



HANS - Återvinning av aluminiumspånor

Anton Bjurenstedt och Mattias Jageberg

RISE Rapport 2025:28

Abstract

HANS – Recycling of aluminium chips

The purpose of the project was to test and evaluate methods to increase the internal use of chips in order to minimize transport and avoid additional remelting. The goal is to achieve equivalent mechanical properties to the cast component currently. The methods to achieve this goal were initially a literature study followed by briquetting trials and casting trials.

Centrifugation of chips before briquetting has not affected the final moisture content in the briquettes. Pre-drying at elevated temperature has also no effect on the final result. The pressing of briquettes drives out so much cutting fluid that no difference in the moisture content of the briquettes has been measured regardless of whether the chips have been centrifuged or not.

In experiments with the addition of briquettes to a small melt (10 kg), the amount of inclusions increased significantly as the relative amount of briquettes increased from 10% to 20%. Even in full-scale experiments with a larger melt (850 kg), a clear difference was seen in terms of inclusions between a reference melt and after the addition of about 8% briquettes. After degassing the melt with added briquettes, however, there is a considerable reduction in the amount of inclusions, both in terms of number and size.

The addition of briquettes produces a noticeable difference in density of the cast material. Degassing and proper slagging significantly reduced the amount of porous inclusions and gases, even in comparison with the reference melt without briquette addition. This is also confirmed in studies of fracture surfaces where the deviations that occur are at a microscopic level.

In the full-scale melt, no direct differences in mechanical properties between the reference melt and the melt with added briquettes have been detected, neither before nor after degassing. Based on this work, it seems that the addition of chips in the form of briquettes can be a good and manageable solution from a sustainability perspective, not negatively affecting the resulting cast material. However, further tests should be conducted to verify this, especially for material applications with higher requirements.

Key words: Recirculated aluminium, Aluminium chips, Aluminium casting, HPDC

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2025:28

ISBN: 978-91-90036-12-9

Innehåll

Abstract	1
Innehåll	2
Förord	3
Sammanfattning	4
1 Introduktion	5
2 Metoder	5
2.1 Förbehandling av spånor.....	6
2.2 Briketteringsförsök.....	6
2.3 Gjutförsök.....	8
2.3.1 Gjutförsök på RISE Jönköping.....	8
2.3.2 Gjutförsök på Comptech Skillingaryd	9
2.4 Utvärdering av gjutet material	10
2.4.1 K-mould.....	10
2.4.2 RPT	11
2.4.3 Dragprovning.....	11
3 Resultat	13
3.1 Förbehandling av spånor.....	13
3.2 Briketteringsförsök, omgång 1	13
3.3 Briketteringsförsök, omgång 2.....	15
3.4 Gjutförsök på RISE.....	17
3.5 Gjutförsök på Comptech Skillingaryd	20
4 Diskussion och slutsats	23
5 Bilagor	24

Förord

Arbetet som redovisas i denna rapport är del av projektet HANS, Hållbar gjutning genom Alternativt Nyttiggörande av Spånor och restprodukter. Rapporten redovisar arbetspaket 3 *Återvinning av aluminiumspånor*. Arbetet utfördes av RISE tillsammans med AGES Kulltorp, Comptech i Skillingaryd, Gothia Maskin Sverige, Hydro Extruded Solutions och Unnaryd Modell, med stöd av Svenskt Aluminium. Projektet har finansierats av det strategiska innovationsprogrammet Metalliska material som syftar till att förverkliga den strategiska forsknings- och innovationsagendan *Nationell samling kring metalliska material*. Programmet är en del av Vinnovas, Energimyndighetens och Formas satsning på strategiska innovationsprogram och samlar Sveriges metallindustrier: Stål, aluminium, hårdmetall, gjutstål, gjutjärn och gjutna icke-järnmetaller.

Sammanfattning

Syftet med projektet var att testa och utvärdera metoder för att utöka det interna användandet av bearbetningsspånor i aluminiumgjuterier i syfte att minimera transporter och undvika en extra omsmältning. Målet är att uppnå likvärdiga mekaniska egenskaper som den gjutna komponenten har i dagsläget. Metoderna för att nå syftet har varit inledningsvis en litteraturstudie följt av briketteringsförsök och gjutförsök.

Centrifugering av spånor innan brikettering har inte påverkat den slutliga fukthalten i briketterna. Inte heller förtorkning vid högre temperatur påverkade slutresultatet. Pressningen av briketter driver ut så pass mycket skärvätska att ingen skillnad i briketternas fukthalt har kunnat uppmätas oavsett om spånorna centrifugerats eller inte.

Vid försök med tillsats av briketter till liten smälta (10 kg) ökade mängden inneslutningar markant då andelen briketter ökade från 10% till 20%. Även vid fullskaleförsök med en större smälta (850 kg) syntes en tydlig skillnad avseende inneslutningar mellan en referenssmälta och efter tillsats av ca 8% briketter. Efter avgasning av smältan med tillsatta briketter sker dock en avsevärd minskning av mängden inneslutningar, både i fråga om antal och storlek.

Tillsats av briketter ger en märkbar skillnad avseende densitet före och efter tillsats av briketter. Avgasning och ordentlig avslagning minskade mängden porösa inneslutningar och gaser betydligt, även i jämförelse med referenssmältan utan brikett-tillsats. Detta bekräftas även vid studier av brottytor där de avvikelser som förekommer är på mikroskopisk nivå.

I fullskaleförsöket har inga direkta skillnader i mekaniska egenskaper mellan referenssmälta och smälta med tillsatta briketter detekterats, varken före eller efter avgasning. Utifrån detta arbete tycks det som att tillsatsen av spånor i form av briketter kan vara en bra och hanterbar lösning ur ett hållbarhetsperspektiv, samtidigt som det inte har påverkat materialet i denna studie negativt. Det bör dock utföras ytterligare tester för att verifiera detta, framför allt när det gäller applikationer med högre krav.

Nyckelord: Materialåtervinning, aluminiumspånor, pressgjuten aluminium

1 Introduktion

HANS-projektet syftar till att utveckla metoder för att återvinna metallinnehållande restprodukter inom gjuteriindustrin. Målet är att skapa ett utökat cirkulärt materialflöde som minskar miljöpåverkan, förbättrar resurseffektiviteten och därmed stärker företagens konkurrenskraft. Projektet innefattar både tekniska och ekonomiska undersökningar för att säkerställa att processerna är industriellt genomförbara.

Arbetsgången med avseende på metallinnehållande restprodukter i gjuteriet kan sammanfattas i fyra steg. Materialet gjuts och bearbetas och en restprodukt eller biprodukt skapas: slagg, stoft, glödskal, slipmull eller spånor. Restprodukten hanteras, sorteras och förädlas genom separering, reduktion, torkning eller brikettera. Den förädlade restprodukten används som återgångsmaterial i gjutprocessen. Kvaliteten på färdig komponent utvärderas och jämförs med motsvarande komponent från originalprocessen.

I arbetspaket 3 utvärderades och testades metoder för att utöka det interna användandet av aluminiumspånor i gjutprocessen. På så vis kan man undvika onödiga transporter och extra omsmältningar. Målet är att uppnå likvärdiga mekaniska egenskaper som den gjutna komponenten har i dagsläget. Detta skulle till exempel kunna uppnås med hjälp av specifik hantering av spånorna så som centrifugering och brikettering, och / eller tillsats av en begränsad mängd spånor.

I arbetet deltog RISE, Swerim och fem företag (Tabell 1).

Tabell 1: Deltagande företag och forskningsinstitut

Företag/ Institut	Aktiva deltagare
RISE	Anton Bjurenstedt, Jörgen Jernkrook, Mattias Jageberg
Swerim	Ulrika Brohede
Hydro Extruded Solutions AB	Nageswaran Tamil Alagan
Unnaryd Modell AB	Andreas Åhsberg
Comptech i Skillingaryd AB	Per Jansson
AGES Kulltorp AB	Ove Bengtsson
Gothia Maskin Sverige AB	Ville Valkari, Mikael Vestin

2 Metoder

Avsnittet beskriver metoderna som använts i arbetspaketet. Arbetet inleddes med en *litteraturstudie* som följdes av *förbehandling av spånor*, *briketteringsförsök* och slutligen *gjutförsök*.

Syftet med litteraturstudien var att få en djupare förståelse för tidigare forskning, identifiera kunskapsluckor och formulera relevanta forskningsfrågor. Den skulle också ge insikter om metoder som kan användas, samt hjälper till att undvika duplicering av tidigare arbete. Alternativa sätt att ta hand om spånor skulle också behandlas.

2.1 Förbehandling av spånor

Arbetet med spånhantering fokuserades på att utveckla och utvärdera metoder för att effektivt förbereda spånor för återanvändning i gjutprocessen. För att reducera mängden skärvätska och samtidigt underlätta transport och hantering kan spånorna centrifugeras och briketteras. Olika tekniker och utrustningar från Gothia Maskin testades i detta syfte.

Skärvätskeblöta spånor upphettades till 800 °C, och gaserna som avgavs analyserades. Mätningarna gjordes med masspektrometer, resultaten redovisas i Bilaga B. Försöket upprepades med spånor som först torkats i 300 °C.

2.2 Briketteringsförsök

Briketteringsförsök utfördes i två omgångar. Omgång 1 med syftet att utvärdera effekten av olika briketryck i briketteringsmaskinen i kombination med olika fukthalt på ingående spånor. Mätningar gjordes av briketternas densitet och deras fukthalt. Omgång 2 utfördes med syfte att producera briketter till gjutförsök samt komplettera omgång 1 med ytterligare briketryck i lägre nivåer.

Fem tunnor med blöta spånor från en CNC-maskin av legeringen 6082 levererades av Hydro från Östanå site i Vetlanda. Spånor med tre olika fukthalter briketterades. De tre olika fukthaltsnivåerna uppnåddes på följande sätt. Centrifugering av spånor genererade de torraste spånorna. Mellannivån uppnåddes genom att endast ta spånor från översta halvan i tunnorna då en viss avrinning skett. Den blötaste fraktionen spånor togs från den nedre halvan i tunnorna. Tre olika maskintyck användes, briketteringstrycket beror sedan på storleken på huvudcylindern och på brikettens tvärsnittsarea. Huvudcylindern hade en diameter på 180 mm och briketternas tvärsnittsarea var 60×40 mm i briketteringsmaskinen som användes. Se Tabell 2 nedan för vilka fukthaltsnivåer som har testats i vilka maskintyck / briketryck. *Låg* fukthaltsnivå har endast testats med det lägre maskintycket då det fanns betänksamheter kring att högre tryck med så pass torra spånor skulle potentiellt orsaka problem i form av kallsvetsning som leder till stopp i maskinen. Vid pressning av torra spånor kan en spray av smörjmedel appliceras för att minska friktionen, detta fanns det inte tillgång till i utfört spånbehandlingsförsök.

Tabell 2: Fukthaltsnivåer och maskintyck / briketryck som använt i försöken.

Maskintyck (bar) / Briketryck (kg/cm ²)			
Nominell fukthaltsnivå i brikett	220 bar / 2620 kg/cm ²	240 bar / 2858 kg/cm ²	260 bar / 3096 kg/cm ²
Låg	X	n/a	n/a
Mellan	X	X	X
Hög	X	X	X



(a)



(b)



(c)

Figur 1. Bilder från spånbehandlingsförsöken, (a) briketteringsmaskin och en tunna med spånor, (b) centrifugen och (c) briketterade spånor.

Densiteten uppmättes med Arkimedes princip i vågen som kan ses i Figur 2. Densiteten uppmättes på tio briketter från varje provserie. Vid nedsänkning av briketterna i vatten avgick luftbubblor i upp till 15 sekunder, varefter mätning gjordes. Längre väntan på ytterligare luftavgång gav upphov till mycket liten ökning av brikettens uppmätta densitet och bedöms försumbar.



Figur 2. Utrustning för att mäta densitet.

Fukthalten uppmättes enligt dokument "Detlev Thiermann, Metal analysis chemical laboratory", dock modifierades hålltider i ugnen något. Briketter för fukthaltsmätning placerades i förslutna plastpåsar i samband med brikettering. Inför provningen vägdes briketterna på en våg med noggrannhet på en hundradel av ett gram och placerades i djupa aluminiumformar. Efter vägningen placerades briketterna 24 timmar i 105°C ugn. Briketterna togs ut och fick svalna i exsickator och vägdes därefter igen. Briketterna placerades återigen i ugnen i 105°C, denna gång i 8 timmar. Briketterna togs ut och fick svalna i exsickator och vägdes därefter igen. Då ingen signifikant viktskillnad kunde uppmätas efter de sista 8 timmarna i ugn ansågs briketterna ha avgett det vatten och de lätta kolväten som de innehållit.

2.3 Gjutförsök

Gjutförsök har utförts i labbskala (10 kg smälta) hos RISE i Jönköping och i industriell skala (850 kg smälta) hos Comptech i Skillingaryd. Hos RISE göts provstavar i kokill och hos Comptech göts provstavar med rheogjutning.

2.3.1 Gjutförsök på RISE Jönköping

Försök med att smälta briketter i ugn och försök med tillsats av briketter till flytande aluminium har utförts. Som utvärdering av försök har utbytet uppmätts och smältans kvalitet har utvärderats med K-mould och RPT. Försöken utfördes i en 10 kg degelugn.

I ett första försök smältes cirka 3 kg briketter i en tom degel. I detta försök uppmättes endast utbytet, K-mould och RPT användes inte för utvärdering. Utbytet uppmättes genom att vikten på det flytande aluminiumet som skopas och hållts ut ur degeln efter nedsmältning divideras med vikten på briketterna som lades i den tomma degeln.

I en andra omgång försök tillsattes briketter i tre olika nivåer, 10%, 20% och 30%, i smält aluminium. Briketterna lades på ytan och inga försök att trycka ner dem under ytan gjordes. Vid tillsättning av 30% briketter sjönk temperaturen i smältan så pass mycket att ytan på smältan stelnade och bildade ett lock. Det slog eldslågor från briketterna och svart rök bildades, se Figur 3. En GoPro-kamera användes för att skapa en TimeLapse av nedsmältningen med syfte att dokumentera rökgaser. Det visades sig dock att rökgaserna var svåra att fånga på bild. Lukten påminde om lukten då olja bränns. Detta skulle kunna utgöra ett arbetsmiljöproblem vid smältning av större mängd spånor. Kvaliteten av smältorna utvärderades med hjälp av K-mould och RPT. För att bestämma utbyte antogs att all slag som skrapades av smältan efter tillsättning av briketterna härrör från briketterna.



Figur 3. Bild från försök hos RISE Jönköping där ca 2 kg briketter tillsattes till 8 kg smält aluminium.

2.3.2 Gjutförsök på Comptech Skillingaryd

Hos Comptech utfördes gjutförsök i en större ugn med inledningvis 850 kg smält aluminium av legering 42000. Gjutförsöket utfördes i steg där de tre stegen benämndes A, B och C, se tabell 3 nedan. Det första steget var en referenssmälta som bestod av ren 42000 legering, cirka 850 kg. I ett andra steg tillsattes totalt 74,4 kg briketter, varav 17,4 kg 44300-briketter och 57 kg 6082-briketter, se Figur 4, motsvarande totalt 8% av smältan. Enligt beräkningar av den kemiska sammansättningen skulle tillförseln av briketterna primärt sänka kiselhalten med 0,3%. Därför tillsattes också 3 kg kisel till smältan. Ingen smältabehandling gjordes. I syfte att uppskatta utbytet av de tillsatta briketterna avslaggades smältan innan provtagning och vikten på slaggen uppmättes. I ett sista steg avgasades smältan under 25 minuter med kvävgas i syfte att rena smältan. Efter avgasning avslaggades smältan och det avslaggade materialet vägdes i syfte att uppskatta utbytet. Från varje steg togs följande prover för utvärdering av smältan; K-mould \times 3, RPT \times 3, analys av kemisk sammansättning \times 1, rheogjutning av dragprovstavar \times 18. Dragprovstavarna frästes ut ur gjutna plattor.

Tabell 3: Sammanställning av de tre smältorna vid gjutförsöken hos Comptech.

Benämning på smältan	Beskrivning
A	Ren 42000 legering
B	42000 legering + 8 % briketter. Ingen avgasning.
C	42000 legering + 8 % briketter. Efter avgasning.



Figur 4. Bild från gjutförsök hos Comptech.

2.4 Utvärdering av gjutet material

Det gjutna materialet utvärderades genom att gjutna provstavar analyserades. Nivån av inneslutningar undersöktes med K-mould-teknik, porositeten undersöktes genom RPT/densitetsindex, och mekaniska egenskaper utvärderades genom dragprovning.

2.4.1 K-mould

En K-mould-form användes för att utvärdera nivån av inneslutningar i smältan. Figur 5 visar K-moulden tillsammans med ett gjutet prov. Gjutgodset bryts upp i fyra brottytor vid förtunningar och antalet inneslutningar på varje brottyta räknas för att få fram ett K-mould värde (K) enligt ekvation (1).

$$K=S/n \quad (1)$$

där

S = totalt antal inneslutningar i n antal brottytor

n = antal undersökta brottytor



Figur 5: K-mould-verktyget och ett gjutgods som ska brytas upp och utvärderas. Provet bryts vid pilarna.

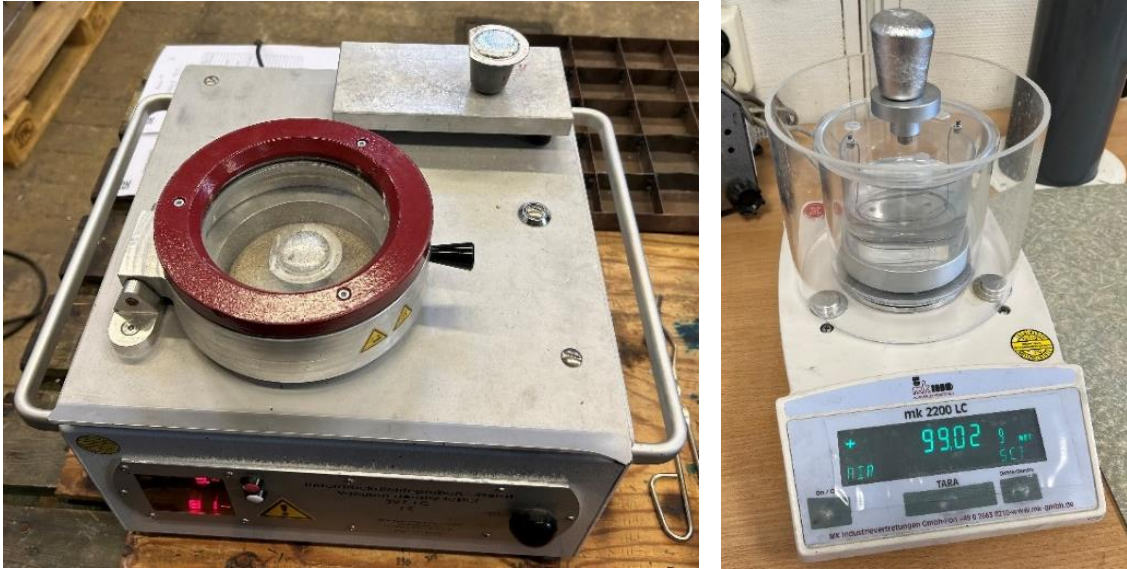
2.4.2 RPT

Smälta hälls i två RPT-koppar. En får stelna i en kammare under reducerat tryck (80 mbar) och den andra stelnar utanför kammaren under atmosfärstryck. Prov som stelnat vid atmosfärstryck markerades med A (ambient air) och prover stelnade vid reducerat tryck markerades R (RPT). Ett nummer på varje prov lades till för att identifiera "RPT-paret". Densitetsindex (DI) i procent beräknades enligt ekvation (2). Där D_{air} = densiteten hos provet stelnat vid atmosfärstryck och D_{RPT} = densiteten hos provet stelnat vid reducerat tryck. Densiteten av proverna mättes med Archimedes-principen, mätning av provets vikt i luft och nedsänkt i vatten. Se Figur 6 för bilder på den utrustning som används.

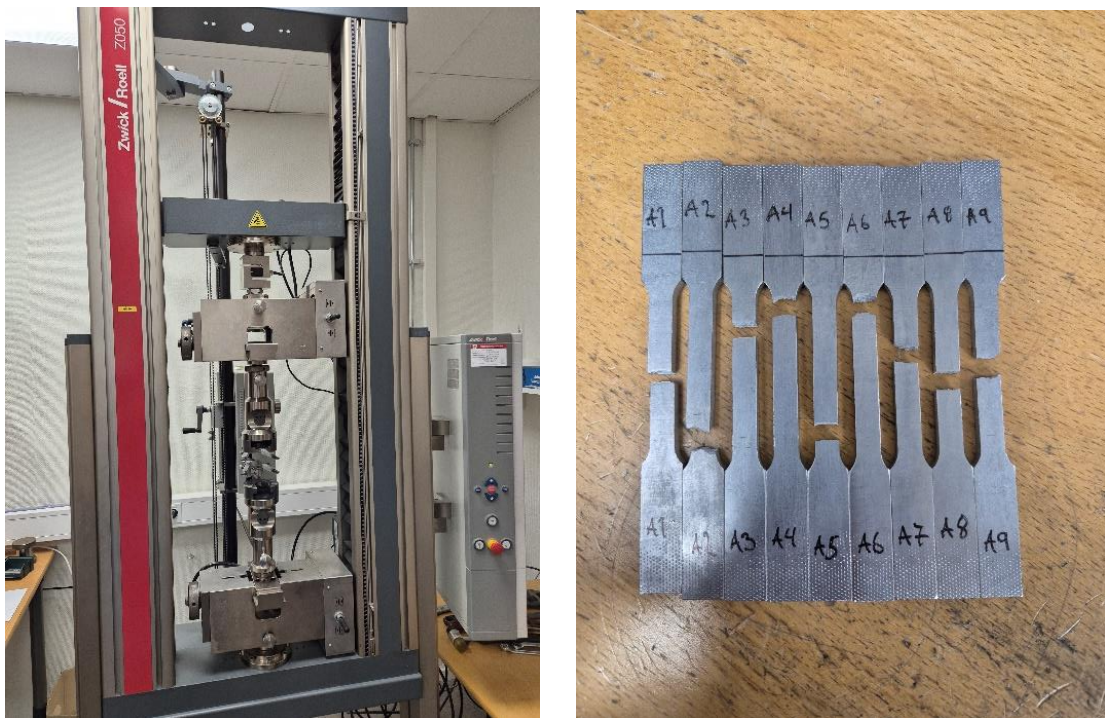
$$DI = \frac{D_{air} - D_{RPT}}{D_{air}} \times 100 \quad (2)$$

2.4.3 Dragprovning

Dragprovning är en metod för att mäta ett materials mekaniska egenskaper, exempelvis elasticitet (E), sträckgräns ($R_{p0.2}$), brottsgräns (R_m) och brottsförlängning (A_5) i ett material. Provstavar bearbetas fram enligt önskad standard beroende på material och storlek. Prover spänns upp i dragbackar eller kläms fast upptill och nedtill, beroende på dragprovets utformning. Två sensorer, s.k. extensiometrar, med ett visst avstånd emellan varandra, läggs emot staven. Därefter börjar staven dras isär. Extensiometrarna följer med materialet när det dras isär, och när staven bryter så erhålls parametrarna som skulle mätas. Dragprovstrustningen hos RISE samt provstavar visas i Figur 7.



Figur 6: RPT-utrustningen och våg för densitetsmätningar.



Figur 7: Dragprovningstrustning samt provstavar.

3 Resultat

Litteraturstudien sammanfattar innehållet från ett tiotal relevanta publikationer och gav viktiga inspel till utformningen av försöken. Den visade bland annat att utbytet av återvunnet material förbättras avsevärt om bearbetningsspånor först pressas till briketter, men också att en rad parametrar vid förbehandlingen kan inverka på resultatet. Indikationer fanns också på att behandling av smältan kan vara nödvändig för att uppnå fullgoda materialegenskaper hos det gjutna materialet. De olika publikationerna skilde sig dock åt i detta fall, vilket underströk vikten av fortsatta undersökningar.

Litteraturstudien återfinns i sin helhet i Bilaga A.

3.1 Förbehandling av spånor

Skärvätskeblöta spånor upphettades till 800 °C och gaserna som avgavs analyserades med masspektrometer. Viktförlusten blev 28%. I processen avgavs koldioxid och vatten samt väte, kol, fosfor, svavel, klor och kalcium. Alla dessa ämnen är karakteristiska för vanliga typer av skärvätskor. Försöket upprepades med spånor som först torkats i 300 °C. Viktförlusten blev nu något lägre, 18%, vilket visar att torkningen hade viss effekt men att en tredjedel av skärvätskan fortfarande fanns kvar i spånorna. Samma ämnen avgavs i detta fall. Resultaten redovisas i detalj i Bilaga B.

3.2 Briketteringsförsök, omgång 1

I tabell 4 nedan visas resultat från briketteringsförsök i omgång 1.

Tabell 4: Resultat från briketteringsförsök omgång 1.

	Hög fukthalt			Mellan fukthalt			Låg
	2620	2858	3096	2620	2858	3096	2620
Briketryck (kg/cm ²)	2620	2858	3096	2620	2858	3096	2620
*Massa vätska (kg)	6,20	2,80	-	4,15	4,30	4,95	0
Massa briketter (kg)	16,60	12,6	20	18,56	18,05	21,05	17,5
Antal briketter (st)	70	40	73	59	68	77	63
Längd (mm), medelvärde ± 2×σ	45 ± 7	46 ± 12	43 ± 15	47 ± 7	47 ± 5	46 ± 12	46 ± 13
*uppsamlad vätska i briketteringsmaskinen							

Det har konstaterats att tillverkade briketter håller ihop mycket väl och klarar att släppas från två meters höjd ner i golvet utan att falla sönder (drop test). Briketrycken som använts är högre än rekommenderat enligt tabell från Ville på Gothia Maskin, se utdrag i Tabell 5. Dock har Hydro kommenterat att briketrycken i gjorda experiment är relevanta då de ligger i paritet med vad de har tänkt att använda i sin briketteringsprocess. I omgång 2 av briketteringsförsöken testades även lägre tryck.

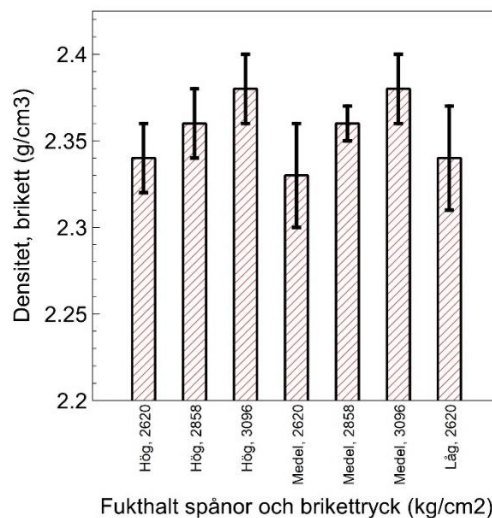
Tabell 5: Rekommenderade briketryck för aluminium. Plastiskt bearbetade legeringar som använts i detta försök är markerad.

	Bulk density	Typical briquette density	Max obtainable briquette density	Solid material density kg/dm ³	Recommended briquetting pressure kg/cm ²
Material					
Aluminium:					
Diecast alloy	0.2-0.6	2.2	2.4	2.65-2.75	1600-3000
Profiled chips (extrusion, wrought alloy)	0.15-0.4	2.4	2.58	2.65-2.75	1200-2000
Light alloy chips	0.3-1.4	2.1	2.26	2.65-2.75	1600-3000
Aviation alloys	0.1-0.4	2.2	2.29	2.65-2.75	1600-3000

Tabell 6 visar resultaten från densitetsmätningarna. Vid upprepade mätningar på samma brikett kunde avvikelser på upp till $\pm 0,03$ noteras. Även om skillnaderna i densitet är ganska små så är trenden ökad densitet med ökat briketryck. På grund av osäkerheterna skulle kanske densiteten redovisats med endast en decimal men då hade inte trenden med ökande densitet varit synlig. Figur 8 visar resultatet i grafisk form och det kan konstateras att skillnaderna i brikettdensitet är små.

Tabell 6: Densitet

Nominell fukthaltsnivå hos spånor	Maskintryck (bar)	Briketryck (kg/cm ²)	Densitet (g/cm ³)
Hög	220	2620	2,34 \pm 0,02
Hög	240	2858	2,36 \pm 0,02
Hög	260	3096	2,38 \pm 0,02
Medel	220	2620	2,33 \pm 0,03
Medel	240	2858	2,36 \pm 0,01
Medel	260	3096	2,38 \pm 0,02
Låg	220	2620	2,34 \pm 0,03

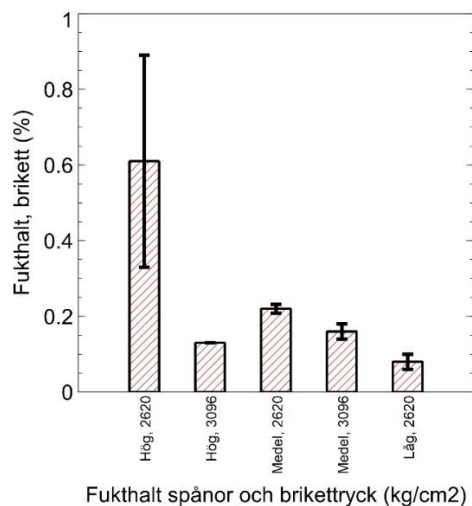


Figur 8: Resultat av densitetsmätningar i omgång 1 med variation av nominell fukthalt på spånor samt variationen i briketryck.

Tabell 7 visar resultaten från fukthaltsmätningarna. Den fukthalt som redovisas i tabellen består av vatten och lätta kolväten som avges vid 105°C. Tyngre kolväten kan finnas kvar. Figur 9 visar resultaten i grafisk form och det som kan konstateras är att en hög nominell fukthaltsnivå av spånor och ett lägre briketryck har resulterat i en högre fukthalt i briketterna.

Tabell 7. Resultat från fukthaltsmätningarna. Fukthalt i *fet* stil är medelvärden av de tre mätningarna i parenteserna.

Nominell fukthaltsnivå hos spånor	Maskintryck (bar)	Briketryck (kg/cm ²)	Fukthalt (%)	Fukthalt (g)
Hög	220	2620	0,61 (0,60; 0,75; 0,47)	1,39 (1,34; 1,74; 1,08)
Hög	260	3096	0,13 (0,13; 0,13; 0,13)	0,32 (0,32; 0,34; 0,30)
Medel	220	2620	0,22 (0,22; 0,23; 0,22)	0,49 (0,44; 0,52; 0,50)
Medel	260	3096	0,16 (0,17; 0,16; 0,15)	0,39 (0,42; 0,40; 0,36)
Låg	220	2620	0,08 (0,09; 0,08; 0,07)	0,18 (0,20; 0,18; 0,16)



Figur 9: Resultat av fukthaltsmätningar i omgång 1 med variation av nominell fukthalt på spånor samt variationen i briketryck.

3.3 Briketteringsförsök, omgång 2

I omgång 2 centrifugerades spånor innan brikettering. De olika tryck som användes redovisas i Tabell 8. Efter pressning av briketter följde densitetsmätningar och mätningar av fukthalt.

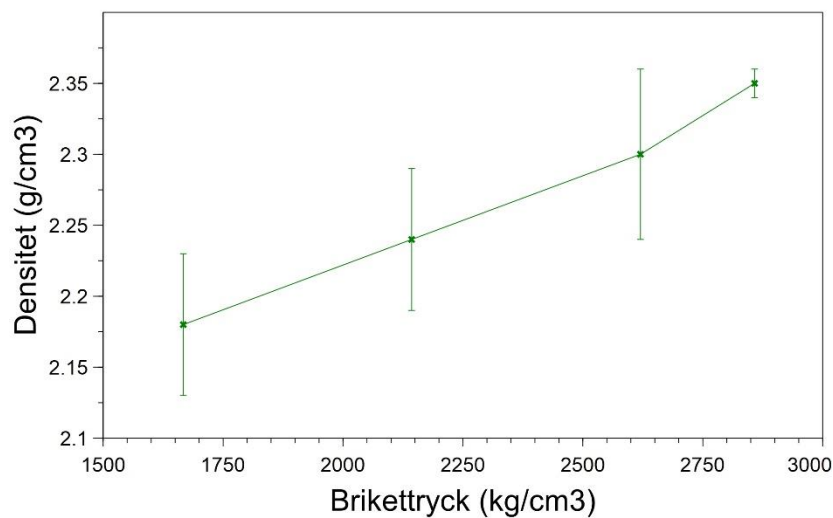
Tabell 8. Resultat från briketteringsförsök omgång 2.

Maskintryck (bar)	140	180	220	260
Briketryck (kg/cm ²)	1667	2143	2620	2858

Densitetsmätning utfördes på 10 stycken briketter från varje briketryck och resultatet redovisar i tabell 9 nedan. I figur 10 visas en grafisk representation av densiteten som en funktion av briketryck, densitetsökningen är näst intill linjär.

Tabell 9. Resultat av densitetsmätningar, omgång 2. Redovisad mätosäkerhet är $2 \times$ standardavvikelsen.

Maskintryck (bar)	Briketryck (kg/cm ²)	Densitet (g/cm ³)
140	1667	2,18 ± 0,05
180	2143	2,24 ± 0,05
220	2620	2,30 ± 0,06
260	2858	2,35 ± 0,01



Figur 10: Resultat av densitetsmätningar i omgång 2 med variation av briketryck. Felstaplarna visar $2 \times$ standardavvikelsen.

Tabell 10 visar resultat från fukthaltsmätningarna. Den fukt som avgått består av vatten och lätta kolväten som avges vid 105°C. Tyngre kolväten kan finnas kvar.

Tabell 10. Resultat från fukthaltsmätningarna. Fukthalt i **fet** stil är medelvärden av de tre mätningarna i parenteserna.

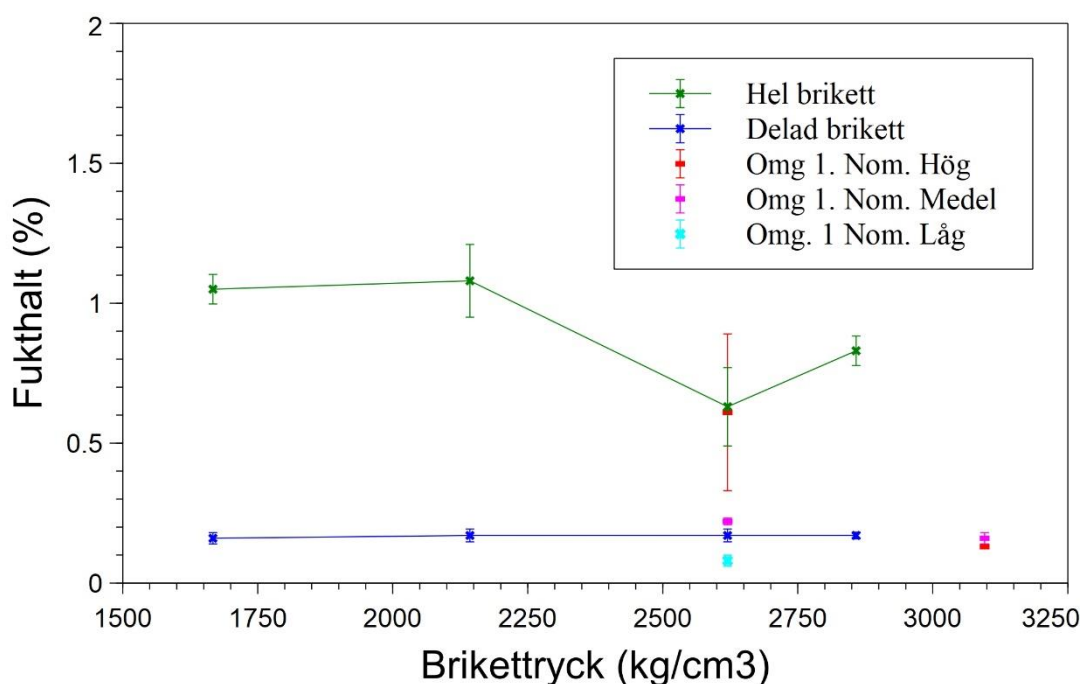
Maskintryck (bar)	Briketryck (kg/cm ²)	Fukthalt (%)	Fukthalt (g)
140	1667	1,05 (1,06; 1,07; 1,02)	2,41 (2,54; 2,34; 2,34)
180	2143	1,08 (1,02; 1,15; 1,08)	2,39 (2,28; 2,56; 2,34)
220	2620	0,63 (0,68; 0,66; 0,55)	1,39 (1,50; 1,46; 1,22)
260	2858	0,83 (0,85; 0,84; 0,80)	1,87 (1,92; 1,86; 1,82)

Efter att fukthalten mätts på de hela briketterna mättes den en gång till efter att briketterna sågats itu. Syftet var att förstå huruvida fukt stängs inne i de pressade briketterna eller inte. Proceduren för fukthaltsmätningen var den samma som första gången. Resultatet visas i tabell 11 nedan.

Tabell 11. Resultat från fukthaltsmätningarna av uppsågade briketter. Fukthalt i **fet** stil är medelvärden av de tre mätningarna i parenteserna.

Maskintryck (bar)	Brikettryck (kg/cm ²)	Fukthalt (%)	Fukthalt (g)
140	1667	0,16 (0,15; 0,16; 0,17)	0,31 (0,29; 0,31; 0,34)
180	2143	0,17 (0,16; 0,18; 0,18)	0,34 (0,32; 0,35; 0,35)
220	2620	0,17 (0,17; 0,17; 0,15)	0,33 (0,34; 0,34; 0,32)
260	2858	0,17 (0,17; 0,17; 0,16)	0,35 (0,36; 0,34; 0,34)

I Figur 11 visas resultat av fukthaltsmätningarna i omgång 2 för både hela och delade briketter. Det kan konstateras att skillnaden i fukthalt mellan de olika brikettrycken är relativt små vilket indikerar att majoriteten av fukten avlägsnats vid centrifugeringen och att mycket lite extra skärvätska pressats ut i briketteringen. Efter att briketterna delats minskar fukthalten ytterligare något från en redan låg nivå.



Figur 11: Resultat av fukthaltsmätningar av hela och delade briketter i omgång 2 med variation av brikettryck. Felstaplarna visar 2 × standardavvikelsen.

3.4 Gjutförsök på RISE

Försök med att smälta briketter i ugn och försök med tillsats av briketter till flytande aluminium har utförts. I gjutförsöken har briketter med densitet på 2,18 respektive 2,35 g/cm³ använts.

I ett första försök smältes cirka 3 kg briketter i en tom degel. I detta försök uppmättes utbytet, K-mould och RPT användes inte för utvärdering, se resultat i tabell 12.

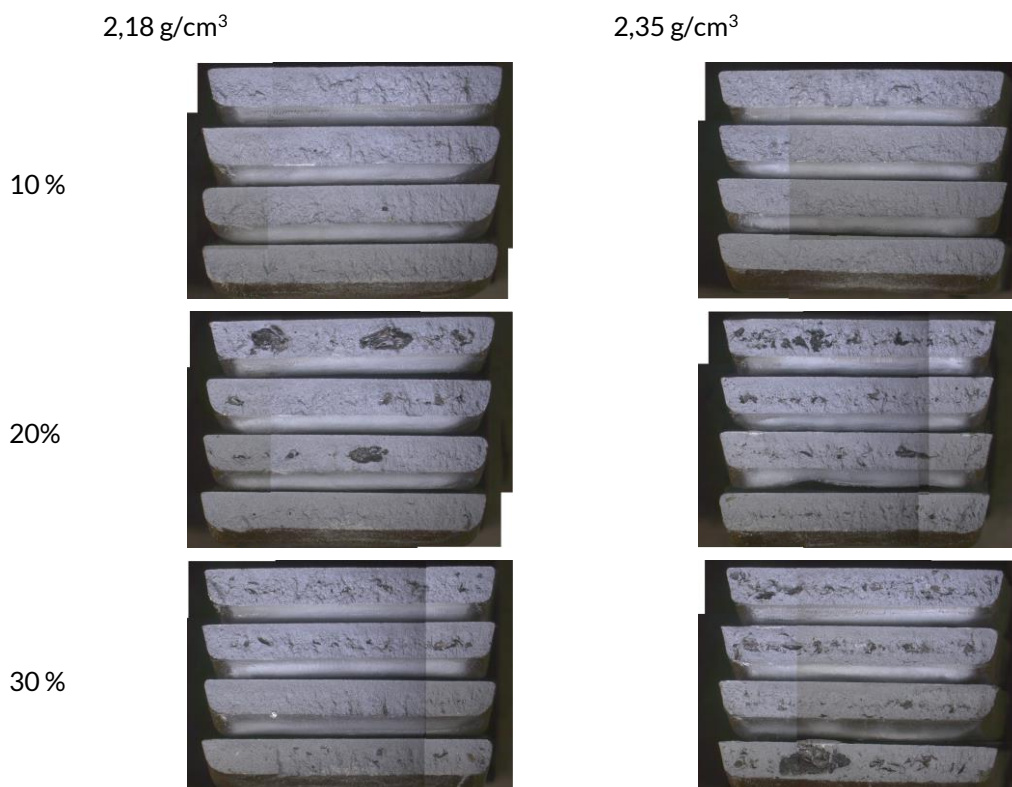
Tabell 12. Utbyte vid smältning av briketter i tom degel.

	Densitet, briketter	2,18 g/cm ³	2,35 g/cm ³
Material IN	Vikt, briketter	3033 g	3051 g
Material UT	Vikt, smält aluminium	2094 g	2153 g
	Utbyte	69 %	71 %

I en andra omgång försök tillsattes briketter i tre olika nivåer, 10, 20 och 30 %, till smält aluminium. Försök utfördes med briketter med lägsta och högsta densiteten i omgång 2, (2,18 respektive 2,35 g/cm³). Resultat för utbyte redovisas i tabell 13. Kvaliteten av dessa sex olika smältor utvärderades med hjälp av K-mould och RPT.

Utbytet varierar från 63% upp till 85%. Vid jämförelse kan vi se att för 10% och 20% tillsatta briketter är utbytet liknande för de två olika densiteterna på briketter. 30% tillsatta briketter gav däremot olika resultat, där briketter med den lägre densiteten gav ett utbyte på 73% och den högre densiteten gav ett utbyte på 85%. En tänkbar förklaring till det högre utbytet vid ökad tillsats av briketter skulle kunna vara att en större andel av briketterna var under ytan på smältan då fler briketter tillsattes. Detta kan ha resulterat i mindre oxidation av aluminiumet och därmed mer nedsmält aluminiumlegering.

Fem K-mould-gjutningar gjordes för varje testkombination, det vill säga totalt 30 st K-moulds göts upp. Bilder av sex st brottytor från K-mould visas i Figur 12, resterande finns i Bilaga C.



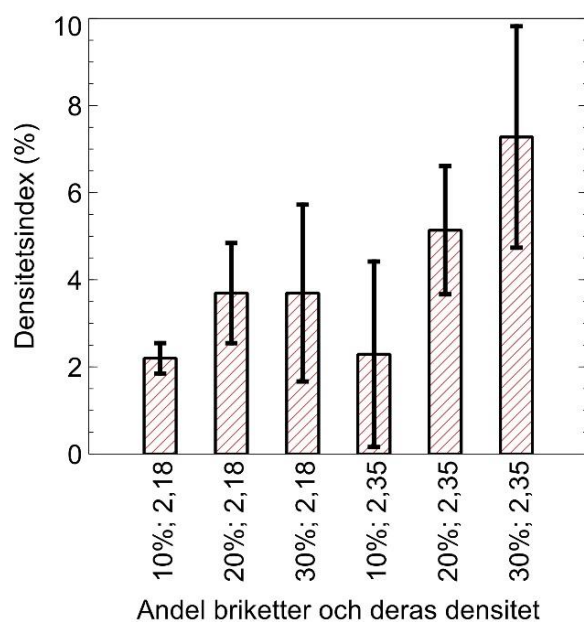
Figur 12. Resultat från utvärdering av K-mould. Fotografier för två av tio uppsättningar brottytor av K-mould gjutningar.

Vanligtvis utvärderas K-mould-gjutningar genom att antalet inneslutningar i brottytan räknas. Då antalet inneslutningar är mycket stort i vissa brottytor och även svåra att särskilja har endast en okulär bedömning gjorts. Bedömningen är att det är en något högre andel inneslutningar på brottytorna i proverna med 2,35 g/cm³ jämfört med 2,18 g/cm³. En tydligare trend är att brottytor i smältorna med 10% briketter har en mindre andel svarta inneslutningar jämfört med smältor med 20 och 30% briketter. Inga tydliga skillnader har kunnat observerats mellan 20 och 30% tillsatta spånor. Vi kan alltså konstatera att risken att få med stora inneslutningar i sitt gjutgods ökar med ökad andel briketter i smältan. Ett reningssteg i form av filtrering eller avgasning skulle kunna påverka mängden inneslutningar, inga sådana försök har dock utförts i denna smälta men avgasning har utförts vid gjutningen hos Comptech.

Resultat från RPT visas i Tabell 13 och Figur 13. Resultaten från RPT mätningarna visar inte på några entydiga trender även om man kan ana ett visst ökat densitetsindex med högre andel briketter. Detta skulle kunna vara ett resultat av en ökad mängd porer till följd av ökat antal kärnbildningspunkterspunkter för gasporer i smältan, porer som sänker densiteten på det prov som stelnar vid reducerat tryck.

Tabell 13. Utbyte vid smältning av briketter i smält aluminium.

		2,18 g/cm ³			2,35 g/cm ³		
		10 %	20 %	30 %	10 %	20 %	30 %
Material IN	Vikt, briketter (g)	1018	2044	2992	1022	2022	2983
	Vikt, smält aluminium (g)	9031	7988	6940	9001	7978	7068
Material UT	Vikt, smält aluminium (g)	9657	9486	9097	9626	9426	9633
	Vikt, slagg (g)	374	518	818	371	529	440
Utbyte		63 %	75 %	73 %	64 %	74 %	85 %



Figur 13: Resultat av RPT mätningar. Felstaplar visar en standardavvikelse.

3.5 Gjutförsök på Comptech Skillingaryd

Tre gjutförsök utfördes på plats hos Comptech, där prover för kemisk sammansättning, K-mould, RPT och dragprovning göts fram för senare analys hos RISE i Jönköping. Förutsättningar för respektive försök enligt följande:

- Försök A: Referenssmälta med 850 kg EN 42000. Avgasad före provtagning.
- Försök B: Smältan från försök A, men med tillsats av ca 8 % briketter. Ingen avgasning före provtagning.
- Försök C: samma smälta som vid försök B, men denna gång med avgasning före provtagning.

Provmaterial som togs ut vid varje försök är:

- Kemanalysprov x 1
- K-mould x 3
- RPT x 3
- Dragprovsmäna x 18. Utav dessa ska hälften genomgå värmebehandling före dragprovningen.

Vid försök C, efter att avgasning utförts bildades stora mängder slagg, som var lättare och mer porös än vanligt. En kraftig ökad slaggmängd skulle tyda på ett lågt utbyte av metall från briketterna. Totalt avlägsnades dock endast 8 kg slagg från smältan, vilket motsvarar knappt 1% av smältans totala vikt. Detta kan anses jämförbart med en normal smälta, och utbytet av tillsatta briketter var därför bra.

Kemisk sammansättning togs fram med spektrometeranalys (fullständig analys visas i Bilaga D). Ursprungslegeringen liknade EN 42000 (AlSi7Mg), men med högre nivåer på järn. Därav jämförs de provresultat som framkommit i försöket mot referenssmältan före brikettering. Utdrag ur standarder tas med endast upplysningsvis, då sammansättningen i övrigt matchar. Verifikation har gjorts mot kontrollprover som matchar de gränsvärden standarden uppger. Figur 14 visar kemisk specifikation för EN 42000.

Alloy designation		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb ^m	Su	Ti ^h	Others ^{a, g}		Aluminium
Numerical	Chemical symbols												Each	Total	
EN AC-42000 ⁱ	EN AC-Al Si7Mg	6.5 to 7.5	0.55 (0.45)	0.20 (0.15)	0.35	0.20 to 0.65 (0.25 to 0.65)	—	0.15	0.15	0.15	0.05	0.25 ^j (0.20)	0.05	0.15	Remainder

Figur 14: Legeringssammansättning EN 42000. Siffror inom parentes avser sammansättning på tackor.

Tabell 14: Kemisk sammansättning i de tre försöken.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
Smälta A	7,24	0,848	0,0511	0,0781	0,229	0,00757	0,0329	0,0179	0,00206	0,0814
Smälta B	7,48	0,803	0,0545	0,0982	0,254	0,00856	0,0347	0,0168	0,00271	0,0746
Smälta C	7,39	0,801	0,0534	0,0968	0,250	0,00867	0,0346	0,0141	0,00278	0,0765

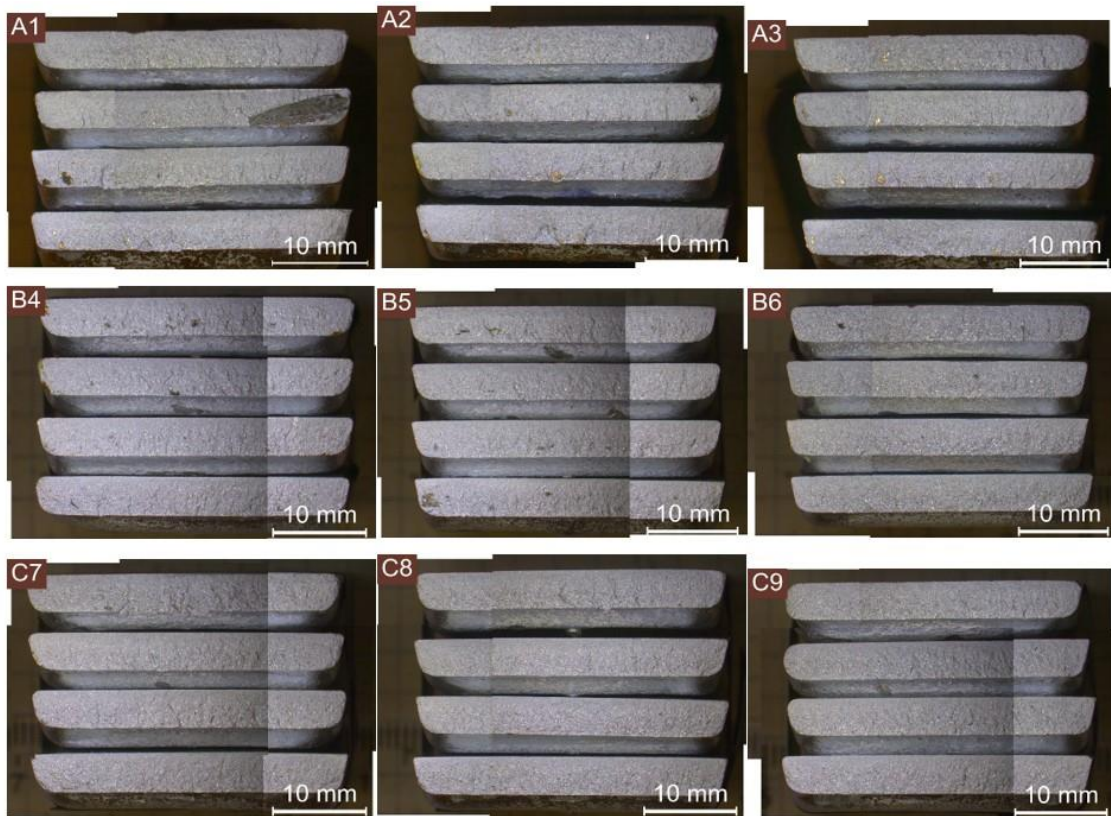
Vid försöket hos Comptech göts tre K-mould prover upp för varje testkombination, totalt 9 st. Bilder på dessa brottytor visas i Figur 15. Vid detta försök har antalet inneslutningar i brottytorna varit på en hanterbar nivå, jämfört med gjutförsöken som gjordes hos RISE. K värde för respektive försök redovisas nedan.

Smälta A: $K = 2$

Smälta B: $K = 10,7$

Smälta C: $K = 5$

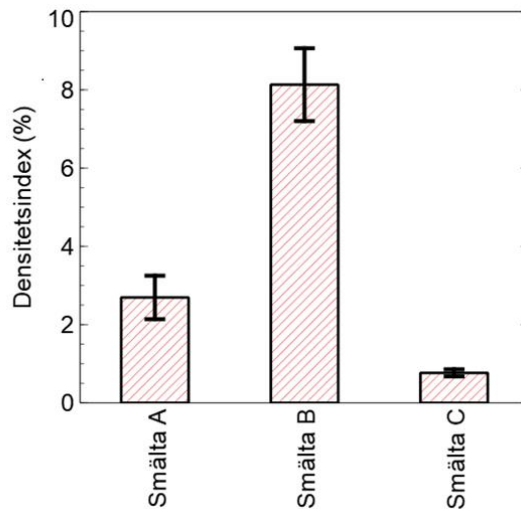
Lägst K-värde fås i referenssmältan (A). När briketter tillsats ökar K-värdet femfaldigt i en obehandlad smälta (B), för att sedan halveras efter avgasning (smälta C). Värt att notera är att alla inneslutningar som detekterats i smälta C är av mikroskopisk storlek, så även om K-värdet i detta fall är högre än i den "rena" referenssmältan, så är den totala arean av inneslutningar i brottytorna betydligt mindre i smälta C.



Figur 15: Brottytor från K-mould provning.

Resultat från RPT (densitetsmätning) visas i Figur 16. Resultaten från RPT-mätningarna visar vid densitetsmätning en ökning av densitetsindex med en faktor 3 då smältan inte avgasas efter tillsats av briketter, jämfört med prover före tillsats. Proven tagna efter att smältan avgasats och slagats av (försök C), påvisar i stället en minskning av densitetsindex till en fjärdedel av det ursprungliga värdet från försök A.

Detta tyder på att man lyckats väl med avgasning och avslagning, och att mängden porösa inneslutningar och gaser i smältan är väldigt låg.



Figur 16: Resultat av RPT-mätningar. Felstaplar visar en standardavvikelse.

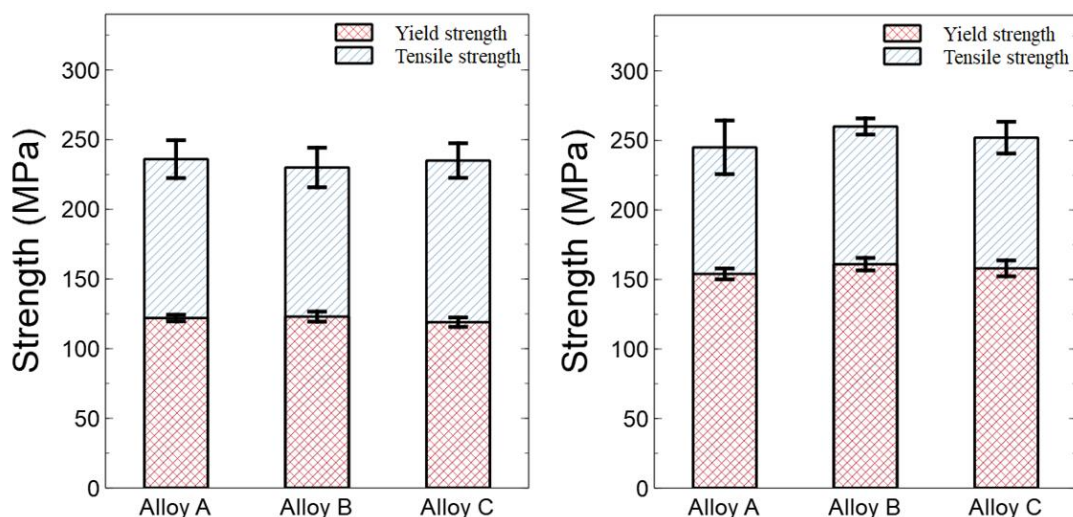
Totalt framställdes 18 dragprovstavar från respektive smälta. Av dessa drogs 9 st från respektive smälta obehandlade, medan resterande genomgick en värmebehandling T6 innan dragprovning. Upplösningsbehandling gjordes i 540 °C under 4 timmar, för att sedan släckas i vatten, ca 70 °C i 5 minuter. Sedan genomfördes åldring vid 155°C i 5 timmar, varefter provstavarna fick svalna i luft. Utdrag ur standarden EN 1706 uppvisande de mekaniska egenskaperna för EN 42000 ses i Figur 17.

Alloy group	Alloy designation		Temper designation	Tensile strength R_m MPa min.	Yield strength $R_{p0.2}$ MPa min.	Elongation A % min.	Brinell hardness HBW min.
	Numerical	Chemical symbols					
Al	—	Al 99,6E	F	75	—	30	17
	—	Al 99,7E	F	75	—	30	17
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	T4	320	200	8	90
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	T6 T64	330 320	220 180	7 8	95 90
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi	F	170	70	5	50
			T6	260	180	5	85
	EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg	F	170	90	2,5	55
			T6	260	220	1	90
			T64	240	200	2	80

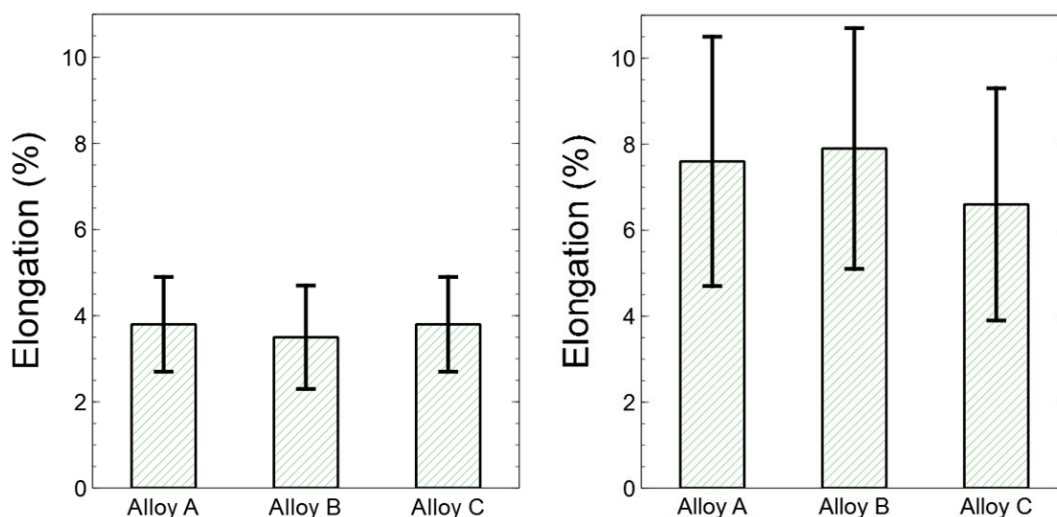
Figur 17: Utdrag ur EN 1706 - Mekaniska egenskaper för EN 42000 markerad.

Resultaten från dragprovningarna redovisas i Figur 18 och 19, där diagrammen till vänster i varje figur visar resultaten "as cast" och till höger ses värden från efter genomförd värmebehandling. Inga direkta skillnader på de mekaniska egenskaperna mellan de olika smältorna kan utläsas ur dessa resultat (Bilaga E).

En viss ökning av sträckgränsen kan utskiljas efter värmebehandling, samt en betydande ökning av förlängningen. Spridningen på förlängningsvärdena varierar dock ganska mycket, och skulle kunna bero på hur orienteringen av provstavarna varit vid frambearbetning.



Figur 18: Resultat från sträck- respektive brottgränser för smältorna A-C. Till vänster värden "as cast", till höger värden efter värmebehandling. Felstaplar visar en standardavvikelse.



Figur 19: Resultat från förlängning (A%) för smältorna A-C. Till vänster värden "as cast", till höger värden efter värmebehandling. Felstaplar visar en standardavvikelse.

Jämförelsevis kan tilläggas att det obehandlade materialet klarar kraven för sträck- och brottgräns enligt EN 1706 om man jämför med legeringen EN 42000. Efter upplösnings behandling och åldring kan en liten höjning av sträck- och brottgränserna utskiljas. Förlängningen klarar med god marginal kravgränsen både före och efter värmebehandling enligt samma standard.

4 Diskussion och slutsats

Syftet med försöket var att prova och utvärdera användandet av briketterade spånor som tillsats i en aluminiumsmälta i industriell skala, vilket har gjorts genom att jämföra provresultat från smältan före och efter tillsats av briketter, samt efter att smältan avgasats efter briketttillsats. Målet var att uppnå likvärdiga mekaniska egenskaper som den gjutna komponenten har i dagsläget.

Mängden fukt (vatten och lätta kolväten) i pressade briketter måste minimeras. Centrifugering av spånor innan brikettering har inte påverkat den slutliga fukthalten i briketterna. Pressningen av briketter driver ut så pass mycket skärvätska att ingen skillnad i briketternas fukthalt har kunnat uppmätas oavsett om spånorna centrifugerats eller inte. Inte heller förtorkning vid 300 °C hade någon effekt på slutresultatet.

Vid försök med tillsats av briketter till liten smälta (10 kg) ökade mängden inneslutningar markant då andelen briketter ökade från 10% till 20%. Även vid fullskaleförsök med en större smälta (850 kg) syntes en tydlig skillnad avseende inneslutningar mellan en referenssmälta och efter tillsats av ca 8% briketter. Efter avgasning av smältan med tillsatta briketter sker dock en avsevärd minskning av mängden inneslutningar, både i fråga om antal och storlek.

Tillsats av briketter ger en märkbar skillnad avseende densitet före och efter tillsats av briketter. Avgasning och ordentlig avslagning minskade mängden porösa inneslutningar och gaser betydligt, även i jämförelse med referenssmältan utan brikett-tillsats. Detta bekräftas även vid studier av brottytor där de avvikelser som förekommer är på mikroskopisk nivå.

Ett gott utbyte från briketterna uppnåddes, och även om en ökning av mängden inneslutningar och ”skräp” kunde detekteras efter briketttillsats, så kan dessa till stor del avlägsnas med efterföljande avgasning. Intressant är också att resultaten från dragprovningen inte visar någon större skillnad mellan de olika försöksstegen. Detta innebär att avgasning av smälta med impeller som ger väldigt bra densitetsindex inte tillför någon förbättring av mekaniska egenskaper vilket i sin tur innebär att det som är defektdrivande i första hand inte är gasinneslutningar i smältan utan något annat som med största sannolikhet är oxider.

I fullskaleförsöket har inga direkta skillnader i mekaniska egenskaper mellan referenssmälta och smälta med tillsatta briketter detekterats, varken före eller efter avgasning. Utifrån detta arbete tycks det som att tillsatsen av spånor i form av briketter kan vara en bra och hanterbar lösning ur ett hållbarhetsperspektiv, samtidigt som det inte har påverkat materialet i denna studie negativt. Det bör dock utföras ytterligare tester för att verifiera detta, framför allt när det gäller applikationer med högre krav.

5 Bilagor

1. Litteraturstudie
2. Chips burning experiments
3. K-mould Jönköping
4. Kemanalys Compthech
5. Dragprovning Comptech

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 2,800 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 2 800 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
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Komponentgjutning
RISE Rapport 2025:28
ISBN: 978-91-90036-12-9