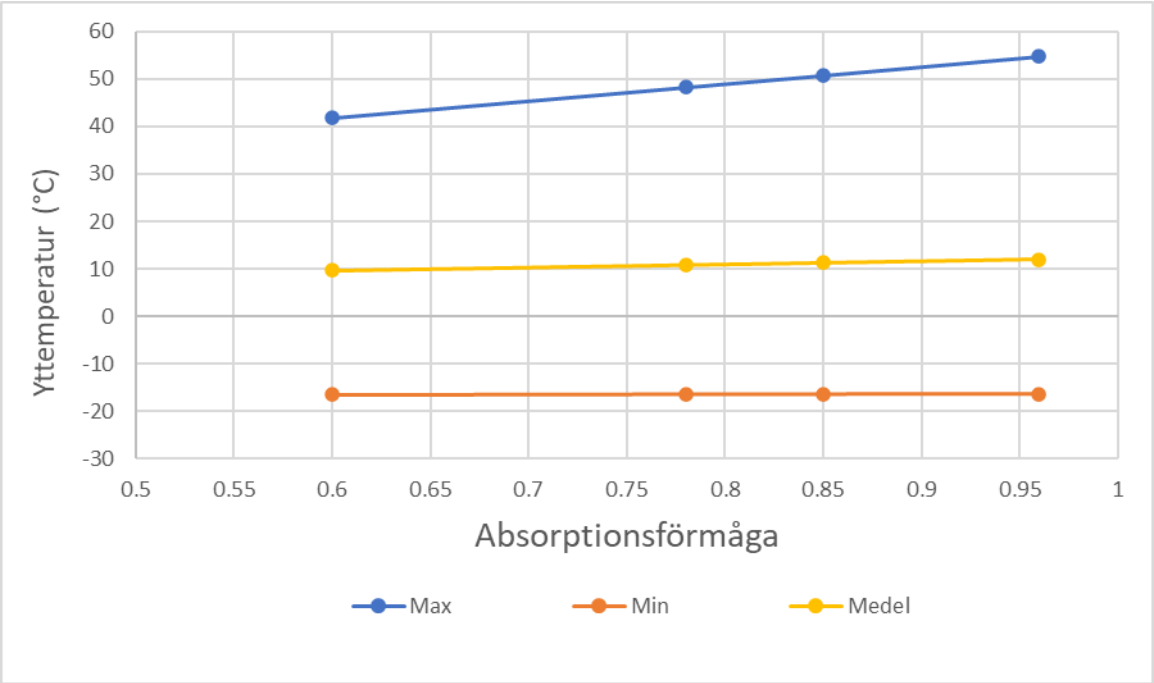
Figur 27: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras när värmeledningsförmågan ändras.



Figur 28: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när värmeledningsförmågan ändras.

4.3.2 GC-väg

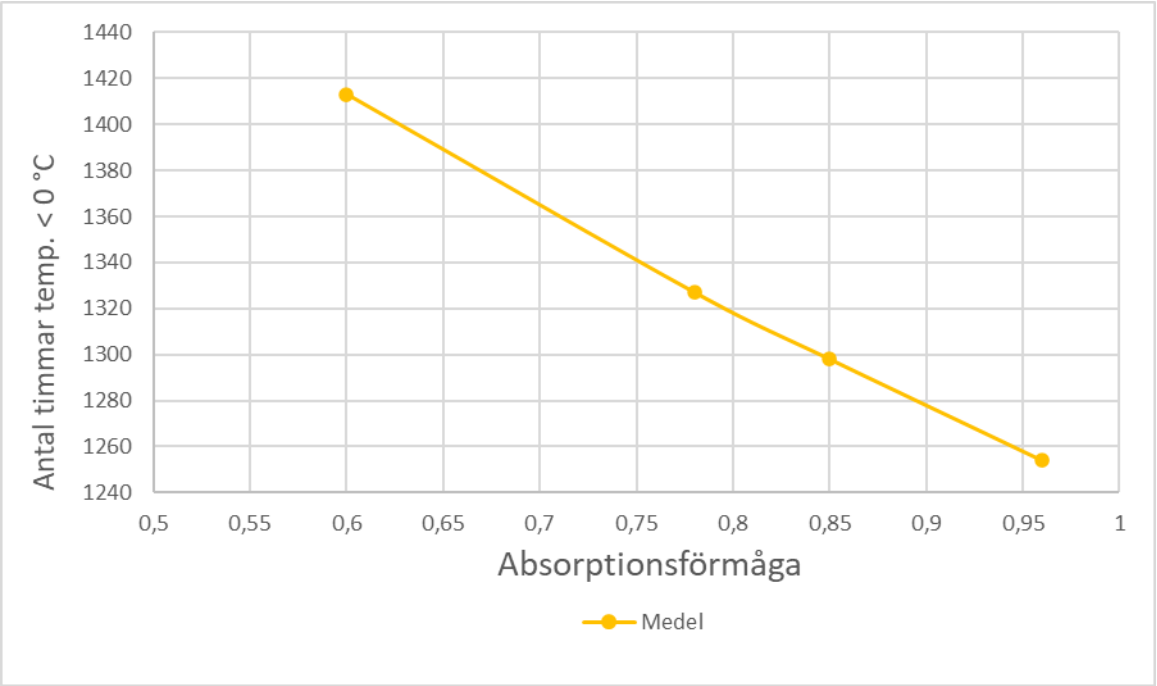
(i) Absorptionsförmåga



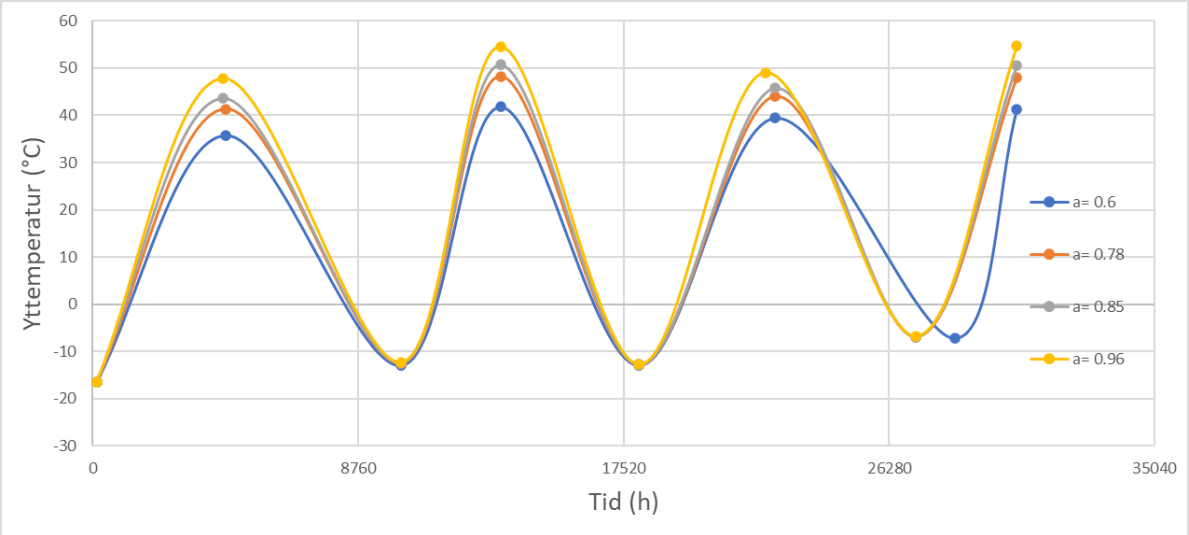
Figur 29: Sammanställning av samtliga värden för absorptionsförmågan och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 20: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när absorptionsförmågan ändras.

Absorptionsförmåga [-]	0,6	0,78	0,85	0,96
Max (°C)	41,83	48,23	50,70	54,66
Min (°C)	-16,52	-16,45	-16,44	-16,41
Medel (°C)	9,71	10,82	11,25	11,93
Antal timmar då temp. < 0°C	1413	1327	1298	1254

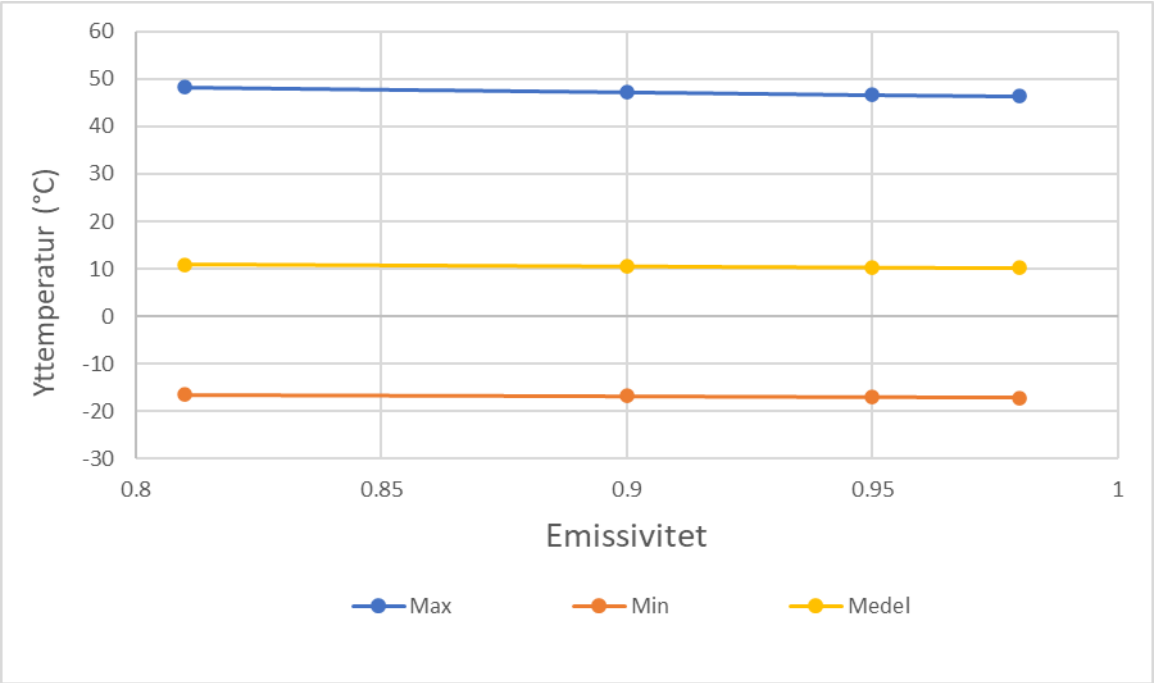


Figur 30: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras när absorptionsförmågan ändras.



Figur 31: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när absorptionsförmågan ändras.

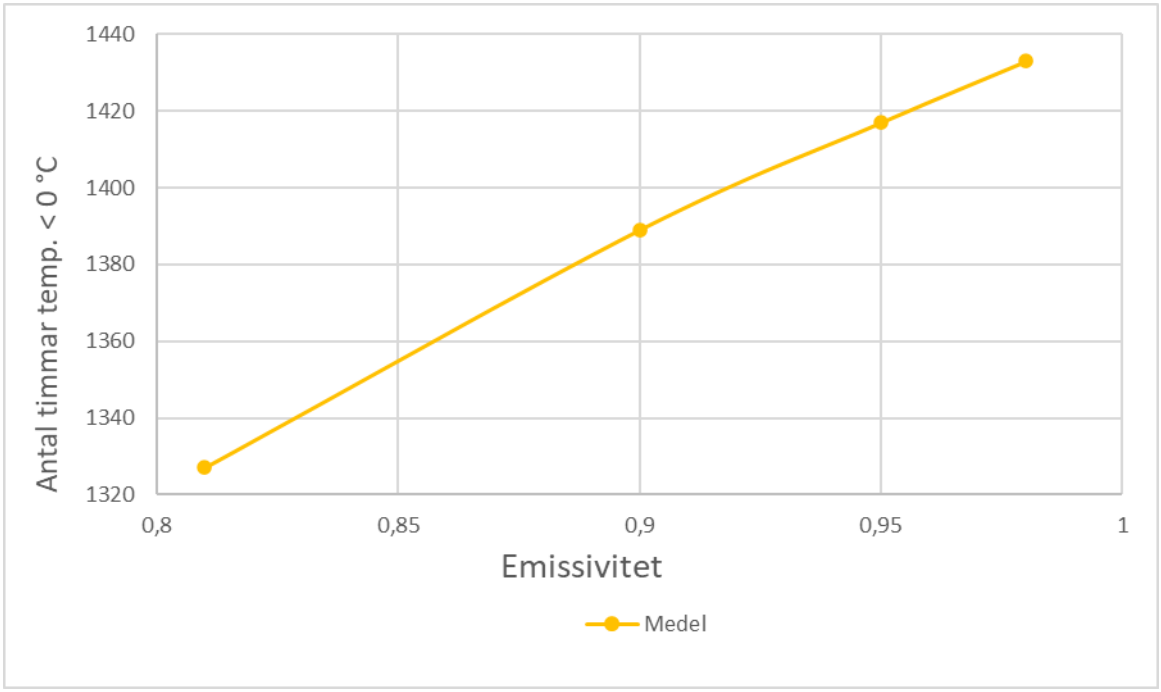
(ii) Emissivitet



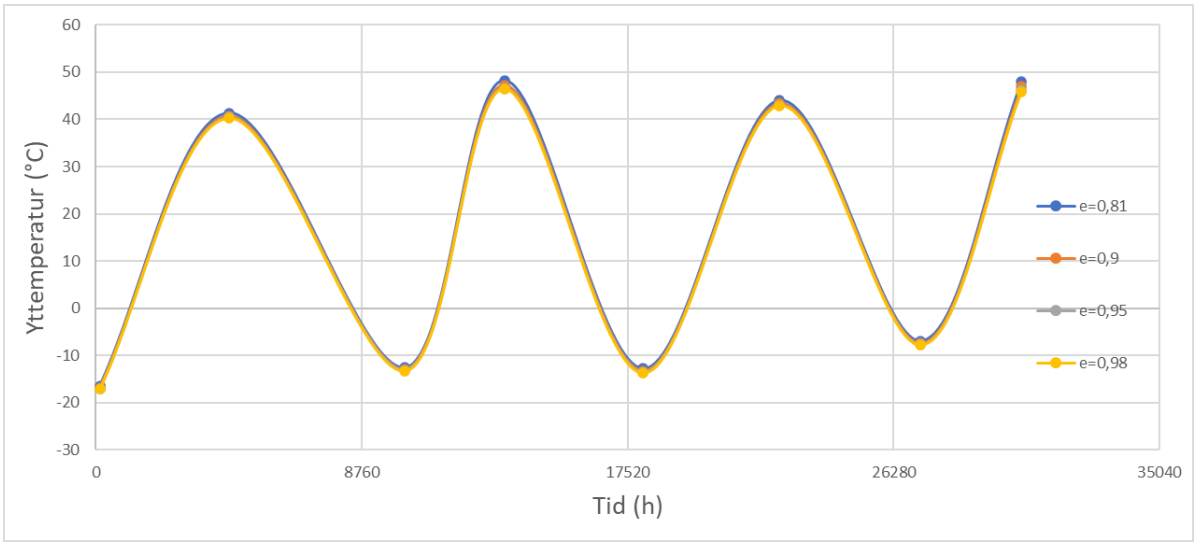
Figur 32: Sammanställning av samtliga värden för emissiviteten och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 21: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när emissiviteten ändras.

Emissivitet [-]	0,81	0,9	0,95	0,98
Max (°C)	48,23	47,24	46,66	46,36
Min (°C)	-16,45	-16,83	-17,03	-17,16
Medel (°C)	10,82	10,49	10,32	10,22
Antal timmar då temp. < 0°C	1327	1389	1417	1433

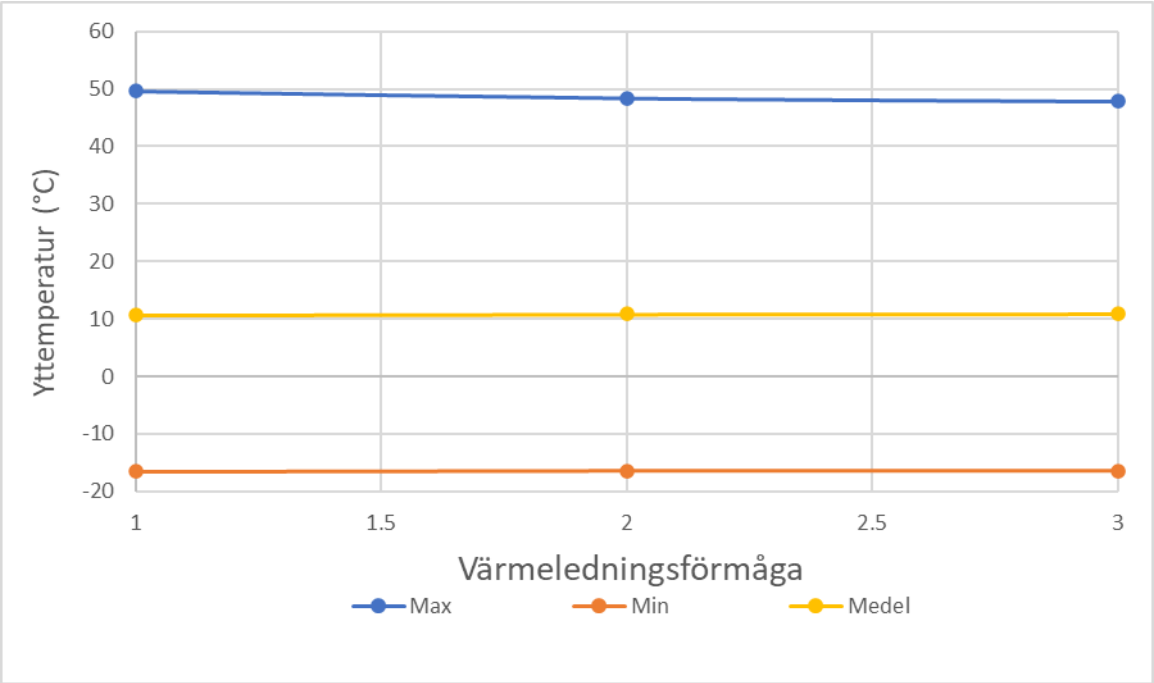


Figur 33: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras när emissiviteten ändras.



Figur 34: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när emissiviteten ändras.

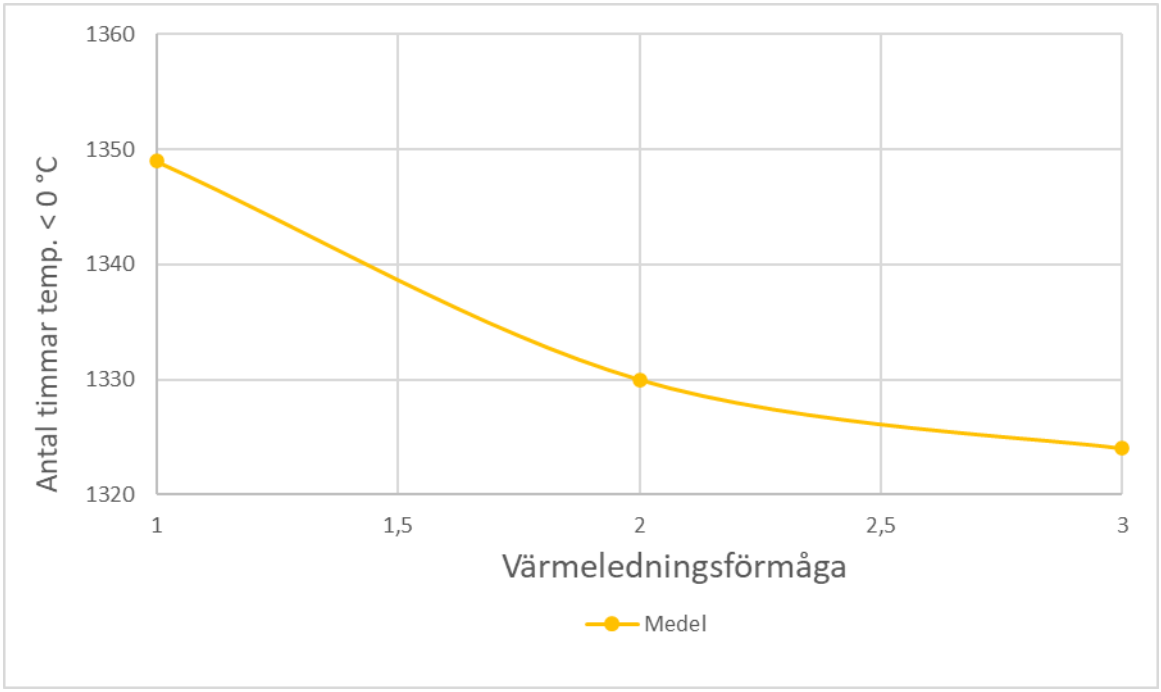
(iii) Värmeledningsförmåga



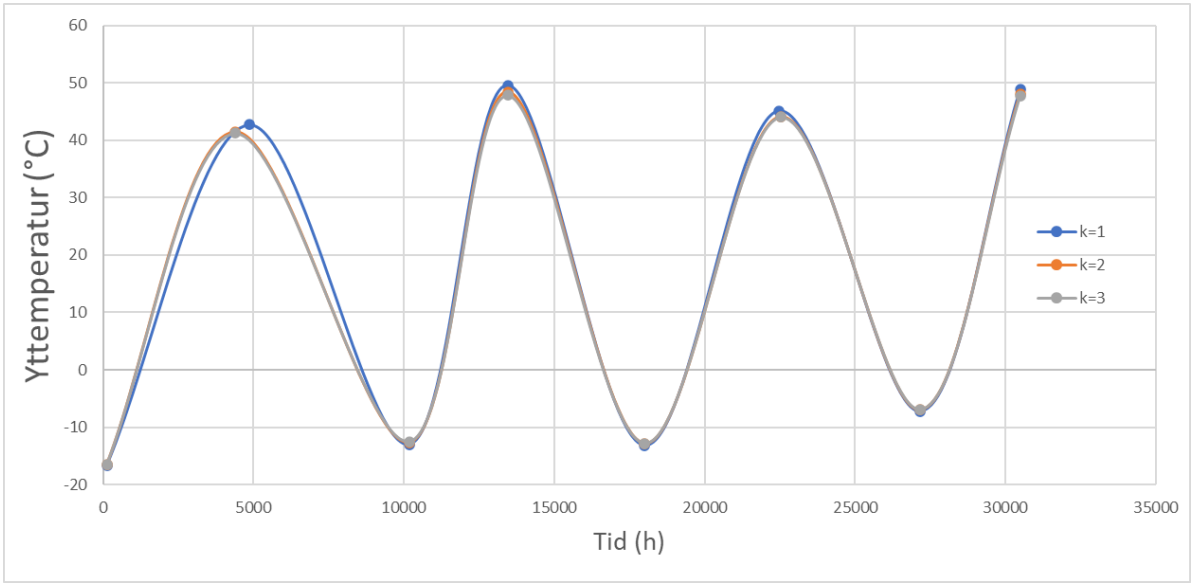
Figur 35: Sammanställning av samtliga värden för värmeledningsförmågan och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 22: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när värmeledningsförmågan ändras.

Värmeledningsförmåga $[W/m \cdot K]$	1	2	3
Max (°C)	49,60	48,38	47,81
Min (°C)	-16,60	-16,47	-16,45
Medel (°C)	10,78	10,81	10,83
Antal timmar då temp. < 0°C	1349	1330	1324



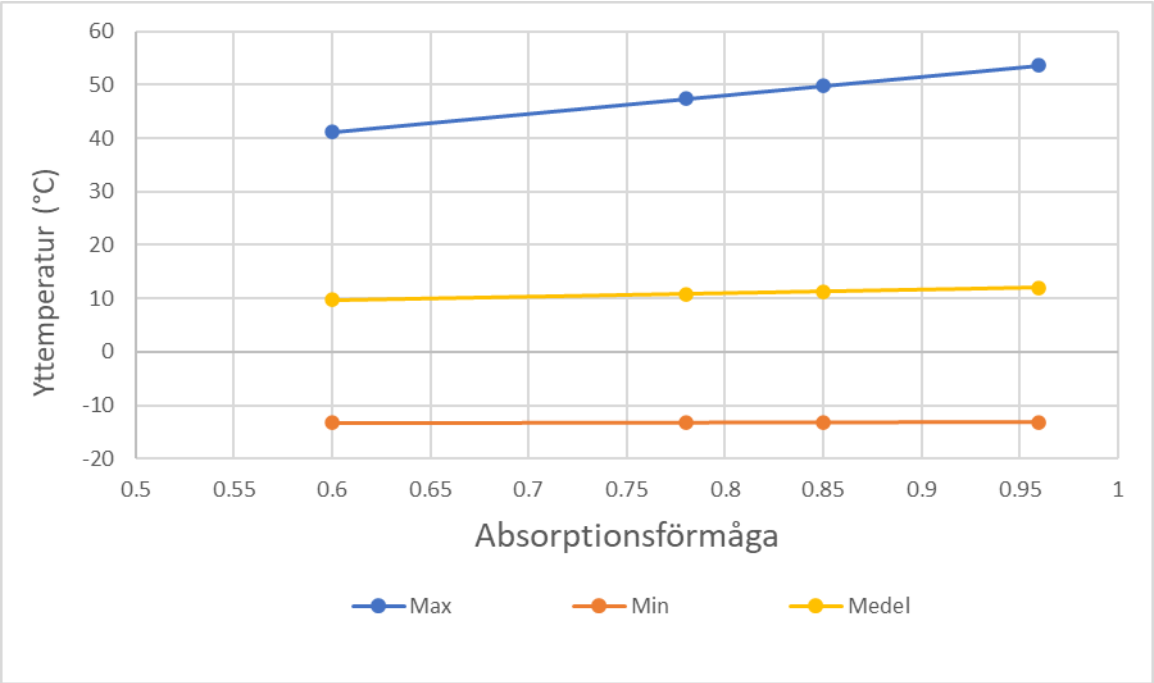
Figur 36: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras värmeledningsförmågan ändras.



Figur 37: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när värmeledningsförmågan ändras.

4.3.3 Bro

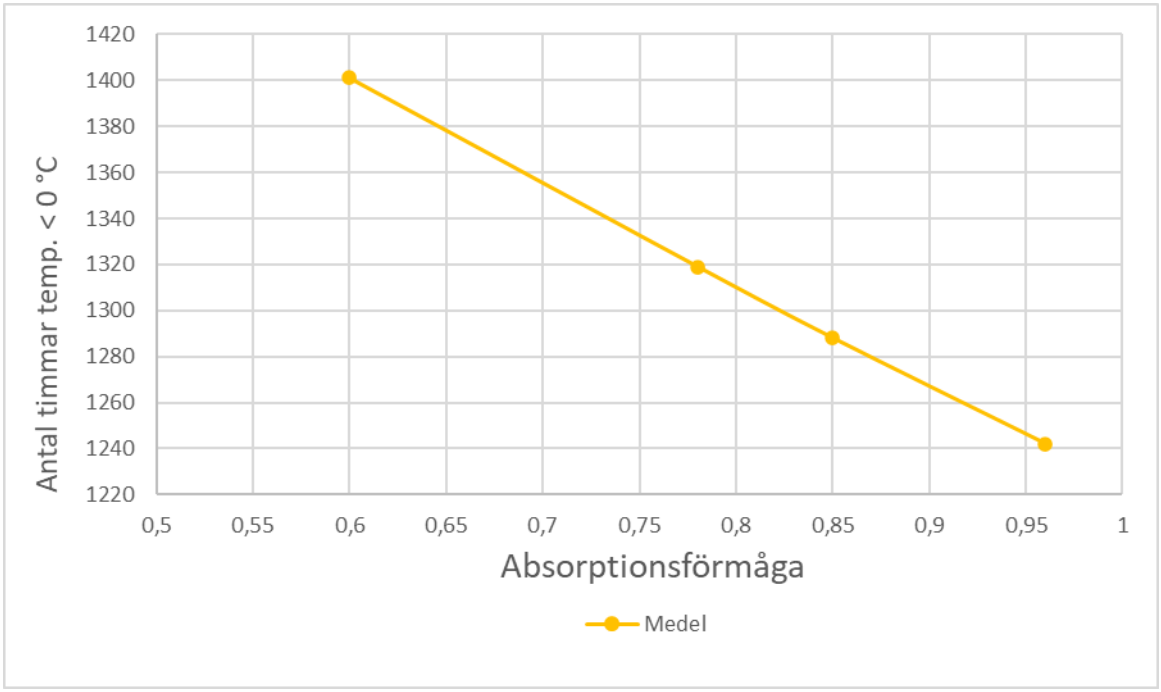
(i) Absorptionsförmåga



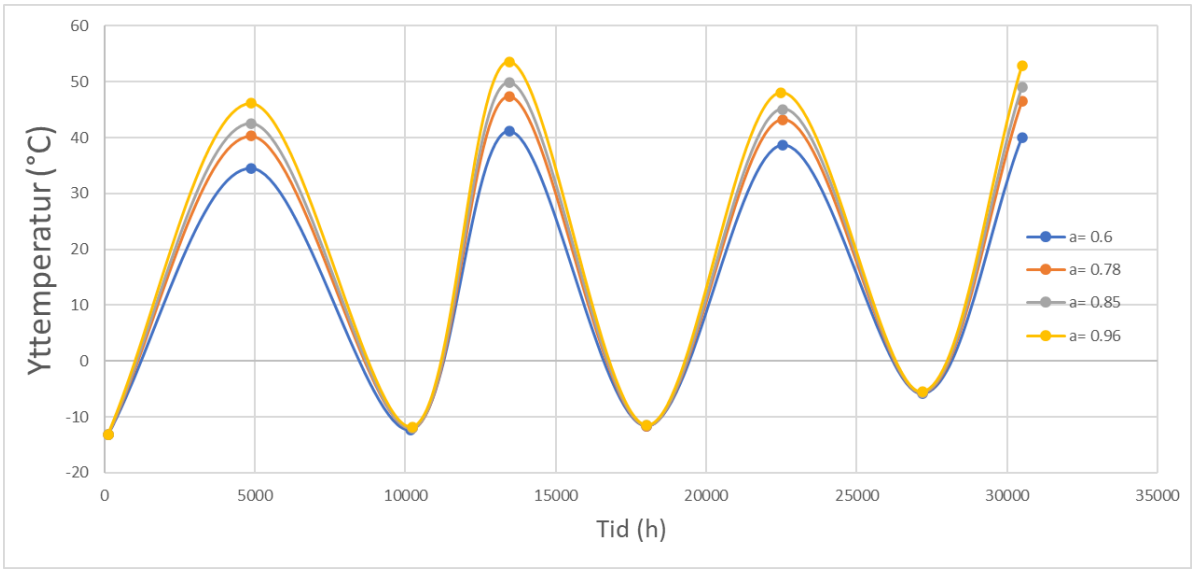
Figur 38: Sammanställning av samtliga värden för absorptionsförmågan och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 23: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när absorptionsförmågan ändras.

Absorptionsförmåga [-]	0,6	0,78	0,85	0,96
Max (°C)	41,17	47,38	49,80	53,59
Min (°C)	-13,26	-13,21	-13,19	-13,15
Medel (°C)	9,75	10,86	11,29	11,97
Antal timmar då temp. < 0°C	1401	1319	1288	1242

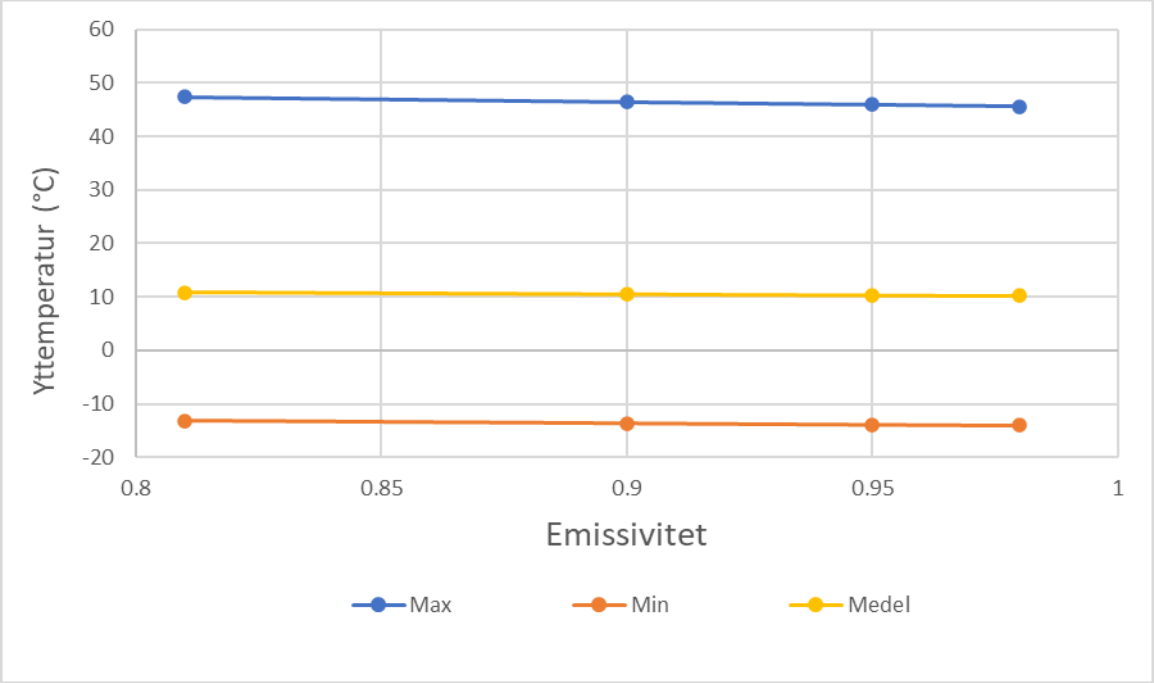


Figur 39: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras absorptionsförmågan ändras.



Figur 40: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när absorptionsförmågan ändras.

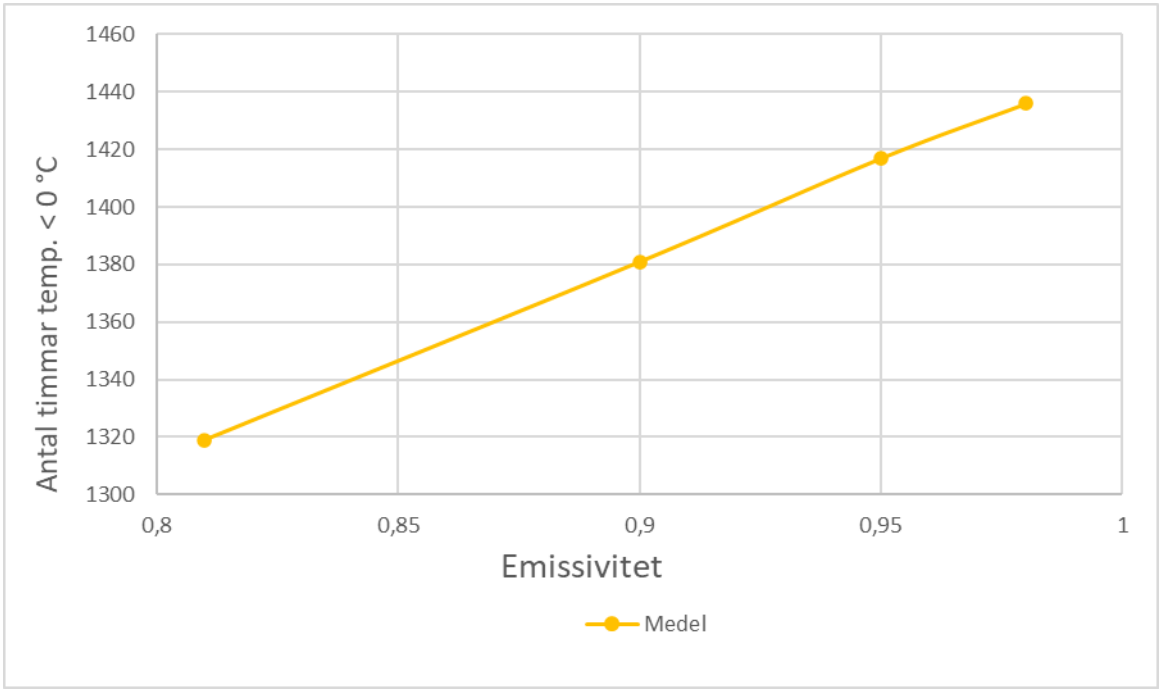
(ii) Emissivitet



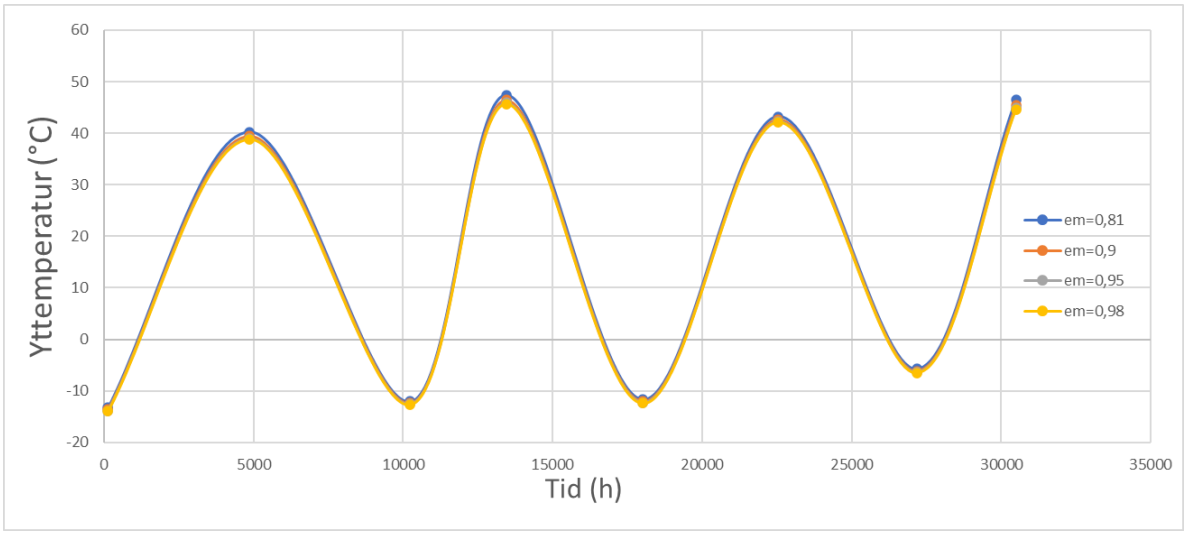
Figur 41: Sammanställning av samtliga värden för emissiviteten och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 24: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när emissiviteten ändras.

Emissivitet [-]	0,81	0,9	0,95	0,98
Max (°C)	47,38	46,43	45,92	45,63
Min (°C)	-13,21	-13,61	-13,83	-13,95
Medel (°C)	10,86	10,54	10,36	10,26
Antal timmar då temp. < 0°C	1319	1381	1417	1436

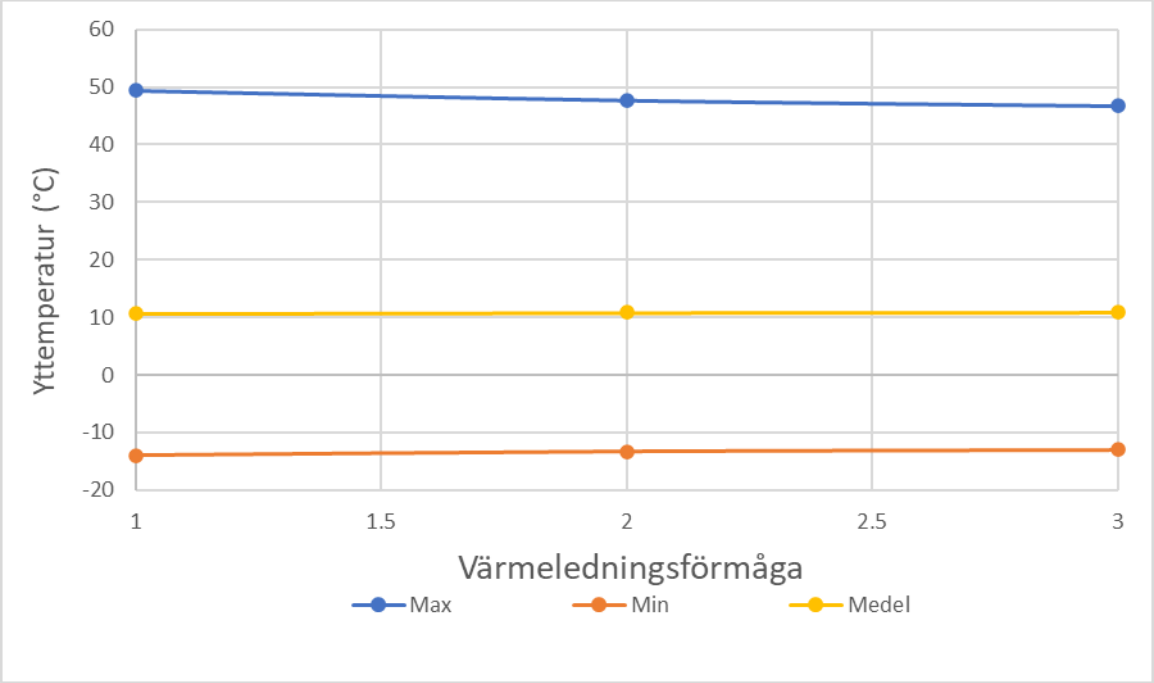


Figur 42: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras när emissiviteten ändras.



Figur 43: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när emissiviteten ändras.

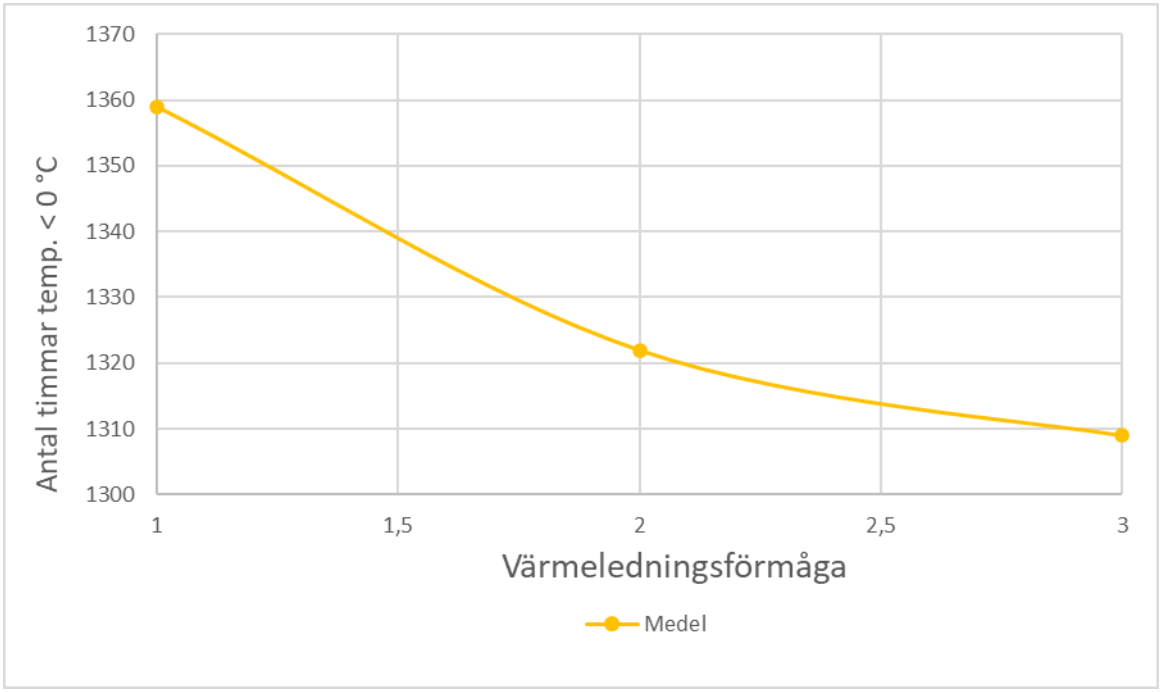
(iii) Värmeledningsförmåga



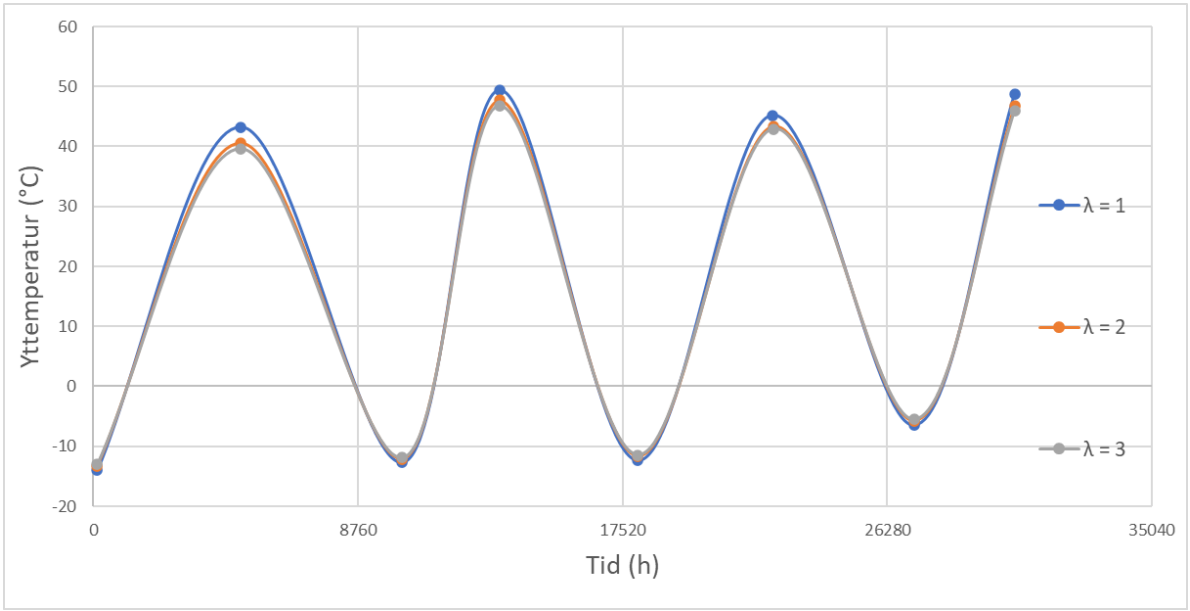
Figur 44: Sammanställning av samtliga värden för värmeledningsförmågan och hur yttemperaturen påverkas över hela perioden.

Tabell 25: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C när värmeledningsförmågan ändras.

Värmeledningsförmåga $[W/m \cdot K]$	1	2	3
Max (°C)	49,36	47,68	46,70
Min (°C)	-13,99	-13,28	-13,04
Medel (°C)	10,79	10,85	10,88
Antal timmar då temp. < 0°C	1359	1322	1309



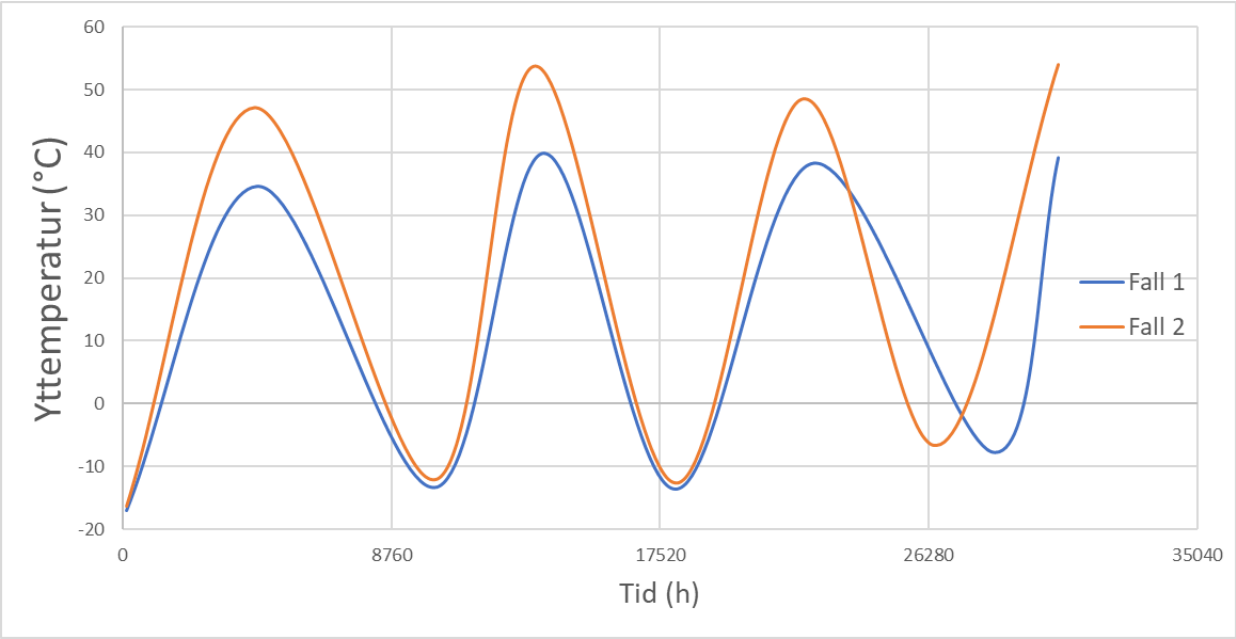
Figur 45: Graf som visar hur antal timmar under 0°C förändras när värmeledningsförmågan ändras.



Figur 46: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för perioden när värmeledningsförmågan ändras.

4.3.4 Extrempunkter

Detta avsnitt visar resultaten för extrempunkterna med avseende på värden för absorptionsförmågan och emissiviteten. För det första fallet är absorptionsförmågan det lägsta värdet (0,6) och emissiviteten och det högsta värdet (0,96) inom räckvidden. För det andra fallet är i stället absorptionsförmågan det högsta värdet (0,96) och emissiviteten det lägsta värdet (0,81) inom räckvidden.



Figur 47: Grafen visar de lägst och högst uppmätta temperaturerna för extrempunkterna under perioden.

Tabell 26: Min-, max- och medeltemperatur och antal timmar under 0°C för extrempunkterna och differensen.

	Fall 1	Fall 2	Differens Δ
Max (°C)	39,84	54,05	14,21
Min (°C)	-17,11	-16,35	0,77
Medel (°C)	9,17	11,94	2,77
Antal timmar då temp. < 0°C	1519	1244	-275

5 Slutsats & Diskussion

Simuleringsresultaten visar att en ökade absorptionsförmåga leder till att yttemperaturen för asfalten ökar. Absorptionsförmåga är ett mått på hur mycket solenergi som absorberas en yta, därav är det rimligt att temperaturen ökar. Absorptionsförmåga är en termisk egenskap som är lätt att påverka, eftersom den är direkt associerad med färgen av materialet. Vad gäller en ändring för emissivitet påverkas temperaturen likt trenden för absorptionsförmågan, men i stället minskar temperaturen. I den numeriska analysen varierade värmeledningsförmågan inom räckvidden 1-3, till skillnad från absorptionsförmåga och emissivitet visade resultaten att värmeledningsförmåga har en relativt liten inverkan på temperaturen hos olika asfaltsbeläggingar, både för vinter och sommartid.

Resultaten från känslighetsanalysen gav en tydlig bild på hur de termiska egenskaperna påverkar yttemperaturen. Från simuleringarna på motorväg kunde vi se att en ändring på 0,36 i absorption från 0,6 till 0,96 resulterade i en ökad maximal yttemperatur under sommaren från 41,40 °C till 53,91°C, en ökning på 12,51 °C. På vintern fick vi en minskning i antalet timmar då yttemperaturen är under 0°C från 1400 till 1235. Skillnaden i lägsta yttemperatur på vintern var näst intill obefintlig, från –15,81 °C till -15,70 °C. Att antal timmar då temperaturen är under 0°C, ändras med ett värde på 265 har en stor betydelse för hanteringen av isbildning och halka på vägunderlaget för den avsedda vägen.

Emissiviteten hade inte en lika stor påverkan som absorptionsförmågan. En ökning från 0.81 till 0.98 minskade endast den maximala yttemperaturen från 47,66 °C till 45,89 °C, en minskning på 1,77 °C. På vintern ökade antalet timmar under fryspunkten från 1312 till 1420, en ökning på 108 timmar. Även lägsta yttemperatur påverkades inte mycket, från -15,75 till -16,44.

Den stora skillnaden i yttemperatur när absorptionsförmågan ändrades blev väldigt intressant för oss. Som vi nämnde i inledningen kan effekterna av varm asfalt i tätbebyggda områden bidra till att värmen hålls kvar vilket gör att hela omgivningen blir varmare. En låg absorptionsförmåga kan därför bli mer lönsam för en miljö med mildare vintrar, exempelvis i städer i södra Sverige.

En hög absorptionsförmåga kan vara anpassningsbart i kallare klimat förutsatt att värmeenergin kan lagras i asfalten. Som det nämndes i avsnitt 2.1.6, hade studier tidigare gjorts på effekten hydroniska rör hade på issmältningen på vintern. Med en asfalt med hög absorptionsförmåga, som ger en ökad yttemperatur hade denna metod kunnat anpassas för att lagra värmeenergin på sommaren för att sedan utnyttja den på vintern.

Som en del av känslighetsanalysen undersöktes extremvärden för de termiska egenskaperna. Resultaten för denna del visade att det högsta värdet för absorptionsförmåga i kombination med det lägsta för emissivitet ledde till väldigt höga temperaturen för yttemperaturen under hela året. Ett lågt värde för emissivitet och ett högt för absorptionsförmåga visade i stället på väldigt låga temperaturen på ytan. En undersökning av extremvärden skapade en tydlig bild av vilka termiska egenskaper som är lämpligast beroende om en hög eller låg yttemperaturen efterfrågas för den avsedda vägbanan. I de fall när klimatet domineras av endast ett varmt eller

kallt klimat, underlättar det valet av de termiska egenskaperna för asfaltsbeläggningarna, eftersom inte lika stor hänsyn behöver tas till stora temperaturvariationer. Stora temperaturvariationer mellan årstider leder till att asfalten behöver optimeras för att behålla en låg temperatur som möjligt under varma perioder, och motsatsen under kalla perioder.

6 Källhänvisning

Per Gunnar Burström, PB. (2007). *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper* (2. uppl). Studentlitteratur.

Trafikverket. (2020). *Värmebölja kan påverka trafiken – både asfalt och räls.* https://www.trafikverket.se/om-oss/nyheter/Nationellt/2020-08/varmebolja-kan-paverka-trafiken—bade-asfalt-och-rals/

Svevia. (2021). *Hur gör man asfalt?* https://www.svevia.se/vart-erbjudande/asfalt/hur-fungerar-asfaltverk

Chen, J., Wang, H., Zhu, H. (2016). *Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified*
asphalt pavement and urban heat island effect. Applied Thermal Engineering 113 (2017) 739–748. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080

Mirzanamadi, R., Hagentoft, C-E., Johansson, P., Johnsson, J. (2017). *Anti-icing of road surfaces using Hydronic Heating Pavement with low temperature. Cold regions Science and Technology, 106-118.* https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.006

Mirzanamadi, R., Johansson, P., Grammatikos, S. (2018). *Thermal Properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study. Construction and Building Materials, 774-785.* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068

Trafikverket. (1994). *Bitumenbundna lager.* https://www.trafikverket.se/contentassets/46aaaeff7d264c71b8ec953091e24ace/1994_26_bitumenbundna_lager.pdf

National Physical Laboratory. (2021). *What is emissivity and why is it important*? https://www.npl.co.uk/resources/q-a/why-is-emissivity-important

Zhang, Z-X. (2016). Effect of Temperature on Rock Fracture. *Rock Fracture and Blasting, 111-133.* https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802688-5.00005-1

Trafikverket. (2020*). KRAV TRVINFRA-00224 Överbyggnad väg, Dimensionering och utformning Trafikverkets infrastrukturregelverk* https://puben.trafikverket.se/dpub/api/v1/Dokument/DownloadDokument?id=e3cce696-3e30-4a4d-9410-105eb49f7fdf&dokumentName=Krav%20TRVINFRA00224%20Oeverbyggnad%20vaeg%20Dimensionering%20och%20utformning%20v1_0.pdf

Vägverket. (1994). *3. Konstruktiv utformning av överbyggnad.* https://www.trafikverket.se/contentassets/46aaaeff7d264c71b8ec953091e24ace/1994_23_konstruktiv_utformning_av_overbyggnader.pdf

Trafikverket. (2011). *TRVK Väg - Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion. TRV 2011:072, TDOK 2011:264* https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10750/RelatedFiles/2011_072_TRVK_vag_2.pdf

Trafikverket. (2019). *Krav Brobyggande. TDOK 2016:0204* https://www.trafikverket.se/contentassets/5e3d8c0eb4e94efd9738cca74b912bf5/krav-brobyggande.pdf

Trafikverket. (1994). *Allmän teknisk beskrivning för broar. BRO 94, 4. Betongkonstruktioner.* https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11031/RelatedFiles/1994_4_bro_94_del_4_betongkonstruktioner.pdf

Sveriges bygguniversitet. (2011). *Robustare brobaneplatta, State-of-the-art och förslag till FUD program.* https://www.sverigesbygguniversitet.se/wp-content/uploads/sites/40/2018/07/Robustare_brobaneplatta_sep-17.pdf

NCC. (2022). *Standardmassor.* https://www.ncc.se/vart-erbjudande/asfalt/asfaltprodukter/standardmassor/

Göteborg Stad. (2021). *Teknisk handbok 2021:2. 12BE Dimensionering av gator med asfalt.* https://tekniskhandbok.goteborg.se/12-projektering/12b-projekteringsforutsattningar/12be-dimensionering-av-gator-med-asfalt/

COMSOL. (2017). *Finite element method (FEM).* https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method

Asfaltsboken. (2018). *1. Inledning och historik.* https://asfaltboken.se/inledning-och-historik/

Naturvårdsverket. (2022). *Effekter i Sverige.* https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatfakta/klimatet-i-framtiden/effekter-i-sverige/

Statens Geotekniska Institut. (1991). *Termiska egenskaper i jord och berg.* https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i12.pdf

Thermal Engineering. (2019). *What is Absorptivity – Absorptance – Definition.* https://www.thermal-engineering.org/what-is-absorptivity-absorptance-definition/

SMHI. (2022). *Ladda ner meteorologiska observationer.* https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=airtemperatureInstant,stations=all

W. Highter & D. Wall. (1984). *Thermal Properties of Some Asphaltic Concrete Mixes.* http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1984/968/968-005.pdf

Klimatanpassning. (2019). *Temperatur*. https://www.klimatanpassning.se/hur-klimatet-forandras/klimateffekter/temperatur-1.146497

SMHI. (2021). *Globalstrålning under året och dygnet.* https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/stralning/globalstralning-under-aret-och-dygnet-1.170219

Stockholms Stad. (2021). *Teknisk handbok för byggande, drift och underhåll på offentlig mark*. https://tillstand.stockholm/tillstand-regler-och-tillsyn/mark--och-gatuarbeten/teknisk-handbok-for-byggande-drift-och-underhall-pa-offentlig-mark/

Albatayneh, A., Alterman, D., Page, A., Moghtaderi, B. (2020). *The Significance of Sky Temperature in the Assessment of the Thermal Performance of Buildings.* *https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8057/pdf*

VTI. (2020). *Skador, orsaker och åtgärder*. https://www.vti.se/forskning/vag--och-banteknik/grusvag/skador-orsaker-och-atgarder

SCB. (2005). *Väglängder och vägbredder enligt NVDB per län 2005.* https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/transportinfrastrukturens-markanvandning/pong/tabell-och-diagram/vaglangder-och-vagbredder-enligt-nvdb/vaglangder-och-vagbredder-enligt-nvdb-per-lan-2005/

Hexagon. (2021). *3.4.1, Steady-state flow and transient flow.* https://www.cradle-cfd.com/media/column/a151

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

CHALMERS