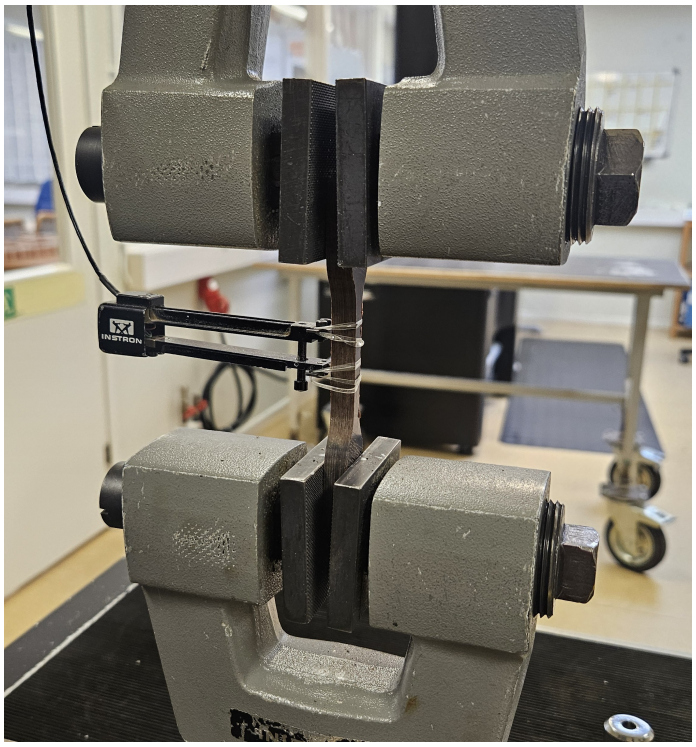
CHALMERS



Återbruk av polymermaterial för optimerad draghållfasthet

En experimentell DOE-studie av processparametrars inverkan på spillmaterial från Diab AB

Examensarbete inom högskoleprogrammet Maskinteknik

WILMA JANSSON & FILIPPA WÄRME

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026
www.chalmers.se

Examensarbete 2026

Återbruk av polymermaterial för optimerad draghållfasthet

En experimentell DOE-studie av processparametrars inverkan på spillmaterial från Diab AB

Wilma Jansson & Filippa Wärme



CHALMERS

Institutionen för Industri- och materialvetenskap
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg 2026

Återbruk av polymermaterial för optimerad draghållfasthet

En experimentell DOE-studie av processparametrars inverkan på spillmaterial från Diab AB

Wilma Jansson, Filippa Wärme

© Wilma Jansson, Filippa Wärme 2026.

Handledare: Jerry Stigsson, Diab International AB
Examinator: Peter Hammersberg, Industri-och materialvetenskap

Examensarbete 2026
Institutionen för Industri-och materialvetenskap
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Hundben inspänt i dragmaskin inför dragprovning i laboratorium hos Diab Laholm AB.

Skriven i LaTeX
Göteborg 2026

Återbruk av polymermaterial för optimerad draghållfasthet
En experimentell DOE-studie av processparametrars inverkan på spillmaterial från Diab AB
WILMA JANSSON, FILIPPA WÄRME
Institutionen för industri- och materialvetenskap
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Detta arbete fokuserar på spillmaterialet H100 från Diab International AB i syfte att identifiera materialets egenskaper samt optimera processparametrarna för maximal hållfasthet.

Diabs produktion i Laholm tillverkar divinycell-PVC vilket är ett starkt kärnmaterial som används i sandwichkonstruktioner. Materialet består av en kombination mellan termo- och härdplast för att åstadkomma önskvärda egenskaper. Under produktion genereras spillmaterial i olika former, där kutterspill utgör en stor andel. Spillet blir idag ihoppressat till briketter för energiåtervinning då materialet inte går att omsmältas på en ekonomiskt och miljömässigt hållbart sätt. Företaget vill därav undersöka möjligheterna för återbruk av materialet i nya tillämpningsområden.

Idag finns det få studier och begränsad data om hur kutterspill kan bearbetas och hur det påverkas av pressning. Arbetet fokuserar därför på hur kutterspill från produkten H100 kan processas, hur materialet reagerar på olika processparametrar och vilka samband som kan hittas till materialets mekaniska egenskaper.

Framtagningen av försöksplanen genomfördes med *design of experiment* för att undersöka hur de olika processparametrarna påverkade draghållfastheten. Provkörningarna genomfördes i en mindre termisk press som efterliknar en press i produktionen. Huvudparametrarna var temperatur (°C), tid (minuter), tryckkraft (kN) och vikt (gram). Plattorna tillverkades och bearbetades för att sedan testas med dragprovning för att få fram draghållfastheten. Förvärmningstester genomfördes för att se över möjligheten att korta ner processtiden för plattorna i pressen.

Resultatet visade att temperatur och tid visade stor signifikans för draghållfastheten. Det kunde även identifieras ett starkt samband mellan plattans färg och draghållfastheten, vilket visar en potential att använda det som en kontroll för plattans hållfasthet. Arbetet ger en ökad förståelse över hur processparametrarna påverkar kutterspill. Ger en grund för fortsatt arbete kring hur H100 kutterspill kan återbrukas.

Nyckelord: polymermaterial, återvinning, materialkarakterisering, optimering, processparametrar, draghållfasthet, materialvetenskap, förvärmning, Design of Experiment, mätsystemanalys.

Optimering av processparametrar för polymermaterial med fokus på draghållfasthet
En experimentell DOE-studie av processparametrars inverkan på spillmaterial från Diab AB
WILMA JANSSON, FILIPPA WÄRME
Institutionen för industri- och materialvetenskap
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

This study focuses on the waste material H100 from Diab International AB, aiming to identify the material's properties and optimize process parameters for maximum strength.

Diab's production facility in Laholm manufactures Divinycell PVC, a strong core material used in sandwich structures. The material consists of a combination of thermoplastic and thermoset plastic to achieve desired properties. Production generates waste material in various forms, with offcuts and trimmings accounting for a significant share. Currently, the waste is compressed into briquettes for energy recovery, as the material cannot be remelted in an economically and environmentally sustainable manner. Consequently, the company wishes to explore opportunities for reusing the material in new applications.

Currently, there are few studies and limited data regarding how wood shavings can be processed and how they are affected by compression. This work therefore focuses on how shavings from the H100 product can be processed, how the material responds to various process parameters, and what relationships can be identified regarding the material's mechanical properties.
The development of the experimental plan was carried out using design of experiments to investigate how the different process parameters affected the tensile strength. The test runs were carried out in a smaller thermal press that mimics a press in production. The main parameters were temperature (°C), time (minutes), compressive force (kN) and weight (grams). The plates were manufactured and processed and then tested with tensile testing to determine the tensile strength. Preheating tests were carried out to examine the possibility of shortening the process time of the plates in the press.

The results showed that temperature and time had a significant impact on tensile strength. A strong correlation was also identified between the color of the plate and its tensile strength, indicating potential for using color as a means of monitoring board strength. The study provides greater insight into how process parameters affect wood chip waste and establishes a foundation for future work on the reuse of H100 chip waste.
Keywords: polymer materials, recycling, material characterization, optimization, process parameters, tensile strength, materials science, preheating, Design of Experiment, measurement system analysis

Förord

Detta examensarbete skrevs på institutionen för industri- och materialvetenskap vid Chalmers tekniska högskola i samarbete med Diab International AB i Laholm.

Tack till våra handledare som har hjälpt oss under hela arbetets gång, Peter Hammersberg på Chalmers tekniska högskola och Jerry Stigsson på Diab International AB.

Tack till alla fina kollegor på Diab som har stöttat och hjälpt oss under processen.

Wilma & Filippa, Göteborg, 05-2026

Innehåll

1 Inledning **1**
- 1.1 Bakgrund . . . 1
- 1.2 Problemformulering . . . 2
- 1.3 Syfte . . . 2
- 1.4 Frågeställningar . . . 2
- 1.5 Avgränsningar . . . 2

2 Teori **3**
- 2.1 Polymermaterial . . . 3
  - 2.1.1 Divinycell-PVC . . . 3
  - 2.1.2 Återvinning av polymermaterial . . . 4
- 2.2 Mekaniska egenskaper för Divinycell H100 . . . 4
- 2.3 Dragprovning . . . 4
- 2.4 Företagets nuvarande hantering av spillmaterial . . . 4
- 2.5 Tidigare arbeten . . . 5

3 Metod **7**
- 3.1 Design av experiment (DOE) . . . 8
  - 3.1.1 Initial faktorförsök . . . 8
- 3.2 Material och provberedning . . . 8
- 3.3 Pilotpressning . . . 9
- 3.4 Materialkarakterisering . . . 9
  - 3.4.1 Position . . . 10
  - 3.4.2 Färganalys . . . 10
  - 3.4.3 FTIR-analys . . . 10
  - 3.4.4 Densitet . . . 10
- 3.5 Dragprovning . . . 11
  - 3.5.1 Provbearbetning . . . 11
  - 3.5.2 Genomförandet av dragprov . . . 11
- 3.6 JMP . . . 12
- 3.7 Vidareutvecklad försöksplanering (DOE) . . . 12
  - 3.7.1 Val av processparametrar och nivåer i vidareutvecklad DOE . . . 13
  - 3.7.2 Genomförande . . . 14
- 3.8 Mätsystemanalys . . . 14
  - 3.8.1 Design av MSA . . . 14

4 Resultat **17**
4.1 Resultat från initialt faktorförsök . . . 17
4.1.1 Materialkarakterisering . . . 18
4.1.1.1 Färganalys . . . 18
4.1.1.2 FTIR . . . 19
4.1.1.3 Densitet . . . 19
4.1.2 Mekaniska egenskaper . . . 20
4.1.2.1 Draghållfasthet . . . 20
4.1.2.2 Töjning . . . 20
4.1.2.3 Elasticitetsmodul . . . 20
4.1.3 Huvudeffekter . . . 20
4.1.4 Interaktionseffekter . . . 21
4.2 Resultat från vidareutvecklad faktorförsök . . . 22
4.2.1 Verifierade tester . . . 22
4.2.2 Optimerade tester . . . 23
4.2.3 Tester inom ökat temperaturintervall . . . 24
4.2.4 Tester med förvärmning . . . 25
4.2.5 Färganalys med verifiering och optimering . . . 27
4.2.6 Prediktiva modeller för mekaniska egenskaper . . . 27
4.3 Optimerade parameterinställningar . . . 29
4.4 Resultat från mätsystemanalys . . . 31

5 Diskussion **33**
5.1 Processparametrarnas påverkan på draghållfastheten . . . 33
5.1.1 Huvudeffekterna . . . 33
5.1.2 Interaktionseffekterna . . . 34
5.2 Utvärdering av verifierings- och optimeringstester kopplat till satsvariation . . . 34
5.3 Förvärmningsplattornas påverkan på processtiden . . . 35
5.4 Samband mellan färganalys och draghållfasthet . . . 36
5.5 Optimerade testerna . . . 37
5.6 Prediktiva modeller och optimering av parameterinställningar . . . 37
5.7 Analys av mätsystemets tillförlitlighet . . . 37
5.8 Felkällor och osäkerheter . . . 38
5.9 Rekommendationer vid fortsatt arbete . . . 40

6 Slutsats **41**

Referenser **43**

A Processen **I**

B Försöksplanering **III**

C Kompletterande

data från JMP **VII**

D Mätsystemanalys **XI**

1

Inledning

Detta arbete genomfördes i samarbete med Diab International AB och fokuserade på återanvändning av spillmaterialet från företagets produktion.

1.1 Bakgrund

Diab tillverkar ett kärnmaterial, Divinycell, som används i sandwichkonstruktioner. Materialet kännetecknas av låg densitet i kombination med goda mekaniska egenskaper, såsom hög hållfasthet och styvhet. Divinycell erbjuds i flera olika serier, de har varierande materialegenskaper beroende på krav och användningsområde. Exempel på dessa serier är PVC, PET, PES och PEI. Serien Divinycell-PVC produceras på en av företagets tillverkningsanläggningar i Laholm, Sverige. Plattorna används framför allt inom vindkraft, maritim sektor, industri och transport [1]. Det är spillmaterialet från denna produktion som ligger till grund för detta arbete.

Divinycell-PVC är baserat på PVC 'polyvinylklorid' som är uppblandat med en härdplast 'aromatisk polyurea' till ungefär 50%. Kombinationen av de olika plasttyperna bidrar till materialets specifika egenskaper. PVC:n bidrar med hög duktilitet, värmebeständighet, formbarhet och brandbeständighet medans härdplasten bidrar med styvhet, kemikaliebeständighet och dimensionsbeständighet. Vid tillverkningen och efterbearbetning av Divinycell-PVC uppstår spillmaterial och biprodukter, som utgör ungefär 40% av de producerade materialet. Tillverkningsprocessen genererar olika typer av spillmaterial såsom kutterspill, såg- och sandspill, kitspill, biprodukt-spill och A-spill. Diab erbjuder efterbearbetning och avancerat CNC-bearbetat kit på plattorna utifrån kundbeställningar, där uppkommer biprodukterna som fortfarande håller en god kvalitet men som saknar användningsområde [2].

Företaget har tidigare undersökt alternativa metoder för spillhantering, det senaste och mest omfattande projektet genomfördes mellan 2013 och 2014. Då utfördes tester på materialet H60, stora mängder av den insamlade informationen och data har däremot gått förlorad. Mindre projekt genomfördes även under 2000-talet men tillgången till data är begränsad.

1.2 Problemformulering

Problematiken med spillmaterialet är främst att det innehåller härdplast som inte kan omsmältas på grund av dess tvärbundna struktur. Detta begränsar möjligheten att återanvända materialet. Allt spillmaterial från produktionen skickas i dagsläget direkt till energiåtervinning varav den största andelen spill utgörs av kutterspån. Det representerar ungefär en fjärdedel av allt tillverkat material som företaget producerar, vilket inte är gynnsamt ur ett ekonomiskt och ekologiskt hållbarhetsperspektiv.

1.3 Syfte

Arbetet syftar till att undersöka möjligheten att återanvända spillmaterialet från produktionen som ett nytt råmaterial, för att finna möjliga tillämpningar och användningsområden för materialet och dess mekaniska egenskaper.

Genom formpressning av testplattor undersöks processparametarna och hur de påverkar materialegenskaperna. Arbetet innefattar även en inledande undersökning kring förvärmning av plattor, för att kunna undersöka om det går att korta ner processtiden.

1.4 Frågeställningar

- Hur varierar egenskaper i relation till processparametrar och av inkommande spillmaterial? Hur kan processen optimeras för att få önskade materialegenskaper med kortast möjliga processtid?
- Finns det karakteriseringsmetoder som har samband till materialets egenskaper? Är sambandet tillräckligt noggrant för att använda som processövervakning?

1.5 Avgränsningar

Briketterna som samlas in från produktionen består av ihoppressat kutterspill. Spillet kommer endast testas med ett specifikt produktrecept, H100. Briketterna pressas senare till testplattor i en pilotpress. Formen och pressen som används vid testningen är mindre varianter av de som används i den större produktionen, tester kommer inte genomföras i större format. Testning av de mekaniska egenskaperna sker med dragtestning. Skjuv- och tryckprovning genomfördes inte.

2

Teori

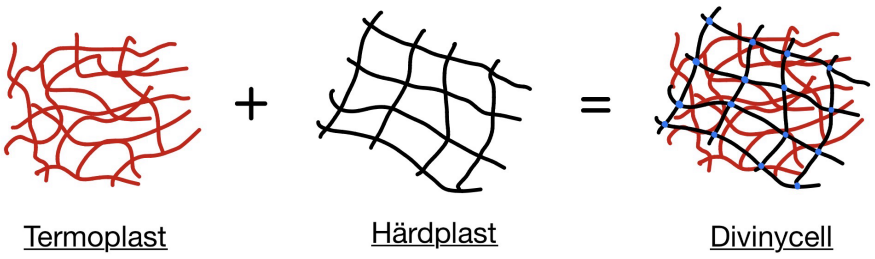
Teorin ligger till grund för en djupare förståelse av polymermaterial och deras egenskaper. Den syftar till att ge en tydlig översikt av hur Diab hanterar sitt spillmaterial idag, samt att identifiera tidigare studier som kan vara relevanta för området.

2.1 Polymermaterial

I dagens samhälle är vi i ständig kontakt med polymermaterial, de förekommer i många olika former som plaster, elastomerer och textilfibrer [3]. Plaster delas främst in i två huvudgrupper termoplaster och härdplaster. Termoplaster kan smältas och formas om, medan härdplasterna inte kan det utan att den kemiska strukturen bryts ner [4].

2.1.1 Divinycell-PVC

Divinycell-PVC som arbetet fokuserar på är en blandning av termoplast och härdplast. Materialet är ungefär hälften härdplast och hälften termoplast, i figur 2.1 demonstreras hur blandningen av plasterna och deras nätverks struktur är utformad. Termoplasten representeras av de långa röda PVC-kedjorna, medan de svarta kedjorna illustrerar härdplastens tvärbundna nätverk, Divinycell är en blandning av båda polymererna sammanflätade. Därav kan Divinycell-PVC kan beskrivas som ett semi-IPN-material. De olika polymertyperna kombineras för att erhålla önskade materialegenskaper. Slutresultatet blir ett homogent material som har samma egenskaper i alla riktningar [5].



Figur 2.1: Beskrivning av strukturen för Divinycell PVC baserat på [5]

2.1.2 Återvinning av polymermaterial

Återvinning av Divinycell-PVC innebär vissa utmaningar eftersom materialet innehåller härdplast. Härdplastens tvärbundna nätverk begränsar möjligheten till omsmältning och omformning av materialet där av behöver alternativa metoder för hanteringen studeras [4]. Det finns idag olika metoder för återvinning av polymermaterial, både mekaniska och kemiska[6].

Mekanisk återvinning av härdplast är möjlig genom att materialet först sönderdelas till fragment av enhetlig storlek. Materialet kan därefter bearbetas ytterligare genom malning och granulering. Efter bearbetningen kan den granulerade plasten användas som fyllmedel vid tillverkning av nya produkter [7].

Återvinning av härdplast kan även genomföras i en pyrolysprocess. Polymeren värms upp till hög temperatur(400 °C eller mer) vilket medför att materialet bryts ner till mindre beståndsdelar i en syrefri eller syrefattig miljö. Slutprodukten är i huvudsak olja men de tillkommer även restprodukter vilket kan användas som bränsle inom cementindustrin eller förbränning av avfall [6].

En annan metod vid återvinning av härdplast är solvolys. Processen solvolys HTL utförs i vatten vid högt tryck och relativt låg temperatur jämfört med pyrolysen (50-250 bar, 200–400 °C). Under processen bryts polymeren ner till olja som potentiellt kan användas som råmaterial [6].

2.2 Mekaniska egenskaper för Divinycell H100

Materialet som kommer användas i detta arbete använder briketter består av Divinycell PVC, materialkvaliteten H100. H100 i initiala form har en densitet mellan 90-115 kg/m^3, värmedeformationstemperatur på 125°C och en max process temperatur på 110°C. Materialet har en dokumenterad draghållfasthet på 3,5 MPa[8]. I detta arbete ligger fokus på draghållfastheten hos de återanvända spillmaterialet.

2.3 Dragprovning

Materialets draghållfasthet utvärderas genom dragprovning och använda sig av en standard från "ASTM international". Standarden heter ASTM D638-14 från [9] , som används för nuvarande inom företaget. I denna standard framgår hur testningen ska genomföras och provkropparnas geometri.

2.4 Företagets nuvarande hantering av spillmaterial

Diab AB har under en längre tid undersökt olika möjligheter för återbruk av spillmaterialet som uppstår i produktionen. I dagens produktion utgör spillet ungefär 40% av de producerade materialet. Spillet förekommer som kutterspill, såg- och sandspill,

kitspill, biprodukt-spill och A-spill. Arbetet fokuserade på kutterspill som utgör den största andelen spill. För nuvarande samlas kutterspillet i en kvarn för att malas ner till mindre flisar. Sedan pressas de ihop i en press utan värme för att bilda briketter som är ungefär 90x160 mm i storlek, detta för att minska volymen på lagret. Briketterna skickas därefter till energiåtervinning. Hanteringen av spillmaterialet visar på att det finns behov av alternativa metoder som gör processen mer cirkulär.

2.5 Tidigare arbeten

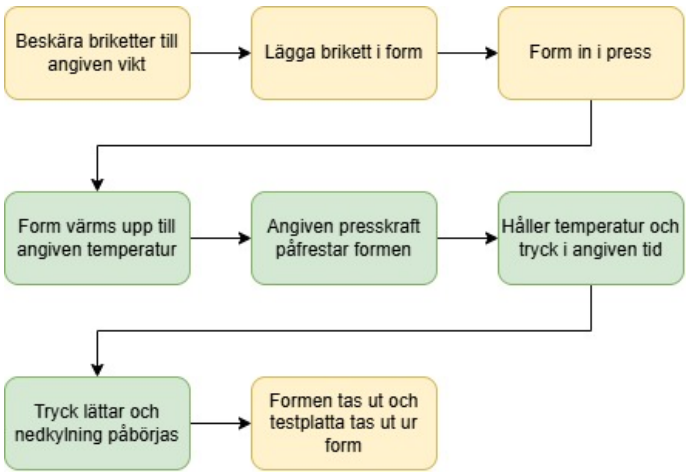
Diab AB har genomfört ett liknande arbete år 2013 då testades en annan kvalitet, H60, men arbetet blev ofullständigt och mycket av data försvann genom åren [5]. Testningen skedde i en pilotpress som hade inställningar om vilken temperatur, tid och tryckkraft som skulle användas.

Testningen från 2013 testade olika framtagningsprocesser, bland annat pressning med temperatur och tryck. Denna process tog fram homogena plattor som sedan visade sig hade en bra hållfasthet. Det visade också att tryck var en viktig del för att få fram homogena plattor. I början av förra arbetet användes tjockleken på briketten som en faktor, som sedan ändrades till vikt. Detta på grund av variation i densitet på briketterna. En annan process som testades var med en kalandreringsteknik, 'calendering technique'. Processen går ut på att uppvärmt material trycks in mellan varma cylindrar som rullar och pressar ut ark i en bestämd tjocklek och bredd [10]. Denna process gav inte en bra hållfasthet och testades inte vidare.

3

Metod

I detta arbete har metoden strukturerats i två huvudsakliga faser. Den första fasen innefattar utformningen av en initial försöksplanering, den baserades på informationen från litteraturstudien samt tidigare tester som genomförts i samband med återvinning av Diab ABs spillmaterial. I denna fas så bestämdes val av processparametrar och inom vilket intervall de skulle vara mellan. Även provberedning genomfördes och plattorna pressades. Det framställda plattorna materialkarakteriserades med färganalys, FTIR-analys samt densitetsmätningar. Därefter genomfördes dragprovning för att identifiera materialets mekaniska egenskaper. Resultaten analyserades för att se samband mellan de olika processparametrarna. Hela processen beskrivs som en processkarta i bilaga A.1. Figur 3.1 visar en mer detaljerad vy av pressningen till plattor.



Figur 3.1: Identifierade hundben innan dragtestning

Den andra fasen omfattar en vidareutveckling av den initiala försöksplaneringen, där resultaten från den första fasen låg till grund för verifiering samt optimering av parametrarna. I denna fas genomfördes även en mätsystemanalys (MSA) för att identifiera kvaliteten på sambandet mellan färganalysen och hållfastheten.

3.1 Design av experiment (DOE)

För att förstå effekten som olika faktorer bidrar med under en process så används en systematisk metod som kallas DOE [11]. Den skapar en förståelse för komplexa system med ett ramverk som är både kraftfullt och effektivt. Ramverket är uppbyggt på ett sätt för att identifiera faktorernas påverkan på utdata samt visa på om det finns några samband mellan de olika faktorerna som påverkar. Utifrån data så kan de olika faktorerna optimeras för att ge ett önskat resultat. Metoden är mycket effektiv då den kan ge maximal information utifrån minimalt antal körningar, vilket är optimalt när de är flera faktorer och de interagerar mellan varandra.

3.1.1 Initial faktorförsök

En faktoriell försöksplan skapades i JMP med hjälp av en 'Easy DOE'. Utifrån tidigare litteraturstudie och processkartläggning, se bilaga B.1, så valdes temperatur (°C), tid (min), tryckkraft (N) och vikt (g) som huvudfaktorer, studien låg även till grund för de intervall som processparametrarna befann sig i. Basterat på tidigare erfarenheter och nuvarande processintervall sattes gränserna för temperaturen mellan intervallet 150–180 °C, tiden: 5-20 minuter samt tryckkraften: 400-1000 kN. Vikten på briketterna som ska pressas bestämdes variera mellan 100-200 gram.

Utifrån att försöksplaneringen skulle innehålla fyra huvudfaktorer så var det lämpligt att genomföra ett reducerat faktorförsök på 24 tester där faktorerna inkluderade tre nivåer: en undre gräns, en övre gräns samt en centrumpunkt. En axialpunkt användes även för trycket på 745 kN och faktorförsöket innehöll även tre replikat för att kunna uppskatta variationen mellan testerna. När försöksplaneringen designades utformades den i randomiserad ordning för att undvika systematiska fel och öka tillförlitligheten i resultaten. Se den initial försöksplanering i B.2.

För att kontrollera att intervallen som bestämdes för processparametrarna bedöms vara genomförbara i försöksplanen så skapades två testplattor (exkluderade från försöksplanen), de hade de lägsta inställningarna på temperatur, tid och tryckkraft där den ena plattan vägde 100 gram och den andra 200 gram. Dessa tester genomfördes för att testa de lägsta parameterinställningarna och se att briketterna smälte ordentligt så det gick att göra tester på.

3.2 Material och provberedning

I samband med produktionen av plattor baserade på H100-blandningen samlades spillbriketter in. De sparades enbart om det hade en relativt jämn geometri och inte hade tydliga defekter som exempelvis sprickor. Därefter förberedes briketterna på laboratoriet där de sticksågades till rätt vikt, en avvikelsen på ±5 gram tilläts. Tjockleken på briketterna mättes även med hjälp av ett skjutmått.

3.3 Pilotpressning

Pressen som användes för att tillverka plattorna hade ett förberett program där temperatur, tryck och tid ställdes in förhand. Formen bestod av två delar som var formpassade med varandra. Botten delen hade en rektangulär fördjupning där briketten lades ner, se figur 3.2. Överdelen kommer trycka på briketten under hela pressningen, plasten kommer att fylla ut bottnen av formen, därav användes en gummiring för att sätta runt upphöjningen. Överdelen trycktes in i formen för att få ett tryck mot briketten, så den inte flyttades under insättningen av formen i pressen. För att skydda formen och pressen från att skada varandra användes en stålskiva som lades på formen. Skivan markerades för att säkerställa att samma skiva användes under hela testningen. I figur 3.3 visas en brikett som användes under ett faktorförsök.



Figur 3.2: Botten av formen som användes under pressningen



Figur 3.3: Sågad brikett med angiven vikt

Formen som användes hade ett litet hål i botten på ena långsidan för att kunna ha en termometer, detta är inget som användes under arbetet. Men under pressningen gjorde det att vissa plattor trängde sig in i öppningen. Uttagningen av en del plattor blev därav mer komplex. För att få ut dessa plattor borrades det hål i två eller fler hörn, för att därefter skruva ner skruvar. Utnyttjade en hävarm av antingen hammare eller kofot för att få ut plattan. I figur 3.1 beskrivs pressningenprocessen som ett flöde från brikett till färdig testplatta.

3.4 Materialkarakterisering

Genomförde analyser på de pressade plattorna för att samla information om hur processparametrarna påverkade för att ge olika egenskaper.

3.4.1 Position

Maskinen mätte under varje pressning olika mätvärden om hur pressen agerade under tiden. Ett av mätvärdena var avståndet mellan toppen av pressen och bottenplanet. Dessa värden konverterades sedan om till punktdiagram med utjämnade linjer med axlarna position x tiden. Genomfördes en tom körning, nollprov, för att kunna eliminera formens tjocklek från diagrammen. Detta gjordes med att pressa formen utan en brikett i, med mellan inställningar på temperatur och tryck, men en lång tid. Denna parameter kommer däremot inte att behandlas i den fortsatta analysen i denna studie.

3.4.2 Färganalys

Verktyget som användes läste av ytan av plattan och gav ett värde på L, a och b. Där L beskrev hur ljust/mörkt testet var, högre tal inom intervallet 0-100 motsvarade ljusare nyans. Mätningen a beskrev röd/grönt värde där a+ visade på rödare nyanser och a- grönare. Därefter beskrev b blå/gult värde, b+ visade på gulare nyanser och b- visade på blåare nyanser [12]. Verktyget kalibrerades inför varje provomgång. Det gjordes genom att verktyget har ett lock med en väl upplyst helvitt område som analyseras för att nollställas. Under provtagning togs det värden i mitten och ett i hörnen på varje platta, kommer betecknas L(M) och L(H) i resten av rapporten. Detta för att ha en överblick om plattan hade varierande färgnyans.

3.4.3 FTIR-analys

Med användning av en 'Everest ATR' maskin identifierades molekyl bindningar genom att testa hur mycket infrarött ljus materialet tar upp. Maskinen nollställs med att köra en bakgrund, en 'tom körning', innan varje ny platta. Därefter spänns plattan, som ska analyseras, in i maskinen. Data samlades in i ett *Excel*-ark för vidare analysering.

3.4.4 Densitet

Plattorna blev skurna till 3 lika stora prover, med måtten 19x115 mm enligt standarden [9]. Varje provbit markerades med 1, 2, 3 från kanten till mitten. Två plattor blev felaktigt utskurna, detta ledde till att det lades till två extra körningar i tabellen (940075 och 950076). Det användes digitalt skjutmått för att mäta tjocklek, längd och bredd. Mätte vid mitten av varje prov för att ha en konsekvent mätmetod. Vägde provet med en elektrisk våg. Använde programmet *Excel* för att dokumentera värdena och även för att räkna ut densiteten med formeln:

$$\rho = \frac{m}{t \cdot l \cdot b}$$

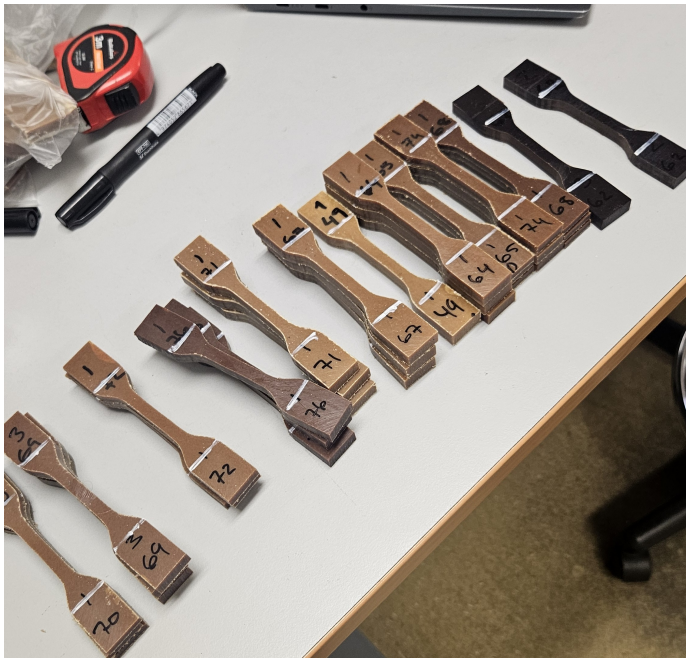
där m är massan, t är tjockleken, l är längden och b är bredden.

3.5 Dragprovning

Dragprovning genomfördes för att identifiera hållfasthet, töjning och elasticitetsmodul hos de olika plattorna och hundbenen.

3.5.1 Provbearbetning

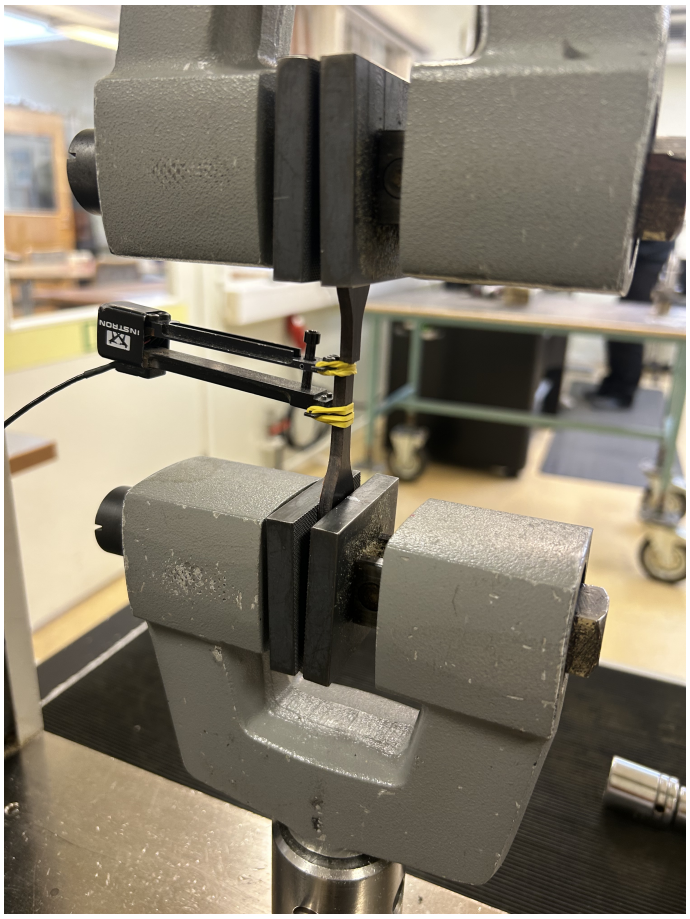
Efter densiteten är bestämd så frästes en midja ut på proverna, fräsningen genomfördes med hjälp av en fixtur som hade förberetts med givna mått utifrån standard. Därefter mättes bredden och tjockleken på provernas midjor, för att få information om deras tvärsnittsarea, med ett digitalt skjutmått. Hundbenen markerades med namn och nummer på toppen och botten för att kunna identifieras efter brott. För att säkerställa en jämn dragning ritades två vita sträck på proverna med ett spann på 63 mm mellan markeringarna. I figur 3.4 visas hundben med identifiering och markering.



Figur 3.4: Identifierade hundben innan dragtestning

3.5.2 Genomförandet av dragprov

Dragtestningen genomfördes i laboratoriet hos Diab. Först spändes provet in i dragprovningsmaskinen vid markeringarna och en extensometer fästes med två gummiband runt midjan, se figur 3.5. Extensometern användes för att identifiera provets töjning och elasticitetsmodul. Därefter startade dragtestet och mätdata började samlas in där ett växande kraft-tid diagram kunde synliggöras, när provet gick av så stannade maskinen och kraften föll ner till noll. Utifrån tvärsnittsarean på respektive test beräknade ett program hållfasthet, töjning och elasticitetsmodul för varje prov. Det togs även bilder på alla dragprover för att identifiera typ av brott.



Figur 3.5: Hundben efter brott i dragprovmaskin med extensometer.

Dragningen genomfördes under två dagar, 66 stycken hundben drogs på dag ett och resterande 12 hundben drogs under dag två. Under dag två uppstod ett handhavandefel med extensometern vilket innebar att datan för töjningen inte visade sig vara tillförlitlig och elasticitetsmodulens data saknades.

3.6 JMP

Programvaran JMP användes för analysera den samlade datan. En tabell fylldes med resultat från ovannämnda metoder som en respons och sedan alla processparametrar som faktorer. I tabellen var varje hundben en rad. Tabellen användes sedan för att analysera fram vilka faktorer som hade stor påverkan på de olika responserna. Detta gjordes med olika typer av metoder inom JMP;s program, som 'Fit Model' och 'Graph Builder'.

3.7 Vidareutvecklad försöksplanering (DOE)

För att kunna bekräfta resultaten och öka tillförlitligheten från de tidigare testerna så genomfördes verifierande faktorförsök. Försöksplanen skapades i syfte att verifi-

era och optimera parametrarna, testa övre gränsen för temperaturen samt ta reda på om förvärmning är fördelaktigt för att korta ner processtiden. Fortsättningen av försöksplanen förväntades innehålla 21 tester med en randomiserad ordning för att undvika systematiska effekter och öka pålitligheten. Se den vidareutvecklade försöksplanering B.3 i Appendix A.

3.7.1 Val av processparametrar och nivåer i vidareutvecklad DOE

Totalt genomfördes tre verifieringstester med spridning över hela processen. De tre testerna hade olika spann på temperatur, tid och tryck, två av testerna hade en vikt på 150 gram samt en var på 100 gram. Verifieringstesterna valdes ut på grund av att det hade en bra spridning, då det alla tre testerna hade varierade hållfasthetsresultat samt att de hade stor variation i inställningar. Ett av verifieringstesterna hade bäst resultat i hållfastheten från den föregående försöksplanen, vilket gjorde detta även till ett optimerat test.

Optimeringstesterna var tre stycken, ett av testerna var med från den tidigare försöksplanen med maxinställningar på temperatur, tid och tryck med en vikt på 150 gram. Det andra optimerade testet togs fram med avseende på det första men med en vikt på 200 gram istället. Det visade sig att en högre vikt hade en positiv påverkan på tidigare resultat, en brikett på 200 gram med de parameterinställningarna var inte testat sedan tidigare. Det tredje testet togs fram med hjälp av Bayesian Optimization i JMP där det optimerade parametrarna hade maxinställning på temperatur, tid och tryck samt en brikett med vikten 180 gram.

Resultaten från tidigare testning visade på att hållfastheten hade ett approximativt linjärt samband med ökad temperatur i pressen. För att förstå hur materialets egenskaper påverkas av en högre temperatur utanför de övre spannet på 180 °C så genomfördes fyra tester, två av testerna på 190 °C och två på 200 °C. Parameterinställningarna bestämdes med hjälp av Fit model prediction samt Bayesian Optimization i JMP. De optimala parametrarna för maximal hållfasthet med Fit model prediction gav maxinställningar på tid och tryck samt en brikett på 200 gram för både temperatur 190–200 °C. Bayesian Optimization gav att tid och tryck skulle ligga på maxinställningarna medan vikten skulle vara 100 gram.

För att se över hur materialets egenskaper skulle påverkas med förvärmning så genomfördes 10 förvärmningstester. Syftet var att se över möjligheten att korta ner processtiden för plattorna därav testas tiden på 5 och 12,5 minuter. Temperaturen bestämdes variera mellan 165 °C och 180 °C med förhoppning på att plattorna hinner smälta fullständigt. Tryckkraften visade sig ha en negativ påverkan på hållfastheten vid tidigare testning och därav har 6 av testerna det lägsta trycket på 400 kN, samt att vikten varierar på 100 g och 200 g. För att vara säker på att trycket har en negativ påverkan på hållfastheten för de förvärmda plattorna så har två att testerna ett tryck på 700 kN samt två på 1000 kN. Vikten på dessa plattor är bestämd att vara konstant på 200 g.

3.7.2 Genomförande

Verifieringstesterna hade upprepade processen från 3.3. Den nya testningen använde samma material, H100. Men med briketter från en ny insamling från produktionen. Under genomförandet av verifieringstesterna fick en platta en tydlig kontaminering. Detta testet valdes att göra om på nytt. Den genomfördes med en brikett från från första insamlingen som var till den primära testningen.

Förvärmning krävde att pressformen var uppvärmd till den temperaturinställning som skulle uppnås under själva pressningen. Briketten värmdes upp i en separat ugn, med samma temperatur, i 12 minuter. I pressen ändrades programmet så att den först pressade ihop och värmde upp formen och sedan öppnade sig när temperaturen var nådd. Formen togs därefter ut och öppnades. Den uppvärmda briketten placerades i formen och sattes in i pressen igen. Därefter pressades formen ihop med given tryckkraft under given tid och temperatur. Till skillnad från tidigare program kyldes formen inte ner innan den plockades ut, under denna testning avslutades programmet i den givna höga temperaturen.

Sedan genomgick plattorna samma metod som i 3.4 och 3.5. Resultaten från metoden analyserades i JMP som förgående testning. Men här markerades hundbenen tydligt vilka som var verifiering, optimering, hög temperatur. Lades till kolumner för processparametrarna om förvärmning samt vilken sats briketterna kom från.

3.8 Mätsystemanalys

För att använda färganalys som ett mätverktyg för plattans hållfasthet krävs det att mätsystemet visa sig vara tillförlitligt, därför genomför en MSA (mätsystemanalys) på plattorna. MSA är ett verktyg som används för att analysera variationen i ett mätsystem och kunna visa på dess pålitlighet.

Den metoden som används för att analysera datan i JMP är Gauge R&R som syftar till repeterbarhet och reproducerbarhet. Repeterbarheten avser hur mycket mätverktyget varierar i sina resultat när samma operatör genomför samma mätning flera gånger. Reproducerbarheten beskriver hur olika operatörer som genomför samma mätning kan uppnå liknande resultat [13].

3.8.1 Design av MSA

I MSA;n valdes sju testplattor ut i syfte att säkerställa tillförlitliga resultat, dessa prover har samma spridning som processen har. Upplägget utformades med tre operatörer där varje operatör genomförde tre mätningar per platta. Mätdata samlades in från två punkter på plattans baksida, till höger om mitten samt plattans övre högra hörn. För att mätningarna ska vara helt oberoende av varandra så utförs MSA;n under tre dagar, där operatörerna mätte de sju plattorna vid ett tillfälle varje dag. Denna metod såg till att operatörerna inte kände till resultatet från tidigare mätning, detta för att undvika påverkan på nästföljande mätningar. Ordningen randomiserades för att undvika systematiska effekter. För varje mätning sparades

datan för L, a och b från mätinstrumentet. Se den designade MSA;n D.5 i Appendix C.

4

Resultat

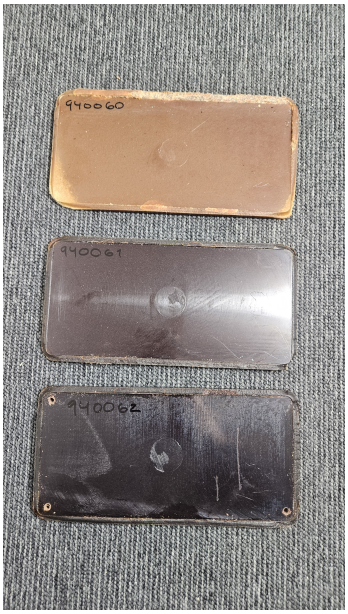
I följande kapitel presenteras resultaten från de tester och analyser som utfördes på plattorna. Plattorna identifieras med nummer 9400XX, där de två sista siffrorna representerar respektive platta. I den löpande texten används endast dessa två siffror. De parameterinställningar som vardera platta har kommer att redovisas enligt temperatur/tid/tryck/vikt.

4.1 Resultat från initialt faktorförsök

Nedan visas resultaten från den första DOE;n.



Figur 4.1: Plattor: -57, -58, -59



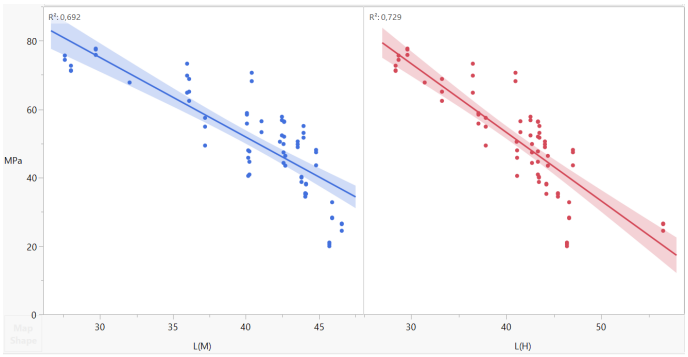
Figur 4.2: Plattor: -60, -61, -62

I figur 4.1 och figur 4.2 syns 6 plattor från testningen. Inställningarna för två av plattorna, platta -59 hade 165/5/400/100 och platta -62 hade 180/20/700/200. De resterande plattornas inställningar kan avläsas i Appendix B.2.

4.1.1 Materialkarakterisering

De resultat från färganalysen, FTIR;n och densiteten presenteras för att identifiera de olika materialegenskaperna hos plattorna.

4.1.1.1 Färganalys



Figur 4.3: L-värdena förhållande till hållfastheten

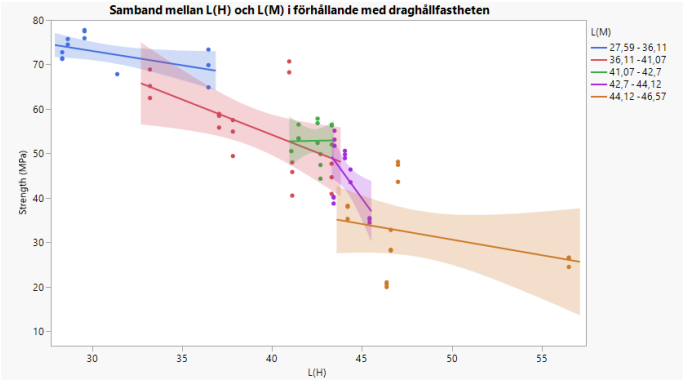
I figur 4.3 visas sambandet mellan L-värdena, hur ljus plattan är i förhållande till hållfastheten. Analysen ger att $R^2_{L(M)} = 0.692$ och $R^2_{L(H)} = 0.729$, programmet tolkar att 69,2 % respektive 72,9 % av spridningen förklaras av modellen. L(M) och L(H) *P-value* ≤0.001, vilket innebär att programmet anser att L är signifikant i förhållande till hållfastheten. Med en gemensam analys av L(M) och L(H) blev *logworth* L(H) högre än L(M), se figur 4.4. Det innebär att JMP anser att L(H) har en högre statistisk signifikans än L(M) i förhållande till hållfastheten. *Logworth* är ett sätt för JMP att räkna om P-värde till mer hanterbara värden och visuellt använda för jämföra faktorer.

Source	Logworth	PValue
L(H)	3,038	0,00092
L(M)	0,785	0,16401

Figur 4.4: L(M) och L(H) på hållfastheten

Figurerna i Appendix C.1 och C.2 visar att a har $R^2_{a(M)} = 0.304$ och $R^2_{a(H)} = 0.381$. Detta innebär att modellen förklarar 30,4% och 38.1% av variationen av värdena på a. $R^2_{b(M)} = 0.602$ och $R^2_{b(H)} = 0.625$ tyder på starkare samband än a, 60.2 % och 62.5 %. Både a och b värdena hade ett *P-värde*≤0.001.

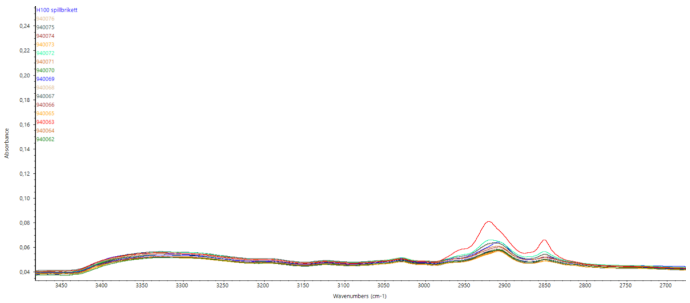
För att undersöka hur L(M) och L(H) skiljer sig i förhållande till draghållfastheten skapades graf 4.5. L(H) visas på x-axeln och hållfastheten på y-axeln, L(M) är inlagd som en *overlay*. Färgerna visar vilka värden L(M) antar vid en viss hållfasthet. Linjerna visar vilka värden L(H) har. I det blåa området är linjen relativt rak, L(M) och L(H) kan förutsättas anta lika värden vid denna hållfastheten. Sedan i det lila området är lutningen starkare vilket indikerar på att L(H) har stark koppling till hållfastheten, medans L(M) har större spridning.



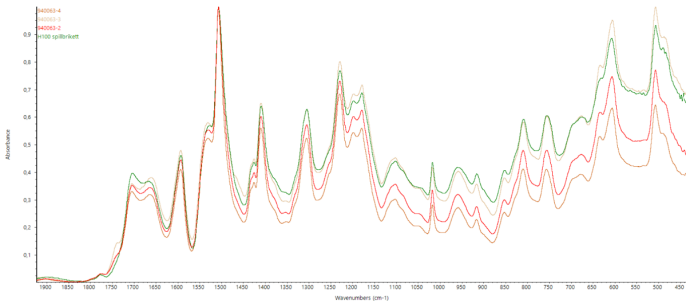
Figur 4.5: Sambandet mellan L(M) och L(H) i förhållande till draghållfastheten

4.1.1.2 FTIR

Diagrammet i figur 4.6 visar hur mycket infrarött ljus som olika plattor tar upp. Vid 2880 cm^{-1} kan en avvikelse observeras på plattan -63. Detta ledde till att noggrannare tester genomfördes på plattan som visas i figur 4.7. Där samma platta testades vid tre olika tillfällen, diagrammet visar stor spridning i upptaget av infrarött ljus därav borde hela metodens resultat tolkas med försiktighet.



Figur 4.6: FTIR diagram mellan våglängderna 3450 cm^{-1} och 2700 cm^{-1}



Figur 4.7: FTIR diagram för olika tester på -63 plattan

4.1.1.3 Densitet

I figurerna C.3 och C.4 i Appendix, analyseras sambandet mellan densiteten och draghållfastheten. De två responserna har $R^2 = 0.09$, kan ses i Appendix C.4, vilket

betyder att endast 9% av variationen kan därav förklaras med modellen. Vilket innebär att det är ett svagt linjärt samband mellan densiteten och hållfastheten. Det kan också ses med konfidensintervallen i diagrammet, hur den skuggande delen sprider sig längs linjen. Däremot visar vidare analys att *P-value* = 0.0090, detta betyder att densiteten och hållfastheten inte är en slumpmässig koppling. Även om sambandet är svagt visas det fortfarande att en liten koppling i de olika resultaten finns. I Appendix C.3 jämförs densitetens och de andra huvudfaktorernas signifikans på draghållfastheten. Då är densitetens *logworth* 1.483 medans temperatur och tid är 32.731 respektive 27.349.

4.1.2 Mekaniska egenskaper

Baserat på dragtesterna som utfördes hos Diab har en analys genomförts av draghållfastheten, töjningen och elasticitetsmodulen. Detta för att ta reda på hur processparametrarna och deras interaktion påverkar de mekaniska egenskaperna.

4.1.2.1 Draghållfasthet

Effekterna för draghållfastheten kan ses i Appendix C.5. Processparametrarna som har störst påverkan på hållfastheten är tid och temperatur. Effekterna visar sig vara extremt signifikanta på grund av sina låga P-värde, det syns även med *logworth* att tiden har den starkaste påverkan. Modellen har en R^2 på 96,0%.

4.1.2.2 Töjning

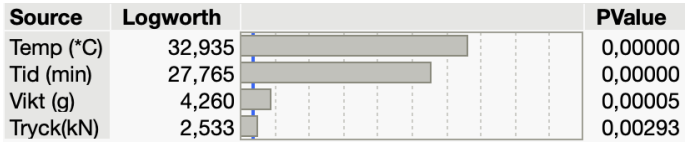
Analysen om faktorernas signifikans på töjningen finns i Appendix C.6. Där tid, temperatur och interaktionen mellan temperatur och tid är de med högst *logworth* i jämförelse med de andra parametrarna. Vilket indikerar på att de faktorerna har en hög statistisk koppling till töjningen. Men även tryck och vikt visar sig ha låga P-värden.

4.1.2.3 Elasticitetsmodul

Genom genomföring av liknande analys för elasticitetsmodulen, se Appendix C.7, visas det att tid och temperatur har högst *logworth*. Några av de andra faktorerna är också signifikanta, då de har låga P-värden.

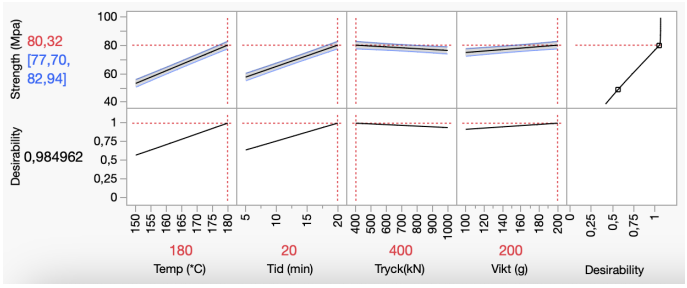
4.1.3 Huvudeffekter

Analys på endast huvudparametrarna ger att temperatur och tid är starkt signifikanta, se 4.8. Modellen som har tagits fram har $R^2_{adj} = 0.92127$ vilket förklarar 92,127% av variationen. Vid flera faktorer och interaktioner är R^2_{adj} mer korrekt att använda då den tar hänsyn till antalet parametrar som är med samt modellens komplexitet.



Figur 4.8: Huvudeffekterna för draghållfastheten

I figur 4.9 har programmet analyserat vilka inställningar som har gett den högsta hållfastheten hos plattorna och därav predikterat de mest passande inställningar för maximal draghållfasthet. Inställningarna på temperatur, tid, tryck coh vikt blev 180/20/400/200. Profilerna beskriver sambandet mellan en specifik faktor och hållfastheten. Översta rutan som är predikterad av "Tryck(kN)" beskriver sambandet mellan hållfastheten och kraften. Enligt analysen är det ett negativt samband då den lutar neråt vid de högre kN-värdena. JMP menar på lägre tryckkraft kommer ge högre hållfasthet än med höga tryckkrafter. De andra faktorerna har positiva samband med hållfastheten, det framgår med hjälp av grafernas lutning.



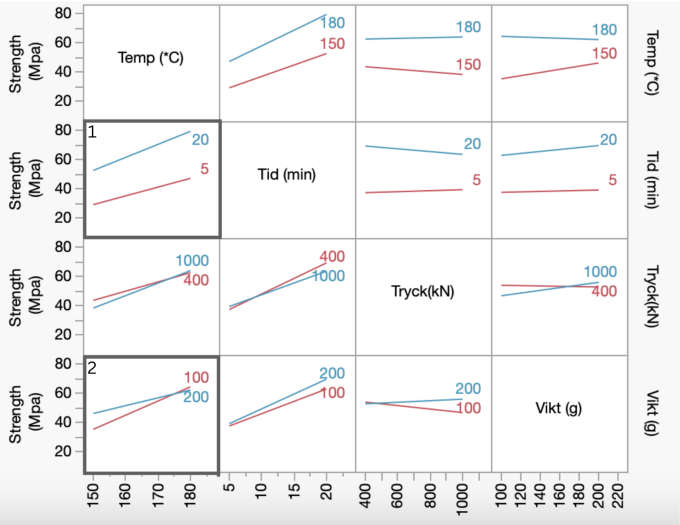
Figur 4.9: Prediktionsprofil för huvudeffekterna

4.1.4 Interaktionseffekter

I följande figur 4.10 undersöks samverkan mellan huvudparametrarna för att analysera deras interaktionseffekter. Ruta nummer 1 i figuren med huvudparametrarna temperatur och tid visar när tiden är konstant på 5 och 20 minuter. Där syns det att både temperaturen och hållfastheten ökar tillsammans, vilket tyder på ett samband mellan variablerna. Interaktionseffekten mellan temperaturen och tiden är inte extremt stark då linjerna är förhållandevis parallella. Rutan indikerar även på att draghållfastheten varierar avsevärt med tiden under konstant temperatur. I ruta 1 där samband mellan temperatur, tid och hållfasthet analyseras så hålls tryckkraften och vikten på sina medelvärden, 700 kN och 150 gram.

I ruta nummer 2 visas sambandet mellan temperaturen och vikten där linjerna inte är parallella och därav indikerar på att det finns ett interaktionssamband mellan det två variablerna. Det kan visas återigen i Appendix C.5 där sambandet visar på stor signifikans. Båda linjerna i rutan växer vid högre temperatur vilket tyder på att sambandet mellan temperaturen och vikten har ett positivt inverkan på hållfastheten. Däremot visas det att skillnaden i hållfastheten mellan viktnivåerna minskar vid en högre temperatur. Vikten är konstant på 100 och 200 gram, plattorna på 100 gram visar sig ha den högsta hållfastheten vid högsta temperatur och 200

gram plattorna visar sig starkast vid den låga temperaturen.



Figur 4.10: Interaktionseffekterna mellan processparametrarna

4.2 Resultat från vidareutvecklad faktorförsök

Det vidareutvecklade faktorförsöket gick ut på att verifiera plattor, optimera parametrar, testa utökat temperaturintervall och ta reda på om förvärmning kunde korta ner processtiden. Resultaten är framtagna med avseende på draghållfastheten.

4.2.1 Verifierade tester

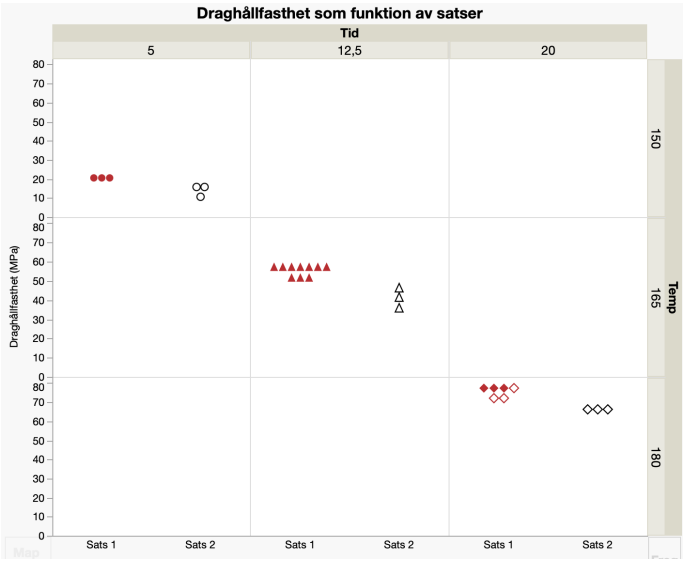
Figuren 4.11 visar resultat från de verifierade testerna med avseende på draghållfastheten, tiden samt temperaturen. På x-axeln visas vilken sats av material som plattorna framställdes från och på y-axeln visas draghållfastheten.

Färgerna på det olika satserna är kopplat till vilket tillfälle som materialet hämtades från produktionen. Den röda satsen (●, ▲, ◆, ◇) var de första briketterna som användes för att producera plattorna för det initiala faktorförsöket, sats 0. Den svarta satsen (○, △, ◇) var materialet som hämtades för det vidareutvecklade faktorförsöket, sats 1. Symbolerna var ifyllda eller ej beroende på vilket tillfälle som plattorna tillverkades. Formerna med ifylld markering (●, ▲, ◆) var skapade under det initiala faktorförsöket, medan de markörer som saknar fyllning (◇, ○, △, ◇) skapades under det vidareutvecklade faktorförsöket. Formen på markörerna representerar vilka tester som var replikat av varandra.

Resultatet från de olika testerna visar att hållfastheten skiljer sig åt beroende på vilken sats materialet är framställt från. Där materialet för det initiala faktorförsöket ger generellt högre hållfasthet.

Med mätvärdena som kommer från verifieringsplattorna testas modellen igen med hänsyn till huvudeffekterna. Med de nya testerna fås $R^2_{adj} = 0.907402$, vilket betyder att modellen förklarar 90.74%. Vilket är en minskning med 1.8124 procentenheter

från första modellen.

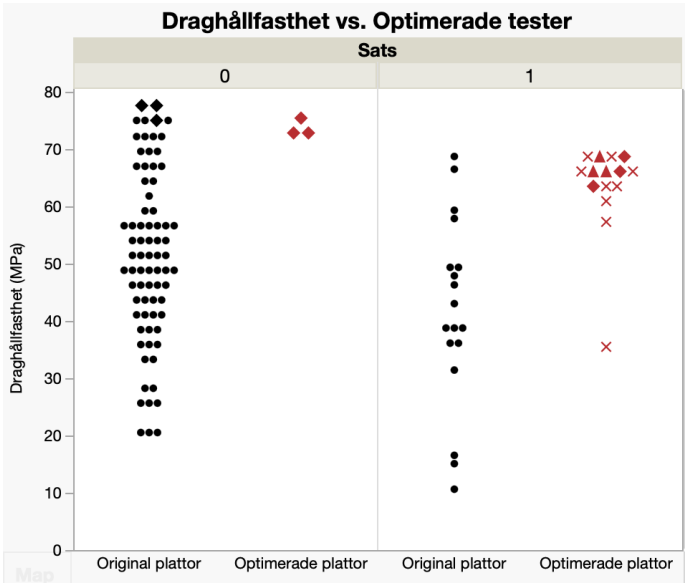


Figur 4.11: Draghållfastheten för verifieringsprover som funktion av tid, temperatur och sats

4.2.2 Optimerade tester

Med de nya mätvärdena från optimerade testerna gav den nya modellen följande R^2 värden, $R^2 = 0.816479$ och $R^2_{adj} = 0.80867$. Det betyder att den ny modellen förklarar ungefär 80,87% av responsens variation. Det är en minskning på ungefär 11.7 procentenheter jämfört med initiala faktorförsöket.

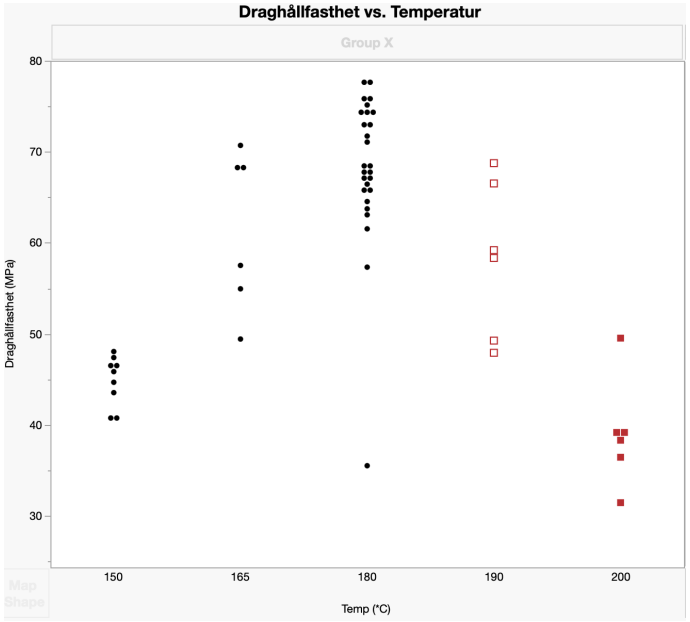
I figuren 4.12 så visas en jämförelse mellan original plattorna och de optimerade plattorna i förhållande till draghållfastheten. De optimerade plattorna är röda i färgen (◆, ▲, ×) och formen på de identifierar vilka plattor som är replikat. Romberna (◆, ◆) som visas i bilden är de optimerade parametrarna (180/20/400/150) som i tidigare faktorförsök gav högst hållfasthet. Plattorna är även indelade i grupper beroende på vilken sats de tillhör där sats 0 är den sats material som hämtades för det initial faktorförsöket och sats 1 är den sats som hämtades för den verifierande. Det syns en skillnad i satserna på deras hållfasthet med likadana parametrar. Där sats 1 ger generellt lägre hållfasthet än sats 0. För att undersöka hur satsen påverkar modellen läggs typen av sats som en ytterligare faktor i programmet. Detta ger en ny R^2_{adj}=0.898091 och R^2=0.903291, vilket är en tydlig ökning.



Figur 4.12: Jämförelse av optimerade i förhållande till draghållfastheten

4.2.3 Tester inom ökat temperaturintervall

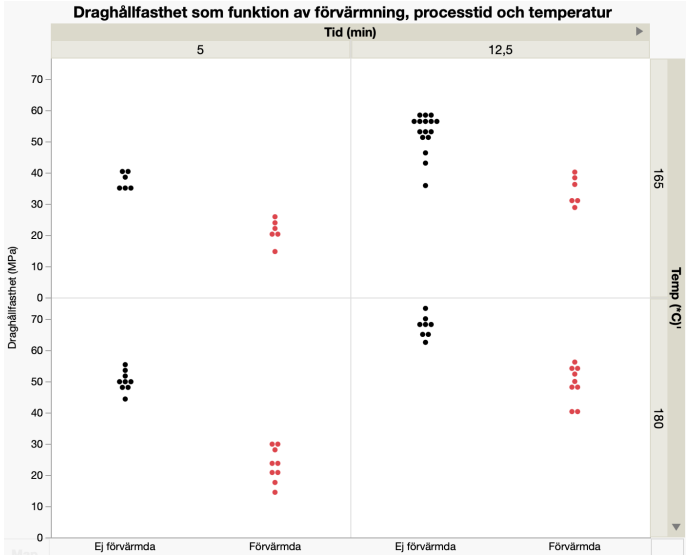
Hur det ökade intervallet på temperaturen gav för draghållfastheten visas i figur 4.13. Där 190 °C (□) och 200 °C (■) indikerar att en högre temperatur än 180 °C har negativ påverkan på hållfastheten. Men programmet anser att det är för få mätvärden för att kunna förklara och helt säkerställa att det är just den höga temperaturen som ger den lägre hållfastheten. Modellen kan endast förklara 70% av variationen när höga temperaturer är med i temperatur intervallen, vilket är en minskning på ungefär 20 procentenheter från initiala faktorförsöket. Alla proverna som visas i figuren har en max tid på 20 minuter.



Figur 4.13: Jämförelse av nytt temperatur intervall i förhållande till draghållfastheten

4.2.4 Tester med förvärmning

Draghållfastheten i förhållande till förvärmning, processtid och temperatur visas i figur 4.14. Förhållandet mellan de förvärmda och ej förvärmda plattorna gentemot hållfastheten tyder på en skillnad. För en processtid på 5 min så visar de förvärmda plattorna en betydligt lägre hållfasthet än de ej förvärmda. En processtid på 12,5 min visar liknande resultat. Det bör noteras att de förvärmda och det ej förvärmda plattorna kommer från två olika satser som kan påverka resultatet.



Figur 4.14: Draghållfasthet för förvärmda och ej förvärmda prover

Förvärmningsplattorna hade luftbubblor på ovansidan när de plockades ur formen med hög temperatur. I figur 4.15 syns luftbubblorna tydligt på platta -97 med inställningarna 180/12.5/700/200. De plattor som genomgick förvärmning uppvisade även på ojämn smältning genom plattans tjocklek, se figur 4.16. Plattorna hade en tendens att smälta snabbare på undersidan, därav på ovansidan och på kanterna, medan mitten av plattan inte hann smälta igenom fullständigt.

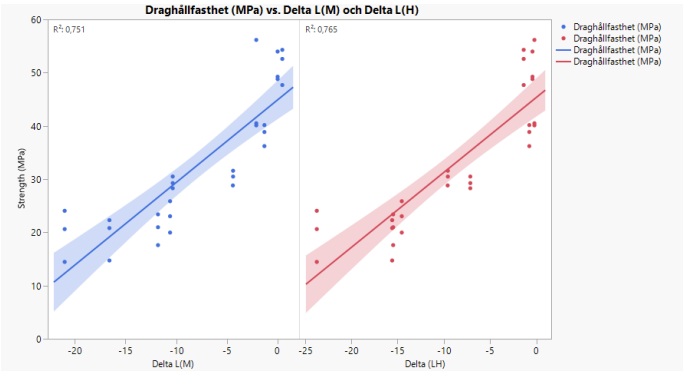


Figur 4.15: Tre av förvärmningsplattorna (-95, -96, -97)



Figur 4.16: Fyra av förvärmningsplattorna från sidan (från toppen: -94, -95, -96, -97)

Grafen i 4.17 visar en positivt samband mellan draghållfastheten och hur stor differens det är på fram- och baksida. När ΔL(H) är liten så är generellt draghållfastheten högre. Ytstrukturen varierade även på dessa plattor gentemot de från det initiala faktorförsöket. Vissa av plattorna såg fortfarande frasiga ut och det syntes en skillnad mellan kanterna och mitten på plattan där det hade smält ojämnt. Det var en del plattor som inte såg homogent smälta ut på ovansidan exempelvis platta -95 och -96. Platta -90 med inställningarna 180/5/400/200 hade en differens på 20.98 och 23.74 i L(H) och L(M) från färganalysen, det tyder på en skillnad mellan färgen i hörnen och i mitten.

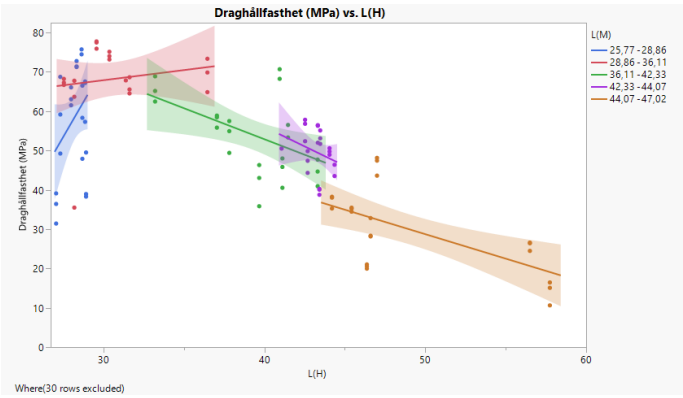


Figur 4.17: Draghållfastheten (MPa) vs Delta L(M) och Delta L(H)

Den processparametern som visade störst påverkan på förvärmningen var tiden, med ett högt *logworth*-värde samt en stark signifikans, se Appendix C.8.

4.2.5 Färganalys med verifiering och optimering

För vidare förståelse om färganalysen gjordes en ytterligare graf med L(H) och L(M) i förhållande till hållfastheten som syns i figur 4.18. Grafen visar en del områden som ligger över varandra, som det gröna och lila. Vilket tolkas som L(H) värden i det spannet visar samband med båda de L(M) spannen. Den blåa linjen har en skarp lutning som indikerar på att L(H) har stor samverkan med hållfastheten i det spannet.



Figur 4.18: Sambandet mellan L(M) och L(H) i förhållande till draghållfastheten

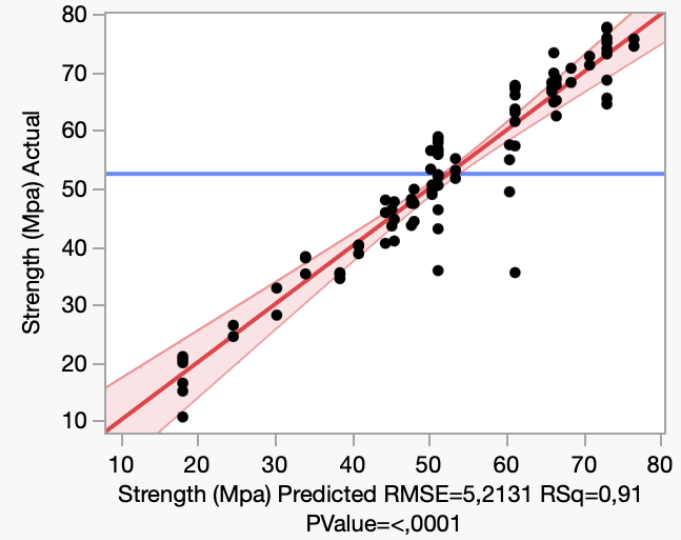
4.2.6 Prediktiva modeller för mekaniska egenskaper

De predikterade modellerna baserades på resultaten från det initiala och vidareutvecklade faktorförsöken. De plattor med utökat temperaturintervall samt de som är förvärmda ingår inte i de predikterade modellerna.

I figur 4.19 visas förhållandet mellan de verkliga värdena för hållfastheten på y-axeln och det predikterade värdena på x-axeln. Denna analys tar hänsyn till alla dragtester som genomförts, de representeras som punkter i bilden och den röda diagonalen beskriver den predikterade modellen. Det ideala förhållandet hade varit

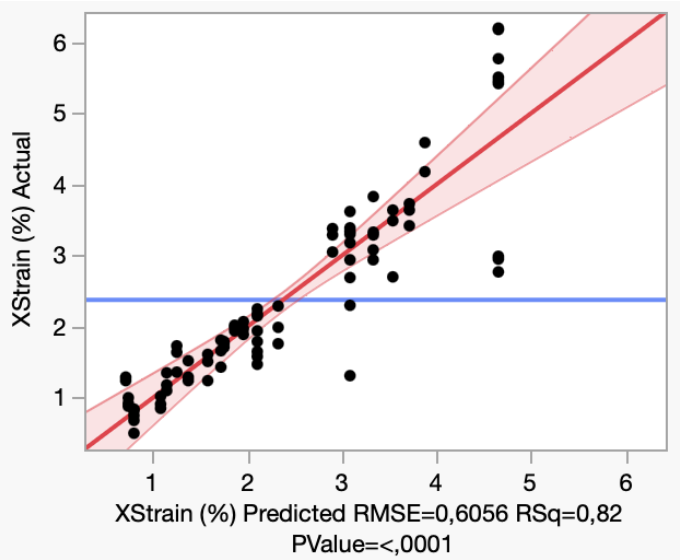
att alla punkterna ligger på diagonalen, i detta fall så ligger många av punkterna väldigt nära vilket innebär att modellen predikterar resultatet bra. Värdet RMSE visar ett prediktionsfelet för modellen på $\pm 5,2$ MPa och RSq=0,91 som står för att modellen förklarar 91% av variationen för hållfastheten. Sambandet visar sig även vara statiskt signifikant med ett *P-värde* ≤ 0.001.

Modellen innehåller flera replikat vilket innebär att programmet kan tolka modellen mer noggrant. *Lack of fit* är ett sätt att förklara modellens anpassningsbarhet, $P_{Lack\ of\ fit}$>0.05 är önskvärt. För draghållfastheten och huvudfaktorerna (med deras interaktioner) ger ett $P_{Lack\ of\ fit}$ på 0.1194. Vilket indikerar på att JMP inte har bristande data som försämrar modellanpassningen.



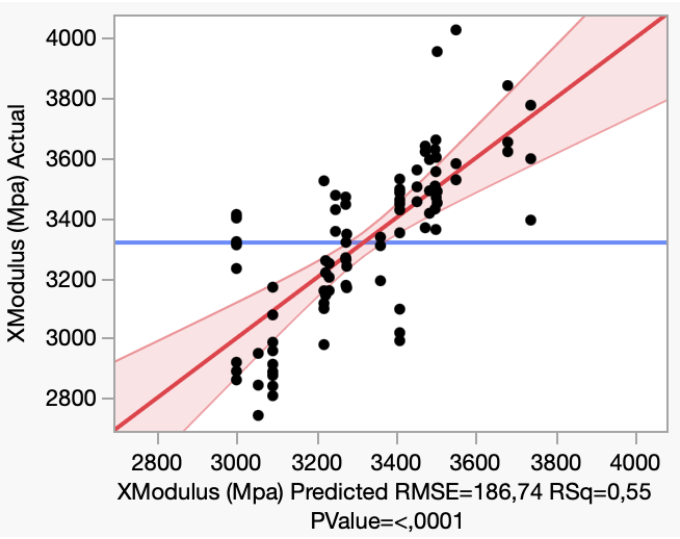
Figur 4.19: Predikterad modell för draghållfastheten

Figur 4.20 visar töjningens förhållande mellan de verkliga resultaten och den predikterade modellen. Den predikterade töjningen har ett RMSE på 0,6056 vilket innebär ett prediktionsfel uppemot $\pm 0,61$ MPa. Modellen visar att variationen kan förklaras till 82% och sambandet visar sig vara statisk signifikant med *P-värdet*. Töjningen har ett $P_{Lack\ of\ fit}$ på 0.3345, programmet anser att mätvärdena har en okej modellanpassning.



Figur 4.20: Predikterad modell för töjningen

Slutligen så visar figur 4.21 förhållandet mellan de verkliga resultaten och den predikterade modellen för elasticitetsmodulen. Där RMSE visar ett prediktionsfel som i genomsnitt befinner sig $\pm 186,74$ MPa från den predikterade modellen. Värdet för RSq visar sig vara 0,55 vilket säger att modellen förklarar variationen för responsen med 55% och *P-värde* visar sig vara statiskt signifikant. $P_{Lack\ of\ fit}$ är 0.0145, då den är under 0.05 så anser JMP att modellen inte kan anpassa sig bra. Det betyder att modellen har bristande information eller för varierande svar.

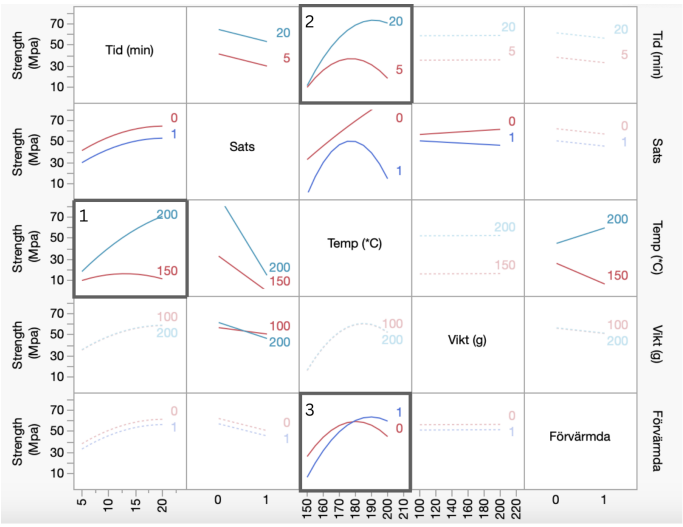


Figur 4.21: Predikterad modell för elasticitetsmodulen

4.3 Optimerade parameterinställningar

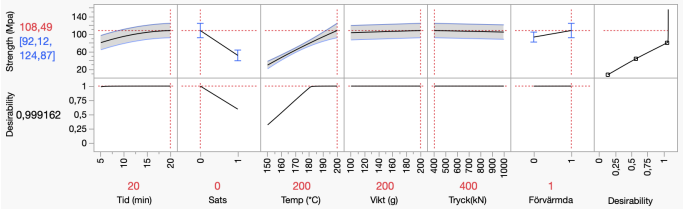
Resultaten från alla tester som har genomförs visas i profilerna för interaktionseffekter för att illustrera samverkan mellan de olika parametrarna, se figur 4.22. Graferna

för samverkan mellan temperatur och tid tyder på en koppling. I ruta 1 där temperaturen är konstant och tiden är rörlig ökar grafen med 200 °C mer kraftigt än grafen på 150 °C. I ruta 2 så är tiden är konstant och temperaturen är rörlig, där syns det att en tid på 5 min når ett maximum för hållfastheten vid ca 175 °C. För tiden på 20 min så uppnås detta maximum vid ca 182 °C därav så minskar hållfastheten igen. I ruta 3 så visas de förvärmda plattorna som betecknas som nummer 1 ge en högre hållfasthet än det ej förvärmda plattorna nummer 0 vid en hög temperatur. Vid en lägre temperatur så är det tvärt om, de ej förvärmda plattorna visar sig vara mer hållfasta. Det bör finnas i åtanken att de ej förvärmda plattorna innehåller två olika satser av materialet medan de förvärmda plattorna enbart innehåller en.



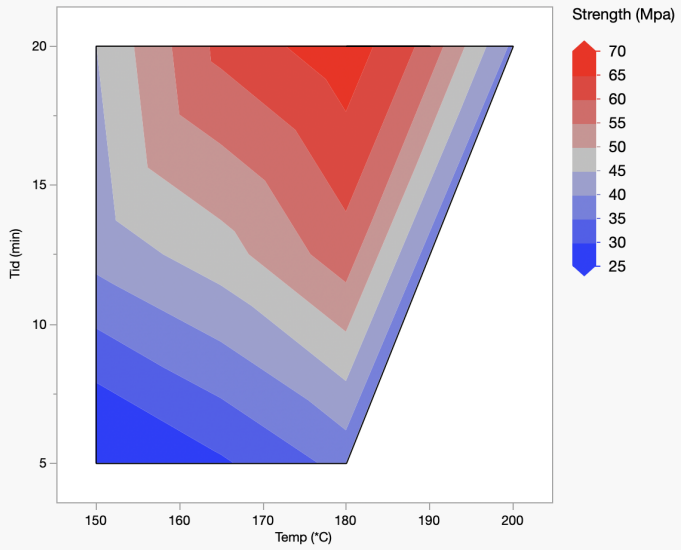
Figur 4.22: Samverkan mellan de olika parametrarna efter alla tester som genomförts

Den maximerade parameterkombinationen för högsta draghållfastheten presenteras i figur 4.23. Där visas den högsta hållfastheten ligga på ca 108 MPa, där tid, temperatur och vikt är på de högsta inställningarna. Vikt och tryckkraft ligger nästan på en horisontell linje, det tyder på att de parametrarna inte påverkar resultatet mycket. Det är en stor skillnad mellan sats 0 och sats 1, den negativa lutningen indikerar på att sats 1 ger lägre hållfasthet än sats 0. Förvärmning har en positiv lutning vilket tyder på att plattorna gynnas av att förvärmas. Då graferna för tid, vikt och tryckkraft har ett större skuggat område betyder det att JMP inte kan med säkerhet uppskatta exakt vad responsen får för värde, men det är en uppskattning.



Figur 4.23: Maximerad önskvärdhet på hållfastheten

I figur 4.24 vissas de område som uppvisar högst draghållfasthet gentemot temperatur och tid, vilka var de parametrar som hade högst signifikans för hållfastheten. Det röda området är det med högst hållfasthet.



Figur 4.24: Konturdiagram för draghållfasthet

4.4 Resultat från mätsystemanalys

Utifrån data som samlades in från de mätningar som genomfördes visar *Variance Components for Gauge R&R*, i Appendix D.6 och D.7, att en väldigt stor del av variationen på L-värdena beror på den faktiska skillnaden mellan proverna och inte på mätsystemet.

Hela 99,42% av variationen av L(M) beror på plattorna. Repeterbarheten, avvikelsen av att samma operatör mäter samma platta, ligger på 0,48%. Reproducerbarheten, olika operatörer mäter samma platta, ligger på ca 0,1%. Samt variationskomponenten *Gauge R&R* visar en total varians på 0,58%. Variationen av värdena för L(H) beror 98,22% på plattorna. Där repeterbarheten ligger på 1,47% och reproducerbarheten på 0,31%. Variationskomponenten för *Gauge R&R* visar en varians på 1,78%.

Diagram som visar spridningen mellan testerna för L(M) och L(H) samt de olika operatörerna illustreras i figur D.1 och figur D.3 i Appendix. Standardavvikelsen i mätsystemanalysen för L(M) gav *Gauge R&R* ett värde på 7,6% se figur D.2 och för L(H) så resulterades ett *Gauge R&R* värde på 13,3% se figur D.4 i Appendix.

5

Diskussion

I detta avsnitt diskuteras resultaten från de olika tester och analyser som genomförts på plattorna. Avsnittet inkluderar även potentiella felkällor och osäkerheter samt rekommendationer för ett fortsatt arbete.

5.1 Processparametrarnas påverkan på draghållfastheten

De olika processparametrarna temperatur, tid, tryckkraft och vikt påverka draghållfastheten i olika omfattning, där temperatur och tid visade starkast samband kopplat till de mekaniska egenskaperna.

5.1.1 Huvudeffekterna

Vid analys av enbart huvudeffekterna så visar temperatur och tid på tydligt samband med draghållfastheten, se figur 4.8. Temperaturen har högst *logworth* vilket tyder på stark signifikans i denna analys, därefter kommer tiden som också uppvisar hög signifikans. Både vikten och tryckkraften är också signifikanta men inte i lika hög grad. Variationen i data kan förklaras till ungefär 92% vilket är väldigt bra, då det är önskvärt att ligga över 90%. I prediktionsprofilen 4.8 kan vi se att temperatur, tid och vikt har positiva samband med hållfastheten. Det innebär vid högre värden på parametrarna inom de intervall som har studerats gynnas hållfastheten. Däremot så visar tryckkraften på en negativ påverkan.

Att temperatur och processtid hade högst påverkan på det mekaniska egenskaperna kan tyda på att hållfastheten är starkt kopplat till smältan på plattorna. Vid en högre temperatur och tid indikerar resultatet på att plattorna hinner mjukna och smälta mer. Det kan göra materialet mer homogent, då diffusionen ökar och porerna i plattorna kan minska , samt att smältan gör molekylbindningarna starkare. Att trycket hade en negativ påverkan på hållfastheten kan tyda på att materialet pressades för hårt. Om materialet komprimerades för hårt kan det ha påverkat spridningen av värmen och därav påverkat plattans smälta. Viktens positiva påverkan på hållfastheten kan bero på starkare molekylbindningar, där en större mängd material bidrog med bättre kontaktytor mellan partiklarna. Det kan även bero på att materialet blev mindre poröst. Resultatet var däremot lite oväntad då den större mängd material hade kunnat resultera i en mer ojämn smälta i plattan och därav

påverkat hållfastheten negativt.

5.1.2 Interaktionseffekterna

Huvudparametrarna visade inte stor interaktionseffekt mellan varandra, se figur 4.9. Temperaturen och tiden interagerar inte med varandra men har en stor samverkanseffekt. Detta är antagligen för att både temperatur och tid har en stor individuell effekt på draghållfastheten. Det kan också tolkas med hjälp av figur 4.22 att tiden har en större påverkan på hållfastheten när temperaturen är 200 °C. Medan vid 150 °C har tiden inte lika stor effekt på hållfastheten. Detta kan bero på att plattan kräver högre temperatur för att kunna smälta. I figuren kan det antas att draghållfastheten har ett maximum vid 190 °C när tiden är 20 minuter, men vid 170 °C när tiden är 5 minuter. Det tyder på att vid hög temperatur så krävs det även längre processtid för att kunna uppnå de högre värdena för draghållfastheten.

Resultatet kan tyda på att det finns en interaktionseffekt mellan temperaturen och de förvärmda plattorna, se figur 4.22. Vid en temperatur på över 180 °C har temperaturen en positiv inverkan på hållfastheten för de förvärmda plattorna.

5.2 Utvärdering av verifierings- och optimeringstester kopplat till satsvariation

Syftet med verifieringstesterna var att skapa underlag för att kunna bedöma repeterbarheten och reproducerbarheten för plattorna. De optimerade testerna skulle undersöka om det fanns inställningar som var mer fördelaktiga för hållfastheten. För de två olika faktorförsöken användes olika satser av materialet H100. Satserna kommer från två olika produktionstillfällen av materialet.

Resultaten mellan originalplattorna och verifieringsplattorna från det vidareutvecklade faktorförsöket visade på skillnader i hållfasthet. Alla verifieringsplattorna gav ett sämre resultat för hållfastheten, se figur 4.11, skillnaderna kan tyda på variation i materialet eller i produktionsprocessen. Det togs fram fyra verifieringsplattor i det vidareutvecklade faktorförsöket där en av plattorna gjordes med material från första satsen och de övriga tre kom från den andra satsen. Den optimerade verifieringsplattan skapad med sats 0, ◆ i figur 4.12, presterade bättre än de andra optimerings plattorna. Genom att jämföra med en platta som hade samma inställningar men med material från sats 1 visas det att draghållfasthet medelvärdet var 7.88 MPa lägre än den med sats 0.

Det indikerar att det inte är en stor skillnad i produktionen från de olika tillfällena, utan att det troligtvis beror på en skillnad i materialet. Under en observation av briketterna från den andra satsen kunde plastbitar påträffas i några av briketterna, se exempel i figur 5.1. Dessa plastbitar kan ha påverkat resultatet för hållfastheten, bindningarna kan ha försvagats av skräpet och svaga punkter samt defekter skapats i materialet. Alternativt att den andra satsens sammansättning skiljde sig lite under beredningen vilket kan ha påverkat material egenskaperna.



Figur 5.1: En brikett från den andra satsen med påträffad plastbit i sig

För de optimerade plattorna kunde variationen förklaras bättre från det initiala faktorförsöket än i den vidareutvecklade. Det kan återigen bero på variation i materialet eller i produktionsprocessen. När satsen tas med som en faktor i analysen kunde JMP förklara variationen bättre, vilket tyder på att det finns en skillnad mellan de olika satserna. Resultaten från de optimerade plattorna blir därav svårare att jämföra med proverna från den initiala faktorförsöket.

Utifrån reflektionen ovan kan ett tydligt samband mellan sats och draghållfasthet tolkas. Beroende på vilken sats som använts för tillverkning av plattorna påverkas resultatet från dragningstesterna signifikant.

5.3 Förvärmningsplattornas påverkan på processtiden

Parameterinställningen tid visade sig vara starkt signifikant för draghållfastheten. Förvärmning av plattor var därav intressant att undersöka, främst för att se om det hade kunnat möjliggöra en kortare processtid för plattorna i den termiska pressen.

Resultaten av det förvärmda plattorna från figur 4.14 visar på att förvärmningen gav lägre hållfasthet än de plattor som inte var förvärmda. Detta resultat ska beaktas med försiktighet då det inte är säkert att det beror på förvärmningen eftersom det har visat sig att det är en skillnad i det olika satserna av materialet. Den data som analysen har skapats utifrån innehåller båda satserna. De ej förvärmda plattorna är från det initiala faktorförsöket därav den första satsen (Sats 0) och de förvärmda plattorna är enbart producerade utifrån den andra satsen (Sats 1). Det är den andra satsen som har visats sig ha sämre material egenskaper från verifieringstesterna så därav kan inte en fullständig analys genomföras.

Förvärmningen resulterade i stora färgskillnader mellan plattornas ovansida och undersida. Vid en minskad färgskillnad mellan sidorna så tenderade hållfastheten att öka. Tiden är faktorn som påverkar färgskillnaden allra mest, vilket också är en av de parametrar som påverkar hållfastheten i förvärmda plattor mest. Plattorna hade även luftbubblor på ovansidan samt visade på ojämn smälta genom plattorna. Luftbubblorna beror troligtvis på att plattorna värmdes upp till en hög temperatur och därefter inte genomgick en nedkylning. De bildades förmodligen när locket plockades bort för att plattan inte hade hunnit sätta sig ordentligt innan. Plattorna visade ojämn smälta där botten på plattan var mörkare än ovansidan men framförallt så visade sig kärnan av plattorna vara väldigt ljus, många plattor visade även på en porös kärna. Detta kan indikera på att plattorna inte är fullständigt genomsmälta vilket kan påverka hållfastheten negativt.

För att korta ned processtiden kan förvärmningen definitivt vara ett bra alternativ och något att se över. Förvärmningen fick, som tidigare, temperatur och tid som mest signifikanta processparametrar för draghållfastheten speciellt tid har en avsevärd hög signifikans. Parametrarna vikt och tryck visade på negativa samband och därav hade med fördel hållits till de lägre inställningarna.

5.4 Samband mellan färganalys och draghållfasthet

För att kunna ha en visuell koppling till om en platta har en bra hållfasthet eller inte vill man kunna se en koppling mellan färganalysen och draghållfastheten.

L-värdenaa visade sig vara signifikanta och hade en relativt god samverkan till hållfastheten. Även om det var en liten skillnad så hade ändå L(H) en större *logworth* och en större R^2 än L(M). Detta kan bero på att L(H) representerar hörnen på plattorna. Genom att referera tillbaka till figur 4.1 och 4.2 kan den visuella skillnaden synas på plattan direkt. Till exempel platta -59 är mitten mörkare än hörnen, det kan indikera att plattan inte har hunnit smälta fullständigt. Platta -62 har en mer enfärgad yta som kan tyda på att hela plattan har en bättre genomsmältning och skulle kunna innebära en mer homogen struktur.

Analysen kopplat till färgparametrarna grönt/rött (a) och gul/blå (b) visar på signifikans, men stödet för att se en kopplingen till hållfastheten är inte så stark. Plattorna inte är särskilt röda eller gröna därav är det rimligt att a inte visar på en tydlig koppling till hållfastheten då den förmodligen inte varierar mycket. De ljusare plattorna hade mer av en gulare nyans i sig som visas i figur 4.1. Färgparametrarna a och b kan ge en mer nyanserat samband kopplat till hållfasthet men det hade krävts fler tester och en mer omfattande analys kring det. I detta arbete blev därav L-värdena mer intressanta att lägga fokus på.

5.5 Optimerade testerna

Som nämndes ovan presterande inte de optimerade plattorna som det hoppades på, vilket troligen beror på satserna. Men det som är värt att diskutera är att jämförelse med de andra plattorna med samma sats så presterade de bra. De visade även bättre hållfasthet än plattorna med de högsta temperaturerna. Optimerings testningen tycks bekräfta hypotesen och tanken men svårt att jämföra med första testningen på grund av satserna.

5.6 Prediktiva modeller och optimering av parameterinställningar

I resultatet kan slutsatsen dras att modellen till draghållfasthet och töjning går att lita på. Men att elasticitetsmodulen har brister i antingen repeterbarheten eller i antal tester. Då både *lack of fit* och R^2 hade låga värden är underlaget för lågt för att kunna dra slutliga kopplingar.

Temperatur och tid påverkar varandra väldigt mycket som bevisas i resultatet. Detta var något som även syntes i första testningen och avgjorde hur de optimerade plattorna skulle bli. Högre temperatur och hög tid visade sig vara absolut bäst för draghållfastheten. Men vid extra höga temperaturer, 190 °C och 200 °C, blev den lägre. Detta var önskvärt resultat då vid dessa höga temperaturer kan plasten bilda en saltsyra som kan förstöra pressen och göra det farligt att arbeta med. Men då det endast gjordes fyra tester med de extra höga temperaturerna kan inte den parametern helt uteslutas, men resultaten tyder på att det är en topptemperatur på ungefär 180 °C. Däremot när det gjordes en maximerad önskvärdhet på hållfastheten, som syntes i 4.23, visade temperaturen en linjär graf. Men med det skuggande partiet över linjen visar det att programmet inte helt kan utesluta att linjen kanske inte är helt linjär.

5.7 Analys av mätsystemets tillförlitlighet

Mätsystemanalysen i form av färgmätning genomfördes på 7 av plattorna från processen för att ta reda på hur trovärdig data är och om processen är repeterbar och reproducerbar. Om färgmätningarna visar sig vara tillförlitliga och samband med draghållfastheten kan identifieras, så hade eventuellt färgmätning varit ett bra alternativ som verifieringsverktyg för att uppskatta materialets hållfasthet.

Under genomförandet av mätsystemanalysen sparades tre olika mätvärden från varje test (L ,a och b), de värdena beskriver färgen på plattan. Testerna genomfördes på två punkter på plattans baksida, det första testet togs i mitten och det andra togs uppe i det högra hörnet på plattan. Varför två tester togs på vardera platta var för att också kunna identifiera skillnaden på färgen i mitten och på hörnen.

Analysen av testerna i första punkten utfördes med mätvärdet L. Där *Gauge R&R*

hade en standardavvikelse på 7,6% av den totala variationen, det är bra standardavvikelsen ska önskvärt ligga under 10%. Det tyder på att systemet är tillförlitligt. Därav kan *Variance Components for Gauge R&R* analyseras för att ta reda på fördelningen av den totala variationen och där låg variationskomponenten *Gauge R&R* på 0,58% som kopplas till mätsystemet. Ungefär 98% beror på skillnaderna mellan de olika plattorna, se bilaga D.6. Det innebär att mätsystemet är väldigt bra, den största variationen kommer från plattorna vilket den bör göra.

För testet som utfördes i punkt två så visar *Gauge R&R* standardavvikelsen på 13,3% vilket är högre än fösta testpunkten men resultatet är fortfarande acceptabelt för spridningen. I *Variance Components for Gauge R&R* visade variationskomponenten *Gauge R&R* ligga på 1,78% för mätsystemet, det är fortfarande lågt vilket är bra. Den största variationen kommer fortfarande från skillnaden mellan plattorna, se bilaga D.7.

Mätsystemanalysen visar att variationen i mätningarna verkar påverkas av L-värdenas nivå. I framtida arbeten kan det vara fördelaktigt att överväga om L-värden kan behandlas på ett sätt som ger en jämn spridning över hela skalan.

Sammanfattningsvis visar båda mätsystemanalyserna bra resultat. Den absolut största variationen beror på skillnaden mellan plattorna och mätfelen var låga både för instrumentet och mellan operatörerna. Detta indikerar på god repeterbarhet och reproducerbarhet, mätsystemet visade sig vara stabilt och tillförlitligt.

5.8 Felkällor och osäkerheter

Detta arbete involverar många praktiska moment, vilket medför en risk att få defekter och variation i resultatet på grund av den mänskliga faktorn. Flera mätningar på briketterna och plattorna genomfördes med hjälp av ett skjutmått, mätningarna försöktes genomföras så konsekvent som möjligt men det kan förekommit mätfel under mätningarna.

Materialet och provberedningen har sina osäkerheter. Briketterna som användes under faktorförsöken var från två olika satser, där ena satsen visade sig innehålla små plastbitar. Briketterna kontrollerades så de inte innehöll någon synlig bit plast innan pressningen, men risken finns att mindre fragment kom med. Hur mycket dessa bitar påverkade resultatet är inte säkert då de försöktes undvikas så gott de gick.

Provberedningen av briketterna utfördes i sticksåg och för mer precision så användes en skrapa för att ta bort det resterande spånet på briketten för att hålla sig inom en tolerans på ± 5 gram. Den manuella provberedningen gav en tjocklek som varierade beroende på mätpositionen på yta av briketten. Densiteten varierade också mellan de olika briketterna från samma sats, även när vikten var den samma så varierade tjockleken. Den varierande tjockleken kan ha påverkat hur snabbt värmen spred sig i briketterna och där av påverkat plattornas egenskaper.

Mätningarna som genomfördes under färganalysen har sina osäkerheter då det inte finns någon tydlig instruktion på hur färgen skulle mätas på plattorna. De instruktioner som fanns var att mäta på ovansidan av plattan, en mätning till höger om mitten utanför en cirkel som hade skapats från pressen samt en mättning uppe i högra hörnet. Under det vidareutvecklade faktorförsöket genomfördes färganalysen lite annorlunda då mätinstrumentet saknades och plattorna behövde sågas isär till hundben. Då genomfördes mätningarna istället på en spillplatta, därav genomfördes inte mätningarna fullkomligt konsekvent vilket skapar en osäkerhet i resultatet på färgmätningen. FTIR-analysen hade en stor variation i resultat vid mätningar på samma platta, det gör värdera väldigt osäkra att kunna använda.

Vid provbearbetningen av hundbenen svarvades en midja ut från rektanglarna som hade sticksågats fram. För att få en midja som följde mått enligt standard så skapades en fixtur. Under svarvningen skapades vibrationer i midjan, om en större mängd material togs bort på samma gång visade det sig att midjan blev lite ojämn i bredd. Därav svarvades midjan flera gånger för minska vibrationernas påverkan på midjebredden. Även om hundbenens midjor mättes med skjutmått för att ta fram tvärsnittsarean och i ett senare steg beräkna draghållfastheten så kan vibrationerna ha påverkat midjan. Vibrationerna kan ha skapat ojämnheter och mikroskopiska sprickor som indirekt påverkar hållfastheten.

Under dragtesterna för det initiala faktorförsöket uppstod ett handhavandefel med extensometern där 12 hundben drogs, datan för elasticitetsmodulen och töjningen blev ogiltig. Elasticitetsmodulen saknade värden helt efter testerna och töjningen fick värden men de avvek från de övriga testerna så de bedömdes inte vara lämpliga att ta med i vidare analysering.

En annan osäkerhet är hur analysen av resultatet kan ha påverkats av brus samt hur mycket data som togs bort vid brusreduceringen. Både om för mycket eller för lite data plockades bort kan det påverka resultatet och de analyser som genomförts.

Tolkningen av de högra temperaturerna och förvärmningen finns det också lite osäkerheter kopplat till. De höga temperaturerna visade en negativ påverkan på hållfastheten som enskild parameter men för det optimerade parametrarna menade programmet att den ska ge positiv påverkan. Det kan bero på att det är för lite data punkter vid 190 och 200 garder för att programmet ska kunna skapa en relevant modell. Vid tillverkningen med hög temperatur så blev plattorna väldigt mörka vilket kan ha indikerat på att materialet hade brutits ner till en högre grad vilket är oönskat. Pressformen hade även som pulverliknande rester i sig som kan misstänkas vara saltsyra från nedbrytningen av plattorna. För att undvika förstöra utrustning bör inte temperaturerna på 200 °C användas i en större utsträckning. Förvärmning av formen och briketterna visade sig vara fördelaktigt för att korta ner processtiden. Däremot så hade det varit bra om det hade funnits tester från samma sats med likadana inställningar men utan förvärmning, detta för att kunna dra tydligare kopplingar mellan förvärmningen och dess påverkan på hållfastheten.

5.9 Rekommendationer vid fortsatt arbete

Vid fortsättning av detta arbete hade det varit fördelaktigt att fokusera på hur temperaturen och tiden kan optimeras eftersom de visade sig ha absolut starkast signifikans för draghållfastheten.

Eftersom det fanns ett tydligt samband att temperaturen hade en positiv påverkan på hållfastheten upp mot 180 °C, så hade fokuset kunnat ligga på att ta reda på mer exakt vilken temperatur som är mest optimal. Där följande faktorförsök hade kunnat ligga i ett smalare temperaturintervall med 180 garder som mittpunkt. Fler datapunkter kring 180 °C hade varit bra då en mer representativ modell för temperaturen och hållfastheten hade kunnat genomföras. Det hade varit värdefullt att samla in mer information om datapunkterna kring 190 °C även om den kanske inte är den mest optimala inställningen. Tester på temperaturen 200 °C bör minimeras eller undvikas helt, på grund av att materialet sannolikt hade börjat brytas ner och potentiellt saltsyra hade bildas.

Ett annat förslag till fortsatt arbete hade varit att undersöka uppsamlingen av briketter. Då satserna hade stor påverkan kan det vara fördelaktigt att får mer information om kvalitén på spillmaterialet. Undersöka andelen rent Divinycell och om eventuella biprodukter från övriga produktionen kommer med i briketterna. Detta för att få en mer repeterbara resultat under processen.

Det hade också varit bra att kolla närmare på förvärmning av plattorna då tiden visade sig vara starkt signifikant men processtiden är begränsad. De förvärmningstester som genomfördes gav ett sämre resultat i hållfasthet i jämförelse med de ej förvärmda plattorna men däremot bestod det av två olika satser av material också. Därav är det viktigt att få mer information kring förvärmningen för att se om det var förvärmningen eller de olika satserna som faktiskt påverkade resultatet negativt.

En djupare analys kring hur färganalysen fungerar som ett verifierings alternativ för hållfastheten hade också kunnat genomföras. Där en MSA med goda resultat ligger till grund för att visa på repeterbarhet och reproducerbarheten för verktyget och processen.

Testning av andra kvalitéer med en liknande metod för att skapa en bredare kunskapsbas om spillmaterialet. Detta för att i ett senare steg kunna implementera det inom andra användningsområden.

6

Slutsats

Utifrån arbetets metod och resultat har flera analyser och reflektioner genomförts för att kunna få en bättre förståelse för materialet och på processen.

Genom hela analysen syns tydligt att temperatur och tid har stor påverkan på draghållfastheten. Det finns tydlig koppling mellan dessa parametrar och hur draghållfastheten utvecklas. Men signifikansen för interaktionen mellan tid och temperaturen är inte särskilt stor. Analysen indikerar på att vid höga temperaturer som 190 °C och 200 °C blir hållfastheten sämre, även om det krävs mer testning för att säkerställa teorin. Tryck och vikt har liten påverkan på hållfastheten, där vikt har positiv- och tryck negativ effekt. I förhållande till temperatur och tid påverkar de hållfastheten väldigt lite. För hög draghållfasthet är det optimalt att ha fokus på högre värden på temperatur och tid.

Det fanns stor koppling mellan de mörka plattorna och hållfastheten. Mörkare plattor klarade dragtestet bättre än ljusa. Färganalysen av hörnen på plattorna hade större signifikans än färgen i mitten. Troligen beror det på att mörkare hörn innebär mer jämn smältning i plattan. Färganalys om b, gul/blå, var viktig men inte lika trovärdig som L-värdena. Hur röd/grön (a) plattan var svårt för modellen att hitta ett mönster, även om den var signifikant och inte slumpmässig. Färganalysen visade sig vara en bra metod för att indikera hållfastheten på plattan. Det genomfördes en MSA för att undersöka repeterbarheten och reproducerbarheten för färganalysen. Den visade goda resultat och bevisade att det är lämplig metod.

Prediktionsmodellen är trovärdig och kan förklara variationen av värdena bra inom de givna intervallen. Det som påverkar prediktionsmodellen mycket utöver processparametrarna är vilken sats som använts. Resultatet visade på sämre repeterbarhet i det vidareutvecklade faktorförsöket som förklarades med vilken sats som användes. Det gör satsen till en faktor som har stor signifikans i hur variationen av draghållfastheten blir. Prediktionsmodellen är trovärdig men satsen är en faktor som är svår att förutse om inte förarbete för kvalitetskontroll införs.

Användning av förvärmning för att korta ner presstiden för plattorna kan vara fördelaktigt. Resultat tyder på att förvärmning har en positiv effekt på hållfastheten vid kortare tid. Däremot så påverkar förvärmningen den homogena strukturen hos plattorna. Det visade en stor variation i färganalysen beroende på ovan- och undersida. Kärnan visar en indikation på porös struktur och en ojämn smältning.

För fortsatt arbete hade en utvärdering av satsernas kvalité kunna genomföras för att få mer reproducerbara process. Förslagsvis kolla över andelen rent Divinycell som hamnar i briketterna, då det påverkar draghållfastheten. Genomföra fler tester över de höga temperaturernas påverkan på resultatet, då det endast genomfördes få tester på de temperaturerna med 190 °C och 200 °C. Testa andra material kvalitéer, då endast H100 analyserades i detta arbete.

Referenser

[1] Diab group, "CORE MATERIALS AND BUOYANCY FOAMS FROM SPACE TO SEABED." [Online]. Available: https://www.diabgroup.com/

[2] Jerry Stigsson, "Divinycell Production PVC foam (intern presentation)," Tech. Rep., 2026.

[3] Nationalencyklopedin, "Polymer." [Online]. Available: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/polymer?isSearchResult=true

[4] Wikipedia, "Plast," 2 2026. [Online]. Available: https://sv.wikipedia.org/wiki/Plast

[5] Diab international AB, "Intern teknisk rapport," Tech. Rep., 2013.

[6] Naturvårdsverket, "Materialåtervinning av plast." [Online]. Available: https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/plast/materialatervinning-av-plast/?q=%C3%A5tervinning%20av%20plast

[7] CAMEC Technological Solutions, "The recovery and reuse of thermosetting plastics." [Online]. Available: https://www.camec.net/en/blog/the-recovery-and-reuse-of-thermosetting-plastics

[8] "Datasheet Divinycell H (SI-version)," Tech. Rep.

[9] ASTM international, "ASTM D638 - 22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," Tech. Rep., 2022.

[10] "What Is the PVC Calendering Process?" 1 2026. [Online]. Available: https://www.linyangpvc.com/blog-what-is-the-pvc-calendering-process.html

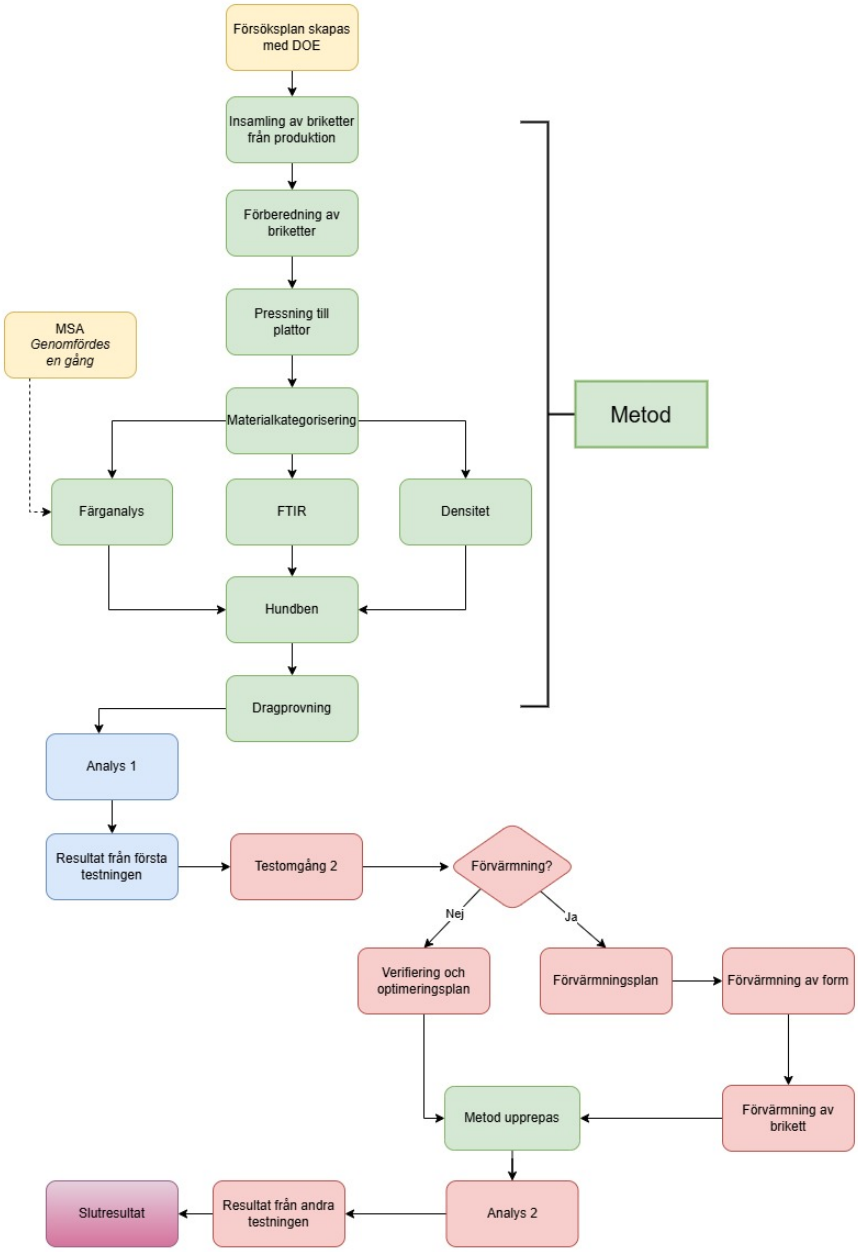
[11] JMP Statistical Discovery, "Design of Experiments." [Online]. Available: https://www.jmp.com/en/statistics-knowledge-portal/design-of-experiments

[12] Tim Mouw, "LAB Color Values / Color Spaces," 11 2025. [Online]. Available: https://www.xrite.com/blog/lab-color-space

[13] Quality-One International Discover the Value, "Gage Repeatability & Reproducibility (Gage R&R)." [Online]. Available: https://quality-one.com/grr/#:~:text=Gage%20Repeatability%20and%20Reproducibility%20(Gage%20R&R)

%20is,the%20equipment%20*%20Reproducibility%20of%20the%20appraiser

Appendix A – Processen



Figur A.1: Processkarta

Appendix B – Försöksplanering

Processsteg	Input / X	Klass	Outputs / Y
Insamling av brikett	Produktionssats	N	Förberedda briketter
Insamling av brikett	Tid sen insamling	N	Förberedda briketter
Insamling av brikett	Visuellt val	SOP	Förberedda briketter
Förberedning	Vägning	SOP	Förbestämd vikt
Pressning	Pressordning	SOP	Parameterinställningar
Pressning	Temperatur	C	Draghållfasthet
Pressning	Tid	C	Draghållfasthet
Pressning	Tryck	C	Draghållfasthet
Pressning	Vikt	C	Draghållfasthet
Pressning	Placering i form	SOP/N	Platta
Pressning	Utagning ur form	SOP	Platta
Pressning	Tid i form innan utagning	SOP/N	Platta
Materialkategorisering	Sågning/mätning/vägning	SOP	Densitet/Färganalys/FTIR
Materialkategorisering	Placering av mätinstrument	SOP/N	Mät variation
Färganalys	Kalibrering av verktyg	SOP	Färgvärden
Färganalys	Utförande	SOP	Färgvärden
Färganalys	Provyta	N	Färgvärden
Hundben	Oregelbunden fräsning	N/SOP	Förberedda prover
Hundben	Midja	SOP	Dragprov resultat
Dragprovning	Avstånd mellan munstyckena	SOP	Dragprov resultat
Dragprovning	Kalibrering av verktyg	SOP	Dragprov resultat
Dragprovning	Placering	SOP	Dragprov resultat

Figur B.1: P-map

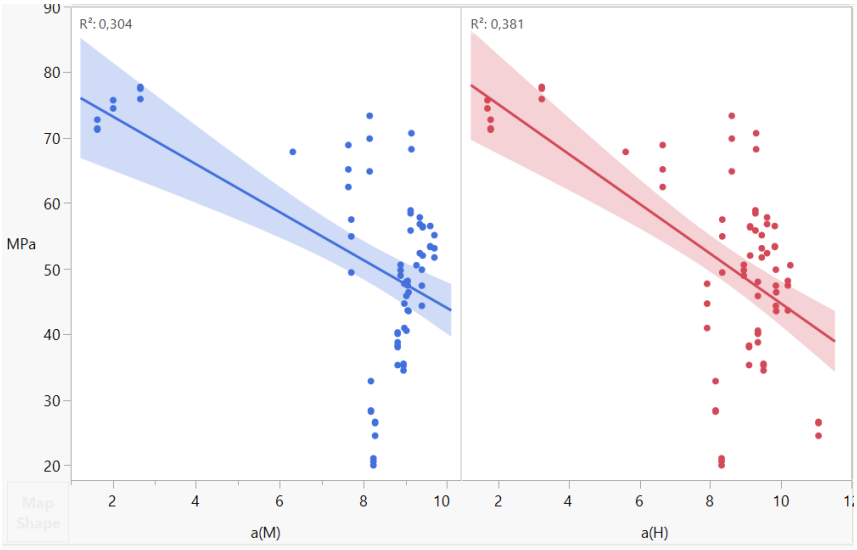
Körning	Platta	Temperatur (°C)	Tid (min)	Tryck (kN)	Vikt (g)	Anteckningar
1	940051	165	12.5	700	150	
2	940052	150	5	400	150	
3	940053	150	20	1000	150	
4	940054	165	5	1000	200	
5	940055	180	5	700	150	
6	940056	180	20	1000	100	
7	940057	180	12.5	1000	200	
8	940058	180	12.5	400	100	
9	940059	165	5	400	100	
10	940060	165	12.5	700	150	
11	940061	180	20	400	150	
12	940062	180	20	700	200	
13	940063	150	5	1000	100	
14	940064	180	5	400	200	
15	940065	150	20	400	100	
16	940066	150	12.5	700	100	
17	940067	150	12.5	400	200	
18	940068	165	20	745	100	
19	940069	150	20	1000	200	
20	940070	180	5	1000	100	
21	940071	150	5	700	200	
22	940072	165	12.5	700	150	
23	940073	165	20	400	200	
24	940074	165	12.5	1000	150	
25	940075	165	12.5	700	150	Omkörning av 940051
26	940076	180	12.5	1000	200	Omkörning av 940057

Figur B.2: Initial försöksplanering

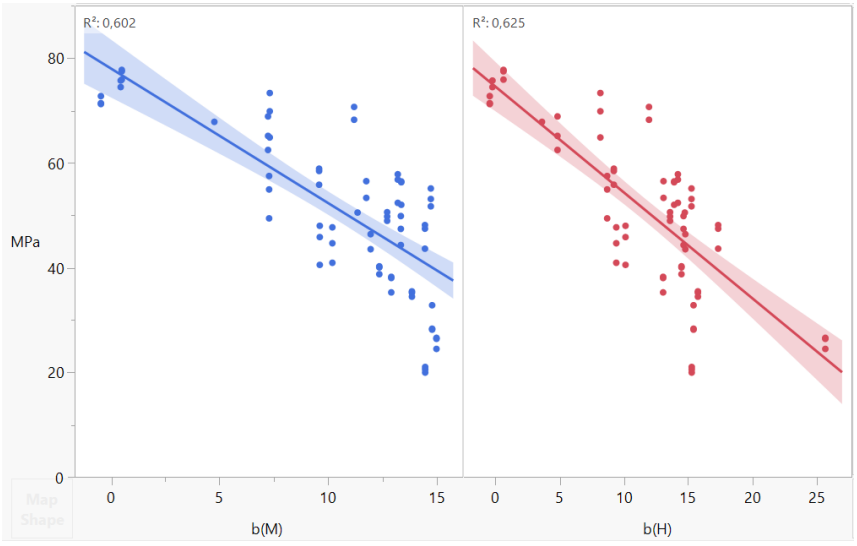
Körning	Platta	Temperatur (°C)	Tid (min)	Tryck (kN)	Vikt (g)	Anteckningar
1	940077	150	5	1000	100	Verifiering
2	940078	180	20	400	200	Optimerat test 3
3	940079	190	20	400	100	Temp 190 grader
4	940080	180	20	400	180	Optimerat test, Bayesian
5	940081	200	20	400	200	Temp 200 grader
6	940082	180	20	400	150	Optimerat test/ Verifiering
7	940083	200	20	400	100	Temp 200 grader
8	940084	180	20	400	200	Optimerat test 2
9	940085	190	20	400	200	Temp 190 grader
10	940086	165	12.5	700	150	Verifiering
11	940087	180	20	400	200	Optimerat test
12	940088	165	12.5	400	200	Förvärmd platta
13	940089	180	5	400	100	Förvärmd platta
14	940090	180	5	400	200	Förvärmd platta
15	940091	180	12.5	400	100	Förvärmd platta
16	940092	180	12.5	400	200	Förvärmd platta
17	940093	165	5	400	200	Förvärmd platta
18	940094	165	5	700	200	Förvärmd platta, tryck
19	940095	165	12.5	1000	200	Förvärmd platta, tryck
20	940096	180	5	1000	200	Förvärmd platta, tryck
21	940097	180	12.5	700	200	Förvärmd platta, tryck
22	940098	180	20	400	150	Optimerat test/ Verifiering, omkörning, brikett från batch 1

Figur B.3: Vidareutvecklad försöksplanering

Appendix C – Kompletterande data från JMP



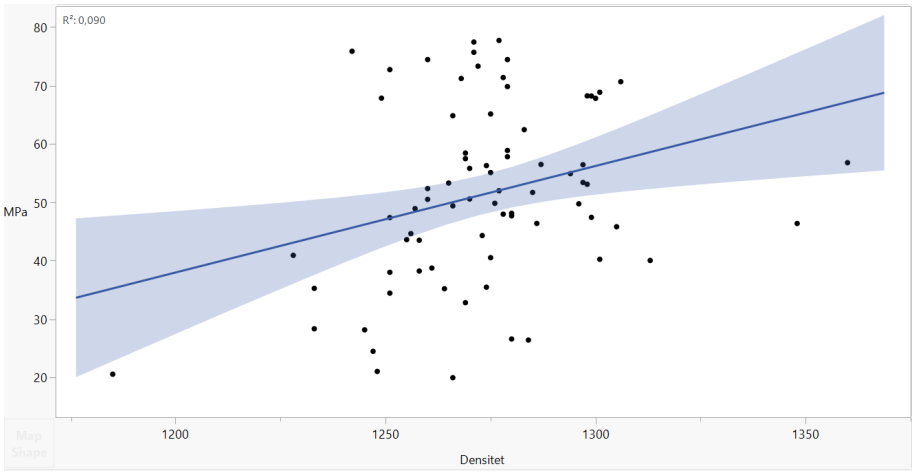
Figur C.1: a-värdena förhållande till hållfastheten



Figur C.2: b-värdena förhållande till hållfastheten

Source	Logworth	PValue
Temperatur	32,731	0,00000
Tid	27,349	0,00000
Vikt	3,734	0,00018
Tryck	2,255	0,00555
Densitet	1,483	0,03292

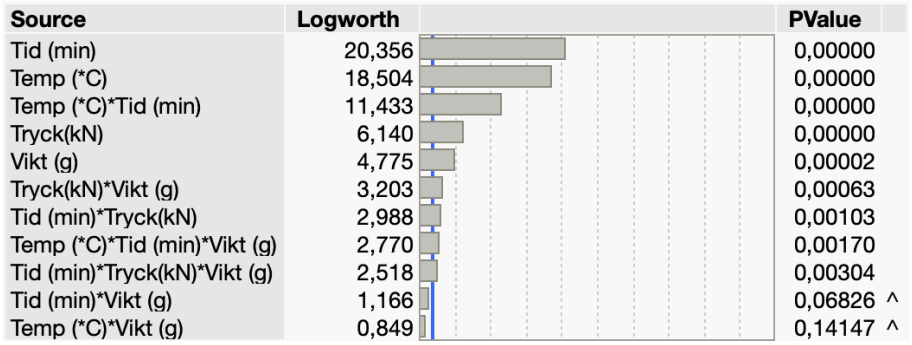
Figur C.3: Huvudfaktorernas och denisteten'logworth' på draghållfastheten



Figur C.4: Densitet fördelning längs draghållfastheten

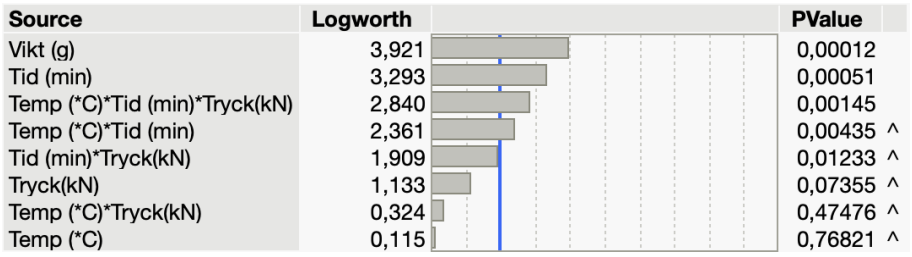
Source	Logworth	PValue
Tid (min)	24,330	0,00000
Temp (*C)	20,372	0,00000
Temp (*C)*Vikt (g)	3,913	0,00012
Vikt (g)	3,609	0,00025 ^
Temp (*C)*Tid (min)*Tryck(kN)*Vikt (g)	3,597	0,00025
Temp (*C)*Tid (min)*Tryck(kN)	2,766	0,00171 ^
Tryck(kN)*Vikt (g)	1,841	0,01444 ^
Tid (min)*Tryck(kN)	1,838	0,01452 ^
Temp (*C)*Tid (min)	1,707	0,01965 ^
Temp (*C)*Tryck(kN)	1,589	0,02578 ^
Temp (*C)*Tid (min)*Vikt (g)	1,245	0,05692 ^
Temp (*C)*Tryck(kN)*Vikt (g)	1,214	0,06112 ^
Tid (min)*Vikt (g)	0,981	0,10450 ^
Tryck(kN)	0,950	0,11222 ^
Tid (min)*Tryck(kN)*Vikt (g)	0,619	0,24044 ^

Figur C.5: Huvudfaktorernas signifikans för draghållfastheten



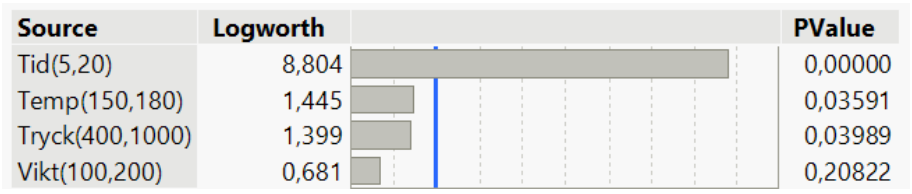
Source	Logworth	PValue
Tid (min)	20,356	0,00000
Temp (*C)	18,504	0,00000
Temp (*C)*Tid (min)	11,433	0,00000
Tryck(kN)	6,140	0,00000
Vikt (g)	4,775	0,00002
Tryck(kN)*Vikt (g)	3,203	0,00063
Tid (min)*Tryck(kN)	2,988	0,00103
Temp (*C)*Tid (min)*Vikt (g)	2,770	0,00170
Tid (min)*Tryck(kN)*Vikt (g)	2,518	0,00304
Tid (min)*Vikt (g)	1,166	0,06826 ^
Temp (*C)*Vikt (g)	0,849	0,14147 ^

Figur C.6: Huvudfaktorernas signifikans för töjningen



Source	Logworth	PValue
Vikt (g)	3,921	0,00012
Tid (min)	3,293	0,00051
Temp (*C)*Tid (min)*Tryck(kN)	2,840	0,00145
Temp (*C)*Tid (min)	2,361	0,00435 ^
Tid (min)*Tryck(kN)	1,909	0,01233 ^
Tryck(kN)	1,133	0,07355 ^
Temp (*C)*Tryck(kN)	0,324	0,47476 ^
Temp (*C)	0,115	0,76821 ^

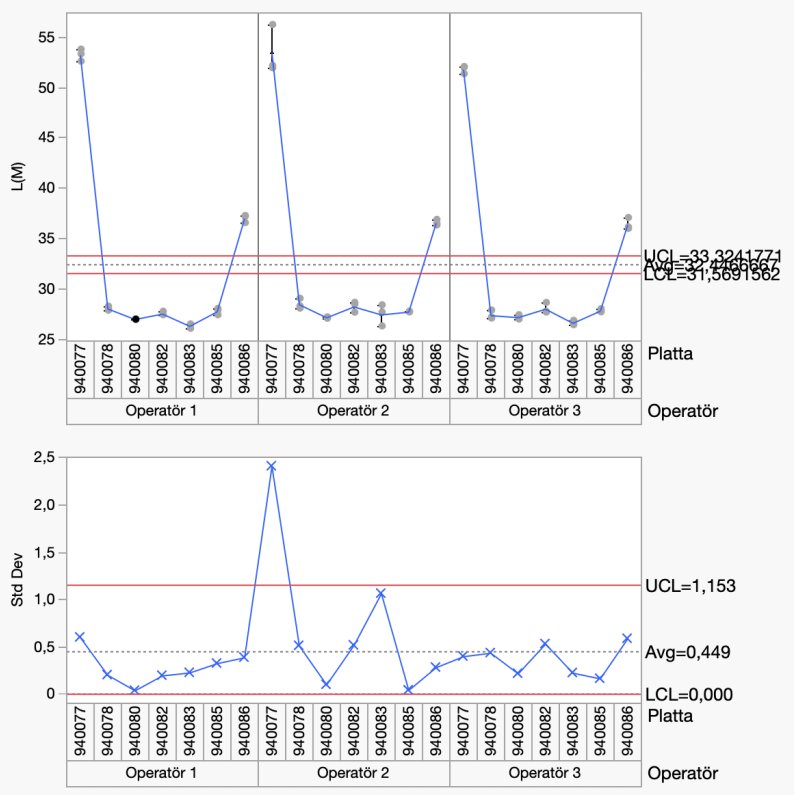
Figur C.7: Huvudfaktorernas signifikans för elasticitetsmodulen



Source	Logworth	PValue
Tid(5,20)	8,804	0,00000
Temp(150,180)	1,445	0,03591
Tryck(400,1000)	1,399	0,03989
Vikt(100,200)	0,681	0,20822

Figur C.8: Huvudfaktorernas signifikans mot hållfastheten på förvärmda plattor

Appendix D – Mätsystemanalys



Figur D.1: Mätsystemanalys för LM

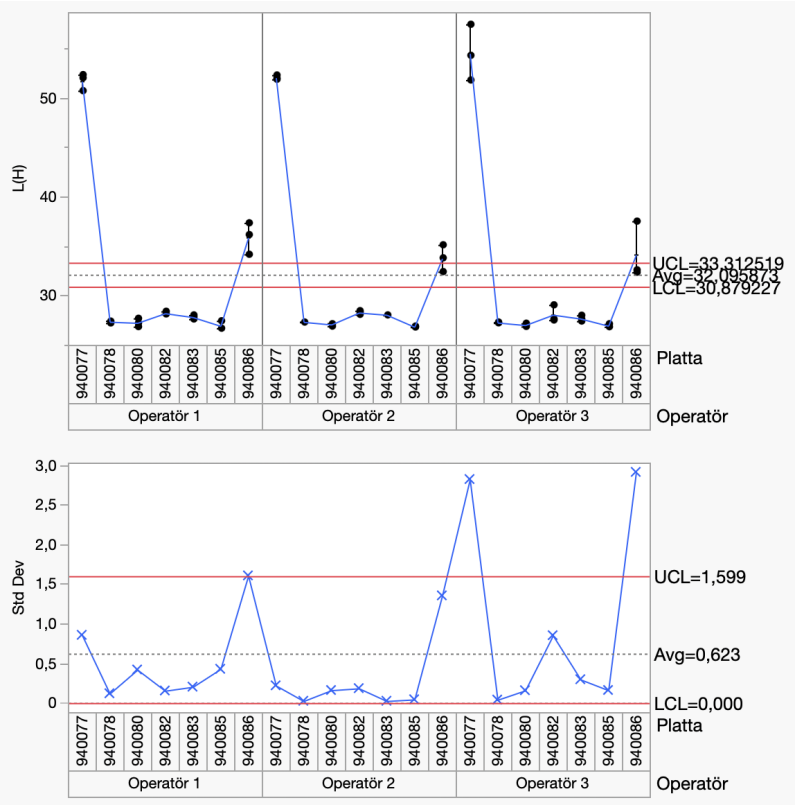
Gauge R&R

Measurement Source		Variation (6*StdDev)		which is 6*sqrt of
Repeatability	(EV)	4,012153	Equipment Variation	V(Within)
Reproducibility	(AV)	1,818005	Appraiser Variation	V(Operatör) + V(Operatör*Platta)
Operatör		1,319869		V(Operatör)
Operatör*Platta		1,250236		V(Operatör*Platta)
Gauge R&R	(RR)	4,404829	Measurement Variation	V(Within) + V(Operatör) + V(Operatör*Platta)
Part Variation	(PV)	57,568121	Part Variation	V(Platta)
Total Variation	(TV)	57,736393	Total Variation	V(Within) + V(Operatör) + V(Operatör*Platta) + V(Platta)

Summary and Gauge R&R Statistics

6	k
7,62921	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0,07652	Precision to Part Variation = RR/PV
18	Number of Distinct Categories = Floor(sqrt(2)*(PV/RR))

Figur D.2: Gauge R&R mätresultat för LM analys



Figur D.3: Gauge R&R mätresultat för LH analys

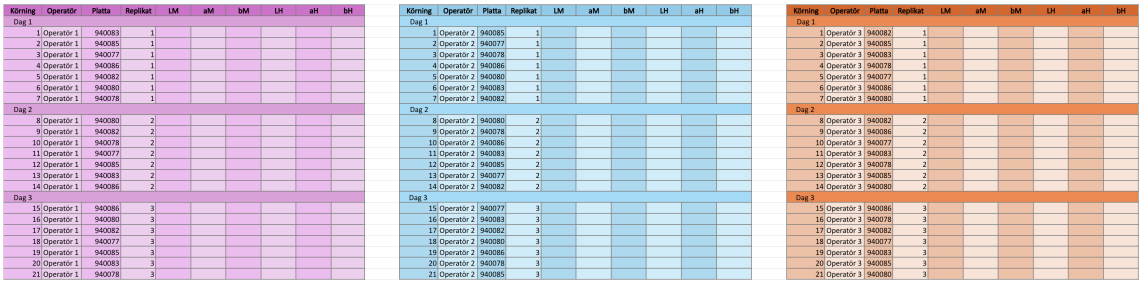
Gauge R&R

Measurement Source		Variation (6*StdDev)		which is 6*sqrt of
Repeatability	(EV)	6,037273	Equipment Variation	V(Within)
Reproducibility	(AV)	2,753224	Appraiser Variation	V(Operatör) + V(Operatör*Platta)
Operatör		1,213335		V(Operatör)
Operatör*Platta		2,471449		V(Operatör*Platta)
Gauge R&R	(RR)	6,635429	Measurement Variation	V(Within) + V(Operatör) + V(Operatör*Platta)
Part Variation	(PV)	49,326159	Part Variation	V(Platta)
Total Variation	(TV)	49,770462	Total Variation	V(Within) + V(Operatör) + V(Operatör*Platta) + V(Platta)

Summary and Gauge R&R Statistics

6	k
13,3321	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0,13452	Precision to Part Variation = RR/PV
10	Number of Distinct Categories = Floor(sqrt(2)*(PV/RR))

Figur D.4: Gauge R&R mätresultat för LH analys



Figur D.5: Design av MSA

Variance Components for Gauge R&R

Component	Var Component	% of Total	20 40 60 80
Gauge R&R	0,538959	0,58	
Repeatability	0,447149	0,48	
Reproducibility	0,091810	0,0991	
Part-to-Part	92,058015	99,42	

Figur D.6: Variationskomponenter för L(M) med Gauge R&R-analys

Variance Components for Gauge R&R

Component	Var Component	% of Total	20 40 60 80
Gauge R&R	1,223025	1,78	
Repeatability	1,012463	1,47	
Reproducibility	0,210562	0,31	
Part-to-Part	67,585276	98,22	

Figur D.7: Variationskomponenter för L(H) med Gauge R&R-analys

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS