



CHALMERS



Blåsbildning vid applicering av tätskikt på träbroar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik

Simon Angervall & Eric Hellström

INSTITUTION FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
AVDELNING FÖR BYGGNADSTEKNOLOGI

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021

www.chalmers.se

Blåsbildning vid applicering av tätskikt på träbroar
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik
Simon Angervall
Eric Hellström

© SIMON ANGERVALL / ERIC HELLSTRÖM, 2021

Examensarbete ACEx20
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2021

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

Övrig information: Fotografi omslagsbild taget av Burkhardt Walter och konstruktör
ingenieurbüro Miebach

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers reproservice 2021

Blåsbildning vid applicering av tätskikt på träbroar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Simon Angervall

Eric Hellström

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Att bygga broar i trä är något som gjorts sedan lång tid tillbaka. Kraven på beständighet har förändrats mycket sedan träbroar började byggas för flera hundra år sedan och särskilt med avseende på fuktskador. Fuktskyddet på moderna broar består vanligtvis av en bitumenmatta och ovanpåliggande gjutasfalt. Dessa två material bildar ett tätskikt och skyddar konstruktionen från vatten. Vid applicering av tätskiktet på brobjälklaget är blåsbildning ett vanligt förekommande problem. Fenomenet uppstår i kontaktytan mellan tätskiktsmattan och träbjälklaget efter applicering av gjutasfalt som håller en temperatur kring 200 °C. För att påvisa fenomenet har numeriska beräkningar och tester utförts för att redogöra för de fysikaliska faktorerna, exempelvis materialegenskaper och temperaturförhållanden vid applicering av tätskikt som styr händelseförloppet.

I undersökningen har inspiration tagits från testdata av ett tidigare försök som ett företag vid namn Duo Asfalt gjort. Det testet gick ut på att prova olika primers som målats på träunderlaget innan mattan appliceras för att undersöka om valet av primer har en inverkan på blåsbildning. Flera provbitar med olika sorters primers påmålade på respektive bit testades. Efter avsvälning av provbitarna samt att alla primers härdat utfördes dragtest av både primers och tätskiktsmatta. Det gjordes för att utreda vidhäftning mellan bitumenmattan och underlaget vid ett nerkyllt tillstånd för respektive provbit. Anteckningar kring blåsbildning togs för de olika primers även efter att gjutasfalten applicerats och därigenom kunde den primer som hindrar blåsbildning bäst fastställas.

I andra studier som gjorts kring träbroar har blåsbildning tagits upp mer som en notis om att det sker. De undersökningar som görs i denna rapport är därför baserade på samma förutsättningar som testet Duo Asfalt gjort men riktar sig istället mot att förstå fysikaliska processer och förlopp som leder till blåsornas uppkomst direkt efter applicering av tätskikt. Hypotesen som arbetet bygger på är att byggfukt i träet förångas av den värme som tillförs när gjutasfalten läggs upp på bitumenmattan och skapar ett övertryck som leder till att blåsorna uppkommer. För att undersöka hypotesen måste en uppskattning av hur höga temperaturer som uppnås i träunderlaget, samt hur länge det varar göras. Uppskattningen görs med hjälp av en egenutvecklad numerisk beräkning i programmet Matlab. Temperaturfördelningen räknas fram för två olika sammansättningar, en med enkel matta samt en med dubbla mattor varav ett lager gjutasfalt läggs upp på respektive sammansättning. Temperaturprofilen för ytterligare två varianter av de föregående sammansättningarna

beräknas med skillnaden att ett andra lager gjutasfalt lagts ovanpå det föregående lagret gjutasfalt. I slutändan fås alltså fyra olika typer av sammansättningar. Beräkningarna visar att temperaturen i ytskiktet av trä varierar. Ju fler skikt som finns ovanpå träet ju lägre blir temperaturen i träet. Maxtemperaturen för ytskiktet av trä för respektive sammansättning är 127 °C, 105 °C, 65 °C samt 59 °C.

Efter att temperaturprofilen beräknats behövs en uppskattning av vilket luft övertryck som kan uppnås för de olika temperaturen som tagits fram. Det är svårt att veta hur mycket fukt som förångas, därför behövs ett test göras där träbitar värms upp i en tryckkammare till dessa framräknade temperaturer. Ingen tryckkammare hittades som var optimerad för denna typ av undersökning och därför byggdes en egen. För att kontrollera att tryckkammaren ger sanningsenliga resultat görs inledningsvis två tester. En med enbart luft i kammaren och en med ett vattenbad. Innan testen uppskattas övertrycket för respektive fall med hjälp av ideala gaslagen till 35,9 kPa samt 305 kPa. Resultatet från testen är inom ramarna med max +5 kPa avvikelse vilket betyder att testerna som görs med denna utrustning kan anses som trovärdiga. För testerna med trä fås olika resultat beroende på träbitarnas geometri. Som högst uppnås ett övertryck på 240 kPa och som lägst 120 kPa.

Slutsatsen som görs är att blåsbildningsproblematiken beror på fukt och värme. För att kunna ge exakta svar på hur man löser problemet behövs vidare undersökningar men ett förslag är att tillverka en matta som är tjockare och med högre värmeisolerande förmåga.

Nyckelord: Blåsbildning, tätskikt, gjutasfalt, bitumenmatta, tätskiktsmatta, primer, ideala gaslagen, trycktest, numerisk beräkning.

Engelsk översättning av titeln

Blistering in Waterproofing Membranes for Wooden Bridges

Degree Project in the Engineering Programme

Civil and Environmental Engineering

Simon Angervall

Eric Hellström

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of Building Technology

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

To build bridges made of wood is something that has been done since long ago. But their shape and look has been changed since new materials were introduced also because the requirement for durability has been getting tougher. The wooden construction needs to be protected from weather and wind and to achieve that a waterproofing layer is needed on top of it. When this layer is being applied on wooden bridges there often occur, a phenomenon called bladder. It is a common problem that occurs in the contact zone between the waterproofing layer and the wooden construction. To prove that bladder is the cause of moisture bound to the wood getting heated up and expanding, a numerical calculation and a pressure test have been implemented.

The investigation has been inspired by Duo Asphalt's test regarding a few pieces of wood where they tried to investigate which primer that was the most effective against bladder. The same thicknesses and materials have been used for the calculations in this study. The primers were painted on to pieces of cross-glued wood and then a bituminous sheet membrane was applied on top of the primers. In the next step when the membrane had been allowed to cool down the adhesion of the bitumen-layer was tested with a pulling test and the result were recorded. After that the first layer of asphaltic concrete was applied and areas where bladder occurred was noted. The next day a second layer of cast asphaltic concrete was applied and even this time bladder occurred at the same places as the first time but to a lesser extent. Notes regarding which primer that had the best impact against bladder was taken.

The further investigation is based on the same prerequisites as the Duo Asphalt test but is not focused on the different primers impact on bladder. Instead, focus is pointed towards what causes the phenomenon from the very beginning and to understand why it is happening. Other studies that have been done about wooden bridges bladder has only been mentioned as something that happens. To prove the theory of why it occurs an estimation regarding how high temperatures that is achieved. Heat is caused by the hot asphaltic concrete that is applied on top of the bituminous membrane. The estimates are done by using a numerical calculation model designed for heat transfer and Matlab is used to perform the calculations. The results obtained is based on four different solutions with different thickness on the waterproofing layer before the cast asphaltic concrete is applied on top. The maximum temperatures observed for the wooden surface was for the different structures 127, 105, 65, and 59 °C.

When the temperature profile is known an estimation of the maximum pressure

generated by the maximum temperatures. It is not clear how much moisture that evaporates from the wood therefore a test needs to be done. The test is done by letting pieces of wood be exposed to these high temperatures in an air-sealed box. The wooden pieces were kept inside for a certain amount of time and pressure was then measured with a pressure transmitter. The estimated pressure interval when heating just air and just water was set to be 35.9 kPa for water and 305 kPa respectively. When running the test with these conditions, the results turned out to be almost the same and means that further measurement with this equipment would be accurate enough. The results from the wood tests varies from 120 kPa to 240 kPa.

A brief conclusion is made that the bladder is due to moisture from the wood and heat from the asphaltic concrete. In order to give an exact answer how to solve the phenomena, further research is needed. But a suggestion could be to fabricate a bituminous sheet membrane that is thicker and has a higher thermal isolation capability.

Key words: Bladder, waterproofing membrane, asphaltic concrete, bituminous membrane, primer, ideal gaslaw.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	III
INNEHÅLL	V
FÖRORD	VII
BETECKNINGAR	VIII
1 INTRODUCTION & BAKGRUND	2
1.1 Syfte & Mål	4
1.2 Metod	4
1.3 Avgränsningar	4
2 TEORETISKA UTGÅNGSPUNKTER	5
2.1 Träbrokonstruktioner	5
2.2 Om trä	5
2.2.1 Hur växer trä	6
2.2.2 Limträ	6
2.2.3 Fukt i trä	7
2.2.4 Mikrobiell påväxt	8
2.3 Allmänt om tätskikt	9
2.3.1 Primer	9
2.3.2 Bindemedel	10
2.3.3 Gjutasfalt	10
2.4 Allmänna/ Ideala gas-lagen	11
3 DUO ASFALT (LITTERATURSTUDIE)	12
3.1 Utförande	12
3.2 Analys av Duo asfalts testresultat	15
4 NUMERISK BERÄKNING FÖR TEMPERATURÄNDRING	17
4.1 Metod	17
4.1.1 Stabila tidssteget	19
4.2 Analytisk lösning	19
4.3 Modell inför numerisk beräkning	20
4.4 Resultat från numerisk beräkning	21
4.5 Verifiering av numerisk beräkning	24
4.6 Analys	25
4.6.1 Felkällor	26

5	EGET UTFÖRANDE AV TEST	27
5.1	Beräkningsteori för tryckförändring	27
5.2	Tillverkning av labbutrustning inför trycktest	29
5.3	Utförande	30
5.4	Resultat	31
5.5	Analys	32
5.5.1	Vatten och luft	32
5.5.2	Trä	32
5.5.3	Felkällor	33
6	SLUTSATS	35
7	DISKUSSION	36
8	REFERENSLISTA	38
9	BILAGOR	41
9.1	Numeriskt resultat	41
9.2	Analytiskt- och numeriskt resultat	45
9.3	Tillverkning av tryckkammare	46
9.4	Utförande av test	47
9.5	Testresultat i bild- och tabellformat	48
9.6	Matlabkod	51
9.6.1	Anlytisk & numerisk lösning	51
9.6.2	Numerisk lösning enligt <i>figur 14.1 & 14.2</i>	54
9.6.3	Lösningar för eget test	56

Förord

Rapporten har skrivits som en slutlig examination på vår högskoleutbildning inom samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola, campus Johanneberg, Göteborg. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och denna rapport är slutresultatet av vårt arbete. Testförsöken utfördes i Erics pappas garage med lämplig skyddsutrustning för att undvika skador då vi handskats med höga övertryck och temperaturer.

Vi vill rikta ett stort tack till Carl-Eric Hagentoft vår handledare, som under arbetets gång gav avgörande vägledning och hjälp för att utföra arbetet. Vi vill också tacka Angela Sasic Kalagasidis som tagit sig an uppdraget att hjälpa oss samt vara vår examinator. Ett stort tack till Duo Asfalt som gett oss tillgång till all data från deras egengjorda test för att kunna utveckla och resonera kring varför blåsbildning sker.

Tack till Gatu och Väg Väst AB (GVV) som lånade ut gasol och brännare till oss för att kunna genomföra vårt trycktest. Ett tack till MCB Smide och Maskin AB som snabbt kunde hjälpa oss att klippa plåtar till rätt mått för vår egenbyggda tryckkammare.

Göteborg juni 2021
Simon Angervall, Eric Hellström

Beteckningar

Latinska versaler:

E	Entalpi, [KJ/kg]
K	Konduktans, [A/V m]
P	Tryck, [kPa]
P _{luft}	Tryck för luft, [kPa]
P _{tot}	Tryck av vatten och luft, [kPa]
P _{vatten}	Tryck för vatten, [kPa]
P _{vattens partialtryck}	Partialtryck, [kPa]
Q	Värmefflöde, [W]
R	Ideala gaskonstanten, [J/mol K]
RF	Relativ Fuktighet, [%]
R _{surface}	Övergångsmotstånd, [m ² K/W]
T	Temperatur, [°C]
V	Volym, [m ³]
Z	Ånggenomgångsmotstånd [m ² /s]

Latinska gemena:

c	Specifikvärmekapacitet, [J/kg/C]
n	Substansmängd, [mol]
n _{luft}	Substansmängd för luft, [mol]
n _{vatten}	Substansmängd för vatten, [mol]
t	Tid, [s]

Grekiska gemena:

Δ	Delta (Skillnad), [-]
i	Cell index, [-]
α	Värmediffusivitet, [m ² /s]
δ	Ånggenomsläpplighet, [m ² /s]
λ	Koefficient för Värmeledningsförmåga, [W/mK]
ρ	Densitet, [kg/m ³]

1 INTRODUKTION & BAKGRUND

Före år 1990 fanns endast ett fåtal träbroar i Sverige som var producerade i modern tid. Antalet broar byggda i trä ökade under 90 talet och ända fram till idag. Det finns uppgifter om att i början av 2000-talet byggdes cirka 40–50 träbroar varje år bara i Sverige (Pousette och Fjellström, 2004). Trenden att bygga broar i trä är något som håller i sig och ökar stadigt. Exempelvis låg byggnationstakten år 2011 på cirka 120 broar per år (Jundell, 2011).

På en modern träbro med inte alltför stora spännvidder kan brospannet tillexempel bestå av ihop-bultade limträbalkar som läggs över brofundamenten. Ytan behandlas med en så kallad broprimer vars syfte är att öka vidhäftningen mellan tätskiktsmattan och underlaget. Mattan appliceras på den behandlade ytan med hjälp av turbobrännare som drivs av gasol och det förväntas få ett tillräckligt bra fäste för att ingen mer återgård skall behövas gällande vidhäftningen. Efter mattan är lagd, appliceras gjutasfalt ut ovanpå mattan. Det görs för att vattensäkra skarvarna på mattan och därmed förebygga vatteninträngning. När vattnet träet kan limträbalkarna börja ruttna på sikt, vilket leder till att bron förstörs och olyckor kan ske om det inte upptäcks i tid.

Problematiken uppstår när gjutasfalten appliceras på mattan. Bubblor uppstår mellan matta och träunderlag vilket medför en markant försämring av vidhäftning mellan matta och trä. Troligtvis uppstår bubblorna på grund av att gjutasfalten appliceras vid en temperatur på ca 200°-220 °C (Varma, 2018). Det gör att vätskan som finns bundet i träet förångas och har ingenstans att ta vägen under det ångtäta skiktet. Därav bildas det flertalet bubblor. Problemet är återkommande och förekommer på samtliga träbroar men i olika utsträckning. Det finns lite dokumenterat om fenomenet trots att det förekommer ofta och det tros bero på bristande kommunikation mellan entreprenör och övriga inblandade parter, eller att problemet ignoreras (Pousette, 2016).

När massan svalnat lägger sig bubblorna, och där en bubbla en gång bildats är lagret med gjutasfalt väldigt tunt. Det visar sig i form av en grop, som i dagens läge återgärdas med att antingen lägga ut ytterligare ett lager gjutasfalt över hela bron eller enbart fylla i groparna. I vissa fall kan fenomenet återupprepa sig vid den andra påläggningen av gjutasfalt, i andra fall gör den det inte. Nedan visas bild på hur det kan se ut precis efter att blåsorna lagt sig vid första appliceringen av gjutasfalt.



Figur 1: Foto av blåsbildning på träbro. Författarens egen bild.

Asfalt appliceras vanligtvis i två lager där det sista är slitlagret. Samma fenomen med blåsor under mattan har även uppkommit i detta slutliga skede (Pousette, 2016). Blåsorna kan påverka tätheten negativt hos tätskiktet. Även om det visas som tätt, har vidhäftningen mellan tätskiktet och brons bärande konstruktion försämrats vilket kan vara svårt att kontrollera huruvida den påverkats. Den värsta konsekvensen är att bron eventuellt inte längre är tät, vilket leder till röta och försämring av brons hållfastighet.

Den tekniska livslängden för en träbro kan vara satt till antingen 40 eller 80 år och därför krävs löpande underhåll samt kontroller. För att kontrollera om bron har några skador görs olika tester på konstruktionen. Fuktkvot och densitet i träet mäts med olika metoder eftersom dessa parametrar kan ge indikation på om träbjälklaget är skadat. De vanligaste områdena där röta uppkommer är i skarvar, infästningar och i ändarna på bron. Åtgärder som görs för att förhindra röta är att olja in åtkomliga delar av brokonstruktionen eller måla med jämna intervaller. I de fall där röta i bjälklaget kan konstateras måste bjälklaget bytas ut inom en snar framtid som beror av hur illa ansatt konstruktionen är (Pousette och Fjellström, 2004).

På liknande sätt som för trätor appliceras tätskikt även på betongunderlag som måste vara täta. Vid applicering på betong finns inte samma risk för blåsbildning trots att betongen kan innehålla mer vatten. Det beror troligtvis på att betong tar längre tid att värma upp i förhållande till trä. Tätskiktet svalnar innan vattnet förångas och därav uppstår inga bubblor under appliceringsskedet av tätskiktet på betong. Fenomenet förekommer på betong också, skillnaden är att blåsan bildas en tid efter att tätskiktet är klart och ytan är i bruk (Edwards, 2019).

1.1 Syfte & Mål

Syftet med arbetet är att studera fysikaliska processer och förlopp som möjligtvis leder till blåsornas uppkomst direkt efter applicering av tätskiktet på träbjälklag och därmed komma närmare en lösning på problemet. Hypotesen som arbetet bygger på är att fukt bundet i träet förångas av den värme som tillförs när gjutasfalten läggs upp på bitumenmattan och skapar ett övertryck som leder till blåsbildning. Följande frågor besvaras i arbetet.

- Hur höga luft övertryck kan förväntas mellan bitumenmattan och träbjälklaget direkt efter applicering av gjutasfalt?
- Vilka faktorer ingår?
- Finns eventuell lösning på problemet?

Målet med undersökningarna är att skapa en vägledning och underlag för vidare studier inom området.

1.2 Metod

För att utreda om ovan beskrivna hypotesen stämmer kommer undersökningen utföras i flera steg som redovisas enligt nedan.

1. Inledningsvis undersöks fenomenet i en litteraturstudie. Studien berör ett test utfört av företaget Duo Asfalt vars syfte är att utreda om olika primers har olika inverkan för blåsbildning under tätskiktet.
2. Steg två redogör temperaturändringen inom två olika bjälklagskonstruktioner inspirerade av Duo Asfalts test. Resultaten tas fram med hjälp av numeriska beräkningar utförda i ett matematiskt datorprogram kallat Matlab.
3. Från den uppmätta temperaturändringen beräknas ett luft övertryck med hjälp av den generella gaslagen som därefter undersöks i form av ett trycktest med en egentillverkad utrustning.
4. Resultaten från metoderna sammanställs och en slutsats med diskussion till vidare forskning tas fram.

1.3 Avgränsningar

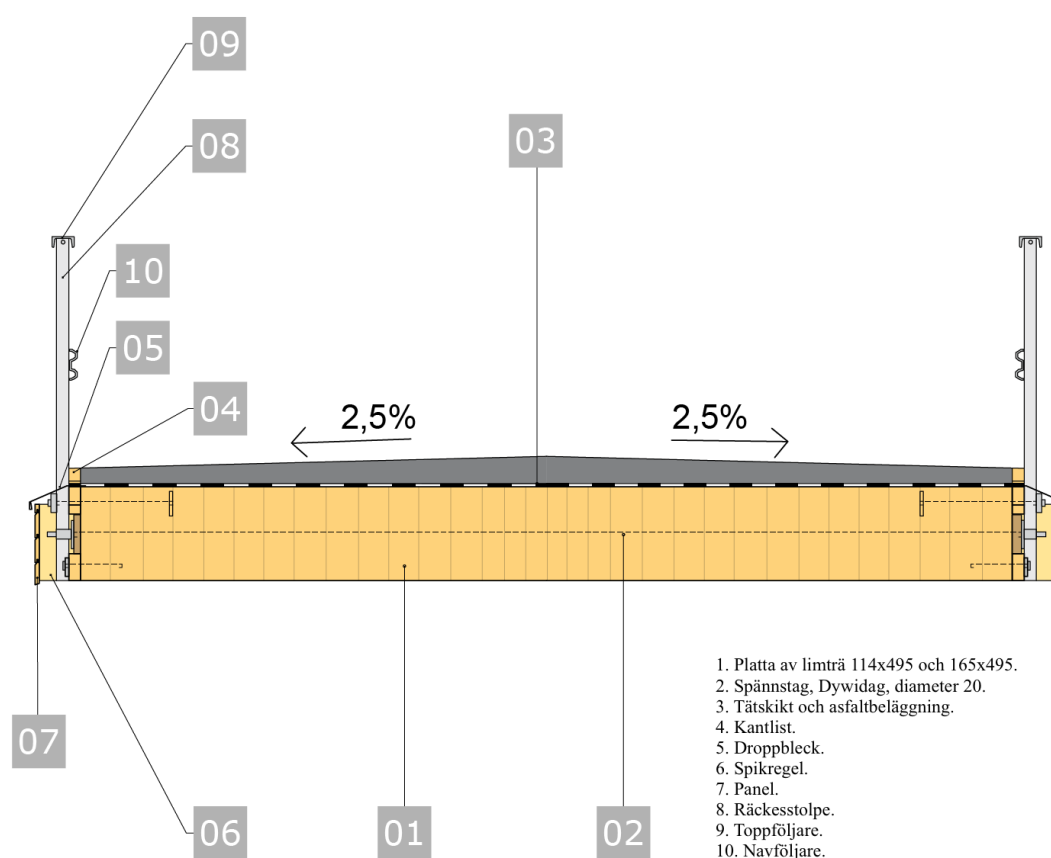
Undersökningarna kommer enbart att rikta sig mot tvärspända träbjälklag inom brokonstruktioner gjorda av trä. Rapporten behandlar mestadels träs egenskaper i förhållande till de metoder som används idag när en träbro byggs. Hållfasthetsegenskaper hos fuktskadade träbroar till följd av otätt tätskikt kommer ej att undersökas utan istället kommer undersökningar kring blåsbildning som eventuellt kan leda till fuktskador genomföras. Egenskaper hos gjutasfalt och bitumen kommer kortfattat benämnas men ej undersökas.

2 TEORETISKA UTGÅNGSPUNKTER

Inom detta avsnitt redogörs de bakgrundskunskaper för att förstå de olika undersökningarna i rapporten. I avsnittet redogörs bland annat fysikaliska teorier men även egenskaper för de huvudsakliga materialen inom ett träbrobjälklag, så som trä, tätskiktsmatta och gjutasfalt.

2.1 Träbrokonstruktioner

Det finns många olika varianter på broar och blåsbildning förekommer på samtliga konstruktioner med ett tätskikt lagt uppepå på en brobana av trä. Enligt träguiden (2019) kan konstruktionerna se ut på flera olika sätt. *Figur 2* visar ett exempel på uppbyggnad av brobana.



Figur 2: Uppbyggnad av träbrokonstruktion. (Träguiden 2019, publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren).

2.2 Om trä

Trä är det äldsta och mest betydelsefulla byggnadsmaterialet i Sverige. För tillfället är det enda byggmaterialet som är förnybart. I takt med att mänskligheten ställs inför stora utmaningar gällande klimatförändringar, är det viktigt att försöka ta vara på jordens resurser och välja klimatsmarta byggmaterial (träguiden, 2020).

Utöver alla de miljöfördelar som trä besitter har även materialet många andra olika förmåner. Trä kan bland annat vara lämpligt ur ett ekonomiskt perspektiv, likaså ett

tekniskt. Beständigheten för byggmaterialet i förhållande till sin egen vikt gör att det lämpar sig för byggande gällande mindre konstruktioner. Men på senare tid har även större konstruktioner som flervåningshus kunnat konstruerats med hjälp av enbart trä som stommaterial (träguiden, 2020).

2.2.1 Hur växer trä

Alla träd växer till en början på längden men blir allt tjockare när det tillkommer årsringar. Träets fiberriktning är vertikal och anledningen till det är för att kunna transportera vatten från roten och ända upp till toppen av kronan. Trä som växer på sommaren får namnet sommarved och trä som växer på våren kallas för vårved (Just Wood, 2021). I mitten av trädstammen finns kärnveden vars fuktkvot ligger mellan 30–50 %. Omslutande ved-lager runt kärnveden kallas för splintved och är den del av träet vars syfte är att transportera den största mängden vatten och mineraler från roten till bladen. Splintvedens fuktkvot ligger runt 50 % vid kärngränsen och 160 % ute vid barken, se *figur 3* (Svenskt Trä, 2020).



Figur 3: Kärnved och splintved. (Svenskt Trä 2020. publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren).

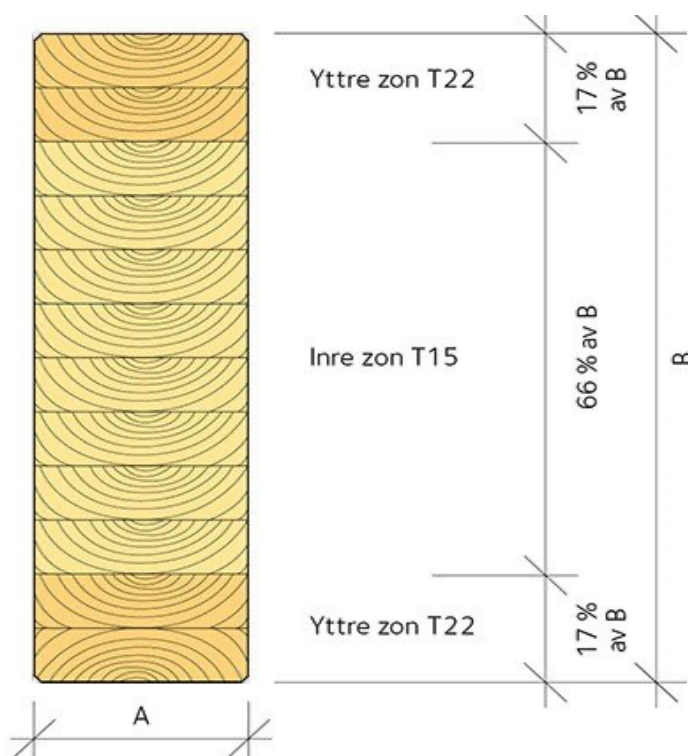
2.2.2 Limträ

Limträ byggs upp genom flertalet ihop limmade lameller som oftast består av konstruktionsvirke. Lamellerna är i regel 45 mm för exempelvis raka limträprodukter, samt 33 mm för krökta limträprodukter. Limträ är ett konstruktionsmaterial som kan tillverkas i olika hållfasthetsklasser (Svenskt Trä, 2020). De klasser som benämns är beroende på vilken hållfasthet limträet har. Exempelvis är GL32c ett hållfasthetkombinerat limträ medan GL32h ett hållfasthetshomogent limträ (Al-Emrani, 2013).

Det hållfasthetkombinerade limträet består av lameller med olika kvalité, där de lamellerna med sämre kvalité byggs in i mitten av träelementet. Det beror på att spänningarna inom balken är som störst på de yttre zonerna. På så sätt behövs de lameller med högst hållfasthet befinna sig på dessa delar av balken, se *figur 4*. Därmed får ett hållfasthetkombinerat limträ en inhomogen-hållfasthet tvärsigenom elementet. Det hållfasthetshomogena limträet har istället lameller av samma kvalité och därav ger balken en homogen-hållfasthet genom hela träelementet (Svenskt Trä,

2020). Denna produktionsmetod möjliggör ett mycket mer effektivt materialutnyttjande, jämfört med att enbart producera limträ med samma hållfasthetsklass.

Där stora spännvidder, laster eller andra avgörande omständigheter utformar de bärande elementen, kan specialtillverkning tillgodoses. I samråd med limträ-tillverkarnas konstruktörer kan limträelement praktiskt taget beställas med vilka dimensioner som helst. Därmed kan både arkitektens och konstruktörens önskemål uppfyllas.



Figur 4: Uppbyggnad av en hållfasthetskombinerad limträbalk. (Svenskt Trä 2020, publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren).

2.2.3 Fukt i trä

Fukttinnehållet i trä anges oftast som fuktkvot (FK %) alternativt relativ fuktighet (RF %). Fuktkvoten talar om hur mycket förångningsbart vatten det finns i materialet i förhållande till materialets torrsvikt. Varvid den relativa fuktigheten beskriver kvoten mellan hur mycket vattenånga luften innehåller samt mängden fukt luften maximalt kan bära vid den aktuella temperaturen (Svenskt Trä, 2020). Mängden vattenånga i luften är alltså till stor del beroende av omgivningens temperatur.

Varm luft kan bära betydligt mer vattenånga jämfört med kall luft, där mätnadsånghalten stiger med en ökande temperatur. Om fukten i luften överstiger mätnadsånghalten alternativt om temperaturen sänks tillräckligt lågt kommer överskottsvattnet kondensera och större vattendroppar bildas (Svenskt Trä, 2020).

Trä och andra träbaserade material är hygroskopiska vilket betyder att materialet ställer sig i jämvikt med luftfuktigheten i miljön och anpassar sin fuktkvot för att komma i jämvikt med omgivningens relativa luftfuktighet. Om fuktkvoten för träet är

högre än jämvikts-fuktkvoten kommer det leda till att träet torkar, om kvoten är lägre kommer träet fuktas upp. Jämvikts-fuktkvoten har därav en avgörande roll på om träet sväller eller krymper och på så sätt kontrollerar den träets egenskaper i förhållande till dimensioner, hållfasthet samt beständighet mot mikrobiell påväxt (Träguiden, 2017).

Trä har ett ånggenomgångsmotstånd Z och ett ånggenomsläpplighetstal δ . Om genomsläppligheten är hög är motståndet lågt och vice versa. Enligt Al Hamami (2012) är trä ett anisotropt material vilket betyder att materialet har olika egenskaper i olika riktningar. Vad det gäller egenskapen med ånggenomsläpplighet är det inget undantag. Vidare skriver Al Hamami att ånggenomgångsmotståndet generellt sett är högre parallellt fibrerna än vinkelrätt fibrerna.

I boken *Tillämpad byggnadsfysik* (Petersson, 2018) kan värden utläsas för ånggenomsläpplighet parallellt och vinkelrätt fibrerna. Dessa värden presenteras nedan och berör trä som har en relativ ånghalt av 80–90%.

- $\perp$ **Fiberriktningen** 1,0-3,5 $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
- $\parallel$ **Fiberriktningen** 1,1-2,3 $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

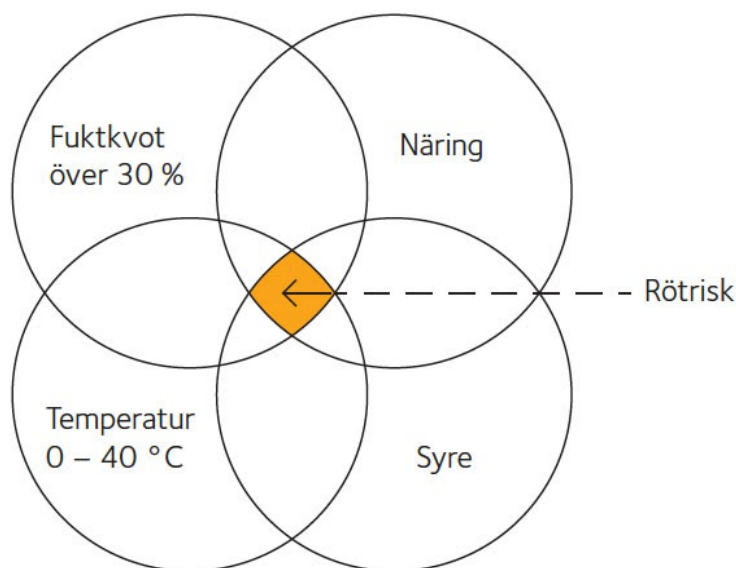
Genomsläppligheten varierar nämnvärt och är därav inga konstanta värden. Det beror på att den relativa ånghalten kan variera mycket i samma träbit (Petersson, 2018).

2.2.4 Mikrobiell påväxt

Mikrobiell påväxt är ett sammanfattningsord för olika typer av mikroorganismiska angrepp. Det kan vara allt ifrån mögelsvamp, blånadssvamp, strålsvamp, rötsvamp eller bakterier. I denna del av rapporten kommer enbart röta belysas eftersom detta angrepp har en betydande roll för träkonstruktioners livslängd och hållfasthet.

Enligt Anticimex (2021) finns det tre olika typer av rötsvampar. Brunrötesvamp, vitrötesvamp och mjukrötesvamp. Rötsvampar bryter ner vedstrukturen vilket gör träet mer poröst och därav ökar träets förmåga att absorbera vatten. Konsekvensen blir att dess hållfasthet försämras och konstruktionen mister sin bärighet (Anticimex, 2021).

För att rötsvampar skall kunna etablera sig krävs det näring, syre, en viss fuktkvot samt en temperatur mellan 0 och 40 plusgrader. Vilken fuktkvot som krävs varierar mellan de olika svamparterna, men så länge fuktkvoten överstiger cirka 30 % kan svamparna orsaka rötskador, se *figur 5* (Träguiden, 2018).



Figur 5: Förhållanden för förekomst av rötsvampar. (Svenskt Trä, 2020. publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren).

Rötsvampar sprider sig genom att släppa iväg sporer. Sporerna färdas med vinden tills de kommer i kontakt med en träyta där de sedan biter sig fast. När virket uppnått en passande fuktkvot och temperatur enligt figur 5, börjar sporen att gro och utveckla hyfer som leder till ett rötangrepp. Det betyder att ett virke kan vara angripet av rötsvampar trots att ingen svampkropp bildats (Träguiden, 2017).

2.3 Allmänt om tätskikt

Tätskikt är något som kan behövas på flera olika typer av konstruktioner som är direkt utsatta för regn och snö. Några exempel är hustak, innergårdar och broar. De används främst för att stöta bort vatten och förhindra inträngning av fukt i konstruktionen. Det görs av olika anledningar beroende på vilka material som används men det handlar i de allra flesta fall om att skydda materialet under (Wicote, 2020).

Enligt Pousette (2016) är tätskikt på träbroar mer eller mindre en kopia av de som återfinns på betongbroar. Trafikverket ställer i TDOK (2016:0204 [3]) krav på att trafikerade ytor på broar skall ha en asfaltbeläggning som består av bindlager, slitlager samt skyddslager i de fallen tätskiktet innehåller en tätskiktsmatta. Tätskiktsmattan som används är i regel 5 mm tjock och är uppbyggd av polymerbitumen med ett armerat nät-lager i mitten.

2.3.1 Primer

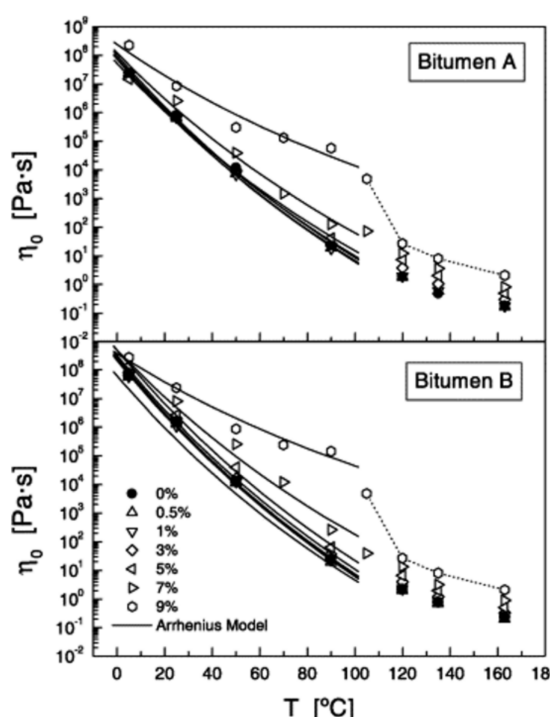
Mattan klistras på underlaget efter att ytan behandlats med primer. Den primer som använts hittills är lösningsmedelsbaserad och innehåller bland annat Ca: 40–70% Xylen (Binab, 2021). Xylen är giftigt och enligt Giftinformation kan ämnet vid inandning orsaka yrsel, illamående, medvetnslöshet och även kräkningar. Pousette (2016) menar att på grund av arbetsmiljöriskerna har en vattenbaserad bitumenprimer tagits fram och finns idag på marknaden. Primerns syfte är att öka vidhäftningen

mellan underlaget och mattan. På träbroar används även en kantremsa av polymerbitumen för att säkra vattentäthet vid kanten.

2.3.2 Bindemedel

Bitumen ingår som nämnt ovan i gjutasfalt men också i de allra flesta asfaltsprodukter. Bitumen är en oljeprodukt och utvinns i samband med att råolja raffinerar. Det innehåller en stor variation av långa kolväten och går därför inte att bestämma exakt vilket ämne det består av (Bergman och Edwards, 1999).

Läran om hur viskositeten för olika material förändras vid olika temperaturer kallas för reologi. Det gäller även för bitumen, som vid höga temperaturer är mer lättflyktigt än vid låga temperaturer. Bitumen definieras som en plastisk massa vid utläggningstemperaturer på cirka 180–220 °C. Om materialet utsätts för någon typ av påfrestning vid dessa temperaturer ger materialet vika för plastiska deformationer omedelbart. Utsätts materialet för upprepade påfrestningar över en viss nivå när lägre temperaturer råder är bitumen mycket styvt. Det finns istället risk för sprickbildning på grund av att materialet blir utmattat (Bergman och Edwards, 1999). I *figur 6* visas hur viskositeten ändras beroende av temperaturen för olika typer av polymermodifierade bitumen samt även omodifierat bitumen som visas som 0 %.



Figur 6: Förhållandet mellan bitumens viskositet och temperatur. (Figur hämtad från vetenskaplig rapport av Garcia-Morales 2003).

2.3.3 Gjutasfalt

Enligt Asfaltboken (Bergman och Edwards, 1999) är gjutasfalt som appliceras ovanpå mattan bestående av Bitumen och eventuella tillsatser av polymerer. Gjutasfalten är också uppblandad med graderat stenmaterial, sand, filler och ibland även finmakadam. Sammansättningen för gjutasfalt varierar och kan därav anpassas till specifika önskemål. Det används i huvudsak på broar, p-däck, terrasser och gårdar. Gjutasfalt som har polymer-modifierat bitumen inblandat används främst på broar och

p-däck. Den har en ökad stabilitet samt flexibilitet vid höga respektive låga temperaturer än den som innehar den traditionella blandningen av bitumen.

Det finns två huvudgrupper som skiljer sig åt. Den ena är gjutasfalt som vanligtvis har en största kornstorlek om 8 eller 11 mm. Gjutasfalten ger en beläggning som är tät mot vatten, slitstark och höghållfast. Den andra huvudgruppen är asfaltmastix som har en max kornstorlek om 4 mm. Den är anpassad för att vara ett rent tätskikt som läggs under en platsättning på en innergård eller liknande (Bergman och Edwards, 1999).

2.4 Allmänna/ Ideala gas-lagen

En gas består av molekyler som ständigt är i rörelse. När en gas släpps in i ett slutet system exempelvis ett kärl, börjar molekylerna ständigt kollidera med kärlets väggar och ett tryck uppstår. Ökar substansmängden gas i en konstant volym fås ett förhöjt tryck på grund av att fler molekyler resulterar i ett ökat antal kollisioner per tidsenhet. Trycket är därav proportionellt mot substansmängden (Jönsson, 2018).

Om temperaturen stiger ökar medelhastigheten av gasmolekylerna vilket leder till fler kollisioner per tidsenhet. Trycket är på så sätt också proportionellt mot temperaturen (Jönsson, 2018). Ett tredje förhållande uppkommer när gasens volym minskar. Om volymen halveras fördubblas antalet kollisioner med väggarna, det medför en fördubbling av trycket. Sammanpressas gasen till en tredjedel av volymen tredubblas trycket. Trycket blir därav omvänt proportionellt mot volymen (Arvidsson, 2021). Dessa förhållanden kan matematiskt sammanfattas enligt formeln nedan.

$$PV = nRT$$

Formeln kallas för den allmänna eller ideala gas-lagen och används endast för ideala gaser. Ideala gaser är ett samlings ord för gaser när molekylernas egenvolym och intermolekylära krafter ej beaktas (Jönsson, 2018).

3 DUO ASFALT (LITTERATURSTUDIE)

Från rapportens början kom vi i kontakt med Duo Asphalt som är ett medelstort svenskt företag med tjänster och utförande i form av tätning, förstärkning och applicering av asfaltslager inom infrastrukturuområdena broar, tunnlar, innegårdar och parkeringshus. De skulle utföra ett dragtest av tätskikt på ett träunderlag och gav oss möjligheten att närvara samt dokumentera relevant information. Av olika anledningar blev det aldrig av. Duo asphalt utförde istället testet ensam varav vi vid ett senare tillfälle tog del av informationen som dokumenterats.

Testet Duo Asphalt gjort gick ut på att undersöka vilken primer som hade bäst egenskaper vad det gäller vidhäftning mellan tätskiktsmatta och träunderlag. I enighet med rapportens innehåll ansågs därför enbart vissa delar av testet intressanta eftersom fokus ligger på blåsbildning. Den mest relevanta informationen för denna undersökning har sorterats och sammanställts i denna rapport.

3.1 Utförande

Under dag 1 utfördes testet på fyra olika stora limträplattor, tre små plattor (1,2x3,3 m) och en stor platta (2x8 m) av träslaget gran. Ovanpå dessa träplattor provades fyra olika sorters primer. Alla fyra primers applicerades på den stora plattan inom en area av 2x2 meter för respektive försegling. Tre av de små plattorna blev enbart försedda med varsitt skikt av antingen den transparenta primern MMA, den gröna primern epoxi eller en av de svarta primerna bitumenemulsion. Efter att alla primers hade blivit applicerade fick plattorna torka och härda tills dag 3. Det redovisas enligt *figur 7* och *tabell 1* nedan.



Figur 7: Foto av Duo asphalt vid applicering av primer. Bild av Bitumenemulsion primer saknas. Foto av Duo Asphalt.

Tabell 1: Använda produkter i Duo Asfalts testförsök.

Primer	Tillverkare	Applicerad mängd	Annat utförande	Kulör
Bitumen-emulsion	Soprema - Aquadere TP	0.25 L/m ²	-	Svart
MMA	IFAB - WestWood® Wecryl 123	2 lager x 0.5 kg/m ²	Sandats 1kg sand frakton 0,7-1,2 mellan lagren	Transparent
Bitumen-lösning	Soprema - Elastocol 500TP	0.25 L/m ²	-	Svart
Epoxi	Soprema - Aquadere TP	2 lager x 0.5 kg/m ²	Sandats 1kg sand frakton 0,7-1,2 mellan lagren	Grön
Tätskikts-matta	Soprema - AnHrock 5 TF C3	Tjocklek 5 mm	-	Svart
Gjutasfalt	Duo Asfalt - PGJA 8 Vax	-	-	Svart

Vid dag 3 hade plattorna torkat och alla primers härdat. I nästa skede utfördes ett dragprovtest av primerna MMA och epoxi för att se vilken av de två förseglingarna som hade den bästa vidhäftningen. Testet utfördes vid tre olika ställen på varje provbit. Resultatet för dragprovning av primer redovisas i *tabell 2*.

Tabell 2: Dag 3, resultat från dragprovning av primer i Duo Asfalts testförsök [kPa].

Mät punkt	MMA stor platta	Epoxi stor platta	MMA liten platta	Epoxi liten platta
1	2090	Släpp vid borrar	Släpp vid borrar	950
2	2110	820	970	460
3	1280	820	2040	släpp vid sågning

Under dag 4 lades en tätskiktsmatta av materialet bitumen ut över de fyra limträplattorna. På den stora samt två av de små plattorna placerades endast en tätskiktsmatta. Den lilla plattan med bitumenemulsion testades med en variant av dubbla mattor. Mattorna smältes fast med en gasolvärmare som vulkar ihop mattan med underlaget. Vid applicering av två tätskiktsmattor användes samma procedur som nämnts innan för den första mattan. När appliceringen av första mattan blivit klar klitrades den andra mattan fast uppe på den första mattan med överlappande skarvar.

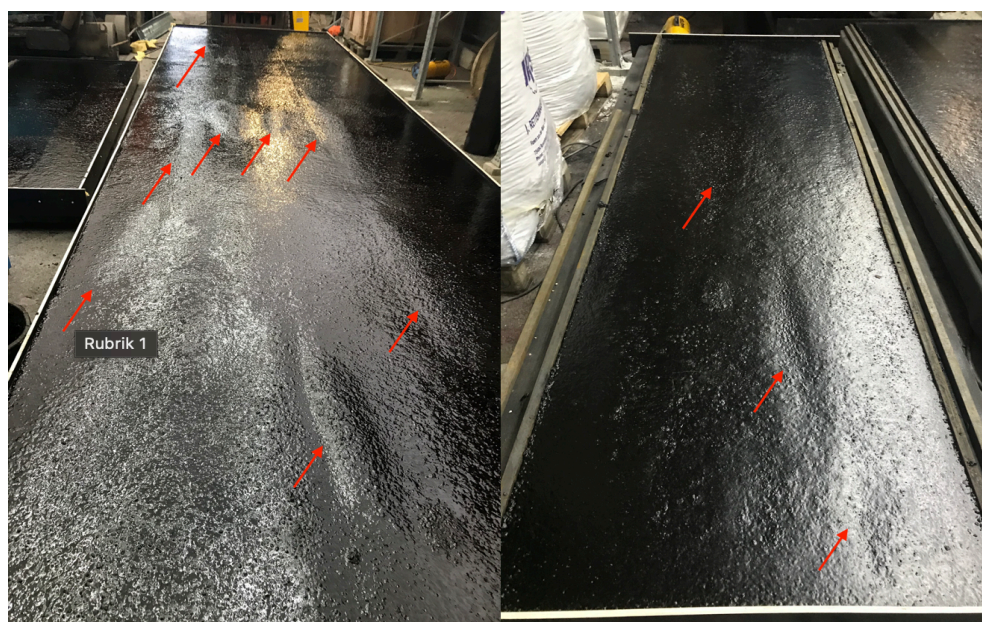
Efter några timmar när mattorna svalnat utfördes ett liknande dragtest som gjordes på primerna, för att mäta tätskiktsmattans vidhäftning vid ett avkylt tillstånd. Resultaten av de olika dragtesten redovisas enligt *tabell 3* nedan.

Tabell 3: Dag 4, resultat från dragprovning av matta i Duo Asfalts testförsök [kPa].

Mät punkt	Bitumen-emulsion	MMA stor platta	Bitumen-lösning	Epoxi stor platta	MMA liten platta	Epoxi liten platta
1	700	0.0	500	300	200	700
2	1000	500	600	0.0	1050 matta sönder	1000 matta sönder
3	400	200	0.0	200	200	600

Dag 4, efter att dragtestet utförts genomfördes utläggningen av det första gjutasfaltslagret. Gjutasfalten antas ha haft en temperatur på 220 °C när den lades ut. Skiktet som applicerades var tre centimeter tjockt och lades ut över bitumenmattan på alla fyra limträplattor, vars temperatur var 15 °C.

Efter cirka 10 minuter uppstod blåsbildning på vissa ställen av de olika provbitarna med undantag för plattan med dubbla mattor. Mängden blåsbildning var olika beroende på vilken primer som befann sig under. Cirka 40 minuter efter att gjutasfalten applicerats uppmärksammades tecken på att konstruktionen svalnat och blåsorna lagt sig. Resultaten av mängden blåsbildning för första gjutasfaltslagret visas enligt *figur 8* och *tabell 4*.



Figur 8: Blåsbildning vid applicering (vänster) och deformation vid avkylning (höger). Foto av Duo Asfalt.

Tabell 4: Läggnings av gjutasfalt 1a lagret, asfalttemp 220 °C.

Bitumen-emulsion	MMA stor platta	Bitumen-lösning	Epoxi stor platta	MMA liten platta	Epoxi liten platta	Dubbla mattor
Enstaka liten blåsa	Flera stora blåsor	Enstaka liten blåsa	Några blåsor	Några blåsor	Enstaka liten blåsa	Inga blåsor

Vid dag 5 applicerades det andra lagret gjutasfalt. Även det lagret lades ut med en tjocklek av tre centimeter. Efter ungefär 10 minuter började blåsor bildas på samma ställen där blåsbildning skedde dagen innan. Resultat visade på att det ej uppstod någon blåsbildning för limträplattan med dubbla tätskiktsmattor. Resultaten redogörs enligt figur 9 och tabell 5 nedan.



Figur 9: Blåsbildning vid applicering av andra gjutasfalts lagret. Foto av Duo Asfalt.

Tabell 5: Läggnings av gjutasfalt 2a lagret, asfalttemp 220 °C.

Bitumen-emulsion	MMA stor platta	Bitumen-lösning	Epoxi stor platta	MMA liten platta	Epoxi liten platta	Dubbla mattor
Inga blåsor	Stora blåsor	Inga blåsor	Stora blåsor	Några blåsor	Några blåsor	Inga blåsor

3.2 Analys av Duo asfalts testresultat

Hypotesen till att blåsor bildas bygger på att det finns fukt bundet i träbjälklaget som sedan förångas när temperaturen stiger (Pousette, 2016). Det resulterar i ett övertryck under tätskiktet som leder till att mattan tappar fästet mot underlaget och en blåsa uppstår. Efter att gjutasfaltläggningarna studerats syns en skillnad i resultat mellan första och andra beläggningen. Generellt sätt uppstår färre bubblor under andra

utläggningen än vad det gjorde under första. Det är visserligen olika beroende på vilken primer som befann sig under. För epoxi exempelvis uppstod det fler blåsor under andra gjutasfalts lagret än vad det gjorde under det första. En teori kan vara att blåsbildningen vid första lagrets gjutning orsakat en permanent försämrad vidhäftning. Därav krävdes det mindre övertryck för att resa de ihop säckade blåsorna.

4 NUMERISK BERÄKNING FÖR TEMPERATURÄNDRING

Målet med denna del av rapporten är delvis att kunna härleda orsakerna till blåsornas uppkomst. En del av problemet beror troligtvis på att träet hettas upp och avger fukt, därav måste en uppskattning av hur höga temperaturer som uppnås, samt hur länge det varar göras. För att lyckas med det krävs en numerisk beräkning för värmens inträngningsdjup genom de olika lagren ner i konstruktionen. Beräkningsgången kommer ske i Matlab och med hjälp av att veta hur temperaturen varierar i konstruktionen kan orsaken till blåsorna lättare fastställas.

4.1 Metod

Värmeberäkningen bygger på en modell som hämtats ur boken *Introduction to Building Physics* (Hagentoft, 2001). En konstruktion med en tjocklek delas upp i ett antal celler med en mindre tjocklek Δx_i . Analysen som görs är endimensionell och innebär att endast energiflöden som går upp och ner i ett material beaktas. En värmebalansekvation tas fram för varje cellkärna för att kunna beräkna ett nettoflöde av energi in eller ut ur varje cell. Varje cellkärna har en viss temperatur T_{start} vid tiden $t = 0$ som förändras för varje tidssteg. Ett index i för respektive cell behövs för att veta vilken cell som är vilken. Temperaturen förändras över tid och räknas fram successivt med en förändring per antal tidssteg Δt . Temperaturskillnaden läggs till för N antal önskade tidssteg som beskrivs av formeln nedan.

$$T(t_{start}) \rightarrow T(t_{start} + 1 \cdot \Delta t) \rightarrow T(t_{start} + 2 \cdot \Delta t) \rightarrow T(t_{start} + N \cdot \Delta t)$$

Hagentoft (2001) skriver att varje cell representerar det material som befinner sig vid det djup som den valda cellen. Det innebär att de tekniska data som materialet har tillskrivs den specifika cellen. Parametrar som behövs är densitet ρ , specifik värmekapacitet c samt värmeledningsförmåga λ . För varje cell måste konduktanserna upp och ner till granncellerna räknas fram för att kunna bestämma energiflöden mellan cellerna vid en bestämd temperaturskillnad och given tid. Konduktanserna räknas fram med hjälp av ekvationen nedan.

$$K_i^{Up} = \frac{1}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2 \cdot \lambda_{i-1}} + \frac{\Delta x_i}{2 \cdot \lambda_i}}$$

$$K_i^{Down} = \frac{1}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2 \cdot \lambda_{i+1}} + \frac{\Delta x_i}{2 \cdot \lambda_i}}$$

Efter att konduktanserna beräknas hos varje cell kan de användas för att beräkna fram Q_{up} och Q_{down} för varje cell med nedanstående formler. *Figur 10.1* illustrerar sambandet av utbytet med värme för cell i .

$$Q_i^{Up} = K_i^{Up} \cdot (T_{i-1} - T_i)$$

$$Q_i^{Down} = K_i^{Down} \cdot (T_{i+1} - T_i)$$

Sambanden ovan ger nettotillförd energi för varje tidssteg, enligt respektive cell. Därefter används ekvationen nedan.

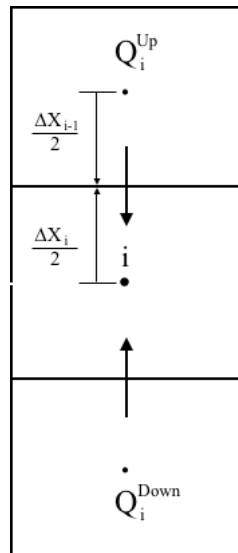
$$\Delta T_i = \Delta t \cdot \frac{Q_i^{Down} + Q_i^{Up}}{(\rho \cdot c)_i \cdot \Delta x_i}$$

När detta genomförs fås en temperaturförändring ΔT_i för varje cell. Temperaturförändringen adderas sedan med den aktuella temperaturen T_i för tidssteget och blir en ny uppdaterad temperatur inför nästa iteration. De gamla/föregående temperaturerna sparas i en matris som sedan plottas upp för att se förändringen av temperatur i respektive cell över tid. Den nedersta och översta cellen kommer att vara i kontakt med omgivningen som är en konstant temperatur T_a och utgör randvillkoren i lösningen. Eftersom mediet är luft finns ett värmeövergångsmotstånd som betecknas $R_{Surface}$. För att få fram konduktansen i övergången används istället ekvationen nedan (Hagentoft, 2001).

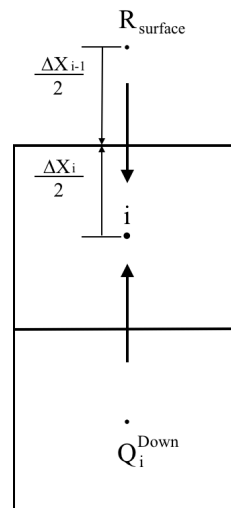
$$K_i = \frac{1}{\frac{\Delta x_i}{2 \cdot \lambda_i} + R_{Surface}}$$

Värmeflödet för de två cellerna blir istället enligt formeln nedan. *Figur 10.2* illustrerar utbytet av värmeeffekt för cell i som har kontakt med luft.

$$Q_i = K_i \cdot (T_a - T_i)$$



Figur 10.1:



Figur 10.2:

Figurer 10.1 & 10.2: Illustrering av värmetransport mellan celler. Figurer gjorda av författare.

4.1.1 Stabila tidssteget

Enligt Hagentoft (2001) kan det stabila tidssteget användas för att kunna bestämma ett tidssteg som är tillräckligt litet för att erhålla konvergenta lösningar. Används ett mycket litet tidssteg fås en omotiverat stor mängd data och iterationer. Används ett för stort tidssteg kommer temperaturerna som följer av varje iteration att bli felaktiga och resultatet blir otydligt och svårt att följa. I *figur 10.1* ovan visas den värmeeffekt som kommer att flöda ut från en cell och in i granncellen. Energiflödet färdas i den riktningen så länge temperaturen i den cellen är högre än vad den är i granncellen. Skulle tidssteget Δt vara för stort finns risken att ΔT_i blir lägre än 0 i det aktuella tidssteget vilket betyder att temperaturen i cellen blir lägre än i granncellen. Flödet av värme kommer att byta riktning i nästa utförda iteration vilket inte stämmer överens med verkligheten. För att förhindra att det inträffar skall nedanstående villkor följas.

$$|\Delta T| = \frac{\sum Q \cdot \Delta t}{\Delta x \cdot \rho c} < 1$$

Konduktanserna kan användas för att beskriva summan av värmeflödet enligt nedanstående ekvation.

$$\sum Q = K_i^{Up} \cdot 1 + K_i^{Down} \cdot 1$$

Det stabila tidssteget Δt^{Stab} kan därefter lösas ut enligt ekvationen nedan.

$$\Delta t^{Stab} = 0.99 \cdot \min \left(\frac{\Delta x_i \cdot (\rho c)_i}{K_i^{Up} + K_i^{Down}} \right)$$

Det stabila tidssteget måste kontrolleras för alla celler där ett värmeflöde förekommer. Δt^{Stab} varierar beroende av celltjockleken, värmeledningsförmågan och den specifika värmekapaciteten för respektive cell. Den cellen som får det minsta stabila tidssteget avgör vilket värde som skall användas för Δt^{Stab} i alla celler (Hagentoft, 2001).

4.2 Analytisk lösning

En analytisk lösning för jämförelse med numerisk lösning tillämpas för att kontrollera att den numeriska lösningen inte avviker för mycket och visar något felaktigt. Vid jämförelse anpassas den numeriska lösningen med en analytisk lösning som är tillgänglig för ett specifikt fall. Den analytiska lösningen fungerar endast för ett homogent halvoändligt material där temperaturen i hela skiktet är lika med T_0 . Vid tiden $t = 0$ införs en temperaturändring vid ytan på materialet från T_0 till T_1 . Stegändringen av yttemperaturen blir $T_1 - T_0$. Temperaturen inuti materialet kan beräknas analytiskt med hjälp av stegändringen för yttemperaturen och den komplementära felfunktionen $erfc$ som visas nedan (Hagentoft, 2001).

$$T(x, t) = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot erfc \left(\frac{x}{\sqrt{at}} \right)$$
$$\text{Där } erfc(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_s^{\infty} e^{-u^2} du$$

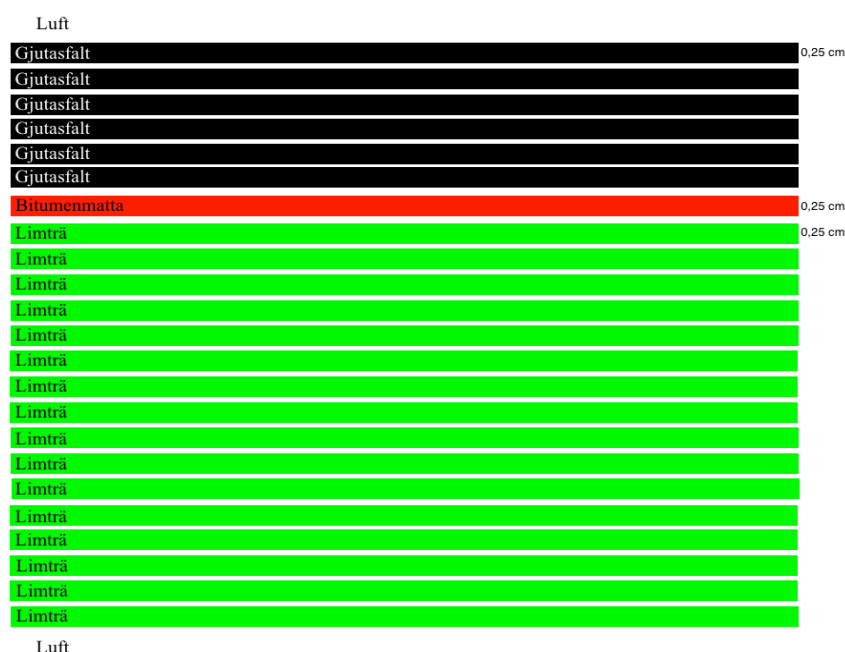
Svaret fås direkt om $\text{erfc}(s)$ plottas upp i Matlab där den finns inlagd som en funktion enligt nedan. Ett värde för värmediffusiviteten a används som parameter (Hagentoft, 2001).

$$\text{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

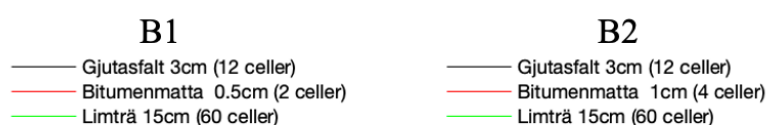
4.3 Modell inför numerisk beräkning

För att beräkna ett resultat som är jämförbart med Duo Asfalts test, användes samma tjocklekar på alla materiallager inom bjälklaget. Bjälklaget delades därefter in i flertalet celler där varje cell fick en tjocklek på 0,25 centimeter. *Figur 11* representerar ett exempel på hur cellindelningen av ett bjälklag kan se ut.



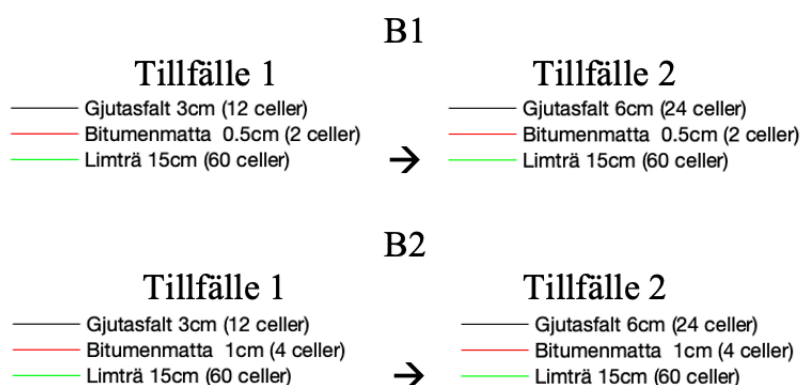
Figur 11: Illustration av materialsammansättningen i form av celler.

I Duo Asphalt test användes två olika bjälklagskonstruktioner, ett med en bitumenmatta och ett annat med dubbla mattor. Av den anledningen skapades två typer av bjälklagsmodeller inför beräkningen. Bjälklagsmodellerna namngavs med B1 och B2 för respektive en och två mattor. *Figur 12* redovisar materiallagerna och antalet celler för B1 och B2.



Figur 12: Lagertjocklek för B1 & B2.

Nästa steg i beräkningsmodellen var att plotta temperaturändringen genom bjälklaget. Gjutasfalten lades ut över konstruktionen i två omgångar och namngavs för respektive omgång till "tillfälle 1" för första lagret gjutasfalt och "tillfälle 2" för andra lagret. Skillnaderna mellan de två tillfällena utgörs av antalet celler eftersom det finns ett gjutasfaltslager vid tillfälle 1 respektive två gjutasfaltlager vid tillfälle 2. *Figur 13* representerar en förtydligande bild över hur händelseförloppet för varje bjälklagskonstruktion kan se ut.



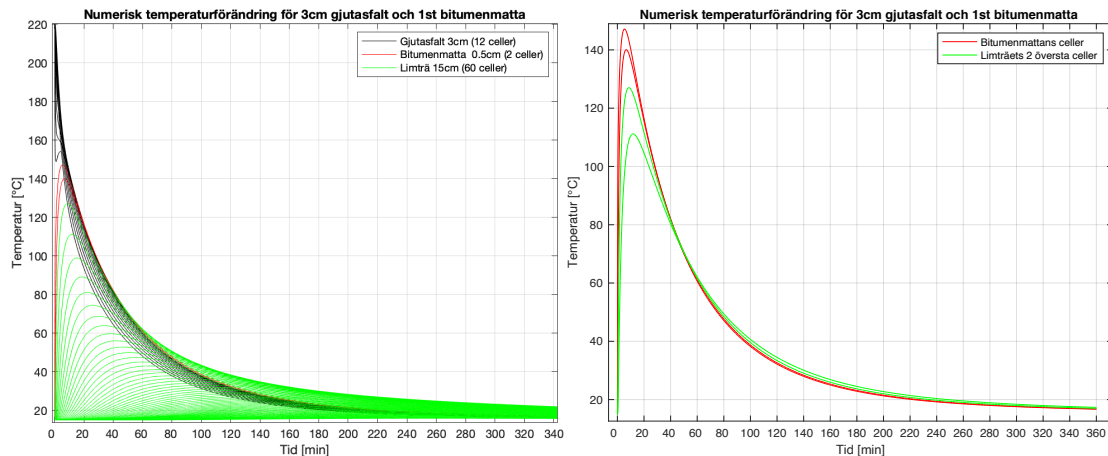
Figur 13: Lagertjocklek för B1 & B2 vid olika tillfällen.

Då B1 och B2 får en förändrad temperatur under tillfällena 1 och 2 beräknas fyra olika *figurer*: 14.1, 15.1, 16.1, 17.1. Varje *figur* är en graf som innehåller flertalet linjer med olika färg där varje linje representerar temperaturändringen för en cell inom konstruktionen. Beskrivning om vilket material som respektive färg representerar visas i legenden på varje *figur* och kan även tolkas i *figurerna 11–13*.

4.4 Resultat från numerisk beräkning

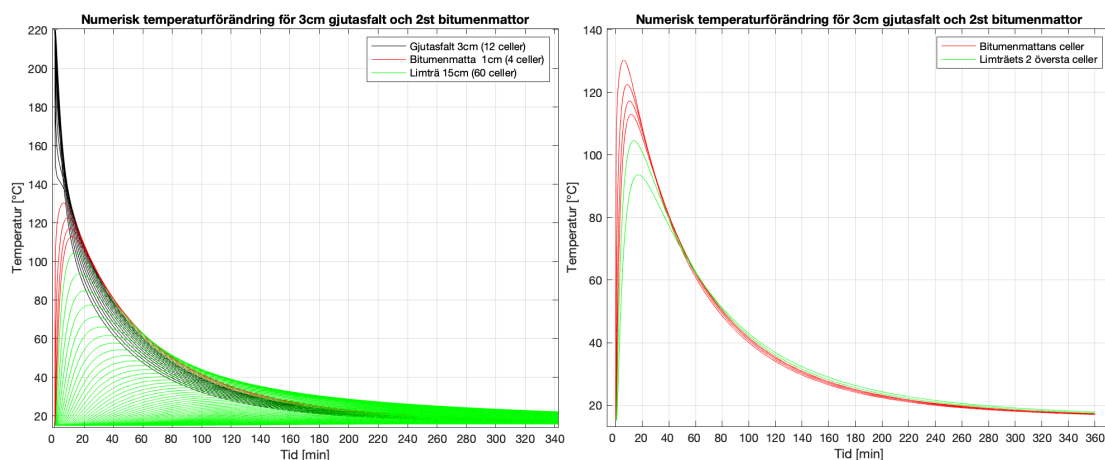
I de vänstra *figurerna* nedan redogörs alla cellers temperaturändring i konstruktionen under en tidsperiod av fem och en halv timme. *Figurerna* till höger nedan visar samma tidsperiod med skillnaden att de visar ett urval på temperaturändring för de mest intressanta cellerna, bitumen och de två översta limträcellerna. Varför just dessa celler är de mest intressanta beror på att det är inom detta område blåsbildning sker och därav sätter förutsättningar för senare utfört test som undersöks närmare i kapitel 5. Förstorad bild av *figurerna* kan ses enligt *Bilaga 1–6*.

Figur 14.1 och *14.2* visar resultatet för B1 vid tillfälle 1. När *figur 14.1* analyseras, syns att gjutasfaltens celler startar med en negativ lutning vilket tyder på att temperaturen i gjutasfalten sjunker. Samtidigt får bitumenmattans celler och delar av limträbjälkeslagets celler en temperaturökning eftersom de representerande cellerna har en positiv lutning. Cellernas temperatur ökar succesivt och den varmaste bitumencellen når sin topp vid ungefär 147 °C efter 5–10 minuter enligt *figur 14.1*. Limträcellen når sin topp på cirka 127 °C efter 10–15 minuter enligt *figur 14.2*. När gjutasfaltens celler korsar topparna för bitumen- och limträcellerna, ändras lutningen till att bli negativ. Det kan beskrivas som att temperaturen för bitumen- och limträcellerna sjunker. Vid en tid av 340 minuter utjämnas temperaturen av alla material till cirka 20–15 °C.



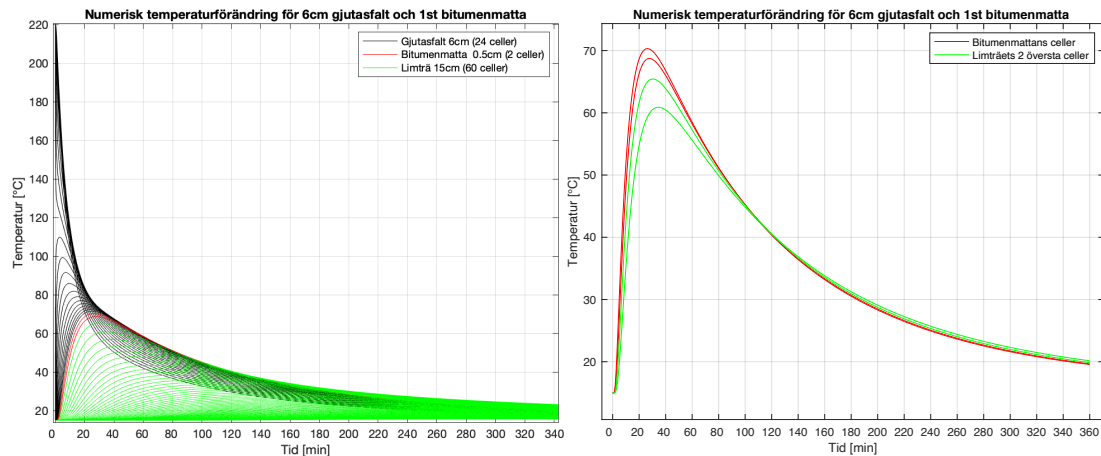
Figur 14.1 & 14.2: 14.1 Visar alla cellernas temperaturändring i konstruktionen för respektive material. 14.2 visar ett urval av Bitumen- och de 2 översta Limträcellerna till höger. Förstorad bild ses i bilaga 1.

Figur 15.1 och 15.2 nedan, visar resultatet för B2 vid tillfälle 1. Utvecklingen för dessa figurer är jämförbara med utvecklingen från föregående figur 14.1 och 14.2. Skillnaden är att temperaturen för den varmaste bitumencellen enbart går upp till 130 °C samt att temperaturen för den varmaste limträcellen endast uppnår 105 °C. Även tiden det tar för att uppnå maxtemperatur har ökat. Det tar nu cirka 10–15 samt 15–18 minuter för respektive cell att uppnå sin maximala temperatur. Slutligen sjunker temperaturen i konstruktionen till 20–15 °C vid 340 minuter.



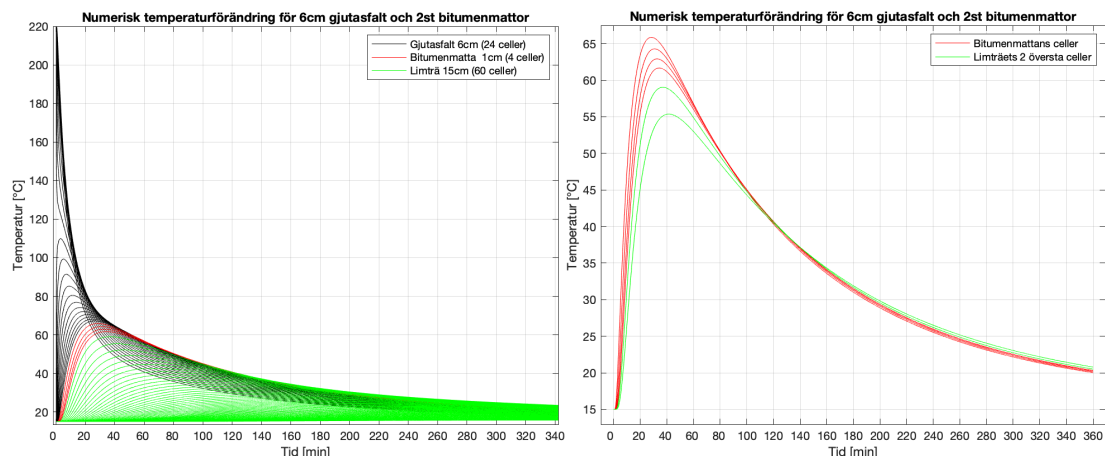
Figur 15.1 & 15.2: 15.1 Visar alla cellernas temperaturändring i konstruktionen för respektive material. 15.2 visar ett urval av Bitumen- och de 2 översta Limträcellerna. Förstorad bild ses i bilaga 2.

Figur 16.1 och 16.2 visar resultatet för B1 vid tillfälle 2. I nedanstående figurer har temperaturändringen skiftat i förhållande till ovanstående figurer 14.1–15.2. I figur 16.1 startar delar av gjutasfaltcellerna med en positiv lutning. Anledningen till det utseende är att det nu befinner sig ett nerkylt gjutasfaltlager under den nylagda gjutasfalten. Det nya händelseförloppet resulterar i att den varmaste cellen hos bitumenmattan och limträet endast uppgår till cirka 70 °C efter 20–25 minuter, respektive 65 °C vid 30–35 minuter. Därefter avtar värmen från konstruktionen och temperaturen stabiliserar sig mellan 20–15 °C i de flesta skikt efter 340 minuter.



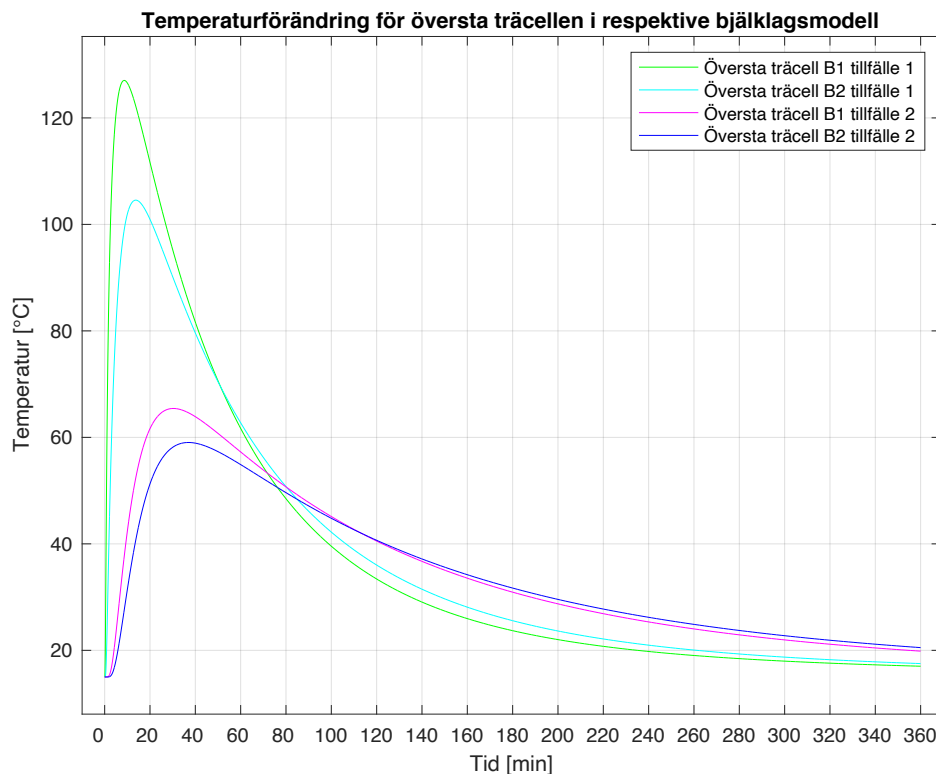
Figur 16.1 & 16.2: 16.1 Visar alla cellernas temperaturändring i konstruktionen för respektive material.
16.2 visar ett urval av Bitumen- och de 2 översta Limträcellerna. Förstorad bild ses i bilaga 3.

Figur 17.1 och 17.2 nedan, visar resultatet för B2 vid tillfälle 2. I dessa figurer uppnår den översta bitumencellen endast 65 °C under 30–35 minuter. Den översta limträcellens temperatur når enbart 59 °C under tidsintervallet 35–40 minuter. Strax efter kurvornas maxtemperatur blir lutningen negativ och temperaturen stabiliseras kring 20–15 °C efter 340 minuter.



Figur 17.1 & 17.2: 17.1 Visar alla cellernas temperaturändring i konstruktionen för respektive material.
17.2 visar ett urval av Bitumen- och de 2 översta Limträcellerna. Förstorad bild ses i bilaga 4.

Figur 18 sammanställer temperaturförändringen av den första träcellen för respektive bjälklagsmodell vars resultat visats ovan. Den förtydligar vilken konstruktion som uppnår den högsta och mest kritiska temperaturen under en viss tid. Utifrån figurerna 14.1–17.2 kan det klargöras att B1 tillfälle 1 är den konstruktion där träet utsätts för högst maxtemperatur men även den snabbaste temperaturförändringen jämfört med de andra konstruktionerna.

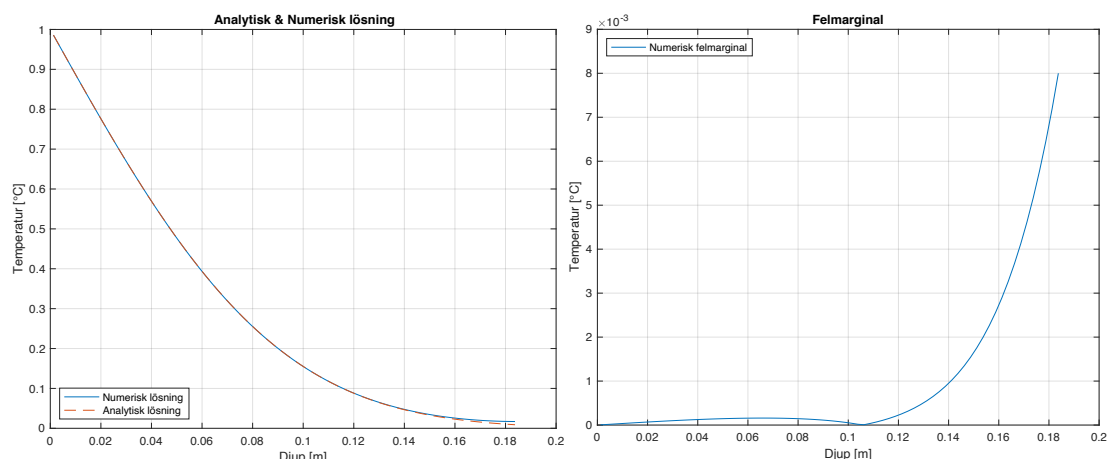


Figur 18: Överskådlig figur av de översta träcellerna för respektive bjälklagsmodell

4.5 Verifiering av numerisk beräkning

När temperaturändringen i bjälklaget beräknats fram, jämförs resultatet med en analytisk lösning. En analytisk lösning kan tillämpas på ett homogent material där randtemperatur anges vid materialets yta. Eftersom den numeriska beräkningen beaktar olika material fås olika egenskaper genom konstruktionen. För att jämföra den numeriska beräkningen med den analytiska måste därför parametrar som materialets starttemperatur, randtemperatur, värmeledningsförmåga, specifik värmekapacitet och densitet ändras till konstanta värden genom hela konstruktionen för att skapa ett homogent material. Detta ändras eftersom erfc inte kan hantera olika värden på dessa parametrar inom samma beräkning. Lösningarna plottas upp enligt *figur 19* samt 20 och en felmarginal sammanställs mellan de två linjerna. Om linjerna ligger på varandra betyder det att lösningarna är lika och felmarginalen liten. Om linjerna ligger separat är lösningarna åtskilda och felmarginalen större. Jämförelsen av dessa lösningar kan ses i *figur 19* varav felmarginalen presenteras tydligare i *figur 20*.

Felmarginalen kan beskrivas som en skillnad av temperatur i förhållande till djup. Därav kan felmarginalen utläsas till att vara lika med noll eftersom djupet går från 0,25 cm till 12 cm. Strax efter 12 cm separerar de två linjerna och felmarginalen ökar. Felet uppstår när bredden på träet trunkeas eftersom oändliga dimensioner inte kan simuleras numeriskt. Felmarginalen ansågs vara såpass liten vid de intressanta skikten att beräkningsmodellen som tagits fram kunde användas.



Figur 19 & 20: Analytisk & Numerisk lösning. Felmarginal av Numerisk lösning i förhållande till Analytisk lösning. Förstorad bild ses i bilaga 5 & 6.

4.6 Analys

Det generella händelseförloppet för samtliga numeriska lösningar, visar att det under de första minuterna sker en stor förändring mellan de olika materialen. Orsaken är att både luften, träet och bitumenmattan till en början håller en konstant temperatur på 15 °C och får ett ökat energitillskott när gjutasfalten med en temperatur på 220 °C läggs ut på konstruktionen. Enligt Jönsson (2018) strävar naturen alltid efter att uppnå jämvikt vilket leder till ett energiutbyte från gjutasfalten till omgivande luft och material. Den ökade energimängden i träet och bitumenmattan resulterar i förhöjda temperaturer i respektive material. Gjutasfalten utsätts istället för det omvända händelseförloppet. Energimängden sjunker när gjutasfalten överför värme till luften och de andra materialen, vilket leder till en sjunkande temperatur.

Ju fler tidssteg som gjorts desto mer stadig blir energiöverföringen mellan de olika materialen. Slutligen stabiliseras temperaturen på 15 °C i bjälklaget. Det beror på att all energi överförs till omgivande luft som i beräkningen är satt till konstant 15 °C.

Vid jämförelse mellan *figurer* 14.1–17.2 ovan kan en tydlig resultatskillnad uppmärksammas. Till följd av att tätskiktet innehåller fler samt tjockare skikt syns dess isolerande förmåga och temperaturen i träet håller sig därav mycket lägre. Ett tydligt exempel på ett sådant uppförande kan ses vid jämförelse mellan *figurerna* 14.1 och 17.1. *Figur* 14.1 innehåller endast en bitumenmatta samt ett lager gjutasfalt. Denna lösning uppnår de högsta temperaturskillnaderna gentemot resterande *figurer* 15.1–17.2. *Figur* 17.1 har jämförelsevis dubbla bitumenmattor samt två lager gjutasfalt och visar de lägsta temperaturskillnaderna i förhållande till övriga resultat. En mer exakt jämförelse mellan de intressanta skikten kan ses i *figur* 18. B1 tillfälle 1 kan ses som den mest kritiska konstruktionen och av den anledningen kommer kommande beräkningar och tester utgå från denna temperaturförändring.

Ytterligare en observation är att temperaturförändringen i bjälklaget kan liknas med en våg som sveper igenom konstruktionen. Vad som sker beror på att tidsförloppet förlängs i samband med att tätskiktets tjocklek ökar. Det tyder på att den ökade tjockleken således får en inverkan på konstruktionens värmetröghet som ökar nämnvärt (Dybro, 2011).

4.6.1 Felkällor

Felaktiga indata i beräkningar är en möjlig felkälla. Till exempel försummas fasförändringar i värmeledningskoefficienterna som används i beräkningarna. Konsekvensen är att de kan skilja sig något från verkligheten eftersom dessa parametrar inte är perfekt konstanta för alla temperaturintervall. Trunkeringsfel uppstår också när modellen delas upp i ett ändligt antal celler när det egentligen kan tänkas vara ett oändligt antal celler med en oändligt liten tjocklek. Avrundningsfel är också något som uppstår till följd av föregående fel (Eldén & Wittmeyer-koch, 2009).

Temperaturen genom de olika skikten kan tänkas vara en överskattning eftersom det finns vatten bundet i träkonstruktionen. För att få vatten att förångas krävs tillförd energi från den omedelbara omgivningen (Jönsson, 2018). Troligt är att det bidrar till en temperatursänkning i skiktet. Eftersom det i dessa beräkningar inte finns någon kontroll på hur mycket fukt som förångas kan heller inte något sägas om hur mycket temperaturen sänks i det verkliga fallet.

5 EGET UTFÖRANDE AV TEST

Inom detta avsnitt redogörs förhållandet mellan tryck och temperatur. När temperaturförändringen genom konstruktionen beräknats i föregående del av rapporten, kan nu ett övertryck mellan bitumenmattan och limträbjälklaget uppskattas. Hypotesen är som nämnts tidigare ett övertryck som uppstår av två faktorer, vilket är kvarvarande luft mellan tätskiktet och träbjälklaget samt fukt bundet i limträet.

Dessa faktorer kommer att undersökas i ett test. Inledningsvis uppskattas ett förväntat övertryck som bör uppstå i kammaren med hjälp av den ideala gas-lagen. Tryckkammaren består av en egentillverkad plåtlåda, där en begränsad mängd luft tillsammans med trä värms upp till en kritisk temperatur. När kammaren nått den rätta temperaturen läses en manometer av för att ge en uppfattning om vilket övertryck som bildats.

5.1 Beräkningsteori för tryckförändring

Hypotesen bygger på två faktorer, luft och vatten. Dessa medium expanderar vid högre temperaturer och om de befinner sig inom ett slutet system likt området mellan tätskiktsmattan och träbjälklaget ökar trycket (Jönsson, 2018). Trycket fortsätter att öka i förhållande till en ökad temperatur tills att systemet inte klarar av övertrycket och en volymförändring sker i form av att en blåsa utvecklas. Utifrån *Daltons lag* skapar luft och vatten två separata övertryck som tillsammans bildar ett totalt övertryck. De separata trycken kan genom formler beräknas och summan av resultatet representerar det största övertryck som kan bildas inom systemet. För att få en så noggrann uppfattning som möjligt angående tryckens storlek beräknas övertrycket för luft och övertrycket för vattenånga separat med hjälp av den allmänna gas-lagen.

Resultaten förväntas skapa ett tryckintervall mellan lufttrycket samt summan av luft- och vattentrycket. Tryckintervallet kommer jämföras med kommande resultat från tryckkammaren och därefter utredas om de två faktorerna luft och vattenånga är orsaken till att blåsor bildas. Resultatet används också av säkerhetsskäl för att kunna klargöra om det ens är möjligt att själva bygga en tryckkammare med tillräcklig kapacitet. Det ger även en uppfattning om vilken noggrannhet manometern behöver ha för att få ett acceptabelt utslag, som därefter kan läsas av med acceptabel noggrannhet. Manometern som används utgår från att normaltrycket är lika med noll och ger därför enbart utslag på övertryck.

Innan beräkningen kan utföras måste ett antal förutsättningar fastställas. Dessa förutsättningar beskriver de yttre, inre och omgivande förhållanden som skall förekomma. När beräkningsmodellen skall jämföras med testet måste samma förhållanden råda för både beräkningsdelen som för trycktestet. Dessa redovisas i punktform nedan.

- Temperatur som skall uppnås 127 [°C]
- Fuktkvot i limträet = 12 %
- Normala lufttrycket = 101,3 [kPa]
- Kammarens volym = 0,038 [m³]

För att kunna beräkna det största övertryck som bildas behövs ett extremfall analyseras där en högsta temperatur i träcellerna uppnås. Den situationen uppkommer i B1 tillfälle 1 enligt figur 14,1 & 14,2. Temperaturen uppnår 127 °C och befinner sig över 120 °C i minst en period av 7 minuter. Därav skälet till att 127 °C sattes som en av förutsättningarna enligt den punktade listan ovan.

Fuktkvoten i limträet togs fram genom att införskaffa en fuktkvotsmätare som angav limträets fuktkvot till 12 %. För att säkerhetsställa fuktkvoten sågades en limträbit i fyra mindre skivor. Skivorna vägdes med en gramsvåg där vikten antecknades och bitarna lades i ugnen. Efter att skivorna legat i ugnen i cirka en timme togs de ut och vägdes och vikten antecknades. Skivorna lades in i ugnen igen och togs ut efter ytterligare en timme. Då skivorna vägdes denna gång noterades samma vikt som vid föregående vägning. Med hjälp av ursprungliga vikten och torrvikten kunde fuktkvoten av limträet beräknas till 11,9 %.

När de omgivande förutsättningarna fastställts kan teorin för övertryckberäkningen redogöras. När övertrycket för enbart uppvärmd luft i tom låda beräknades, applicerades gas-lagen. Beräkningarna skedde i Matlab och tillsammans med alla framtagna förutsättningar kunde övertrycket beräknas till ungefär 35,9 kPa vid 130 °C.

$$\text{Ideala gaslagen: } P_{\text{luft}} = \frac{n_{\text{luft}} * R * T}{V_{\text{luft}}}$$

För att beräkna övertrycket skapat av vattenånga kan även för detta fall lagen om ideala gaser tillämpas. Skillnaden mot lufttestet är att det nu befinner sig två medier i kammaren, luft och vatten. Alltså bör det utvecklade övertrycket från båda medierna summeras för att få det totala övertryck som uppstår. Övertrycket beräknas till max 305 kPa vid 130 °C för vattentestet.

$$P_{\text{vatten}} = \frac{n_{\text{vatten}} * R * T}{V_{\text{vatten}}} * RF$$

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{luft}} + P_{\text{vatten}}$$

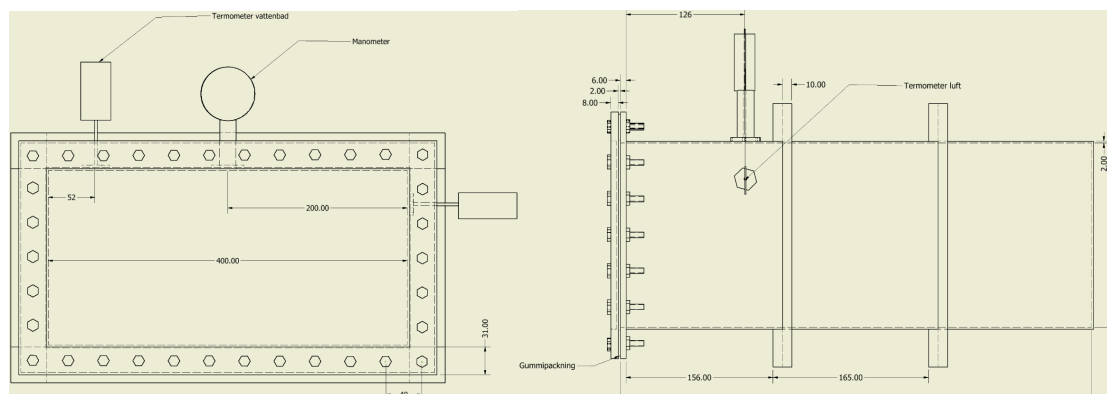
Samma teori används även för trä men med en väsentlig skillnad. Övertrycket beroende av fukten i träet tas fram från fuktkvoten i förhållande till träets temperatur och volym. Det görs i en speciell sorptionskurva framtagna av Deliiski (2011) som gäller för högre temperaturer i trä. Träet som testas har en fuktkvot på 12 % vilket motsvarar en relativ fuktighet på ungefär 94 % vid 130 °C. I beräkningen antas all fukt i träet vara förångad. Med dessa förutsättningar beräknas det högst troliga övertryck av trätestet till ungefär 281 kPa.

$$P_{\text{trä}} = P_{\text{luft}} + P_{\text{vatten}} * RF$$

Vid en sammanställning av de olika formlernas resultat, uppskattades övertrycket till att befinna sig inom ett intervall kring 35,9–305 kPa för samtliga test.

5.2 Tillverkning av labbutrustning inför trycktest

För att möjliggöra ett tryckförändringstest av trä, tillverkas en låda av stålplåtar. Till en början önskas kammaren ha måtten 195x400x500 mm invändigt och för att förenkla tillverkningen, skapas ritningar i CAD-programmet Autodesk-Inventor. Ritningar av kammaren redovisas enligt *figur 21* nedan.



Figur 21: Ritning på egengjord tryckkammare utan isolering, figur av författare. Förstorad bild ses i bilaga 21–22.

Stålmateriel som används är av hållfasthetsklass S235. Dimensioner för stålet, annat material samt annan utrustning redovisas i punktform nedan.

- Stålplåt i 2mm godstjocklek ar
- Plattjärn i dimensionerna 6x31mm
- Plattjärn 10x40 mm.
- Stenull (isolering)
- Gummipackning (utskuret från gummi ark)
- Manometer (Märke: ITEC, noggrannhet: 1,6 %)
- Termometer (Märke: Anders Petter, noggrannhet: ± 1 °C)

På ett plåtark med måtten 2x1000x2000 mm märks de plåtar ut som skall ingå i lådan. Måtten på dessa plåtar visas enligt nedan.

- 2st 500x400 mm
- 2st 200x500 mm
- 1st 200x400 mm
- 1st 268x462 mm

Plåtarna klipps i en maskin med hög precision hos MCB Smide AB i Rollsbo industriområde Kungälv. Plåtarna punktnästas ihop med hjälp av en MIG-svets. Lådan måste vara öppningsbar för att kunna lägga in och ta ur material som skall testas. Därför passas plattjärn in vid öppningen av lådan som sedan skall bli del av bultflänsen. Locket tillverkas och hålbilden för alla bultar på locket och flänsen borras. Därefter helsvetsas lådan i alla skarvar för att få lådan att bli lufttät. Tätheten kontrolleras genom att fylla lådan med vatten som låts stå i cirka två timmar.

En packning av värmebeständigt gummi mellan locket och flänsen tillverkas och passas in med hålbilden. För att mäta övertrycket i lådan behövs en manometer som monteras med hjälp av en muff i stål som svetsas i lådan över ett borrarat hål. Manometern har en mätnoggrannhet på 1,6 % och skruvas ned i muffens gängor med gängtejp för att säkerhetsställa lufttätethet. Temperaturen på luften i lådan måste också kunna uppmätas och därför monteras även en termometer in i lådan genom ett hål från sidan. För att säkerhetsställa lufttätethet svetsas en mutter på utsidan över hålet för att utöka kontaktytan mellan limmet, plåtlådan och termometern. Temperaturmätaren sticks in och limmas fast med hjälp av ett värmetåligt packnings-silikon med märke Loctite SI 5926. Termometern skall ha ± 1 °C i mätnoggrannhet samt uppmäta aktuell temperatur inom 4–10 sekunder.

Övertrycket i lådan förväntas bli högt och därav kan plåten komma att bukta ut och ändra lådans volym. För att förhindra allt för stor utbuktning tillverkas två ramar som svetsas runt lådan. Eftersom stål har en hög värmeledningsförmåga måste lådan isoleras för att uppnå en mer jämn och stabil temperatur inuti lådan. Ett fack i botten av lådan isoleras inte eftersom lådan via det facket kommer att tillföras värme. Värmetillförseln sker med hjälp av en gasolbrännare. Bilder från tillverkning av kammaren kan ses i *bilaga 7–8*.

5.3 Utförande

Testförsöken av tryckkammaren utfördes i fem olika omgångar där temperaturen skulle uppnå cirka 127 °C. Det första testet gick ut på att enbart värma upp luft när lådan var tom. Under det andra testet värmdes en glasform med vatten och under det tredje, fjärde och femte testet värmdes limträ upp, bestående av antingen skivor eller som en solid limträbit. Avläsning av manometern och termometern antecknades genom bilder och Excel. Utförandet av testförsöken dokumenterades i form av bilder och kan ses i *bilaga 3–4*.

När det första testet utfördes med enbart luft observerades temperatur och övertryck direkt. Kammarens lucka bultades fast och trycklådan värmdes upp till 120 °C med hjälp av en gasolvärmare. Vid detta tillfälle antecknades återigen lådans temperatur och övertryck. Det återupprepades för temperaturerna 125 och 130 °C och därefter läts lådan svalna.

När kammaren hade svalnat skedde en liknande procedur för test nummer två. Denna gång placerades en glasform fylld med en liter vatten i kammaren. Formen sattes på distanser för att undvika direkt kontakt med lådans uppvärmda botten. Temperaturen och normaltrycket antecknades innan uppvärmning. Men eftersom det tog lång tid att öka vattnets temperatur sattes en timer igång. Övertrycket antecknades vid tiderna 20, 40 och 60 minuter för respektive temperatur 120, 125 och 130°C, innan lådan kylades ner inför kommande test. Då temperaturen registrerades i luften inuti kammaren och inte vattnets temperatur erhöles mycket lägre övertryck än förväntat. Testet gjordes därför om med ytterligare en termometer installerad som mätte temperaturen på vattnet. Vattnet lades även i en plåtlåda för att öka kontakten med värmekällan och påskynda förångnings processen.

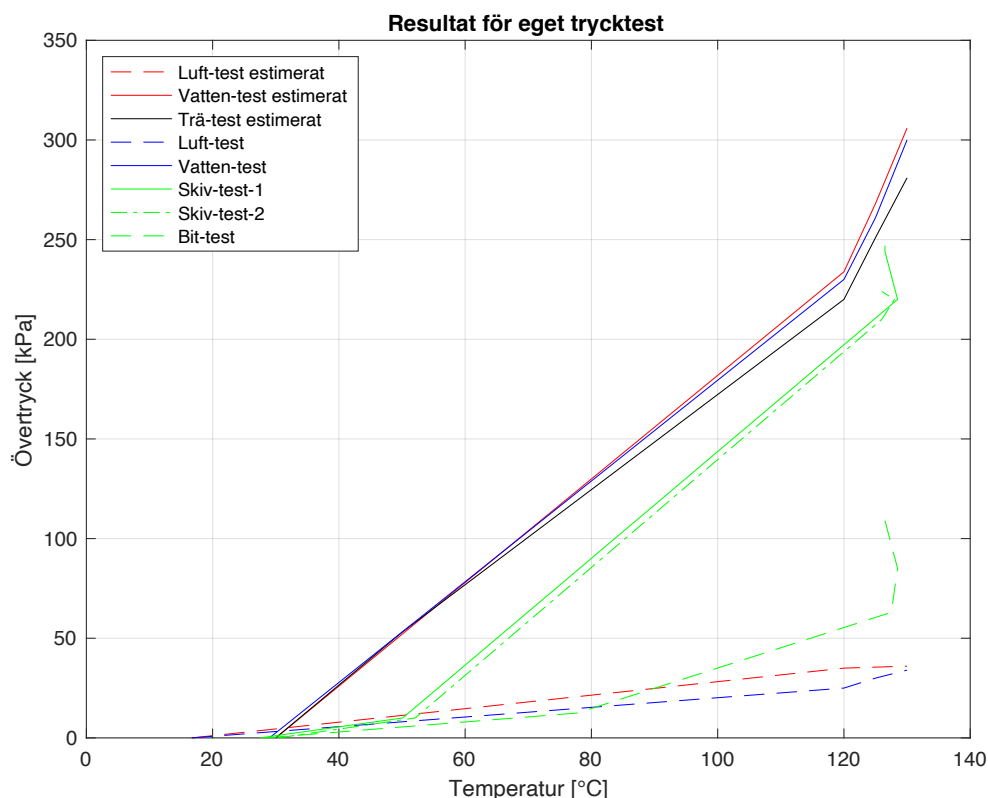
Det tredje och fjärde testet utfördes nästintill exakt likadant. Innan testen sågades limträbitar upp till totalt 40 mindre skivor. Den sammanlagda volymen av de 20

skivorna antecknades och en större limträbit med samma volym sågades ut för att senare användas i det femte och sista testet. 20 skivor placerades glest med luft emellan i kammaren för att exponera så mycket yta som möjligt mot luften. Locket stängdes och nuvarande temperaturen samt normaltrycket observerades. Likt de föregående testen värmdes lådan upp. Anteckningar togs när trycket började öka vid ungefär 50 °C. När lådan kommit upp i temperatur kring 127 °C försökte temperaturen hållas konstant inom en tidsperiod på 7 minuter. Det gjordes för att försöka efterlikna tidsförloppet enligt *figur 14.1* och *14.2* så mycket som möjligt. Eftersom en gasolvärmare användes för att värma upp kammaren var det svårt att hålla temperaturen konstant och temperaturen varierade därav med någon grad under perioden på 7 minuter. Temperatur och övertryck antecknades vid tidsperioden 0, 4 och 7 minuter. Kammaren fick därefter svalna inför nästkommande test.

Under det femte och sista testet lades den större limträbiten in i kammaren på två distanser för att likt plåten med vatten inte komma i direkt kontakt med lådans varma botten. Normaltryck och temperatur antecknades innan uppvärmning och därefter observerades övertrycket och temperaturen på samma sätt som för limträskivorna. Tidsperioden var annorlunda och en period på 30 minuter startades när temperaturen i lådan uppnått cirka 127 °C. Anteckningar skedde vid tiden 0, 15 och 30 minuter innan kammaren fick svalna.

5.4 Resultat

I *figur 22* nedan redovisas resultaten för uppmätt övertryck från de fem olika testförsöken där normaltrycket representerats som 0 kPa. Observera att följande övertryck är det tryck som överstiger normalt atmosfärtryck vars storlek är 100 kPa. Det betyder att ett uppmätt övertryck på exempelvis 240 kPa motsvarar 340 kPa i totaltryck. Linjerna visar övertrycket i förhållande till temperaturen där de blåa linjerna redovisar resultaten för luft- och vattentestet. De gröna linjerna visar resultaten för respektive trä test. Likt resultaten för tryckberäkningarna skulle träet skapa ett övertryck som låg emellan övertrycken för luften och vattnet. Som *figur 22* visar befinner sig träets övertryck inom det estimerade spannet. Dokumentation i form av bilder och tabeller för varje resultat kan ses i bilaga 11–20.



Figur 22: Testresultat av övertryck från egengjort test. Normaltrycket visas som 0 kPa. Resultat i form av bilder och tabellform i bilaga 11–20.

5.5 Analys

5.5.1 Vatten och luft

Vid en sammanställning av tryckberäkningarna gentemot tryckresultaten noteras lika resultat med små avvikelser. Luften påvisade en resultatskillnad på knappt 2 kPa vilket är förhållandevis litet. Det första testet med vatten fick större felmarginaler på cirka 60 kPa. Testet ansågs därför inte trovärdigt eftersom avvikelserna var för stora vid jämförelse mellan det estimerade övertrycket och det uppmätta resultatet. Anledningen till avvikelserna beror sannolikt på att luft ej har lika hög specifik värmekapacitet som vatten, därför kan temperaturen skilja sig mellan de två medierna innan jämnvikt uppnås (Jönsson, 2018). Det estimerade övertrycket beräknas utgående från vattnets temperatur och därför mättes temperaturen i vattnet under det andra försöket. Det resulterade i att skillnaderna i övertryck från beräkningen och testet endast varierade med någon kilopascal. Trycktestet ansågs därför trovärdigt och bör visa ett relevant svar för det skapade övertrycket med uppvärmt trä.

5.5.2 Trä

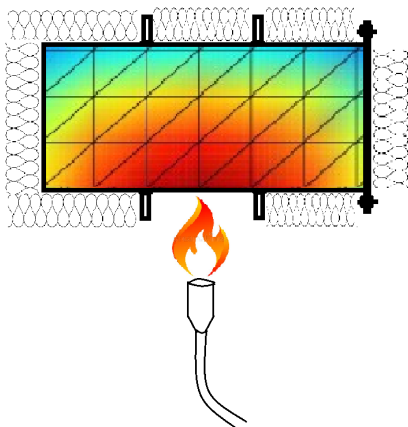
När testerna med trä gjordes noterades de största skillnaderna vid jämförelse av bit- och skivtestet. En trolig orsak till tryckskillnaderna kan vara att de uppskivade träbitarna tillsammans får en mycket större kontaktyta med omgivande luft inne i behållaren och det resulterar i att fukt förångas snabbare. Ytterligare en anledning grundar sig i att en högre mängd ändträ exponeras för omgivande luft i lådan. Ändträ

har generellt sätt högre ånggenomsläpplighet än längsgående fibrer och påskyndar därav processen (Petersson, 2013). Anledningen till att bittestet fick relativt lågt övertryck grundar sig i att all fukt bundet i träet inte hinner avdunsta till omgivande luft. Totalt exponerad yta för träbiten motsvarar endast 23 % jämfört med den sammanlagda exponerade ytan för skivorna. Ytterligare en anledning är att tjockleken på träbiten resulterar i att ånggenomgångsmotståndet blir större än skivornas motstånd och samma mängd fukt tränger inte ut inom det korta tidsintervallet (Petersson, 2013). Föregående orsak kan delvis vara en förklaring till varför uppskattat övertryck inte uppnås för någon av provbitarna. Beräkningarna antar att 100 % av fukten bundet i träet kommer att förångas samt att mängden fukt som estimerats med hjälp av Deliiskis sorptionskurva (2011) kan avvika något från verkligheten.

Trots att det förekommer stora spridningar i resultaten kan ett genomsnitt av övertrycken uppskattas. Genomsnittet bestäms till cirka 200 kPa eftersom större delen av resultaten befinner sig över denna tryckstorlek. Om övertrycket jämförs med Duo Asfalts dragtest kan resultaten bli intressanta. I *tabell 3* visas dragtestsresultaten som utfördes på tätskiktsmattan. Delar av dessa resultat tydliggör att mattan gick sönder vid relativt låga dragspänningar. Dragtestet utfördes under något lägre temperaturer än rumstemperatur vilket indikerar på ett avsvalat tillstånd där vidhäftningen härdad och är som starkast. Trots det släppte fästet mellan mattan och träet vid ungefär 200 kPa för delar av testen vilket är lika stort som det genomsnittliga övertrycket som fåtts av de egna trätesten. Det sammanställda övertrycket representerar det övertryck som bildats när konstruktionen värms upp till följd av varm pålagd gjutasfalt. Enligt Garcia-Morales (2003) sjunker bitumenmattans viskositet i förhållande till en ökad temperatur och därav minskar mattans hållfasthet. Om vissa dragtest tyder på att mattan inte klarar av de övertryck som uppstår vid ett nerkylt tillstånd, resulterar det i hög risk för blåsbildning om mattan utsätts för samma övertryck trots att mattan nu befinner sig i ett varmt tillstånd.

5.5.3 Felkällor

Möjlig felkälla som påverkat testresultatet är ojämn temperatur i lådan. Lådan värmdes som nämnt tidigare med gasol underifrån vilket betyder att undersidan av lådan stundtals blivit väldigt varm i förhållande till lufttemperaturen i lådan. Effekten av det skulle kunna vara att vissa bitar av träet påverkats av värmestrålning och därav utsatts för en högre temperatur än tänkt. Dessa bitar kan ha gett ifrån sig mer fukt än vad de annars gjort vid lägre temperatur. Skiss på värmefördelningen kan ses enligt nedan.



Figur 23: Värmefördelning uppvärmd kammare. Skiss av författare

En annan felkälla kan vara bristande precision på mätinstrument på både termometer såväl som manometer.

Vidare noterades även deformationer på lådans plåtar till följd av höga övertryck samt temperaturer på plåtarna. De utbuktningar som noterades uppskattades till att ha ökat lådans ursprungliga volym med cirka 3% vilket är en märkbar förändring. Konsekvensen av en volymökning är ett sänkt övertryck enligt gas-lagen.

6 SLUTSATS

Efterforskningen som gjorts visar tydligt på att värme och fukt är de två huvudsakliga orsakerna till blåsbildningen. Det har visats att vatten bundet i träet förångas av hög temperatur till följd av pålagd varm gjutasfalt. Vattenförångningen resulterar i att ett övertryck uppstår mellan träbjälklaget och bitumenmattan som kan komma att bli tillräckligt stort för att utveckla en bubbla.

I fallet med Duo Asfalt när dubbla tätskiktsmattor testades visades inga tecken på blåsbildning. Förklaringen till utfallet skulle kunna tänkas vara den isolerade effekt som uppnås av ytterligare en matta. Enligt *figurer 14.1–17.2* i kapitel 4 uppmärksammas en betydligt lägre maxtemperatur i träet för de modeller med tjockare tätskikt. Det medför mindre förångning som i sin tur leder till ett lägre övertryck vilket kan vara avgörande för att blåsbildning överhuvudtaget skall kunna uppstå. Lösning ligger i att kunna tillverka en matta med högre isolerings egenskaper än tidigare använda tätskiktsmattor. En viktig parameter är också fuktkvoten i träet som tätskiktet limmas mot. Det är därför viktigt att materialet skyddas till högsta grad från nederbörd och dagg innan hela tätskiktet är applicerat.

7 DISKUSSION

Vår undersökning har visat varför fenomenet blåsbildning uppstår med relativt enkla medel. Vad som däremot vore intressant att undersöka är att göra ett test med en större provbit som Duo Asfalt gjorde i sitt test. Testet skulle även kunna utföras på en hel bro eftersom man skulle kunna beakta inverkan av verkliga väderförhållanden. En provbit skulle kunna undersökas i en vidare studie av fenomenet där man installerar temperaturmätare och tryckgivare på ett antal ställen av plattan innan mattan bränns fast. Det skulle kunna ge mer information om hur mycket övertryck samt värme som uppstår under mattan och även hur mycket mattan klarar vid högre temperaturer. Att testa på en hel bro kan bli kostsamt om inte resultatet blir tillräckligt bra och därför bör man vänta med att utföra det tills mer efterforskning gjorts inom området.

Något vi hade gjort om vi hade haft både mer tid och tillgångar är att ta fram en matta som har högre isolerande egenskaper. Man skulle kunna tillverka en egen variant som består av två bitumenmattor och någon form av hård isolering som tål värme. Isolermaterialet placeras emellan mattorna och bildar tillsammans en matta med tre skikt. Denna matta skulle kunna appliceras på underlaget med samma metod som används för en enkel matta. Genom att utföra ett test för respektive sammansättning på tätskikt samtidigt, kan mattornas egenskaper analyseras och utvärderas.

Enligt Garcia-Morales (2003) får bitumen en högre viskositet vid högre temperaturer. Materialet är därför mjukt vid höga temperaturer och hårt vid låga temperaturer. Konsekvensen av det skulle kunna innebära ett sämre fäste vid bjälklagets yta. I det fall som Duo Asfalt testade att lägga dubbla mattor, skedde ingen blåsbildning alls. Förklaringen till det är delvis att lägre temperaturer uppnås i träet. En ytterligare teori kan vara att de två mattorna samverkar och fungerar som en typ av stötdämpare vilket motverkar kraften av övertrycket som bildas under tätskiktet. Det är däremot inget som våra undersökningar visat stämmer utan bara en teori som i vidare forskning skulle kunna undersökas.

Vart en blåsa uppkommer verkar vara slumpmässigt och kan bero på många olika faktorer. Enligt våra spekulationer bör större ytor av trä öka möjligheten till att fuktkvoten varierar i delar av bjälklaget. I ett verkligt fall med en träbro finns mycket större ytor än vad som testats i vår studie och troligtvis innehåller vissa områden mer fukt. Konsekvensen av det kan leda till ett högre övertryck vid förhöjda temperaturer i vissa områden. Även mattans vidhäftning kan skilja sig vid vissa delar av bron vilket har uppmärksamats av Duo Asfalts dragtester. Det kan leda till att vissa områden är mer känsliga och klarar därav mindre påfrestning. Sådana ställen skulle exempelvis kunna vara vid kvistrika områden.

Röta är något som dyker upp på landets träbroar titt som tätt och Jon Difs brokonstruktör på Norconsult skrev ett mail till oss för ett par månader sedan. Han berättade att de haft ett par fall det senaste året där man fick byta ut hela bärande träkonstruktionen redan efter halva beräknade livslängden. Vad exakt som fått dessa att ruttna sades det ingen om men vår teori är att det beror på bristfälliga tätskikt. En av oss, har egen erfarenhet av en träbro som byggdes i Kungsbacka kommun för några år sedan där han själv bevittnade att man högg hål i mattan för att få blåsorna att lägga sig. Det medför en stor risk att tätskiktet inte håller tätt och är säkert inte första bron som gjorts så med. Varför man gjorde det var för att förhindra dessa gropar som

blir efter att tätskiktet blåst upp sig. Man trodde sig kunna slippa att lägga ut ett ytterligare lager med gjutasfalt men så blev inte fallet.

Eftersom undersökningen visat att förhöjda temperaturer i konstruktionen är en av orsakerna till blåsbildning kan ett kallare väder vara till fördel. Skulle omgivande temperatur samt bjälklaget vara kallare kan det leda till att gjutasfalten svalnar snabbare. De kritiska temperaturerna blir av den anledningen inte lika höga och kan därav minska risken för blåsbildning. Därför bör tätskiktet läggas i samband med kallare väder om möjlighet fås.

8 REFERENSLISTA

- Al Hamami M. (2012). LTH. *Fuktsäkerhetsgranskning av nybyggnation*, 2012. Hämtad från sidan: <https://www.byfy.lth.se/fileadmin/byfy/files/TVBH-5000pdf/TVBH-5067MAHweb.pdf> 2021-05-11.
- Anticimex. (2021). *Rötsvampsangrepp vanligt hus i trä*. Hämtad från sidan: <https://www.anticimex.com/sv-se/fuktproblem/fukt-mogel-och-rotsvamp/rotsvamp/> 2021-03-23.
- Armaterc. (2012). *Ånga och Kondensat*. Hämtad från sidan: https://static1.squarespace.com/static/5628e082e4b00d6d15772ab0/t/57753ea003596e22f1d90426/1467301541766/Handbok+Ånga-2012_.pdf 2021-05-05.
- Arvidsson J. (2021). Naturvetenskap. *Allmänna Gaslagen*. Hämtad från sidan: <https://www.naturvetenskap.nu/kemi/kemiska-beräkningar/allmänna-gaslagen-44933898> 2021-04-30.
- Bergman A, Edwards Y. (1999). *Asfaltboken. Gjutasfalt*. Hämtad från sidan: <https://asfaltboken.se/gjutasfalt/> 2021-02-23.
- Betongpoolen. *Vad är gjutasfalt*. Hämtad från sidan: <https://www.betongpoolen.nu/vad-ar-gjutasfal> 2021-02-23.
- Binab Nordic. (2021). *Binab tätskikt säkerhetsblad*. Hämtad från sidan: https://binabnordic.se/wp-content/uploads/2021/03/23-Isoglasyr11P_5.0_31610.pdf 2021-03-17.
- Deliiski N. (2011). *Evaluation of wood sorption and creation of precision diagrams for the equilibrium of moisture content*. Hämtad från sidan: https://www.researchgate.net/publication/277399981_Evaluation_of_Wood_Sorption_Models_and_Creation_of_Precision_Diagrams_for_the_Equilibrium_Moisture_Content 2021-05-12.
- Dybro H. (2011). *Hållbart byggande del 3 värmetroghet*. Hämtad från sidan: <https://www.isover.se/news/hallbart-byggande-del-3-varmetroghet-vad-betyder-det-byggnadsutformningen>
- Edwards Y. (2012). *Gjutasfalt – ett vackert och hållbart material i byggande*. Hämtad från sidan: <https://www.gafs.nu/wp-content/uploads/2013/02/Gjutasfalt.pdf> 2021-03-23.
- Edwards Y. (2019). Trafikverket. *Blåsbildning på broar*. Hämtad från sidan: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/78449/Ineko.Product.RelatedFiles/2020_173_Blasbildning_pa_broar_oversiktsrapport.pdf 2021-02-23.
- Eldén L, Wittmeyer-Koch L. (2009). *Numeriska beräkningar -- analys och illustrationer med MATLAB* (4:7) 2021-05-13

Engenering Toolbox. *Thermal Conductivity of common material and products*. Hämtad från sidan: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html 2021-03-29.

Engenering Toolbox. *water-sortation pressure*. Hämtad från sidan: https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-d_599.html 2021-05-02.

Giftinformationscentralen. (2021). *Xylen*. Hämtad från sidan: <https://giftinformation.se/kemikalierregister/xylen/> 2021-04-12.

Gustafsson A. (2006). *Tätskikt för trätytor*. Hämtad från sidan: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962353/FULLTEXT01.pdf> 2021-02-23.

Hagentoft C E 2001. Textbook: Introduction to Building Physics. Studentlitteratur, ISBN 91-44-01896-7

Helmstine A M. (2019). *The Combined Gas Law*. Hämtad från sidan: <https://www.thoughtco.com/definition-of-combined-gas-law-604936> 2021-05-05.

Hulander T. (2008). Fuktskadeteknik. *Fukt i luft och material*. Hämtad från sidan: <https://fuktskadeteknik.com/wp-content/uploads/2018/12/Fukt-i-luft-och-material.pdf> 2021-03-18.

Index SPA. (2013) *REINFORCED ELASTOPLASTOMERIC WATERPROOFING MEMBRANES WITH HIGH CONCENTRATION OF DISTILLED BITUMEN*. Hämtad från sidan: <https://www.indexspa.it/indexspacom/TECNOPLAN/pdf/LIGHTERFLEX-EN.pdf> 202 https://www.wicote.se/tatskikt/1-03-29.

Just wood. *Träets uppbyggnad*. Hämtad från sidan: <https://justwood.se/pages/om-tra> 2021-02-23.

Jönsson G. (2018). Lärobok: *Fysik i vätskor och gaser*. Lunds universitet, ISBN 978916379826-9

Khan Academy. *Daltons Law of Partial Pressure*. Hämtad från sidan: <https://www.khanacademy.org/science/ap-chemistry/gases-and-kinetic-molecular-theory-ap/ideal-gas-laws-ap/a/daltons-law-of-partial-pressure> 2021-05-11.

LTH. (2006). Gaslagar. Hämtad från sidan: <https://www.lth.se/fileadmin/kemigen/pdf/gaslagar.pdf> 2021-04-30.

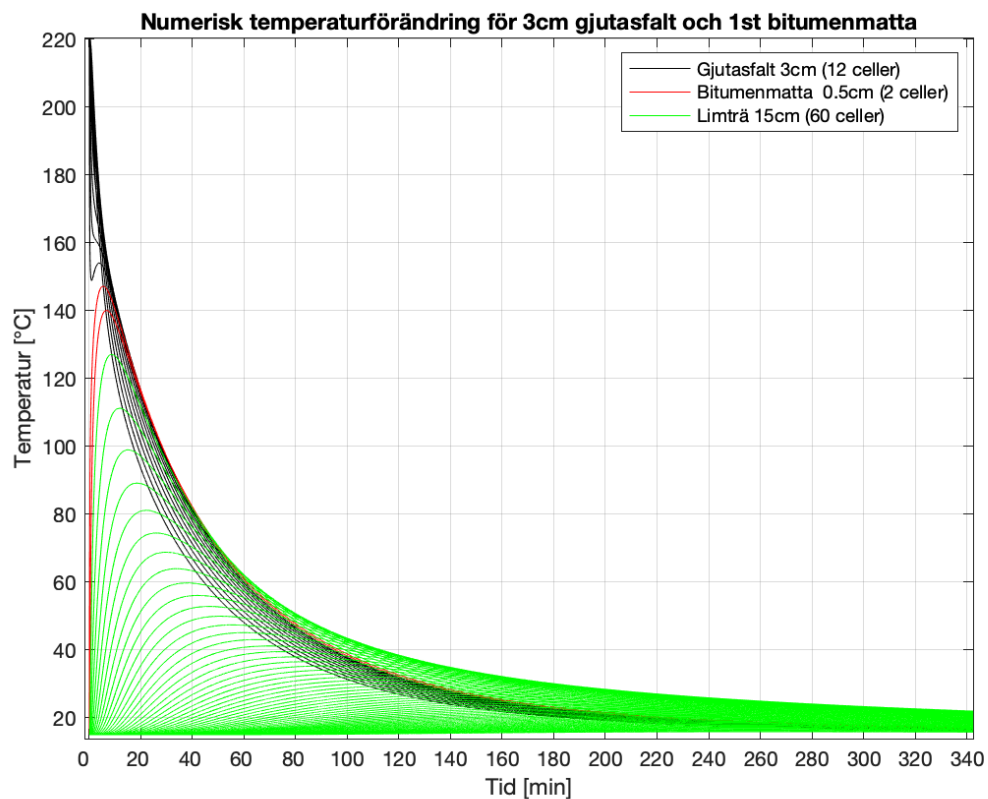
Garcia-Morales M. (2003). *Vicious properties and microstructure recycled eva modified bitumen*. Hämtad från sidan: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236103002175> 2021-05-13.

Mohammad Al-Emrani, Björn Engström, Marie Johansson, Peter Johansson, Lärobok: *Bärande konstruktioner del 1*. 2013

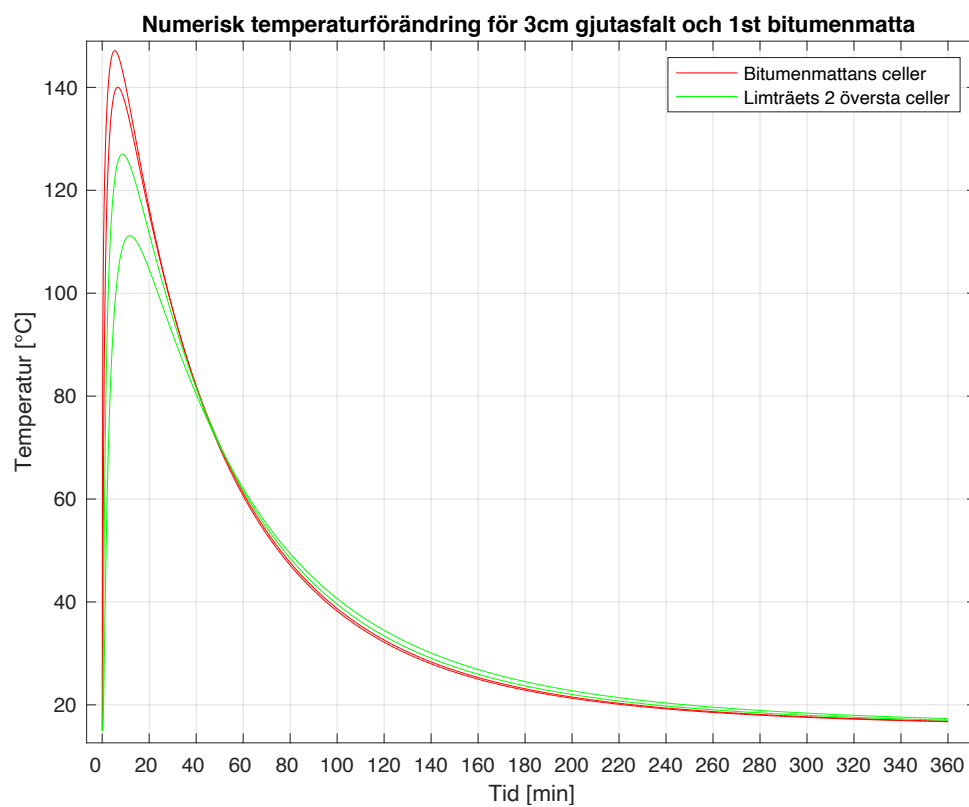
- NCC. *Tätskikt och gjutasfalt*. Hämtad på sidan: <https://www.ncc.se/vart-erbjudande/asfalt/tjanster-metoder/tatskikt-och-gjutasfalt/> 2021-02-23.
- Petersson B Å. (2018). Lärobok: *Tillämpad byggnadsfysik sjätte upplagan*, Hämtad: 2021-05-05.
- Pousette A, Fjellström P A. (2004). *Broinspektion-träbroar*. Hämtad från sidan: https://www.trafikverket.se/contentassets/ae26c562046a410c8611b1bce0f15631/inspektionshandbok_for_trabroar_statens_provningsanstalts_rapport_2004_41.pdf 2021-05-27
- Pousette A. (2006). *Tätskikt och kantlösningar på tvärspända brobaneplasser av trä*. Hämtad från sidan: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1093971/FULLTEXT01.pdf> 2021-02-23.
- Svenskbygggtjänst. (2011). *Förebild för träbroar*. Hämtad från sidan: <https://omvarldsbevakning.bygggtjanst.se/artiklar/2011/september/forebild-for-trabroar/> 2021-05-27.
- Svenskt trä. *Fuktkvot*. Hämtad från sidan <https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/tra-och-fukt/> 2021-03-23.
- Träguiden. (2017). *Årsringar*. Hämtad från sidan: <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-uppbyggnad/traets-uppbyggnad/arsringar/> 2021-03-18.
- Träguiden. (2018). *Mikroorganismer*. Hämtad från sidan: <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/bestandighet1/mikroorganismer1/> 2021-03-23.
- Träguiden. (2019). *Träbroar*. Hämtad från sidan: <https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktionsexempel/trabroar/> 2021-05-21
- Träguiden. (2020). *Stammen uppbyggnad*. Hämtad från sidan: <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-uppbyggnad/traets-uppbyggnad/stammens-uppbyggnad/> 2021-03-18.
- Träguiden. *Materialet trä*. Hämtad från sidan: <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/> 2021-02-23.
- Wicote. (2020). *Vad är tätskikt*. Hämtad från sidan: <https://www.wicote.se/tatskikt/> 2021-04-30.

9 BILAGOR

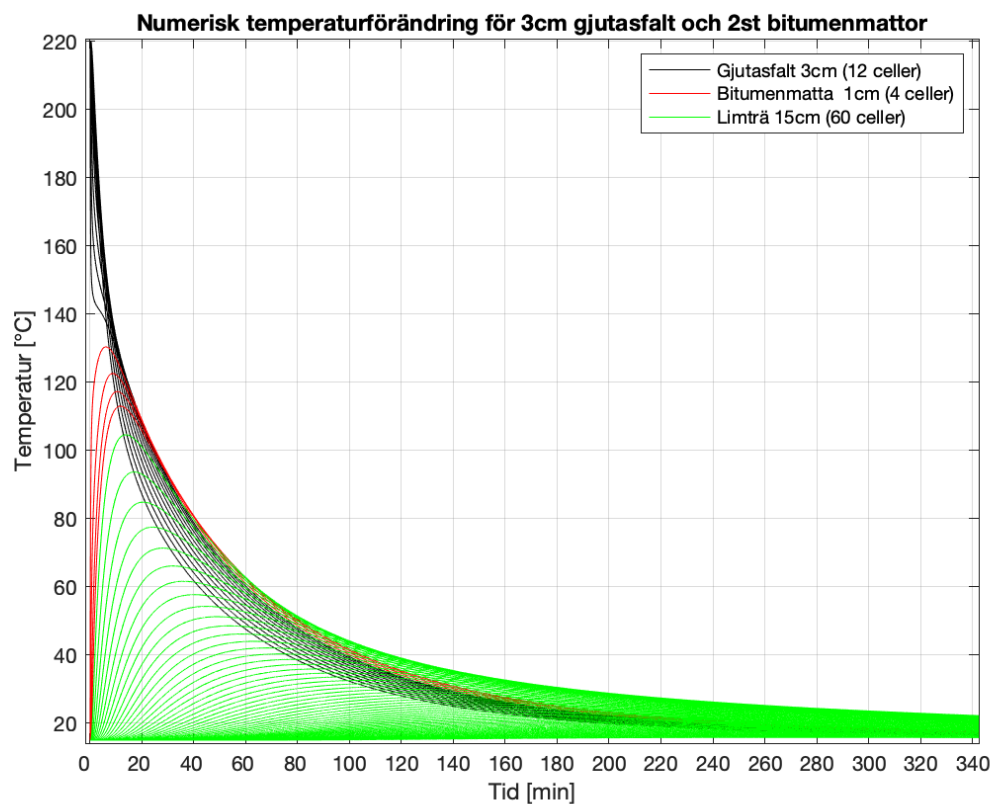
9.1 Numeriskt resultat



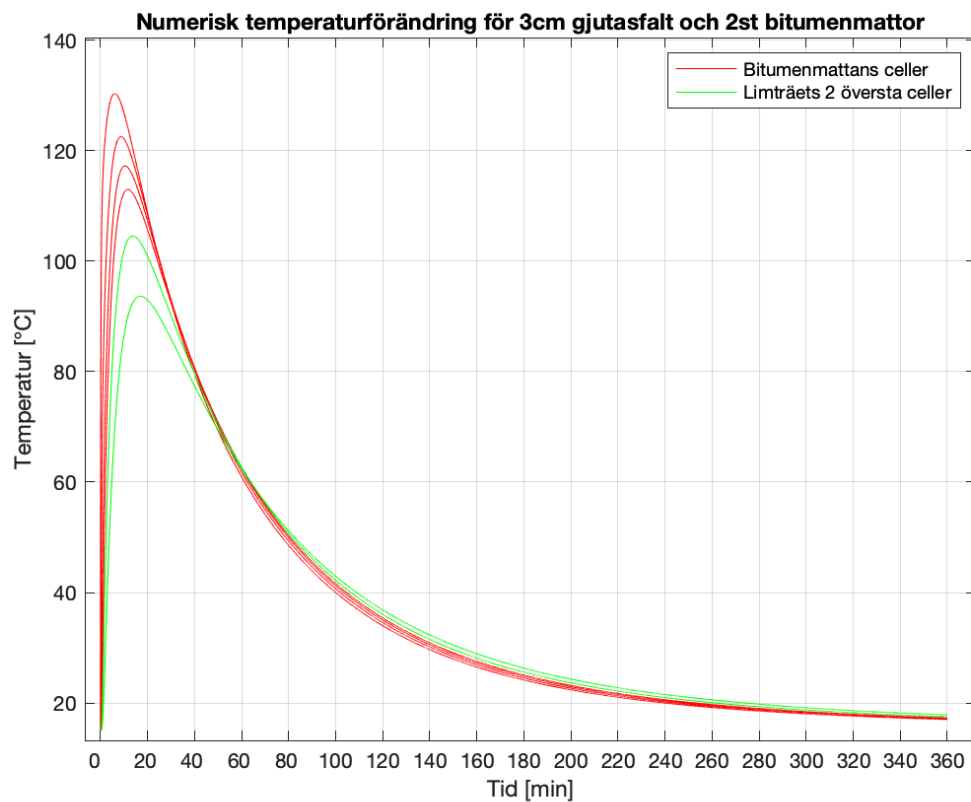
Bilaga 1: Figur 14.1 av temperaturförändring för B1 tillfälle 1.



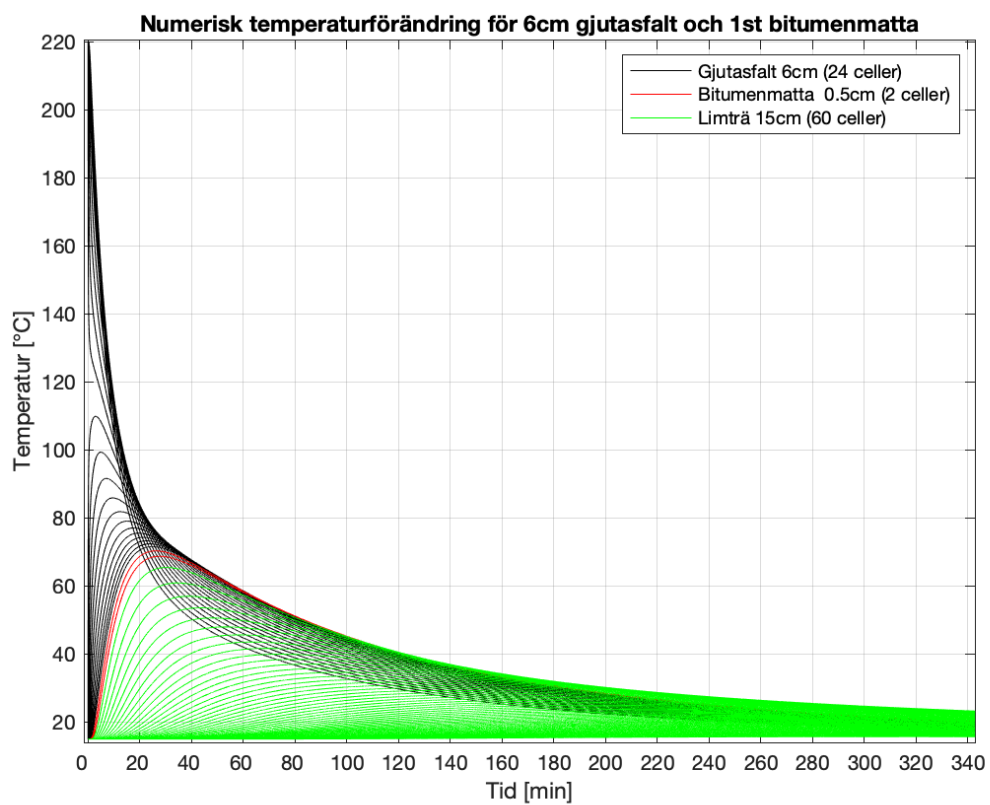
Bilaga 1: Figur 14.2 av inzoomning på temperaturförändring av alla bitumenceller och två översta träcellerna.



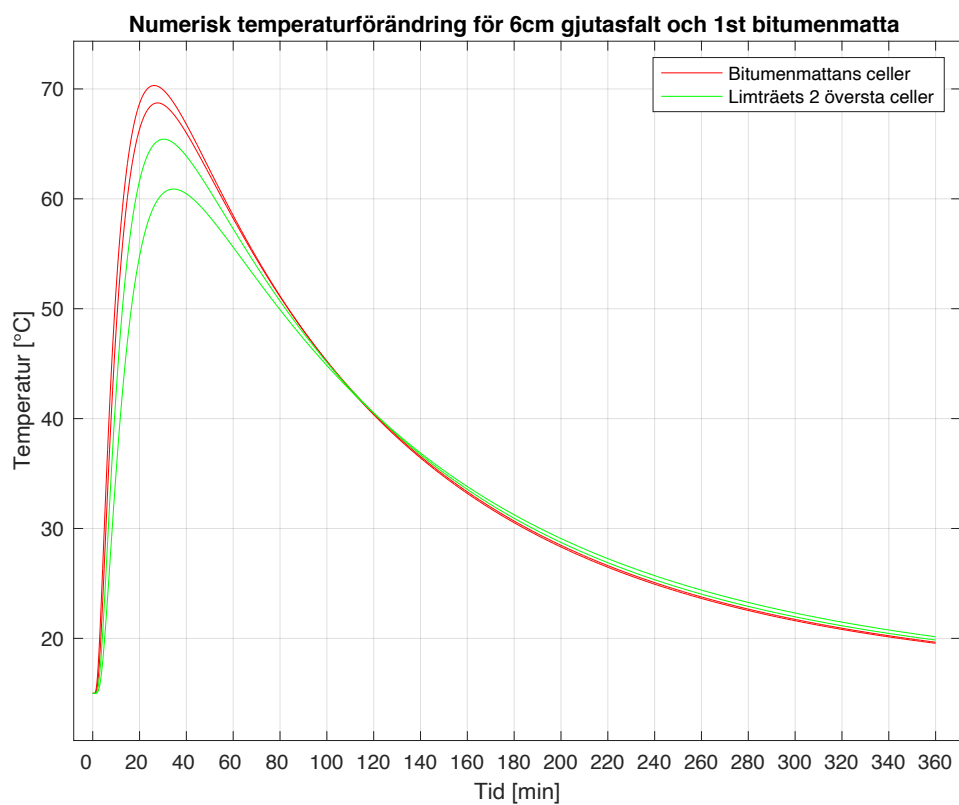
Bilaga 2: Figur 15.1 av temperaturförändring för B2 tillfälle 1.



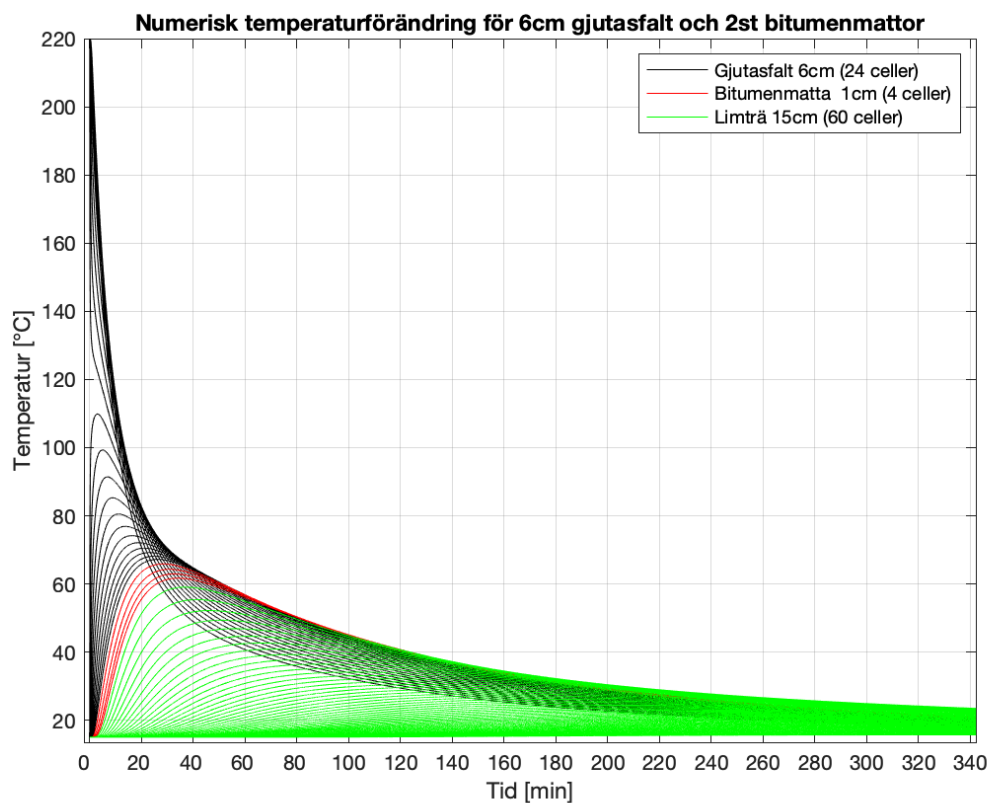
Bilaga 2: Figur 15.2 av inzoomning på temperaturförändring av alla bitumenceller och två översta träcellerna.



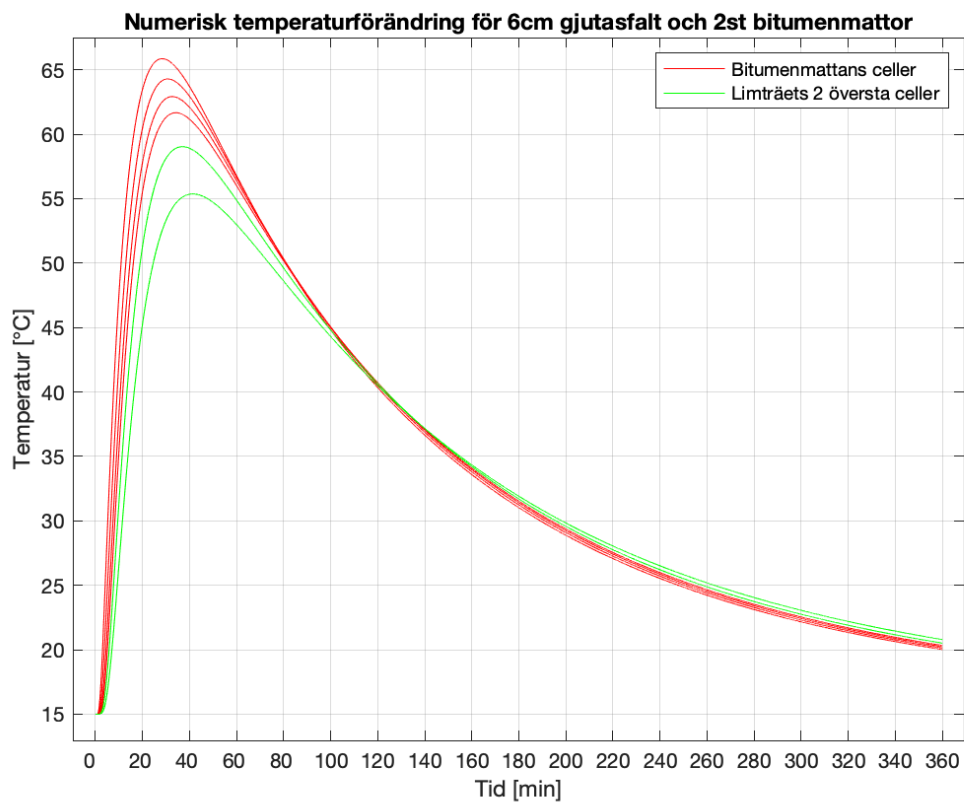
Bilaga 3: Figur 16.1 av temperaturförändring för B1 tillfälle 2.



Bilaga 3: Figur 16.2 av inzoomning på temperaturförändring av alla bitumenceller och två översta träcellerna.

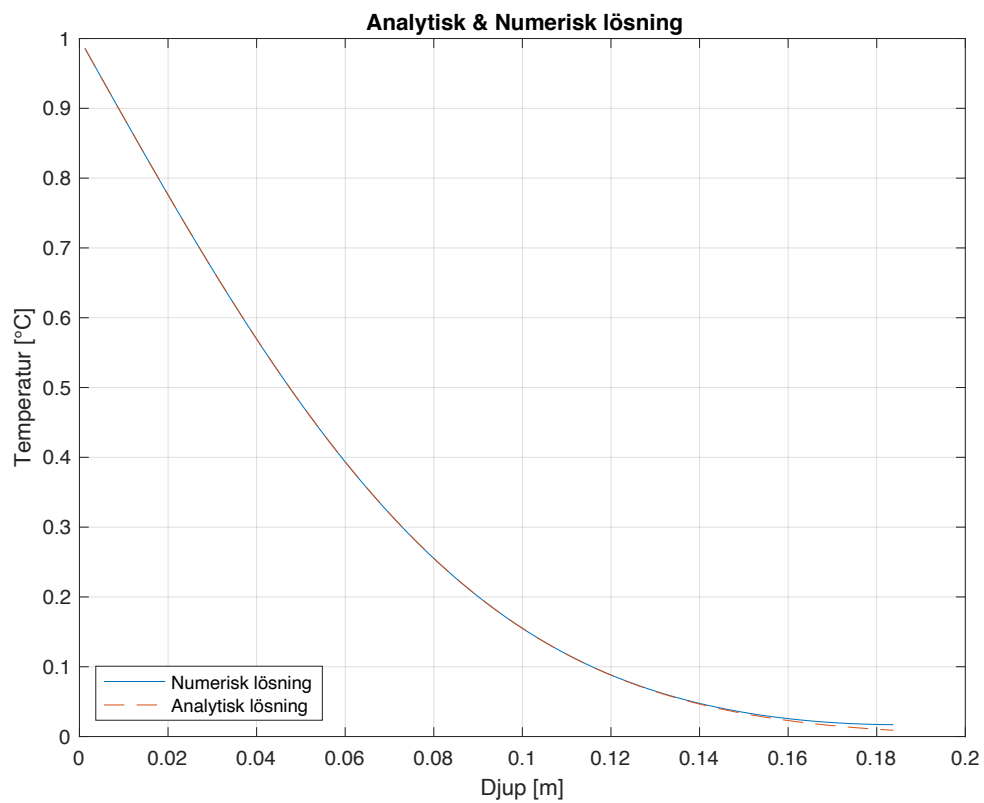


Bilaga 4: Figur 17.1 av temperaturförändring för B2 tillfälle 2

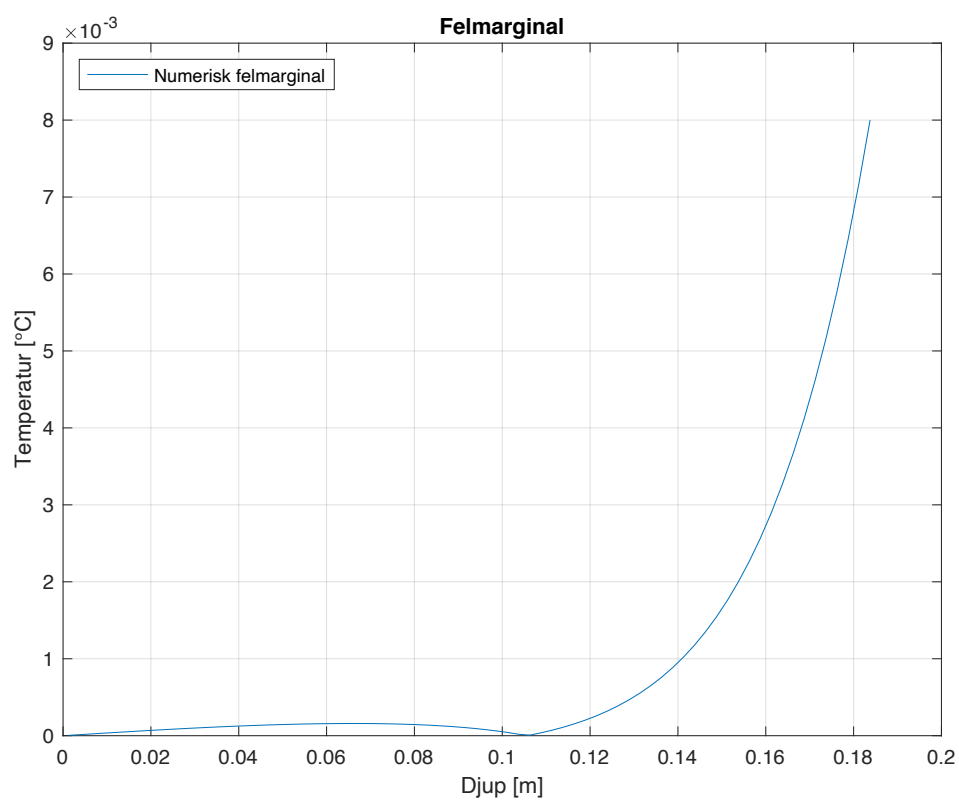


Bilaga 4: Figur 17.2 av inzoomning på temperaturförändring av alla bitumenceller och två översta träcellerna.

9.2 Analytiskt- och numeriskt resultat



Bilaga 5: Figur 19 Analytisk & Numerisk lösning.

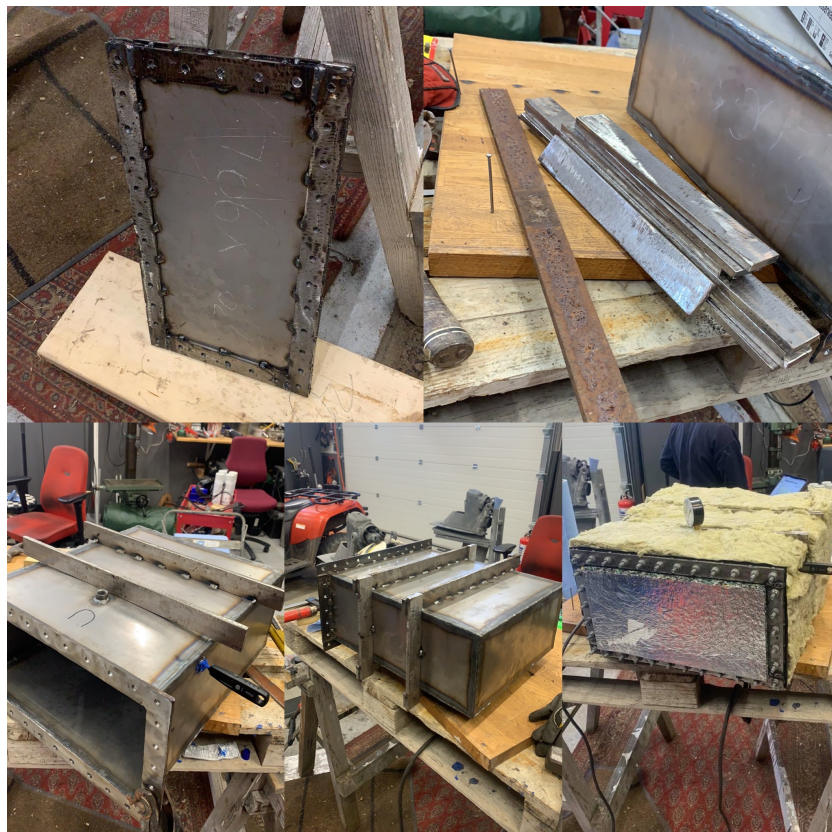


Bilaga 6: Figur 20 Felmarginal av numerisk lösning.

9.3 Tillverkning av tryckkammare



Bilaga 7: Utförande av låda.

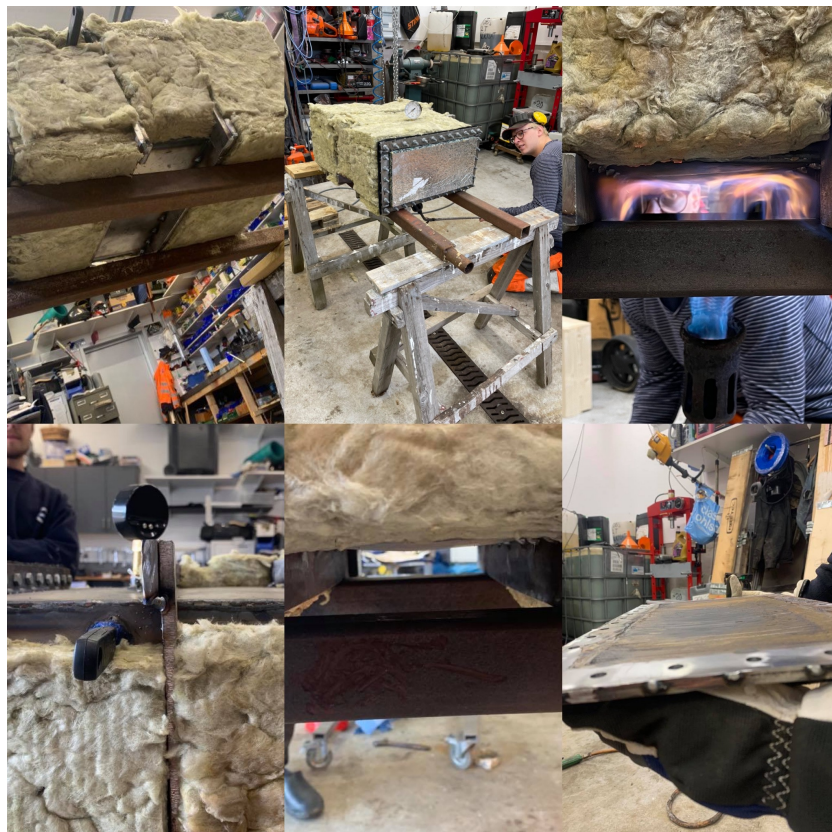


Bilaga 8: Utförande av låda fort.

9.4 Utförande av test

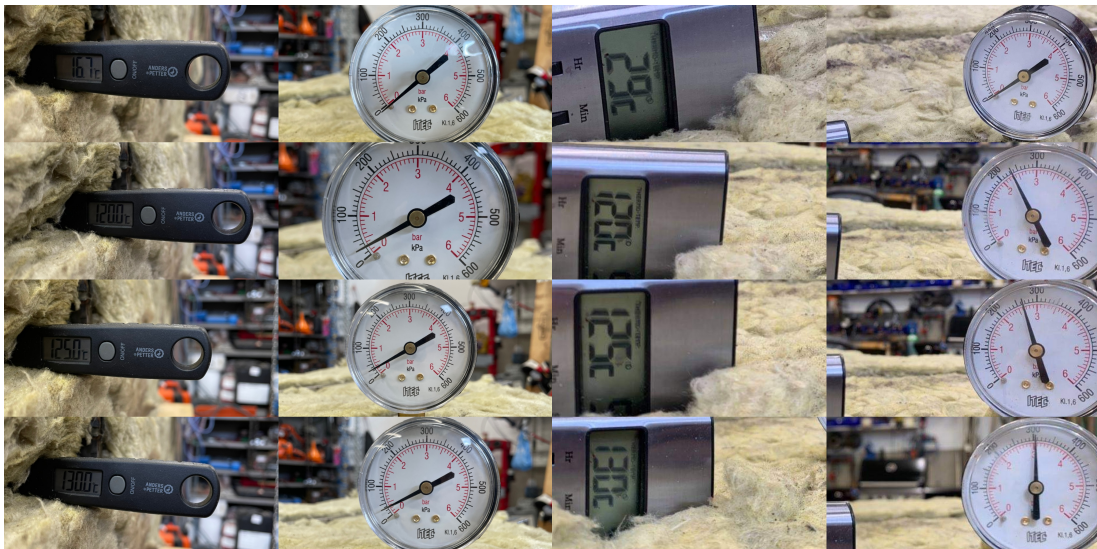


Bilaga 9: Utförande av test.



Bilaga 10: Utförande av test fort.

9.5 Testresultat i bild- och tabellformat



Bilaga 11 & 12: Resultat luft-test & vatten-test.



Bilaga 13: Resultat skiv-test 1.



Bilaga 14: Resultat skiv-test 2.



Bilaga 15: Resultat solid limträbit.

Bilaga 16: Resultat luft-test

Temp [°C]	Tryck [kPa]
16,7	0
120	25
125	30
130	34

Bilaga 17: Resultat vatten-test

Temp [°C]	Tid [min]	Tryck [kPa]
29	0	0
120	20	233
125	40	263
130	60	305

Bilaga 18: Resultat skiv-test 1

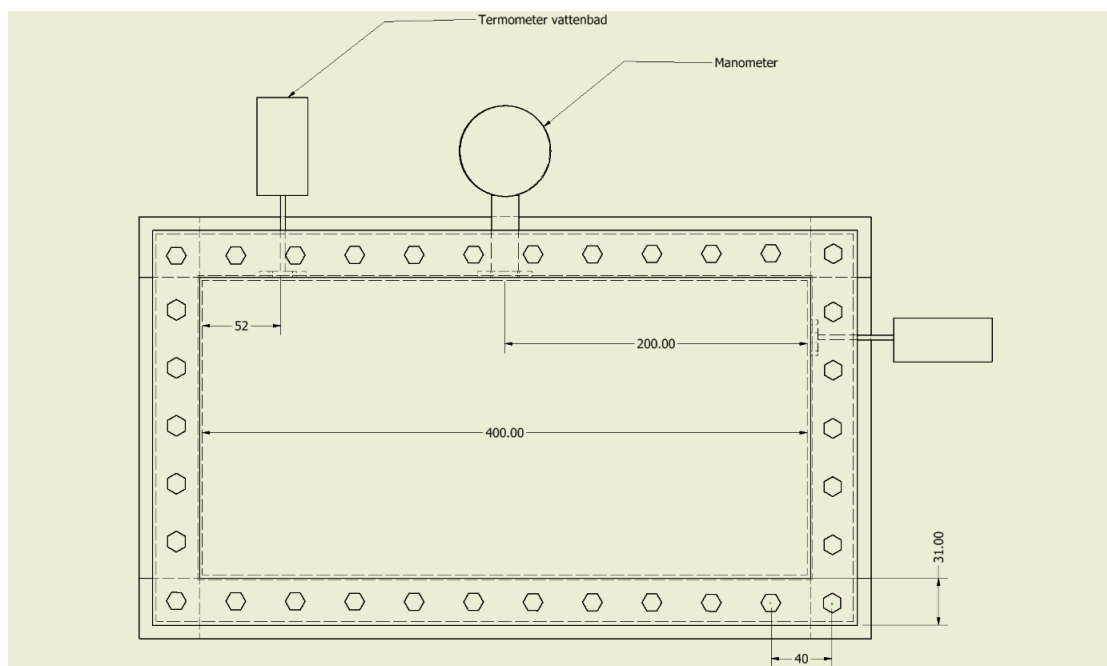
Temp [°C]	Tid [min]	Tryck [kPa]
27,5	-	0
50,1	-	10
128,5	0	220
126,5	4	244
126,5	7	247

Bilaga 19: Resultat skiv-test

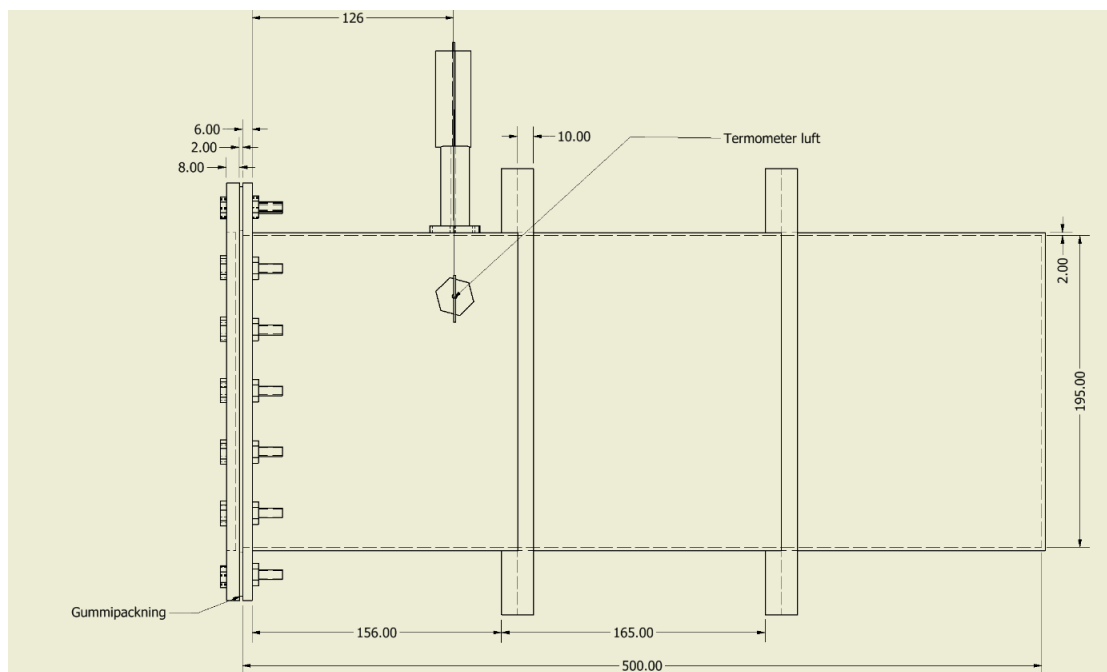
Temp [°C]	Tid [min]	Tryck [kPa]
30,4	-	0
52,1	-	10
126	0	210
128	4	220
126	7	224

Bilaga 20: Resultat bit-test

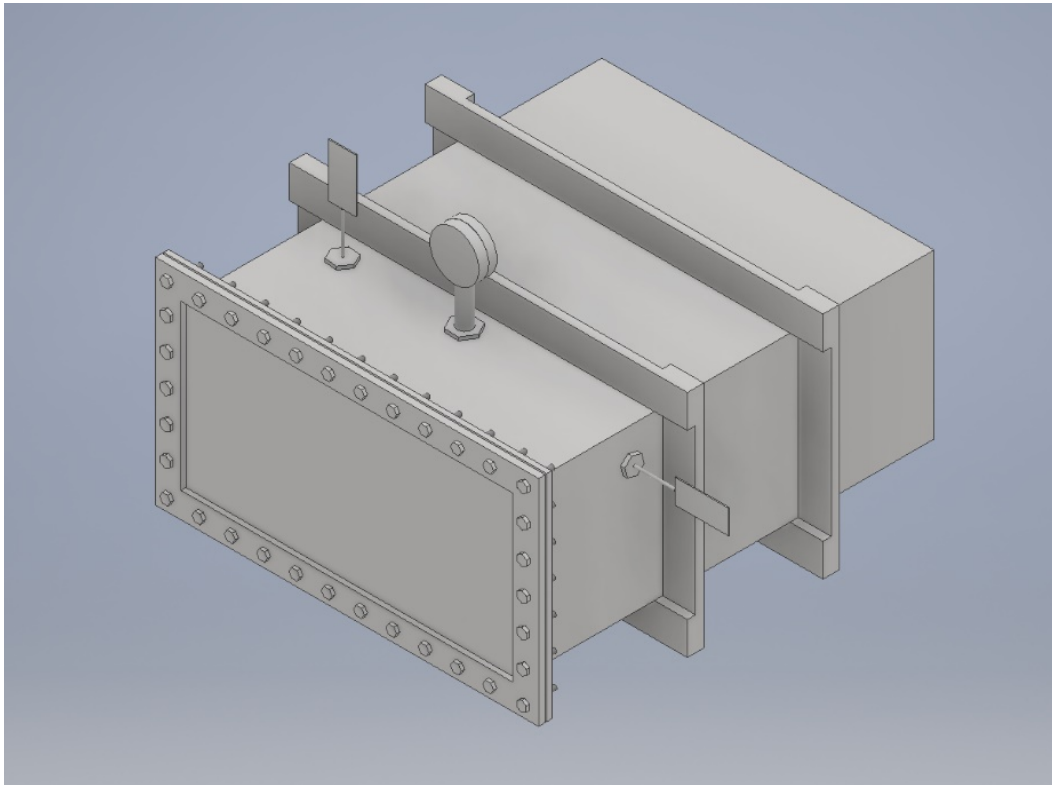
Temp [°C]	Tid [min]	Tryck [kPa]
28,3	-	0
77,8	-	12,5
127,5	0	63
128,5	15	85
126,5	30	109



Bilaga 21: Ritning tryckkammare



Bilaga 22: Ritning tryckkammare



Bilaga 23: 3D bild av tryckkammare

9.6 Matlabkod

9.6.1 Analytisk & numerisk lösning

```
% NUMERISK BERÄKNING AV VÄRMEINTRÄNGNINGSDJUP I TRÄBJÄLKLÄG:
% INDATA:

% Temperaturer luft [°C]
Tluft= 1;

% Teknisk data, ingående material
% Gjutasfalt
% Bitumenmatta
% Limtr√ § (Gran)

% Densitet [kg/m^3]
p_asfalt= 2000;
p_matta= 2000;
p_tra= 2000;

% Specifik värmekapacitet [j/kg/K]
C_asfalt= 837;
C_matta= 837;
C_tra= 837;

% Värmeledningsförmåga [W/mK]
y_asfalt= 1.15;
y_matta= 1.15;
```

```

y_tra= 1.15;

% Värmediffusivitet för gjutasfalt [m^2/s]
a= y_asfalt/(C_asfalt*p_asfalt);

% Dimensioner [m], Antal noder
Xlength= 0.185; % Brobjälklagets tjocklek [m]
DeltaX= 0.0025; % Cellens tjocklek [m]
Nnodes= round(Xlength/DeltaX); % Antal celler

% Cell dimensioner [m]
d_cell_yi= 0.0025;
d_cell_xi= 1;

% Övergångsmotstånd [Km/W]
R_asfalt_luft= 10^(-12); % asfalt-luft approximativt
R_tra_luft= 10^12; % trä-luft approximativt

% Beräkning av konduktanser
K_L_A= 1/((d_cell_yi/(2*y_asfalt))+R_asfalt_luft);
K_A_A= 1/((d_cell_yi/(2*y_asfalt))+(d_cell_yi/(2*y_asfalt)));
K_A_M= 1/((d_cell_yi/(2*y_asfalt))+(d_cell_yi/(2*y_matta)));
K_M_M= 1/((d_cell_yi/(2*y_matta))+(d_cell_yi/(2*y_matta)));
K_M_T= 1/((d_cell_yi/(2*y_matta))+(d_cell_yi/(2*y_tra)));
K_T_T= 1/((d_cell_yi/(2*y_tra))+(d_cell_yi/(2*y_tra)));
K_T_L= 1/((d_cell_yi/(2*y_tra))+R_tra_luft);

% Konduktanser för cellers värmeledning uppåt resp neråt
Kup(1)= K_L_A;
Kup(2:12)= K_A_A;
Kup(13)= K_A_M;
Kup(14)= K_M_M;
Kup(15)= K_M_T;
Kup(16:74)= K_T_T;

Kdown(1:11)= K_A_A;
Kdown(12)= K_A_M;
Kdown(13)= K_M_M;
Kdown(14)= K_M_T;
Kdown(15:73)= K_T_T;
Kdown(74)= K_T_L;

% Beräkning av pC för varje cell [j/m^3K]
pC(1:12)= p_asfalt * C_asfalt;
pC(13:14)= p_matta * C_matta;
pC(15:74)= p_tra * C_tra;

% Start temperatur för varje cell
T(1)= 0;
T(2:12)= 0;
T(13:74)= 0;
DeltaT= zeros(1,74);

% Start temperatur time= 0
Tsave(1,:)= T;

% Beräkning av det stabila tidssteget
x(1)= DeltaX/2; % +DeltaX/2 - djupet av halva cellen
for i=1:Nnodes
    tstabil(i)=(DeltaX*pC(i))/(Kup(i)+Kdown(i));
    x(i+1)= x(i)+DeltaX;

```

```

end
x(:,75)= []; % Exkludera sista värdet i x-vektorn

% Beräkning antalet iterationer, m.h.a av stabila tidssteget fördelat
på total tid
Deltat= 0.99*min(tstabil);
tend= 5*3600;
totaliteration= round(tend/Deltat);
time(1)= 0; % Deltat;

% Beräknar konstruktionens värmeändring m.h.a totaliteration
for j= 1:totaliteration % This solves time
    time(j+1)= time(j)+Deltat;

    for i= 1:Nnodes % Från och med cell 1 och alla celler
        if i== 1 % cell 1 beräknas med Tluft - Bara ett av
alternativen ska göras per i
            Qup(i)= (Kup(i)*(Tluft-T(i)));
            Qdown(i)= (Kdown(i)*(T(i+1)-T(i)));
        elseif i== Nnodes % cell 74 beräknas med Tluft - Bara ett av
alternativen ska göras per i
            Qup(i)= (Kup(i)*(T(i-1)-T(i)));
            Qdown(i)= (Kdown(i)*(Tluft-T(i)));
        else % cell 2-73 beräknas med de förändrade
temperaturerna för varje iteration
            Qup(i)= (Kup(i)*(T(i-1)-T(i)));
            Qdown(i)= (Kdown(i)*(T(i+1)-T(i)));
        end
        DeltaT(i)= (Deltat*((Qup(i)+Qdown(i))/(pC(i)*DeltaX)));
    end
    % Nu har vi svept igenom alla cellerna och sparar gamla temperaturen
    Tsave(j+1,:)= T; % j+1 ej j efter förra raden
    % Uppdatering av nya temperaturen efter ett tidssteg
    T= T+DeltaT; % Förändringar finns i DeltatT som sen läggs till
    T(old)
end

% Plotta Analytisk lösning & Numerisk lösning, --> kolla felmarginal
plot (x,Tsave (1200,: ))
hold on
plot (x, (erfc(x./sqrt(4.*a.*time(1200)))),'--'); % samma x för båda
fallen
title('Analytisk & Numerisk  $1/\sqrt{\partial}$  sning')
xlabel('Djup [m]')
ylabel('Temperatur [ $^{-\infty}$ C]')
legend({'Numerisk  $1/\sqrt{\partial}$  sning','Analytisk  $1/\sqrt{\partial}$ 
sning'}, 'Location', 'southwest')
grid on

AbsError= abs(Tsave (1200,: )-erfc(x./sqrt(4.*a.*time(1200))));
figure
plot(x,AbsError); % OK att felet växer och blir lite större längst
ner. Vi har ju ingen halvoändlig tjocklek!
title('Felmarginal')
xlabel('Djup [m]')
ylabel('Temperatur [ $^{-\infty}$ C]')
legend({'Numerisk felmarginal'}, 'Location', 'northwest')
grid on

```

9.6.2 Numerisk lösning enligt figur 14.1 & 14.2

```
% NUMERISK BERÄKNING AV VÄRMEINTRÄNGNINGSDJUP I TRÄ BROBJÄLKLAG:
% INDATA:

% Temperaturer luft [ $-\infty^{\circ}\text{C}$ ]
Tluft= 15;
% Tekv= Utetemp+(alfasol/(1/Rse))*Isol= 47 (Alternativ utetemp för
visst tillstånd)

% Teknisk data, ingående material
% Gjutasfalt
% Bitumenmatta
% Limträ (Gran)

% Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]
p_asfalt= 2000;
p_matta= 1820;
p_tra= 430;

% Specifik värmekapacitet [ $\text{J/kgK}$ ]
C_asfalt= 837;
C_matta= 1000;
C_tra= 1650;

% Värmeledningsförmåga [ $\text{W/mK}$ ]
y_asfalt= 1.15;
y_matta= 0.5;
y_tra= 0.14;

% Dimensioner [m], Antal noder
Xlength= 0.185; % Brobjälklagets tjocklek [m]
DeltaX= 0.0025; % Cellens tjocklek [m]
Nnodes= round(Xlength/DeltaX); % Antal celler

% Cell dimensioner [m]
d_cell_yi= 0.0025;
d_cell_xi= 1;

% Övergångsmotstånd [ $\text{Km/W}$ ]
R_asfalt_luft= 0.04; % asfalt-luft approximativt
R_tra_luft= 0.04; % trä-luft approximativt

% Beräkning av konduktanser
K_L_A= 1/((d_cell_yi/(2*y_asfalt))+R_asfalt_luft);
K_A_A= 1/((d_cell_yi/(2*y_asfalt))+(d_cell_yi/(2*y_asfalt)));
K_A_M= 1/((d_cell_yi/(2*y_asfalt))+(d_cell_yi/(2*y_matta)));
K_M_M= 1/((d_cell_yi/(2*y_matta))+(d_cell_yi/(2*y_matta)));
K_M_T= 1/((d_cell_yi/(2*y_matta))+(d_cell_yi/(2*y_tra)));
K_T_T= 1/((d_cell_yi/(2*y_tra))+(d_cell_yi/(2*y_tra)));
K_T_L= 1/((d_cell_yi/(2*y_tra))+R_tra_luft);

% Konduktanser för cellers värmeledning uppåt resp neråt
Kup(1)= K_L_A;
Kup(2:12)= K_A_A;
Kup(13)= K_A_M;
Kup(14)= K_M_M;
Kup(15)= K_M_T;
Kup(16:74)= K_T_T;

Kdown(1:11)= K_A_A;
```

```

Kdown(12)= K_A_M;
Kdown(13)= K_M_M;
Kdown(14)= K_M_T;
Kdown(15:73)= K_T_T;
Kdown(74)= K_T_L;

% Beräkning av pC för varje cell [j/m^3K]
pC(1:12)= p_asfalt * C_asfalt;
pC(13:14)= p_matta * C_matta;
pC(15:74)= p_tra * C_tra;

% Start temperatur för varje cell
T(1:12)= 220;
T(13:74)= 15;
DeltaT= zeros(1,74);

% Start temperatur time= 0
Tsave(1,:)= T;

% Beräkning av det stabila tidssteget
x(1)= DeltaX/2; % +DeltaX/2 - djupet av halva cellen
for i=1:Nnodes
    tstabil(i)=(DeltaX*pC(i))/(Kup(i)+Kdown(i));
    x(i+1)= x(i)+DeltaX;
end
x(:,75)= []; % Exkludera sista värdet i x-vektorn

% Beräkning antalet iterationer, m.h.a av stabila tidssteget fördelat
på total tid
Deltat= 1; %0.99*min(tstabil);
tend= 6*3600;
totaliteration= round(tend/Deltat);
time(1)= 0; % Deltat;

% Beräknar konstruktionens värmeändring m.h.a totaliteration
for j= 1:totaliteration % This solves time
    time(j+1)= time(j)+Deltat;

    for i= 1:Nnodes % Från och med cell 1 och alla celler
        if i== 1 % cell 1 beräknas med Tluft - Bara ett av
alternativen ska göras per i
            Qup(i)= (Kup(i)*(Tluft-T(i)));
            Qdown(i)= (Kdown(i)*(T(i+1)-T(i)));
        elseif i== Nnodes % cell 74 beräknas med Tluft - Bara ett av
alternativen ska göras per i
            Qup(i)= (Kup(i)*(T(i-1)-T(i)));
            Qdown(i)= (Kdown(i)*(Tluft-T(i)));
        else % cell 2-73 beräknas med de förändrade
temperaturerna för varje iteration
            Qup(i)= (Kup(i)*(T(i-1)-T(i)));
            Qdown(i)= (Kdown(i)*(T(i+1)-T(i)));
        end
        DeltaT(i)= (Deltat*((Qup(i)+Qdown(i))/(pC(i)*DeltaX)));
    end

    % Nu har vi svept igenom alla cellerna och sparar gamla temperaturen
    Tsave(j+1,:)= T; % j+1 ej j efter förra raden
    % Uppdatering av nya temperaturen efter ett tidssteg
    T= T+DeltaT; % Förändringar finns i DeltatT som sen läggs till
    T(old)
end

```



```

% Plotta numerisk lösning för varje cell, --> kolla temperatur
förändring
p1= plot (Tsave(:, 1:12), 'black');
hold on
p2= plot (Tsave(:, 13:14), 'red');
hold on
p3= plot (Tsave(:, 15:74), 'green');
hold off
grid on

set(gca, 'XTick', 0:1200:21601);
set(gca, 'XTickLabel', 0:20:360);

h = [p1(1);p2(2);p3(3)];
legend(h, 'Gjutasfalt 3cm (12 celler)', 'Bitumenmatta 0.5cm (2
celler)', 'Limtr§ 15cm (60 celler)')
title('Numerisk temperaturföändring för 3cm gjutasfalt och
1st bitumenmatta')
xlabel('Tid [min]')
ylabel('Temperatur [°C]')

mean(Tsave(3600, 17:47))

```

9.6.3 Lösningar för eget test

```

% TRYCK LUFT BERÄKNING:
% dimensioner kammare [m];
h_kammare= 0.1980;
b_kammare= 0.40;
d_kammare= 0.480;
V_kammare= h_kammare*b_kammare*d_kammare; % [m^3]

% Volym luft i kammare;
V_luft= V_kammare; % [m^3]

% Temperatur;
T_kammare= (273+130); % [K] 120°C

% Gaslagen;
R= 8.314472J/(mol*K); % ideala gaskonstant
n= 0.408; % [mol] luft vid normaltryck & rumstemp
P_luft= ((n*R*T_kammare)/V_luft)/1000 % dividerar med 1000 för att
omvandla [N/m^2] till [kPa]

% 120° 35 kpa
% 125° 35.5 kpa
% 130° 36 kpa
%%

% VATTEN TRYCK BERÄKNING:
% Kör luft scriptet innan du kör detta, se till partialtrycket utgår
% från samma temperatur som luften utgår ifrån.

% Beräkna ångtryck vid vald temp (partialtryck * RF)
FK= 0.12; % FK antas till en början vara 12% och detta ger ca 85% RF
i "sorption curve (wood)"
RF= 1.0; % Rent vatten är 100%
Partialtryck_vatten= 270; % Partialtryck av vatten vid vald temp °C
P_vatten= (Partialtryck_vatten*RF)+P_luft

```

```

% 120° 233.86 kpa
% 125° 268.09 kpa
% 130° 305.96 kpa
%%
clear
clc

% TRYCK BERÄKNING FÖR TRÄ:
% dimensioner kammare [m];
h_kammare= 0.1980;
b_kammare= 0.40;
d_kammare= 0.480;
V_kammare= h_kammare*b_kammare*d_kammare; % [m^3]

% dimensioner trä [m];
h_limtra= 0.115;
b_limtra= 0.315;
d_limtra= 0.325;
V_limtra= h_limtra*b_limtra*d_limtra; % [m^3]

% Volym luft i kammare;
V_luft= V_kammare-V_limtra; % [m^3]

% Temperatur;
T_kammare= (273+127); % [K] 120°C

% Gaslagen;
R= 8.3144261815324; % ideala gaskonstant
n= 0.408; % [mol] luft vid normaltryck & rumstemp
P_luft= ((n*R*T_kammare)/V_luft)/1000; % dividerar med 1000 för att
omvandla [N/m^2] till [kPa]

% Beräkna ångtryck vid 90°C (partialtryck * RF)
FK= 0.12; % FK antas till en början vara 12% och detta ger ca 85% RF
i "sorption curve (wood)"
RF= 0.93;
Partialtryck_vatten= 258; % Partialtryck av vatten vid 120°C
P_vatten= Partialtryck_vatten*RF;

% Totalt tryck inne kammaren pga vattenånga och luft
Ptot= P_luft+P_vatten
%%
clear
clc

% Resultat från eget test plottas upp!
% luft
Q= [16.7 120 125 130];
W= [0 25 30 34];

% vatten
E= [29 120 125 130];
R= [0 233 263 302];

% skiv 1
T= [27.5 50.1 128.5 126.5 126.5];
Y= [0 10 220 244 247];

% skiv 2
U= [30.4 52.1 126 128 126];
I= [0 10 210 220 224];

```

```

% bit
O= [28.3 77.8 127.5 128.5 126.5];
P= [0 12.5 63 85 109];

plot (Q,W,'b--')
hold on
plot (E,R, 'b')
plot (T,Y, 'g')
plot (U,I, 'g-.')
plot (O,P, 'g--')
hold off
grid on

legend({'Luft-test', 'Vatten-test', 'Skiv-test-1', 'Skiv-test-2', 'Bit-
test'}, 'Location', 'northwest')
title('Eget Trycktest Resultat')
xlabel('Temperatur [ $^{\circ}$ C]')
ylabel('Tryck [kPa]')

```

