



## Additiv tillverkning av formar för glasjutning

Karin Lundstedt, Henrik Karlsson, Jerry Eriksson, RISE  
Ulf Gotthardsson, Swerea SWECAST

RISE Rapport 7P01736

# Innehåll

<b>Innehåll</b> .....	<b>2</b>
<b>Förord</b> .....	<b>3</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Bakgrundsinformation</b> .....	<b>5</b>
<b>2 3D-printing</b> .....	<b>6</b>
2.1 Additiv tillverkning av sandform.....	7
2.2 Sand och bindemedel.....	9
2.2.1 Kvartssand.....	9
2.2.2 Furan .....	9
2.2.3 Fenol.....	9
2.2.4 Vattenglas .....	10
2.3 Sandformar .....	10
<b>3 Beläggningar</b> .....	<b>11</b>
3.1 Blacker .....	11
3.2 Aktivator .....	11
<b>4 Glasgjutning</b> .....	<b>12</b>
4.1 Glasgjutning i additivt tillverkade sandformar .....	12
4.1.1 Sandformar med blacker.....	12
4.2 Glasgjutning i gjutjärnsformar med blacker .....	14
<b>5 Analys av glasytans kvalitet</b> .....	<b>15</b>
5.1.1 Visuell bedömning .....	15
5.2 Profilometer .....	16
5.3 Mikroskop.....	16
5.4 Transmission .....	16
<b>6 Resultat</b> .....	<b>16</b>
6.1 Gjutning i additivt tillverkad sandform.....	16
6.2 Sandform applicerad med black.....	19
6.3 Gjutjärnsforma applicerad med black.....	22
6.4 Aktivator .....	22
<b>7 Slutsats</b> .....	<b>23</b>
<b>8 Fortsättning</b> .....	<b>24</b>

# Förord

Arbetet genomförs som en förstudie inom utlysningen Materialbaserad Konkurrenskraft med finansiering från Vinnova. Projektpartner är RISE Glas (projektledare) tillsammans med Målerås Glasbruk, Swerea SWECAST och Karlebo Gjuteriteknik. Avsikten med genomförbarhetsstudien är att undersöka förutsättningarna för att ta projektidén till ett större överbrygningsprojekt inom utlysningen Materialbaserad Konkurrenskraft.

## **Projektgrupp**

*RISE – Byggteknik – Glas*

Jerry Eriksson – Projektledare

Karin Lundstedt

Henrik Karlsson

*Swerea SWECAST*

Ulf Gotthardsson

Mahsa Saeidpour

*Målerås Glasbruk*

Stefan Brandstedt

*Karlebo*

Richard Larsson

# Sammanfattning

Inom projektet hade man som avsikt att utreda tre principiella frågeställningar:

1. Går det att gjuta glas direkt i sandform tillverkade med additiv tillverkning? Här har vi visat att det går alldeles utmärkt att gjuta glas i 3D-skrivna sandformar. Viss sprickbildning har uppkommit i formarna vilket är intressant att arbeta vidare med.
2. Går det att med ytbeläggningar eller aktiva ytor åstadkomma jämnare ytor på glasobjekten, gjutna i sand- respektive gjutjärnsformar, för att minska behovet av manuell efterbehandling? I projektet har man visat att användandet av så kallade blacker minskar behovet av efterarbete. Att arbeta vidare med att optimera blackernas formulering och applikationsmetod ses som mycket intressanta områden för ett fortsättningsprojekt.
3. Går det att med aktivator i formen stärka glasytan? Ett första försök att stärka glasytan genom applicering av en aktivator gjordes med en egenblandat slurry innehållande litiumkarbonat. Denna integrerades dock i glasytan som ett vitt skikt. Djupare studier är nödvändiga för att utreda möjligheterna att få fram en aktivator som stärker glasytan utan att påverka transparensen.

I helhet ses resultaten från projektet som mycket intressanta för vidare studier och projektgruppen har för avsikt att hitta finansieringsmöjligheter för ett större utvecklingsprojekt under våren 2018.

# 1 Bakgrundsinformation

Gjutning av glas är en av flera olika tillverkningstekniker som glasindustrin använder. Målerås Glasbruk har en lång tradition av att gjuta glas i exklusiv design. Den hårda konkurrensen på marknaden gör att man ständigt vill ligga i framkant av produktdesign samtidigt som man aktivt arbetar med att förbättra produktionsprocessen utan att ge avkall på sin glaskvalité.

Målerås glasbruk producerar allt sitt glas manuellt och produktionen består till största delen av gjutet glas. Vid gjutning av glas använder man i huvudsak formar av gjutjärn, då värmeledningsförmågan är god plus att de kan användas under längre kampanjer pga av den långa livslängden. Vid korta serier av glasprodukter med enklare geometri används oftast formar av sand. De sandgjutna produkterna är oftast designade med figurer inuti glaset i olika former eftersom glasytorna oftast blir "ruffiga" och kräver bearbetning ifall man önskar en blank yta. Sandgjutning kräver mycket förarbete och liknar tillverkning av gjutjärnsformar.

Gjutjärnsformarna som används i glasproduktion tillverkar Målerås glasbruk själva på ett manuellt sätt som involverar många steg. Först görs en vaxmodell av objektet. Därefter en sandgjutform: vaxmodellen inbäddas i hårt packad sand blandad med ett bindemedel och bränns sedan bort. Kvar finns en hålighet från vaxmodellen. Slutligen tillverkas gjutjärnsformen genom att smält gjutjärn hålls i håligheten. Det manuella arbetssättet begränsar vilka geometrier som kan skapas. Vidare måste gjutformen efterbehandlas genom slipning och polering för att glaset ska få en jämnare yta. Men det är inte enbart formmaterialets fysikaliska egenskaper som påverkar glasytan utan även formmaterialets värmeförmåga. Idag slipas och poleras glasets ojämnheter som uppkommer på grund av formmaterialet i flera steg. Processen är mycket tidskrävande och genom att optimera ytstrukturen i glaset skulle bearbetningstiden kunna minskas. Även gjutjärnsformarna kräver regelbunden rengöring och tidskrävande putsning under glaskampanjerna för att erhålla en blank glasyta utan missfärgningar eller matthet genom oxidavsättningar från formen.

Inom gjuteribranschen finns det lång erfarenhet av att arbeta med gjutformar tillverkade utgående från olika sandtyper och bindemedel. Ibland används kvartssand och vattenglasprodukter men spännvidden mellan olika sandtyper och organiska eller oorganiska bindemedel är stor. Ytbeläggningar, blacker, används regelmässigt för att få bättre ytor på gjutgodset eller hindra formsanden från att reagera kemiskt med det gjutna materialet.

Gjutformens geometri och ingjutsystemens utformning optimeras genom noggrann simulering av smältans väg genom formen samt temperaturfallet vid avsvältningsprocessen. Utgående från kända data om smältans viskositet och flytbarhet liksom smältans och formmaterialets termiska egenskaper kan de slutliga materialegenskaperna förutsägas, men även defekter som porer och krympningar.

På senare tid har en ny teknik för framställning av sandformar introducerats, additiv tillverkning genom 3D-skrivare för sand. Komplexa geometrier kan framställas med korta ledtider till hög precision och låg kostnad jämfört med den traditionella processen baserad på framtagning av modell. Hösten 2016 togs Skandinavians första sandskrivare i bruk på Swerea i Jönköping och tekniken har börjat vinna insteg hos

främst svenska järngjuterier. Någon användning för applikationen glas har inte rapporterats. Däremot har 3D-printade metallformar använts för samma ändamål.

## 2 3D-printing

Framställning av sandformar och kärnor genom additiv tillverkning har på några få år blivit högintressant för svenska gjuterier. Att tillverka formen eller kärnan från CAD-ritning direkt i 3D-skrivaren utan att använda modell eller kärnlåda ger kortare ledtider och minskade kostnader. Dessutom kan mer komplexa geometrier framställas på ett enkelt sätt då designfriheten blir större.

Den variant av additiv tillverkning som fått störst genomslag för sand är en så kallad binder jetting-teknik, där 3D-skrivaren kan liknas vid en bläckstråleskrivare. Sveriges första skrivare som fungerar enligt principen finns på Swerea SWECAST i Jönköping, och arbetar med furanbindemedel och kvartssand. Ytterligare skrivare, som arbetar med samma teknik, finns numera också installerade på enstaka gjuterier i Sverige.

Först appliceras ett tunt lager av sand som är fuktad med syra över hela arbetsplattformen. Därefter portioneras bindemedel ut i önskad geometri via munstycken med hög precision. Plattformen sänks nedåt i arbetsboxen, ett nytt sandlager appliceras och så vidare. Processen fortsätter tills arbetsboxen är helt fylld med formar och kärnor. Bindemedlet har under tiden hunnit härda och efter att överflödiga sand avlägsnats från ytan kan de färdiga produkterna forslas till gjuteriet. En arbetsbox med en volym på en dryg kubikmeter har idag en byggtid på omkring 18 timmar och därefter tar det 3 till 6 timmar att tömma den. Tömningsarbetet sker manuellt och handlaget hos operatören är avgörande för kvaliteten på den slutliga produkten.

Tekniken möjliggör indirekt additiv tillverkning av metalliska komponenter genom gjutning i 3D-printade formar. Detta ger goda förutsättningar för gjuterier och gjutgodsköpare att vidareutveckla sin design- och produktionsprocess. Tre särskilda områden som fått stort genomslag är prototypframtagning, återtillverkning och omkonstruktion för gjutning.

Prototypframtagning för gjutgoods med hjälp av indirekt additiv tillverkning ger kortare ledtider och minskade kostnader. Modeller och kärnlådor behöver inte tillverkas förrän den slutliga produkten går upp i större serier. Flera olika utvecklingslinjer kan också prövas parallellt eftersom designen enkelt kan varieras inom en och samma batch.

Återtillverkning av reservdelar blir möjlig utan att gjuteriet behöver lagra och underhålla modeller och kärnlådor. Om även konstruktionsritning saknas kan komponenten 3D-scannas och form och kärnor tas fram i unika exemplar utifrån detta material. Dessutom kan designen uppdateras för att möta nytillkomna krav.

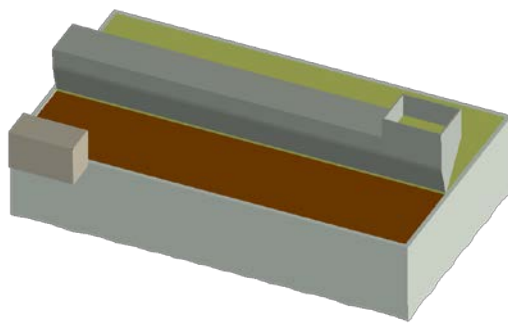
Designfriheten för gjutna komponenter ökar med indirekt additiv tillverkning, då traditionella begränsningar kopplade till släppvinklar, delningsplan med mera till viss del kan upphävas. Detta innebär goda möjligheter till förbättrad design av befintliga produkter, men också att gjutning som produktionsmetod kan bli intressant för helt nya produktsegment. Komponenter som tidigare framställdes genom fogning eller svetsning kan nu konstrueras om för gjutning med bibehållna eller förbättrade egenskaper. I och med detta har indirekt additiv tillverkning tagit steget från

stycketillverkning av unika prototyper och produkter till att vara ett intressant och konkurrenskraftigt alternativ även för serieproduktion.

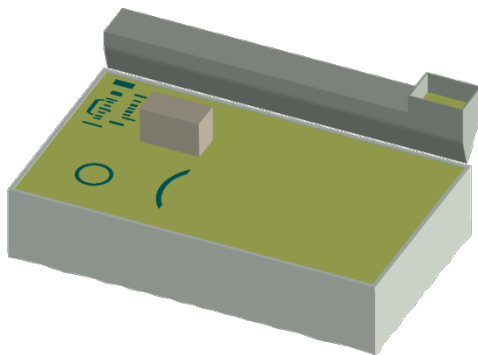
Motsvarande tekniska och produktionsmässiga fördelar som gjuterierna kan uppnå med tekniken, bör också kunna nås vid gjutning av glas i sandformar. Detaljerna i processen, exempelvis val av bindemedel, kan eventuellt behöva modifieras eftersom processtemperaturer, produktionsmiljöer och ytfinhetskrav skiljer sig mellan gjutning av metall respektive glas.

## 2.1 Additiv tillverkning av sandform

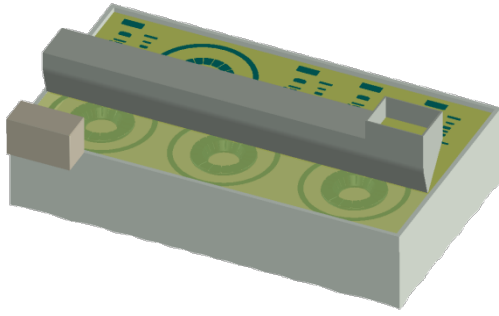
I korthet kan processen att printa en form beskrivas med fem enkla steg:



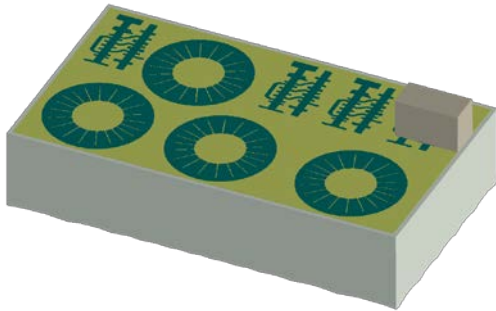
1. Ett lager sand, med inblandad härdare, läggs på skrivboxens yta.



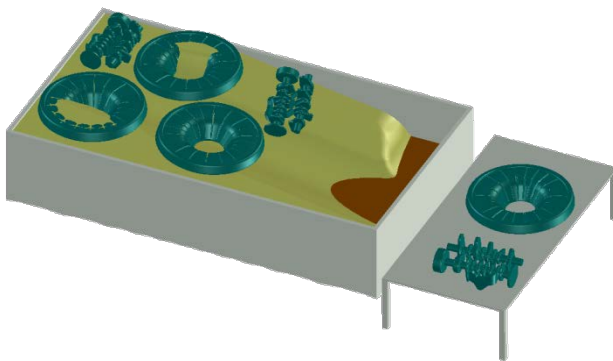
2. Skrivarhuvudet placerar bindemedel på de områden där detaljen ska ligga. Där bindemedlet och härdaren kommer i kontakt med varandra reagerar de till en hård massa. De områden som inte belagts med bindemedel består fortsättningsvis bara av sand med inblandad härdare.



3. Boxens botten sänks ned lite, så att avståndet mellan skriverhuvudet och sandlagret hålls konstant genom hela processen. Ett nytt lager av sand med härdare läggs ut över ytan.



4. Punkterna 2 och 3 upprepas i lager efter lager till dess boxen är fylld på höjden och printerarbetet alltså är färdigt.



5. Boxen töms genom att ohärdad sand avlägsnas med dammsugare och de genomhårdade formarna plockas ut. Resterande lösa sandkorn avlägsnas sedan från ytorna med luft eller pensel.



## 2.2 Sand och bindemedel

För att skapa en hållfast form av sand krävs alltid någon typ av bindemedel som kan hålla ihop sandkornen med varandra. Vid traditionell tillverkning av gjutformar finns en mängd olika bindemedel och processer tillgängliga. I de flesta fall består bindemedlen av åtminstone två, ibland tre olika komponenter.

När formar ska printas behöver man kunna lägga ut bindemedel på en bädd av sand och sedan få bindemedlet att härda relativt snabbt. Vanligen sker härdningen genom att en bindemedelskomponent och en härdarkomponent kommer i kontakt med varandra, alternativt att bindemedlet härdas med värme.

De tre bindemedel som har använts i det här arbetet är sinsemellan ganska olik uppbyggda och samtidigt av typer som är state-of-the-art vid printning. Vi testade två organiska (ett surt och ett alkaliskt) bindemedel samt ett oorganiskt bindemedel. Samtliga baseras på att två komponenter kommer i kontakt med varandra och sanden. Den sand som användes i formarna var en ren finkornig kvartssand.

### 2.2.1 Kvantssand

Kvarts ( $\text{SiO}_2$ ) är det mineral som bygger upp den sand som europeiska gjuterier använder mest. Det finns flera skäl till detta, bland annat att sanden finns lätt tillgänglig i stora delar av Europa, den har relativt låg densitet, den tål höga gjuttemperaturer och dess kemiska egenskaper gör att den fungerar bra tillsammans med de bindemedel som gjuteriföretagen använder.

För formarna som tillverkades inom projektet användes kvartssand med medelkornstorleken 0,13 mm. Sanden hade en komprimerad kornfördelning med ca 80% av kornen inom intervallet 0,09 – 0,18 mm. Samma sandtyp användes oavsett om formarna tillverkades i Jönköping eller av ExOne i Tyskland.

### 2.2.2 Furan

Furan är ett tvåkomponentsystem, där bindemedelskomponenten baseras på furfurylalkohol och härdaren är en syra, oftast paratoluensulfonsyra (=PTS) eller fosforsyra – eller en blandning av båda. Formen får därför sura egenskaper.

Furanformarna är starka men känsliga för höga temperaturer och fukt, och har därför relativt begränsad lagringsbeständighet.

Furanformarna som användes i projektet tillverkades i printern i Jönköping.

### 2.2.3 Fenol

Fenolbindemedlet CHP (Cold Hardening Phenolics) är ett tvåkomponentsystem där bindemedlet är någon typ av fenol i starkt alkalisk vattenlösning och härdaren är en ester. Den färdiga formen har alkaliska egenskaper.

De nyprintade formarna är starka, och kan dessutom behandlas i värme och därigenom ges ökad styrka. De visar starkt motstånd mot fukt och har en mycket god lagringsbeständighet.

Fenolformarna som användes i projektet tillverkades av ExOne i Tyskland.

## 2.2.4 Vattenglas

Vattenglasbindemedlet är ett tvåkomponentsystem där bindemedlet består av natriumsilikat ("vattenglas") och härdaren är en ester. Vattenglaslet är oorganiskt och estern är organisk; ur ett miljöperspektiv innebär det att endast en mindre del av systemet baseras på oljeprodukter. Detta leder till att en väldigt liten andel kan förbrännas så att risken för gaser som kan ge gasdefekter samt vara hälsoskadliga är betydligt lägre än för de båda andra metoderna.

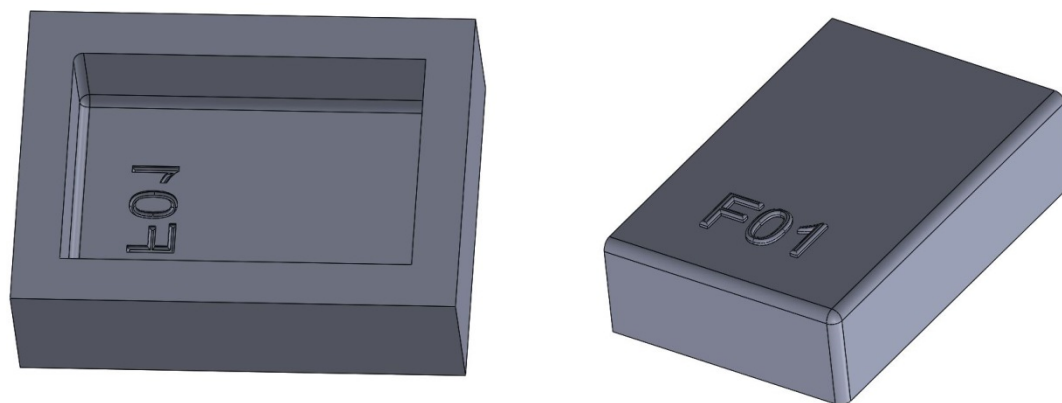
Formarna i sig är starka men starkt hygroskopiska. De suger gärna upp fukt från omgivande luft och får därigenom begränsad lagringsbeständighet.

Vattenglasformarna som användes i projektet tillverkades av ExOne i Tyskland.

## 2.3 Sandformar

Ritningen av sandformarna har gjorts med 3D-cad för den tilltänkta glasprovkroppen med dimensioner 150 x 100 x 40 mm. Sandformen godstjocklek är 20 mm. På ena sidan är hörnen rundade (4 mm radie) och på andra sidan är hörn så skarpa som CAD-ritningen gör dem.

Sandformarna är numrerade, från F01 till F15 (F=furan), P01 till P15 (P=phenolic) och S01 till S15 (S=silicate), beroende på vilka bindemedel som använts. Bokstäverna är placerade nedtill i 100 mm-sidan på glasbiten. Bokstäverna är inåtgående i formen, dvs de står ut ur glasbiten. Bokstäverna är 20 mm höga, står ut 2 mm ur glasytan och är mjukt rundade, se *Figur 1*.



Figur 1. Illustration av sandform

## 3 Beläggningar

### 3.1 Blacker

Ytbeläggningar, blacker, används regelmässigt i gjuteribranschen för att få bättre ytor på gjutgodset eller hindra formsanden från att reagera kemiskt med materialet. Genom att applicera blacken på formsandens ytor skapas en skyddande finkorning beläggning som tränger in mellan sandkornen och jämnar ut ytan samtidigt som den minimerar risken för att sandkorn ska tränga in i den gjutna produkten. Detta gör att gjutjärnsgodset kräver minimal efterbearbetning.

Inom glasindustrin är det vanligast att gjuta direkt i sandformen, men det förekommer även ytbeläggning i form av grafit. I dag finns ingen bra metod för att minska att sandkorn integreras eller ge avtryck på glasytan. Det gör att man lägger mycket tid på efterarbete, där glasets ojämnheter slipas och poleras i flera steg. Det är därför av stort intresse att undersöka ifall blacker från gjuteriverksamheten kan användas inom glastillverkning. Sex olika blacker från gjuteribranschens sortiment, *Tabell 1*, har valts ut för att belägga både sand- och gjutjärnsformar. Två olika beläggningstekniker testades, dels att belägga med pensel och dels att belägga med sprutteknik.

*Tabell 1. Spritbaserade Blacker, (0,5 kg eller ca 0,5 L).*

<b>Black</b>	<b>Nummer</b>	<b>Substans</b>
Magnesitschlichte	5848	Magnesium
Zirkonfluid	1219	Zirkon
Arkofluid	5004 F	Aluminium, järn, magnesium och grafit
Koalid	4087	Aluminium och järn
Koalid	2290	Magnesium och grafit
Nekrofluid	1305	Grafit

*Tillverkare av blacker: Huttenes-Albertus Chemische Werke GMBH (Dusseldorf +49 211 5087100/Hannover +49 511 97970)*

### 3.2 Aktivator

Med hjälp av black kan gjuteriet styra metallproduktens egenskaper i samband med stelandet. Ämnen som finns i blacken kan fås att vandra från blacklagrets yta in i den flytande metallen och påverka metallytans egenskaper. I projektet vill vi testa om den här typen av aktiva formytor också kan fungera vid glastillverkning genom ett jonutbyte mellan alkalimetaller, likt processen för kemiskt härdat glas.

Det finns ingen kommersiell black innehållande någon alkalimetall. Därför tillreddes en egen slurry innehållande etanol och litiumkarbonat inom projektet. Slurryn penslades på en bit av en sandform och torkades 1 dygn innan den 1200-gradiga glasmassan hälldes på den.

## 4 Glasgjutning

### 4.1 Glasgjutning i additivt tillverkade sandformar

På Målerås glasbruk tillverkades glas i additivt tillverkade sandformar med tre olika bindemedel, furan (F), fenol (P), och vattenglas (S). Glassats 59 fångades an på en kula och fyllde de rumstempererade sandformarna till ungefär hälften. Sandformarna med glas placerades därefter i kylugn och kylades under kontrollerade former ner till rumstemperatur.

Glasblock tillverkades i sandformarna F01-F03, P01-P03 och S01-S03



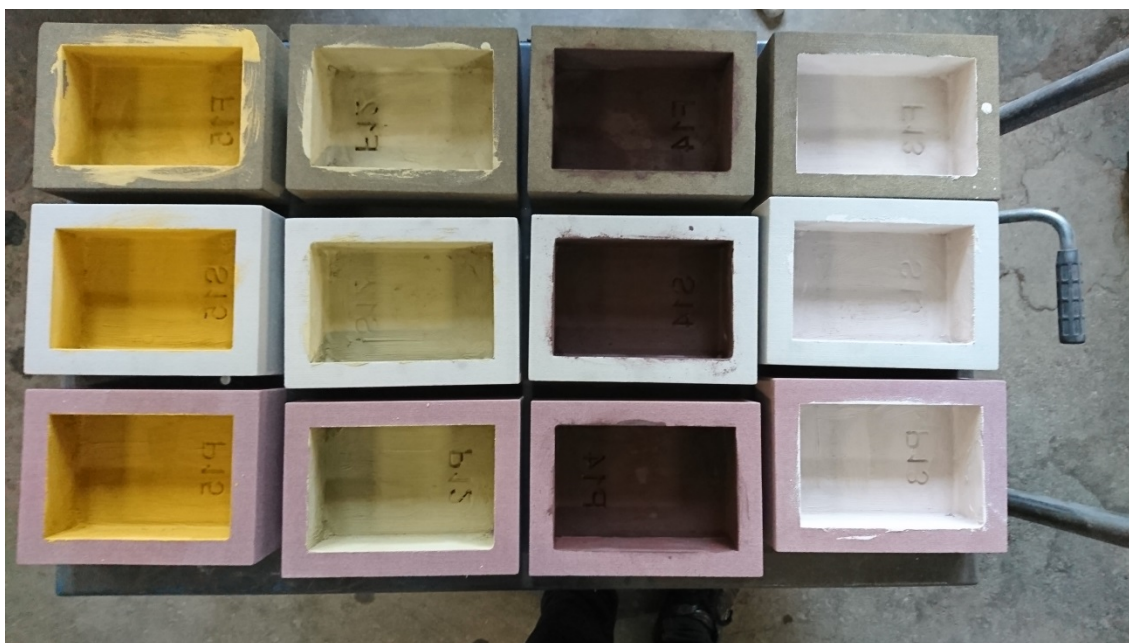
Figur 2. Sandformar med bindemedel fenol (P), vattenglas (S) och furan (F)

#### 4.1.1 Sandformar med blacker

Fyra olika blacker applicerades med pensel i sandformar enligt *Tabell 2*. De belagda sandformarna fick därefter stå i rumstemperatur 2-3 timmar innan formarna fylldes med glas på samma sätt som vid gjutning i sandformar utan beläggning.

Tabell 2. Sandformar med olika bindemedel och blacker.

Blacker	Furan (F)	Fenol (P)	Vattenglas (S)
Magnesitschlichte 5848	12	12	12
Zirkonfluid 1219	13	13	13
Arkofluid 5004 F	14	14	14
Koalid 4087	15	15	15



Figur 3. Blacker applicerade med pensel i sandformar med olika bindemedel

De belagda formarna med pensel ger ett tydligt avtryck av penseldrag i glasytan som inte är önskvärt och därför testades en annan appliceringsmetod, "sprutblackning". Ett lager med black appliceras med en färgspruta inköpt på Biltema, SG600. Blacken späddes med etanol pga av sin höga viskositet och därefter "sprutblackades" formarna med ett tunt eller ett mättat lager. Ett dygn senare tillverkades glasblock på Målerås glasbruk i de "sprutblackade" sandformarna innehållande vattenglas, se *Tabell 3* och *Figur 4*.

Innan dess hade labbförsök utförts på små "sprutblackade" sandformsbitar, se *Tabell 10* i Bilaga 1. Gjutningen utfördes på RISE Glas. Glasats 59 smältes vid 1420 °C och konditionerades vid 1200 °C innan den hälldes på provbitarna. Glas och sandform kylde därefter under kontrollerad form ner till rumstemperatur innan de visuellt granskades.

Tabell 3. Sandformar applicerade med sprutteknik i två olika mättnadsgrader, tunn och mättad

Black	Nekrofluid 1305	Koalid 2290	Koalid 4087	Magnesitschlichte 5848
Formnummer, mättat lager	S04	S06	S08	S10
Formnummer, tunt lager	S05	S07	S09	S11

Nekrofluid 1305

Koalid 2290

Koalid 4087

Magnesit. 5848



Figur 4. Sandformar S05-S11 sprutbelagda med blacker

## 4.2 Glasgjutning i gjutjärnsformar med blacker

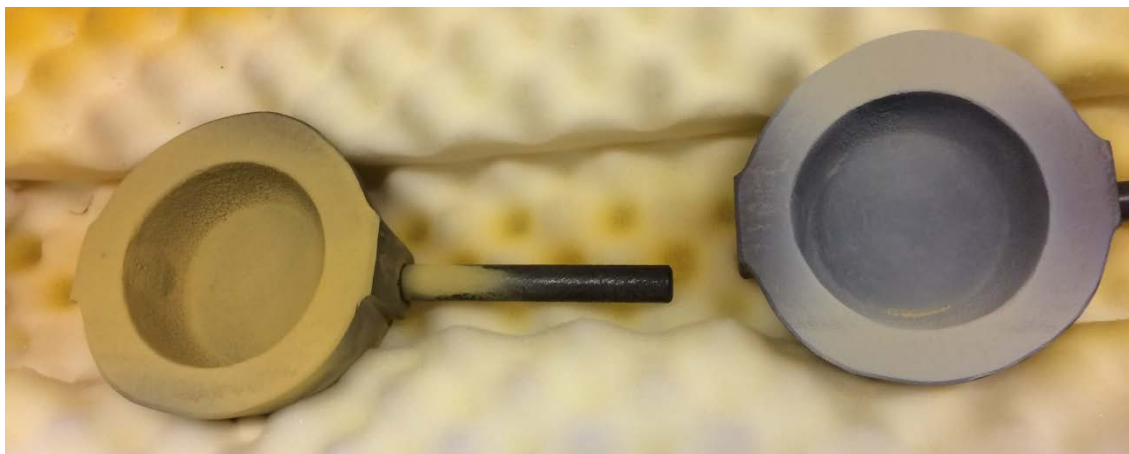
Fyra blacker, Magnesitschlichte (5848), Zirkonfluid (1219), Arkofluid (5004F) och Koalid (4087) applicerades med pensel i 4 gjutjärnsformar, se *Figur 5*. De ytbelagda formarna förvärmades vid 470° C före gjutning. Fyra glasblock tillverkades i varje form och kylades därefter under kontrollerad form ner till rumstemperatur.

Glasblockets ytstruktur bedömdes och jämfördes okulärt med referensglas som tillverkades i obehandlade gjutjärnsformar.



Figur 5. Applicering av blacker i gjutjärnsformar på Målerås glasbruk

Glasblock som tillverkats i de blackbelagda gjutjärnsformarna med pensel får tydliga avtryck i glasytan ifrån penseldrag. Dessa avtryck är inte önskvärda och därför testades "sprutblackning". Ett tunt lager av black applicerades i gjutjärnsformarna. Det var meningen att vi skulle testa 4 olika sorters blacker, men de åttakantiga formarna var inte tillgängliga. Blacker som ingick i testet är Magnesitschlichte 5848 och Koalid 4087.



Figur 6. Sprutbelagda gjutjärnsformor med blacker, till vänster Koalid 4087 och till höger Magnesitschlichte 5848.

## 5 Analys av glasytans kvalitet

### 5.1.1 Visuell bedömning

En visuell bedömning av glasets yta har genomförts under lysrörsbelysning ovanifrån. En sex-gradig skala, se Tabell 4, användes och två personer deltog vid bedömningen.

Tabell 4. Sex-gradig skala som beskriver glasytans kvalitet

Grad	Beskrivning av ytan
0	Yta som för ögat påminner om formmaterialets ytjämnhet
1	Yta som för ögat påminner om formmaterialets ytjämnhet med partiklar av black eller sandkorn i ytan
2	Yta som för ögat påminner om formmaterialets ytjämnhet med en stor mängd partiklar av black eller sandkorn i ytan
3	Yta som för ögat har en ojämna yta än formmaterialet
4	Yta som för ögat har en ojämna yta än formmaterialet med partiklar av black eller sandkorn i ytan
5	Yta som för ögat har en ojämna yta än formmaterialet och med stor mängd partiklar av black eller sandkorn i ytan

## 5.2 Profilometer

Analysen av ytjämnheten genomfördes med en optisk interferometer, Veeco instrumentet NPFLEX, på några utvalda prover tillverkade i sandform S01, S04, S05, S07, F01 och P01 och gjutjärnsformor med black 5848 och 4087 samt referenspuckor. Vid varje analys görs minst 1 men ofta 2 eller fler mätningar över en yta av ca 4 mm<sup>2</sup>. Vid analysen användes objektiv 5 med inställning 2,6 point of view.

## 5.3 Mikroskop

Utvalda prov har undersökts i WILD makroskop M420 med objektiv 8X. Glasen har fotograferats med tillhörande kamera Leica DMC 2900.

## 5.4 Transmission

Transmissionsmätt på glasets "genomsläpplighet" har mätts med ett handhållet instrument från EDTM, modell WP4500 för mätning av synligt ljus i området 400-700 nm.

Glasblock med tjockleken ca 30 mm placerades enligt *Figur 7*.



*Figur 7. Mätning av transmission på glasblock gjutna i sandform.*

# 6 Resultat

## 6.1 Gjutning i additivt tillverkad sandform

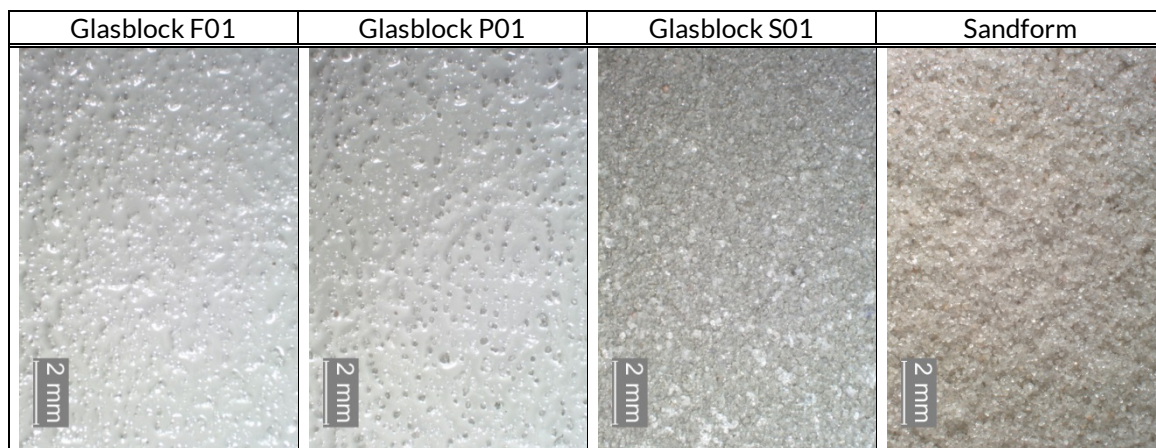
Glas tillverkade i sandform innehållande furan erhåller bäst yta, se *Tabell 5* och *Figur 8*. Bindemedlen fenol och furan avger gaser som är mycket negativa ur arbetsmiljösynpunkt som gör att de inte är lämpliga att använda i dagens tillverkningsprocess hos Målerås glasbruk. För att kunna använda fenol och furan som bindemedel krävs installation av utsug för att minimera den fräna och stickande lukten



som uppkommer när man lägger i den varma glasmassan i sandformen. Vattenglasets avger de lägst störande emissionerna och kan användas utan några åtgärder i hyttan. Nackdelen med vattenglas som bindemedel är att en stor andel sandkorn från formen integreras i glasytan.

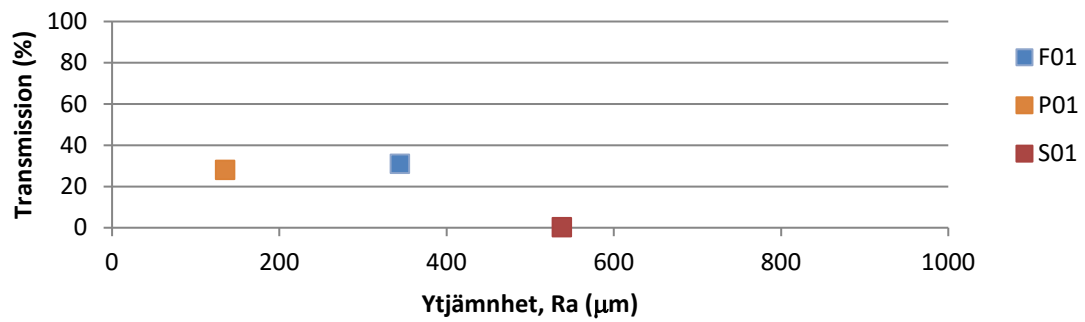
Tabell 5. Visuellt bedömning av glasblock gjutna i 3D-printade sandformar med bindemedlen Furan (F01), Fenol (P01) och Vattenglas (S01), enligt den sex-skaliga skalan 0-5

Glasblock F 01-F03	Glasblock P01-P03	Glasblock S01-S03
		
0	1	5



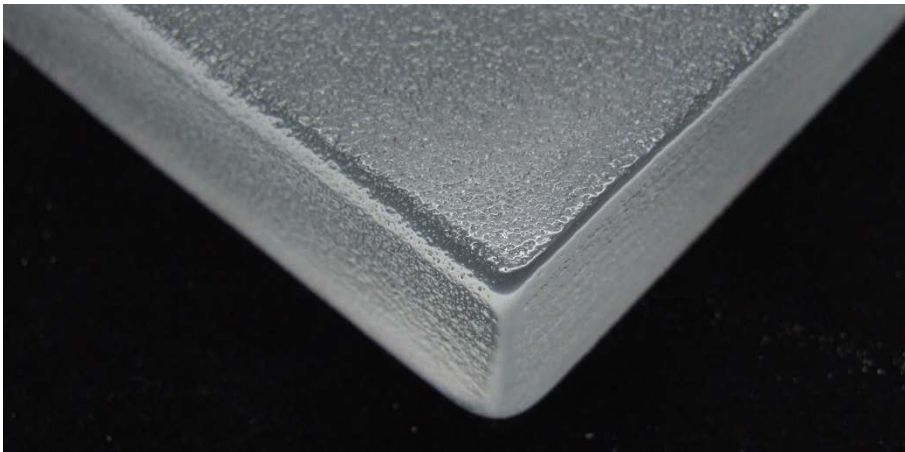
Figur 8. Ytjämnhet i glasblock tillverkade i sandform med bindemedlen furan, fenol och vattenglas samt sandform.

I Figur 9 beskrivs glasets transmission som funktion av ytjämnhet.



Figur 9. Transmission som funktion av ytjämnhet på glasblock gjutna i sandform med bindemedel furan, fenol och vattenglas

Designen med en skarp och en avrundad kant fungerade bra och ger en tydlig avbild i det gjutna glasblocket, *Figur 10*. Även märkningen av formen, tex P03, ger ett bra och tydligt upphöjt motiv som visar på att det finns potential till att kunna designa glasblock med olika uttryck, *Figur 11*.



Figur 10. Avrundad- respektive skarp kant



Figur 11. Märkning av sandform som ger avtryck i glaset

Vid gjutningen uppstod det sprickor på långsidan i sandformarna innehållande vattenglas som bindemedel. Ifall det beror av dimensionering, värmeledning, fukt eller packning har ej utretts.



Figur 12. Spruckna sandformar innehållande bindemedlet vattenglas

Sandformarna med bindemedel furan föll sönder efter en kort tid i kylugnen och all sand hamnade i botten av ugnen. Formarna med de andra två bindemedlen, fenol och vattenglas, var intakta efter kylprocessen och man fick bryta isär dem för att få ut glasblocken.

## 6.2 Sandform applicerad med black

Applicering av black med pensel i sandformarna ger kraftiga avtryck ifrån penseln i glasytan, Figur 13, och några av blackerna integreras i glasytan, Tabell 6.



Figur 13. Glasblock gjutna i 3D-printade sandformar med olika bindemedel och blacker

Tabell 6. Visuell bedömning av glasytan på glas gjutna i sandform med olika bindemedel och blacker som applicerats med pensel, enligt den sex-skaliga skalan

Black	Glasprov	Furan (F)	Fenol (P)	Vattenglas (S)
Magnesitschlichte 5848	12	3	3	5
Zirkonfluid 1219	13	3	3	5
Arkofluid 5004 F	14	3	3	5
Koalid 4087	15	3	3	5

Labbstudien med de "sprutblackade" formlitarna visade att beläggning utförd med sprutpistol ger bäst slutresultat, se *Tabell 7*.



Tabell 7. Resultat från labbstudier sprutning av blacker på sandformsbitar

Namn	Sandform	Magnesit-black		Koalid		Nekrofluid		Koalid		Akrofluid		Zirkonfluid	
<b>Färgnr</b>	-	5848		4087		1305		2290		5004 F		1219	
<b>Formnr</b>	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
<b>Färglager</b>	-	t	m	m	t	m	t	m	t	t	m	m	t
<b>Resultat</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

Blackbelagda sandformar innehållande vattenglas ger en bättre glasyta än icke belagd sandform, *Tabell 8* och *Figur 14*.

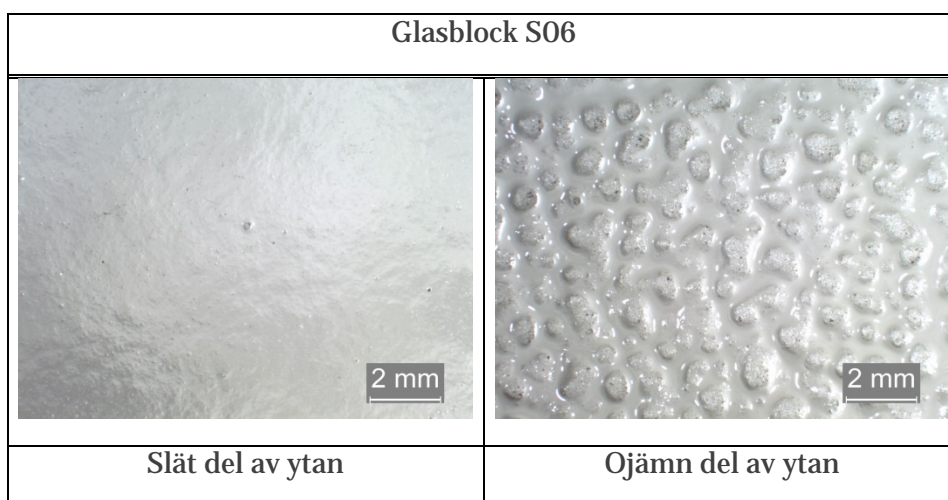
Tabell 8. Visuell bedömning av glasytan på glas gjutna i sandform med bindemedlet vattenglas och olika blacker

Black	Nekrofluid 1305		Koalid 2290		Koalid 4087		Magnesitschlichte 5848	
Form	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11
<b>Resultat</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>0/3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

Black	Nekrofluid 1305	Koalid 2290	Koalid 4087	Magnesitschlichte 5848
Form	S04	S06	S08	S10
(m)				
Form	S05	S07	S09	S11
(t)				

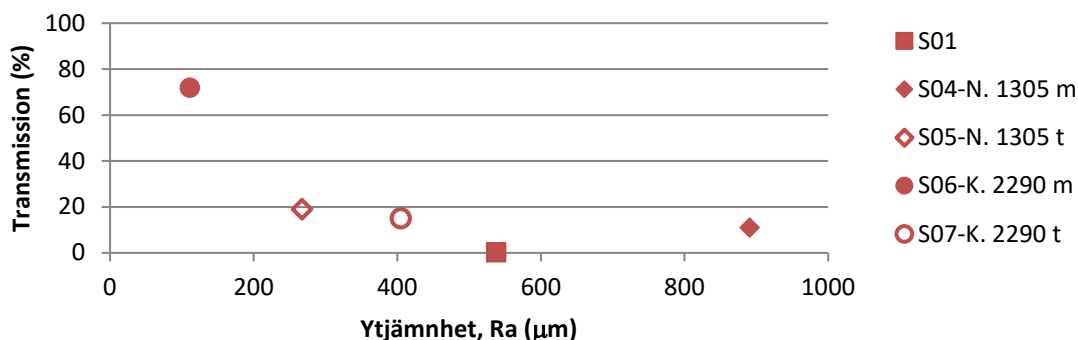
Figur 14. Ytjämnhet i glasblock tillverkade i sandform med blacker i olika mättnadsgrad (m) och (t)

Nackdelen med att belägga med sprutteknik är att det är svårt att kontrollera sprutresultatet under tiden man utför arbetet plus att det lätt bildas små förhöjningar i hörnen beroende på hur man vinklar och håller sprutpistolen. Sprutblackning kräver erfarenhet och bra utrustning för att erhålla en slät yta som uppvisas på vissa delar av prov S06, se Figur 14.



Figur 15. Glasblocks S06 olika ytjämnhet.

Transmission som funktion av ytjämnhet ges i *Figur 16*.



*Figur 16. Transmission som funktion av ytjämnhet på glasblock gjutna i sandform med bindemedel vattenglas och blackerna Koalid 2290 och Nekrofluid 1305 i olika mättnadsgrad*

## 6.3 Gjutjärnsforma applicerad med black

De sprutbelagda formarna gav bättre ytjämnhet på glasblocken jämfört med de penselapplicerade, *Tabell 9*.

*Tabell 9. Visuell bedömning av glasytan som applicerats med pensel enligt den sex-skaliga skalan.*

	Magnesitschlichte 5848	Zirkonfluid 1219	Arkofluid 5004 F	Koalid 4087
Pensel	3	4	3	4
Sprutpistol	0	-	-	3

Det visade sig att det var svårt att mäta glasets ytjämnhet med profilometer på grund av glasblockets utformning. För att mäta på glas krävs ett plant prov med god reflektion för att upplösningen ska bli bra. Utifrån de osäkra resultat vi har fått fram kan man se att glasytans struktur är något ojämna än formmaterialets yta, se bilaga 2.

## 6.4 Aktivator

Slurryn innehållande litiumkarbonat fastnade i glasytan och bildade ett vitt skikt, se *Figur 17*.

Kommersiella blacker innehåller även ett bindemedel. Ifall det hade haft någon effekt på slutresultat, dvs att det vita litiumskiktet inte hade fastnat i ytan, är omöjligt att säga. För att utreda det krävs en större studie som inte ryms under det här projektet.



Figur 17. Sandform belagd med litiumkarbonat och glasprov

## 7 Slutsats

Det går utmärkt att gjuta glas i 3D-printade sandformar. Kvaliten på glasytan skiljer beroende av vilket bindemedel som använts i formen. Bäst yta erhålls när glaset är tillverkat i sandform innehållande bindemedlet furan. Nackdelen med furan är att den avger stickande och fräna emissioner när den varma glasmassan träffar formyten. Det gör att furan inte är önskvärd ur ett arbetsmiljömässigt perspektiv, liksom bindemedlet fenol. Bindemedlet vattenglas avger de lägst störande emissioner och kan användas utan några åtgärder i hyttan. Nackdelen med vattenglas är att en stor andel sandkorn från formen integreras i glasytan och att det krävs någon slags beläggning för att undvika det. Blackerna medför att glasytan blir bättre, dvs att sandkornen inte integreras i glasytan. Bäst resultat erhöles med black innehållande substanserna magnesium och grafit. Appliceringsmetoden av blackerna är oerhört viktig. I studien användes en enkel färgspruta som gav droppliknande struktur, men i en av formarna lyckades vi få en liten andel där beläggningen blev jämn och där erhöles en jämn glasyta. Det gör att vi ser potential till att kunna få en bra ytjämnhet i det gjutna glaset.

Sandformarnas utförande med rundade och skarpa hörn samt bokstavsmärkning syns tydligt i det gjutna glasblocket. De mjuka rundade bokstäverna ihop med de runda och skarpa hörnen gör att vi ser nya möjligheter av komplexa geometrier i sandgjutet glas.

Vid gjutningsprocessen med formarna innehållande vattenglas uppstod sprickor i formen och ifall det beror av dimensionering, värmeledning, fukt eller packningsgrad har inte utretts.

Profilometermätningen på glas tillverkade i gjutjärnsformar visar på att glasytans struktur är något ojämnare än formmaterialets yta men resultatet är osäkert på grund av provkroppens utformning. Vid fortsatta studier är det viktigt att tillverka provkroppar som är planparallella.

Det första försöket med att ta fram en aktivator innehållande Litium var inte lyckat pga att förningen integrerades i glaset. För att ta fram en aktivatorformulering krävs en mer djupgående studie.

## 8 Fortsättning

Den genomförda förstudien visar tydligt att det finns en god utvecklingspotential inom området att använda printade sandformar för formning av glas. Det är samtidigt viktigt att komma ihåg att den är baserad på teknik och material för att gjuta järn, stål och andra metaller. Glas kommer att kräva att ämnen, material och processer modifieras.

Mycket återstår alltså att undersöka innan glasindustrin kan börja använda printertekniken med samma känsla av säkerhet som gjuteriindustrin börjar få. Av de frågor som bör adresseras i en fortsättning kan några speciellt framhållas:

- Utveckling av formmaterial eller tekniska anpassningar som ger finare ytstrukturer i det sandformade glaset. Speciellt bör man koncentrera sig på vattenglasbundna formar – dels för arbetsmiljön i glashyttan och dels ur hållbarhetsaspekter.
- Utökade försök att få önskade ämnen att aktivt vandra in från formyterna in i glasmassan.
- Undersökning av vilka möjligheter och begränsningar printade formar medför för glasindustrin.



## Bilaga 1

Tabell 10. Sandformsbitar sprutbelagda med blacker i tunn (t) och mättad (m) grad

Namn	Sandform	Magnesit-black		Koalid		Nekrofluid		Koalid		Akrofluid		Zirkonfluid	
Färgnummer	-	5848		4087		1305		2290		5004 F		1219	
Formnummer	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Obehandlad (g)	90,2	49,4	108,8	115,7	159,1	113	111,5	109,3	117,6	107,3	83,2	111,3	28,8
med Black (g)	0	51,3	115,1	116,6	159,7	120,8	112,3	111,4	119	109,1	89,2	121,3	30
%	0,0	3,8	5,8	0,8	0,4	6,9	0,7	1,9	1,2	1,7	7,2	9,0	4,2
Färglager		t	m	m	t	m	t	m	t	t	m	m	t



Figur 18. Sandformsbitar sprutbelagda med blacker i tunn och mättad grad. Den översta raden tunn beläggning och den nedersta raden mättad beläggning. Från vänster referens utan beläggning, magnesit 5848, koalid 4087, nekrofluid 1305, koalid 2290, akrofluid 5004F och zirkonfluid 1219.

## Bilaga 2

### Profilometermätningar – Glasblock gjutna i sandform och gjutjärnsform

Tabell 11. Profilometerresultat på glasblock

Sandform	Prov	Ra $\mu\text{m}$	Rq $\mu\text{m}$	Rz mm	Rt mm
Med beläggning					
	S04-N. 1305 m	890,92	1,11	4,48	4,49
	S05-N. 1305 t	267,47	551,29	4,47	4,49
	S06-K. 2290 m	111,03	337,87	4,46	4,49
	S07-K. 2290 t	405,13	676,13	4,45	4,48
Utan beläggning					
	S01	537,83	815,88	4,47	4,49
	P01	135,23	387,33	4,39	4,46
	F01	344,17	660,91	4,46	4,48
Gjutjärnsform					
Med beläggning					
	RG3-4087	142,72	394,02	4,44	4,47
	RG2-5834	118,58	361,2	4,44	4,48
Utan beläggning	RG1	432,29	726,51	4,45	4,49

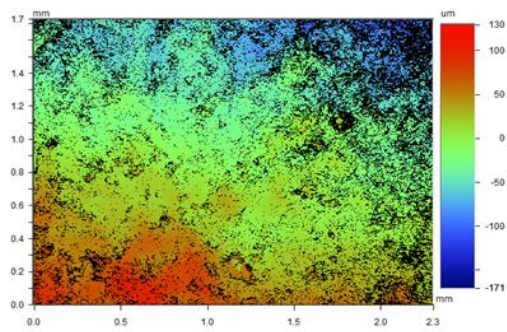
# Gjutjärnsform

## Rundform med markering

**Surface Statistics:**  
Ra: 33.10 um  
Rq: 40.30 um  
Rz: 258.26 um  
Rt: 300.08 um

**Set-up Parameters:**  
Size: 640 X 480  
Sampling: 3.61 um

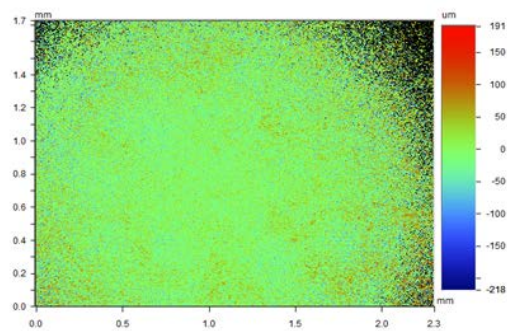
**Processed Options:**  
Terms Removed:  
None  
Filtering:  
None



**Surface Statistics:**  
Ra: 29.90 um  
Rq: 39.27 um  
Rz: 403.55 um  
Rt: 408.58 um

**Set-up Parameters:**  
Size: 640 X 480  
Sampling: 3.61 um

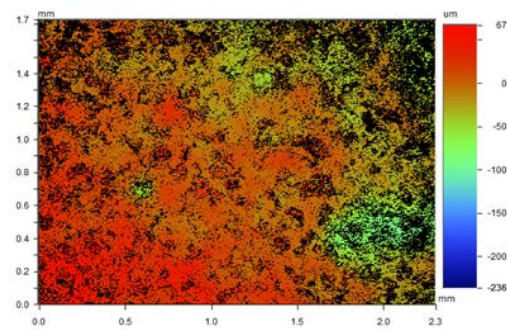
**Processed Options:**  
Terms Removed:  
None  
Filtering:  
None



**Surface Statistics:**  
Ra: 18.45 um  
Rq: 24.23 um  
Rz: 287.85 um  
Rt: 302.92 um

**Set-up Parameters:**  
Size: 640 X 480  
Sampling: 3.61 um

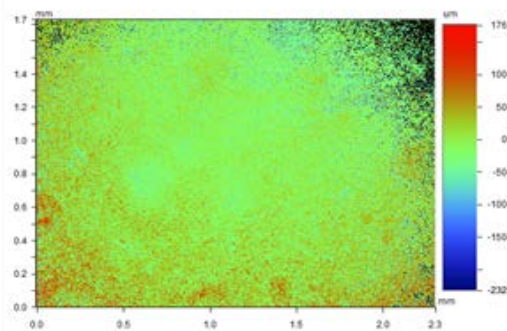
**Processed Options:**  
Terms Removed:  
None  
Filtering:  
None



**Surface Statistics:**  
Ra: 28.19 um  
Rq: 37.26 um  
Rz: 402.23 um  
Rt: 408.40 um

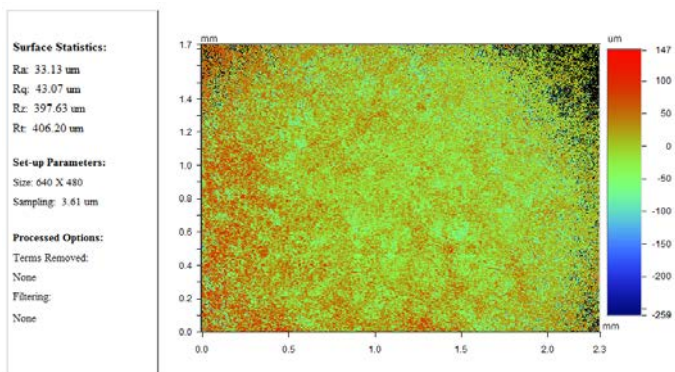
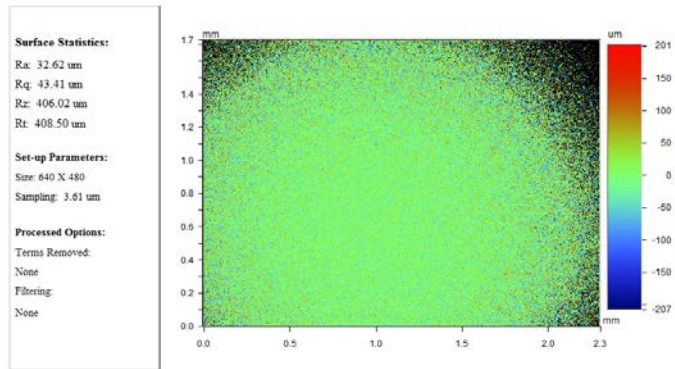
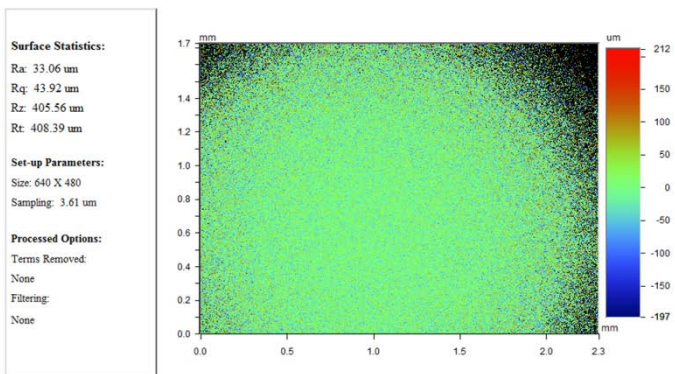
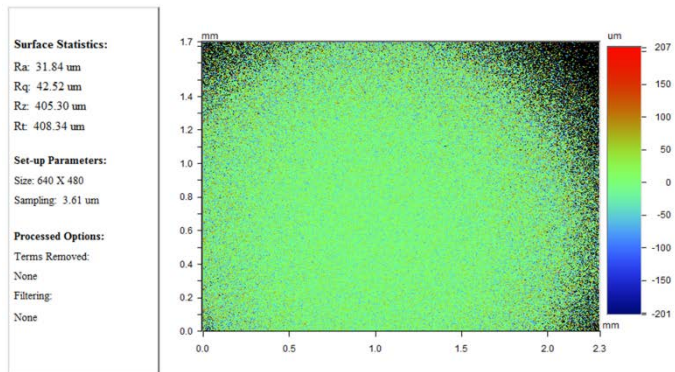
**Set-up Parameters:**  
Size: 640 X 480  
Sampling: 3.61 um

**Processed Options:**  
Terms Removed:  
None  
Filtering:  
None



# Gjutjärnsform

## Rund utan markering



Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB  
351 96 VÄXJÖ  
Telefon: 010-516 50 00  
E-post: [info@ri.se](mailto:info@ri.se), Internet: [www.ri.se](http://www.ri.se)

Byggteknik  
RISE Rapport 7P01736