2006:078 CIV

EXAMENSARBETE

Detektering av igensättningar i gjutrör

LINA LINDÉN

CIVILINGENJÖRSPROGRAMMET
Elektroteknik

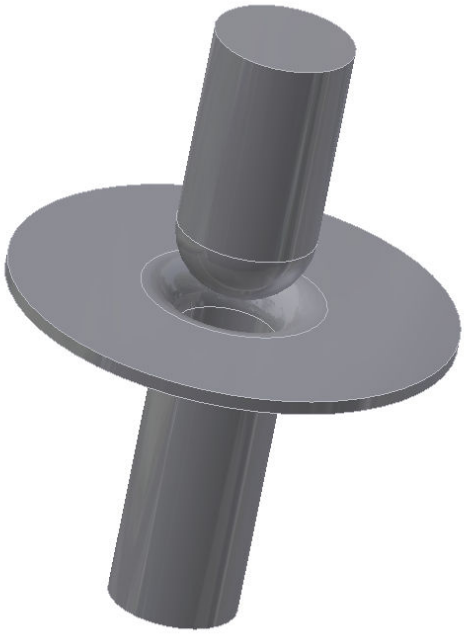
Luleå tekniska universitet
Institutionen för Systemteknik
Avdelningen för Reglerteknik

LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

2006:078 CIV • ISSN: 1402 - 1617 • ISRN: LTU - EX - - 06/78 - - SE

Detektering av igensättningar i gjutrör

Examensarbete Civilingenjörsprogtammet
Elektroteknik med inriktning Reglerteknik



Lina Lindén

Luleå tekniska universitet
Institutionen för Systemteknik
Avdelningen för Reglerteknik

Abstract

This report is a Master's Thesis in the subject of Automatic Control at Luleå University of Technology. The work has been performed at SSAB Tunnplåt AB in Luleå.

Clogging due to slag, steel and oxides sticking to the casting nozzle wall has for a long time been one of the biggest issues in continuous casting of alumina killed steel. Researchers and technicians have been focusing on this for the past years both in Sweden and internationally. Clogging cause many problems related to process control and quality of the final product.

Ultra low carbon steel with high strength and special alloys, in particular titanium, which are produced at SSAB in Luleå demands extra good process control. These steels also impose higher mechanical demands on the continuous casting machine.

In this study availible methods are evaluated. This work includes a study of the most recent articles in the area of continuous casting and especially clogging. A description of the continuous casting machine in Luleå is also included focusing on which measurements that are availible and how they can be useful for clogging detection.

Clogging is a typically multiplicative fault signal. In this study an algorithm producing an index for clogging detection is developed. Moreover is the characteristics of the nozzle valve estimated. Some other models to describe the steel flow in the nozzle are also examined.

A good detection of clogging will make it easier to evaluate different methods for eliminating or reducing clogging in continuous casting.

Sammanfattning

Den här rapporten är ett examensarbete i Reglerteknik på Luleå tekniska universitet. Arbetet har utförts vid SSAB Tunnplåt AB i Luleå.

Igensättningar som beror på att slagg, stål och oxider fäster inuti gjutröret har länge varit ett av de största problemen inom kontinuerlig stränggjutning av aluminiumsläckt stål. På senare år har forskare och tekniker intresserat sig för detta problem både i Sverige och internationellt. Igensättningar orsakar många problem relaterade till processtyrning och kvaliteten på slutprodukten.

De extremt lågkolhaltiga stål med hög hållfasthet och speciallegeringar, speciellt titan, som produceras på SSAB i Luleå kräver extra bra processtyrning. Även mekaniskt ställer dessa stål högre krav på stränggjutningsmaskinen.

I detta arbete undersöks olika metoder. Arbetet inkluderar en studie av de nyaste forskningsartiklarna i ämnet stränggjutning och då speciellt igensättningar. Det innehåller också en beskrivning av stränggjutningsmaskinerna i Luleå och då med speciellt fokus på de mätningar som görs och hur de kan användas för att identifiera igensättningar.

Igensättningar är en multiplikativ felsignal. I det här arbetet har en algoritm för att ta fram ett index för att detektera igensättningar utvecklats. Dessutom har en ventilkurva för stopparen tagits fram. Några andra modeller för att beskriva stålflödet genom gjutröret har också undersökts.

En bra detektering av igensättningar kommer att göra det enklare att prova olika metoder för att eliminera eller minska igensättningsgraden i kontinuerlig stränggjutning.

Förord

Detta är ett examensarbete i Elektroteknik med inriktning mot Reglerteknik vid Luleå tekniska universitet. Examensarbetet är den avslutande delen på civilingenjörsutbildningen. Arbetet är utfört på SSAB Tunnplåt AB i Luleå under hösten och vintern 2005 och 2006 och gäller specifikt feldetektering.

Jag vill tacka min handledare på SSAB, Linus Ahlström. Jag vill också tacka Robert Johansson på SSAB och min examinator Andreas Johansson på LTU för deras stora engagemang i mitt arbete vad det gäller idéer och diskussioner kring olika uppslag. Dessutom vill jag också tacka alla medarbetare på SSAB och då speciellt Kjell Lindquist, Mats Kågström, Åke Lakso och Jari Kallunki vilkas hjälp under arbetets gång varit ovärderlig. Jag är också glad för alla de som intresserat sig för mitt projekt och kommit med idéer och synpunkter både ute på golvet och under fikaraster.

Luleå februari 2006

Lina Lindén

Innehåll

1 Inledning 9
1.1 Bakgrund 9
1.2 Mål 9
1.3 Avgränsningar 9
1.4 Arbetets upplägg 10
2 Stålprocessen och beskrivning av anläggningen 11
2.1 Verksamhetsbeskrivning för SSAB Tunnplåt AB 11
2.1.1 Koksverk 11
2.1.2 Masugn 12
2.1.3 Svavelrening 12
2.1.4 LD-konvertering 12
2.1.5 Skänkmetallurgi 12
2.2 Stränggjutning 12
2.2.1 S45-anläggningen 13
2.2.2 Slaggbildning vid stränggjutning 16
2.3 Beskrivning av gjutrör och stoppare 16
3 Bakgrund till och beskrivning av igensättningar 17
3.1 Igensättningar 17
3.1.1 Definition av igensättning 17
3.1.2 Problem orsakade av igensättningar 17
3.1.3 Klassificering av igensättningar 18
3.1.4 Var i gjutröret hamnar igensättningar 18
3.2 Signaler för att identifiera en igensättning 19
3.2.1 Vad som används idag 20
3.2.2 Alternativa signaler 20
3.3 Metoder för att förutsäga igensättning 21
3.3.1 NCF och NCI 21
3.3.2 Teoretisk flöde genom gjutrör 22
3.3.3 Logisk identifierare 24
3.4 Motåtgärder mot igensättningar 25
3.4.1 Gjutrörets och stopparens utformning 25
3.4.2 Argongas genom stoppare 26
3.4.3 Sotning 26
3.4.4 Klappning 27
4 Underlag för framtagande av modell 29
4.1 Laminär strömning i gjutrör och kokill 29
4.2 Mätdata och prioriteringar för identifiering av igensättningar 30
4.2.1 Skänk 30
4.2.2 Gjutlåda 31
4.2.3 Gjutrör 31
4.2.4 Stoppare 32
4.2.5 Kokill 33
4.2.6 Stål 34
4.2.7 Operatörer 34
4.3 Igensättningsrelaterade beteenden hos systemet 34
4.3.1 Igensättningsidentifiering genom att studera argontryck 34
4.3.2 Chargeväxling vid igensättning 37
4.3.3 Flödets beroende av kokillnivån 38
4.4 Flödesdynamik 40

4.4.1 Styrsignalens dynamik 40
4.4.2 Försöksplan för att ta fram stopparens dynamik 41
4.4.3 Genomförande av försök och resultat 41
4.5 Ventilkurva för stopparen 43
4.5.1 Försöksplan för ventilkurva 43
5 Modelleringar 45
5.1 Fysikalisk modell 45
5.2 Modellbygge utifrån försöksdata 47
5.3 Ventilkurva framtagen ur kördata 48
5.4 Modelleringsosäkerhet i systemet 51
6 Poängsättningsalgoritm baserat på igensättningsindex 55
6.1 Framtagen algoritm 55
6.1.1 ARGON-del 55
6.1.2 STOPPAR-del 58
6.1.3 VÄXLINGS-del 58
6.1.4 KOKILLNIVÅ-del 58
6.1.5 ARV-del 58
6.2 Test av poängsättningsalgoritm 59
7 Slutsatser 61
7.1 Framtagande av igensättningsindex 61
7.2 Ventilkurva 61
7.3 Modellering av igensättningar 61
8 Förslag till fortsatt arbete 63
8.1 Modellosäkerhet 63
8.2 Förbättrad ventilkurva 63
8.3 Vidareutveckling av poängsättningsmodell 63
8.4 Trimning av poängsättningsmodell 63
9 Referensförteckning 65
9.1 Skriftliga referenser 65
9.2 Elektroniska referenser 65
9.3 Muntliga referenser 66

1 Inledning

Följande kapitel beskriver bakgrunden till arbetet samt dess mål och avgränsningar. Det tar även upp hur arbetet lagts upp och genomförts.

1.1 Bakgrund

På SSAB Tunnplåt AB i Luleå produceras höghållfast stål i kvalitéer som enbart ett fåtal verk i världen klarar av. SSAB:s stål har ett högt marknadsvärde och företaget har därför varit lönsamt i både bättre och sämre tider trots stålindustrins kraftigt växlande konjunkturer. För att kunna vara konkurrenskraftiga internationellt har man även högt ställda krav på stort tonnage vilket ställer höga krav på kvalitet och precision i tillverkningen. Allt detta skapar ständigt nya utmaningar för de utvecklare och de operatörer som arbetar inom SSAB.

Igensättningar är en sammanfattningsbenämning på när slagg, stål eller oxider fäster vid rörväggen på gjutröret. Igensättningar har länge varit ett av de stora problemen inom stränggjutningen. Mycket forskning och många undersökningar har gjorts i ämnet under senare år både i Sverige och utomlands. Igensättningar i gjutröret orsakar kvalitetsproblem och genererar dessutom en störning i processtyrningen. De ultrahöghållfasta stålkvaliteter med låg kolhalt och speciallegeringar, speciellt titan, som gjuts i Luleå kräver bra rening från slagg och god processtyrning. Även mekaniskt ställer dessa stålkvalitéer högre krav på maskinen.

Idag har man på SSAB i Luleå en enkel identifiering för igensättning som ger ett larm när det är stora mängder. Dessutom har man kunskaper om hur vissa signaler reagerar på igensättningar och därför kan metallurger spåra detta i efterhand genom att studera sparad mätdata.

Detta examensarbete började med en tanke om att regleringen på maskinen skulle bli robustare om man hade bättre kännedom om igensättningarna i gjutröret. Genom att bättre kunna detektera eller kanske till och med prediktera en igensättning skulle man kunna sätta in de åtgärder man har för att motverka dessa tidigare. Dessutom skulle man bättre kunna utvärdera resultatet av åtgärden. Idén ledde ganska snart till uppslaget för detta examensarbete.

1.2 Mål

Syftet med detta examensarbete är att ta fram en bättre detektering genom att:

- Studera de mätningar som görs kring gjutlåda och kokill och utvärdera ifall de är tillräckliga.
- Ta fram en bättre modell än den man använder idag för att få en tillförlitligare detektering av igensättningarna.

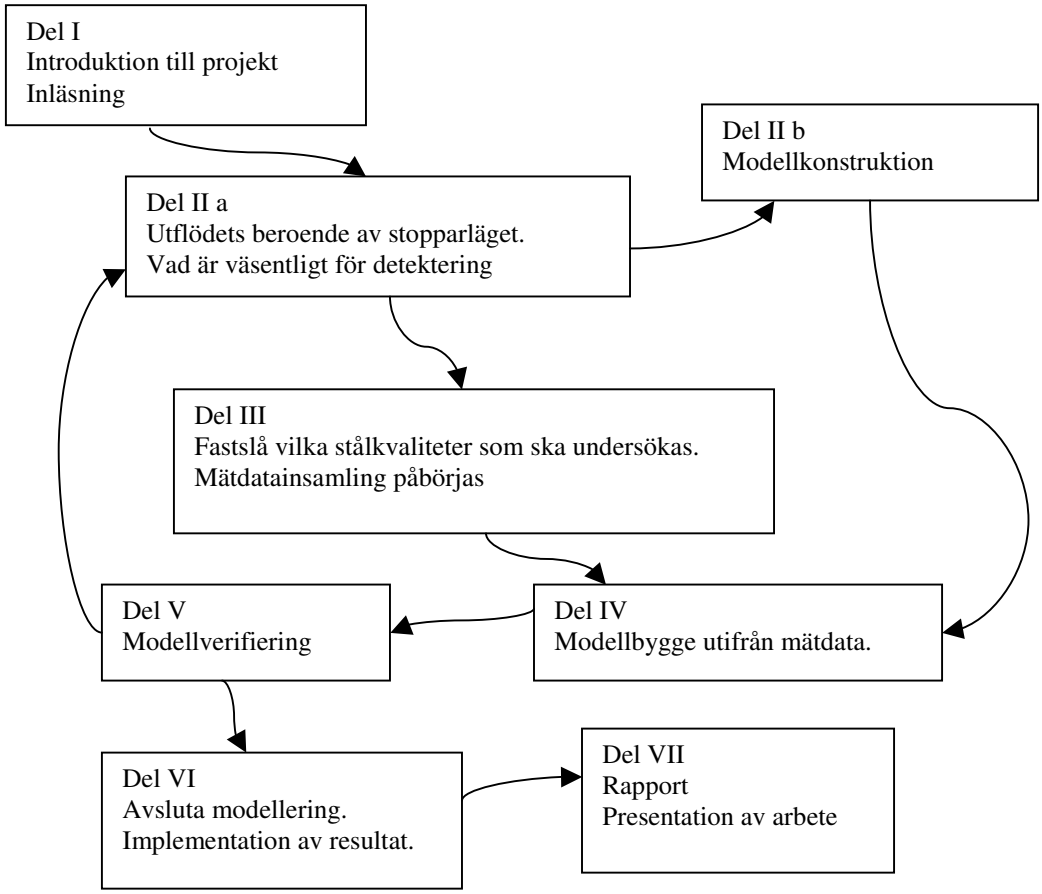
Med hjälp av en förbättrad modell kan man vidta åtgärder för att motverka igensättningarna i god tid. Man kan också märka plötsliga förändringar i processen som beror på släpp. Ett släpp är när ansamlingar av igensättningar släpper och ramlar ner i kokillen för att sedan gjutas in i ämnet.

1.3 Avgränsningar

Arbetet ska innehålla en litteraturstudie av den forskning som gjorts kring igensättningar och modellering av detta. Arbetet koncentreras till att ta fram en modell över en av

stränggjutningsmaskinerna i MATLAB samt att studera loggade mätdata. Vidare ska undersökningarna koncentreras till igensättningar orsakade av oxider men inte av frysningar, det vill säga när gjutröret sätter igen på grund av för låg gjuttemperatur.

1.4 Arbetets upplägg



Figur 1. Arbetets upplägg.

Arbetet har lagts upp enligt bilden i Figur 1. Dessutom upprättades en tidplan, Tabell 1, för när de olika momenten skulle påbörjas. Denna tidplan har kunnat hållas genom arbetets gång förutom vad det gäller start av mätdatainsamling, del III, och modellbygge utifrån mätdata, del IV. Dessa moment blev försenade på grund av tekniska problem relaterade till en ombyggnation av stränggjutningsmaskinen. Att inte arbetet i stort blev försenat på grund av detta beror på att den teoretiska modellkonstruktionen är väl genomförd.

Del	I	II a	II b	III	IV	V	VI	VII
Vecka för planerad start	1	2	2	3	5	6	12	15
Verklig start	1	1	2	4	8	9	12	15

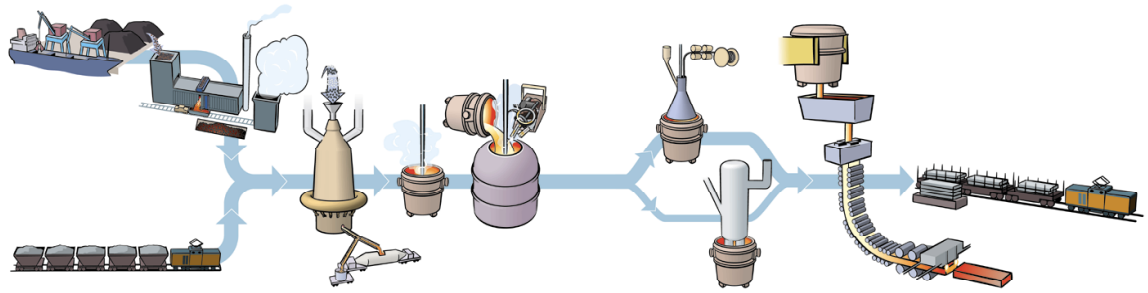
Tabell 1. Tidplan och hur den efterföljts.

2 Stålprocessen och beskrivning av anläggningen

Nedan följer en beskrivning av företaget SSAB Tunnplåt AB och stålprocessen samt specifikt av stränggjutningsanläggningen som är föremål för denna studie.

2.1 Verksamhetsbeskrivning för SSAB Tunnplåt AB

SSAB Tunnplåt AB är det största av fyra dotterbolag i SSAB Svenskt Stål AB. De övriga tre är SSAB Oxelösund, Plannja och Tibnor. Koncernen bildades 1978 genom sammanslagning av Domnarvets Järnverk i Borlänge, Oxelösunds Järnverk och Norrbottens Järnverk i Luleå. SSAB Tunnplåt AB, som har produktionsorterna Luleå och Borlänge, är Nordens största tillverkare av tunnplåt och ledande vad det gäller utveckling av höghållfasta stål. I Luleå finns koksverk, masugn och stålverk och i Borlänge finns valsverk. Detta examensarbete är utfört på stålverket. Varje dygn lämnar mellan tre och fyra tåg Luleå med ämnen, slabs, för vidare transport till valsverket i Borlänge. [18] [15]



Figur 2. Översiktsbild över ståltillverkningen i Luleå, SSAB Tunnplåt AB.

I Figur 2 visas en översiktsbild över ståltillverkningen i Luleå från råvara till färdigt ämne. Råvarorna för ståltillverkningen i Luleå är malm och kol. Från LKAB levereras malm i form av pellets. I masugnen framställs råjärn från pellets, koks och kalk. Råjärnet transporteras sedan till stålverket. I stålverket sker först en svavelrening och sedan en sänkning av kolhalten i LD-konverter. Efter dessa två steg har råjärnet förvandlats till stål. Sedan legeras och behandlas stålet ytterligare via skänkmetallurgi. Slutligen når det färdiga stålet stränggjutningsmaskinen där det gjuts till slabs. Ett ämne är 220 mm tjock och 0.8-1.5 m brett. Efter märkning och avsvalning är slabsen klara att transporteras till Borlänge för valsning och vidareförädling. [17]

Eftersom detta arbete behandlar stränggjutning tar kapitel 2.2 och 2.3 upp detta noggrannare och en beskrivning över detta utelämnas därför helt här.

2.1.1 Koksverk

För att framställa råstål i masugnen behövs koks som tillverkas av kol. Kol levereras från flera länder runt om i världen som Australien, USA och Kanada för att sedan förädlas till koks. Processen tar cirka 18 timmar och går ut på att kolet upphettas till en mycket hög temperatur och då bildas koks och koksgas. Koksen levereras till masugnen medan koksgasen återvinns för upphettning av ugnarna i koksverket. Restprodukter från koksverket vidareförädlas och säljs som kemiska biprodukter. [17]

2.1.2 Masugn

Råjärn produceras kontinuerligt i masugnen. I masugnens topp fyller man på med pellets, koks, kalk och andra tillsatser i lager. Lagren med pellets reduceras sakta till råjärn och sjunker mot masugnens botten medan temperaturen stiger. När råjärnet nått en tillräckligt hög nivå i masugnens botten tappas det ner i torpedovagnar och då har det en temperatur på ca 1500° C. Torpedovagnarna fraktas till stålverket och hälls över i råjärnsskänkar. En sådan skänk på cirka 114 ton kallas charge. [17]

2.1.3 Svavelrening

När råstålet kommer in i stålverket sker först en svavelrening eftersom svavel är en förorening i stål som försämrar dess duktilitet. Allt eftersom produktionen gått mot mer specialstål har kraven på lägre svavelhalter skärpts. Svavelrening går till så att man injicerar kalciumkarbid i stålet med en lans och åstadkommer slaggbildning. Delar av slaggen kan återvinnas och användas. Redan i detta skede är det klart vilken stålkvalité som man vill framställa och riktvärden för olika legeringar har ställts upp. [17] [1]

2.1.4 LD-konvertering

Efter svavelrening hälls råstålet över i en LD-konverter för att färskas, det vill säga sänka kolhalten. Syre blåses med högt tryck mot smältans yta och kolet i stålet reagerar med syret och därigenom sänks kolhalten. När råjärnet nått en kolhalt på under 2% kallas det stål. Här tillsätter man även skrot för att kyla stålet eftersom behandlingen höjer temperaturen. På ytan i LD-konvertern bildas slagg som inte är önskvärt i stålet. När man häller över stålet från konvertern till en skänk stannar denna slagg kvar i konvertern och kan sedan återvinnas i masugnen. I skänken görs en grovlegering enligt ett recept som tagits fram utifrån kundens önskemål om stålets kvalitet. [17] [1]

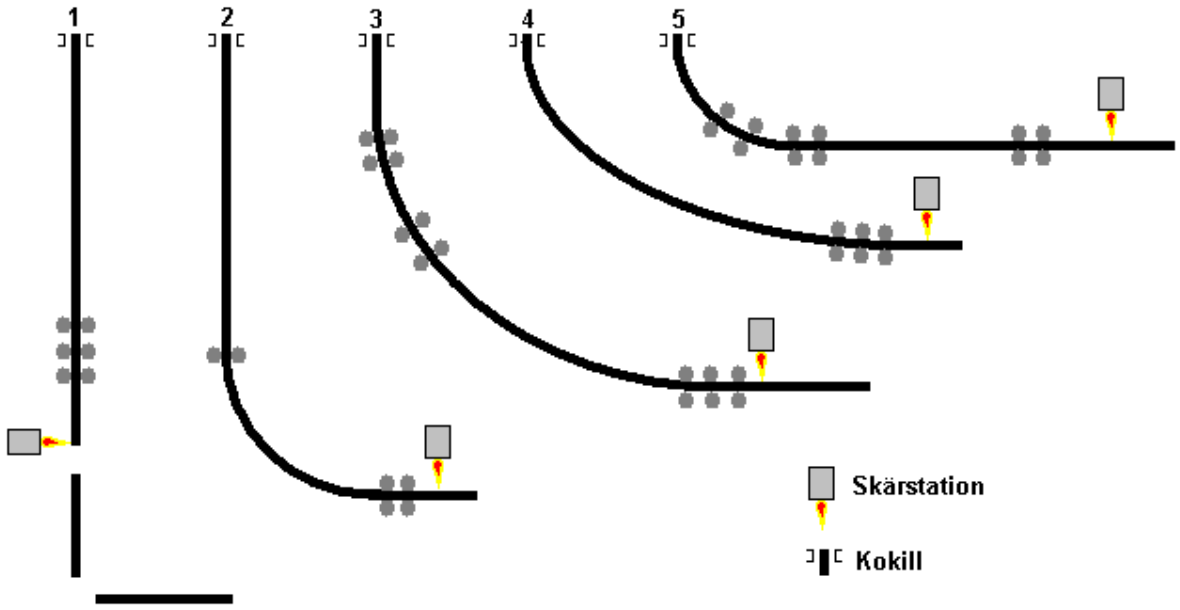
2.1.5 Skänkmetallurgi

Efter färskning och grovlegering sker den slutgiltiga behandlingen av stålet i skänkmetallurgin. Här finjusteras allt och man kan tillverka hundratals olika stålsorter. Ytterligare legeringar tillsätts och behandlingen sker antingen i CAS-OB anläggningen eller i RH-anläggningen.

I CAS-OB sänks en keramisk huv över stålet och argongas används för att röra om i stålet medan legeringar tillsätts i form av metallbitar. I RH framställs stål med extremt låga kolhalter, därför sker behandlingen under vakuum. Båda anläggningarna måste kunna redovisa mycket noggranna analyser och rätt temperatur på stålet för att få rätt kvalité till kund. [17] [1]

2.2 Stränggjutning

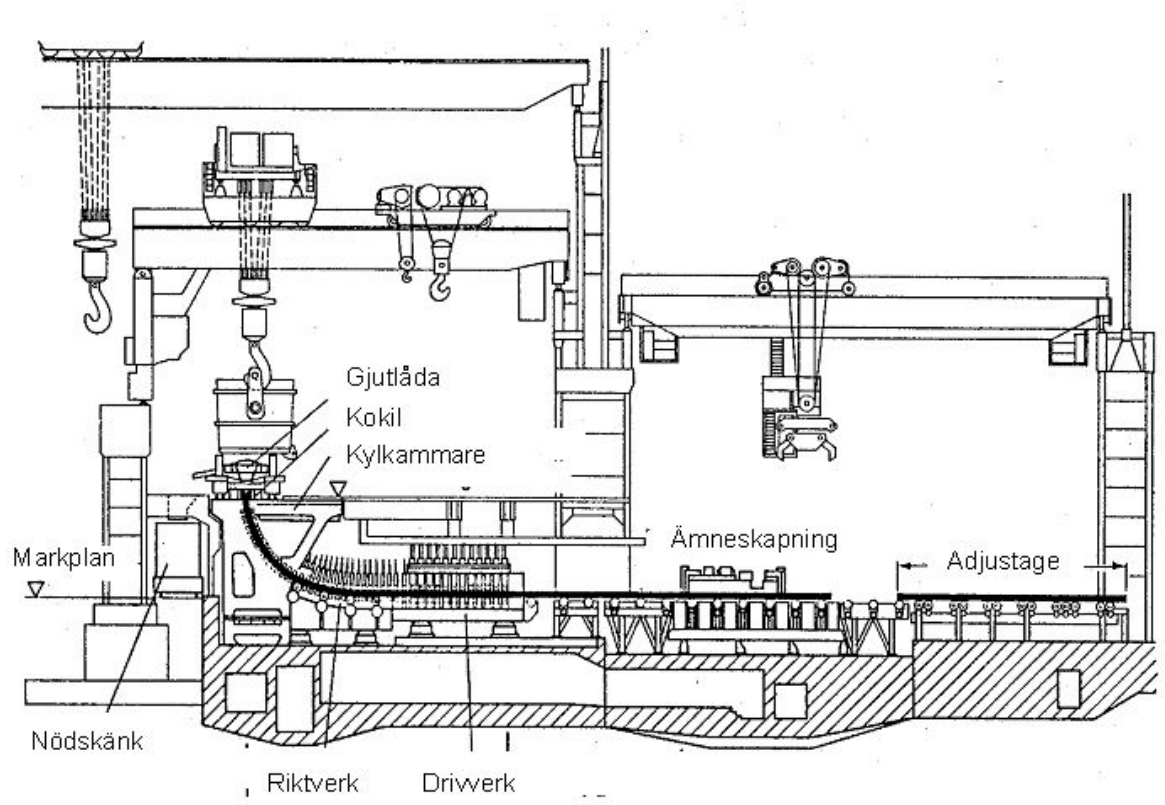
Kontinuerlig stränggjutning, till skillnad från formgjutning, ger ett mer homogent ämne som därigenom har bättre hållfasthetsegenskaper. I Luleå tillverkas den största ämnesformen, slabs. Det förekommer även stränggjutning av mindre ämnen, så kallade billets och blooms. Maskiner för stränggjutning har utvecklats allt sedan 1940-talet och idag sker över 60 % av all ståltillverkning i världen med stränggjutningsmaskiner, i Västeuropa och Asien är det över 80 %. I stränggjutningens barndom var alla maskiner vertikala, medan nästan alla maskiner idag har en mer eller mindre böjd gjutbana. I Figur 3 kan man se hur utvecklingen på stränggjutningsbanan har skett [4].



Figur 3. Utvecklingen av utseendet på gjutbanan från vertikala maskiner på 1940-talet till böjda maskiner idag.

Förutom förbättrade hållfasthetsegenskaper har stränggjutningen inneburit minskad energiförbrukning, minskad personalåtgång, högre produktivitet och allmänt bättre kvalitet på stålet.

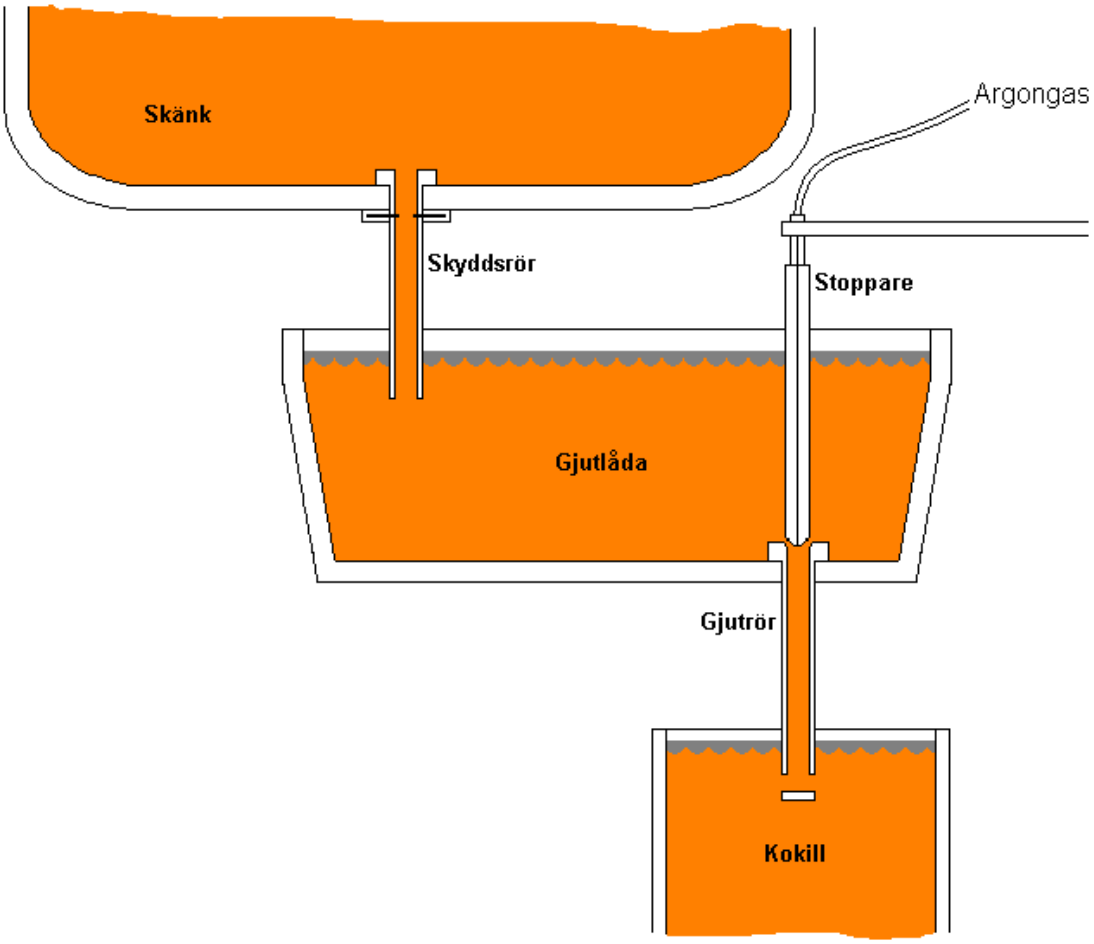
2.2.1 S45-anläggningen



Figur 4. Vy över S5.

S45 är stränggjutningsanläggningen på SSAB i Luleå där finns två stränggjutningsmaskiner, sträng 4, S4, och sträng 5, S5. Båda är av typ 3 i Figur 3. S4 togs i drift 1980 och har byggts om år 2000 och 2005 för att klara mer höghållfasta stål. S5 byggdes ursprungligen för att Luleå skulle kunna ta över det tonnage som tidigare tillverkades i Borlänge när all masugnsdrift lokaliserades till Luleå 1989. S5 var från start en mer avancerad maskin än S4. Efter senaste ombyggnationen på S4 klarar bägge maskinerna av de mest krävande stålsorterna. Den största skillnaden idag är styrsystemen. S4 har ett nytt ABB-system medan S5 har ett Alcont-system med vissa delar från Siemens.

Själva gjutningen i maskinerna och den reglering som styr detta fungerar dock likadant för bägge maskinerna trots olika styrsystem. Kring gjutröret, vilket är det centrala i denna rapport, finns inga skillnader alls. Figur 4 visar S5 från sidan. Skänken placeras med travers i vridtornet och gjut sedan. Längst till höger syns avskärningstationen.



Figur 5. Principskiss över stränggjutningsmaskin kring gjutlådan.

Under hela gjutprocessen är det viktigt att stålet inte kommer i kontakt med syre. Vid kontakt med syre reagerar stålet och framförallt aluminiumoxid utfälls vilket är en orsak till igensättningar i gjutröret [13]. Stränggjutningen går till så att en skänk stål lyfts upp med travers i vridtornet och vrids in i position för gjutning. Överst i skänken finns ett lager slagg som fungerar som ett lock på skänken. Under gjutning har man dessutom ett lock på själva skänken för att förhindra värmeutstrålning och kunna hålla temperaturen på stålet. Att hålla temperaturen är också mycket viktigt då man gjuter stålet vid en temperatur mycket nära likvidus.

Genom skyddsröret rinner stålet ner i gjutlådan. Nivån i gjutlådan hålls konstant genom reglering av vridtärningen, en typ av ventil, vid öppningen på skyddsröret. Ytan på gjutlådan hålls täckt med täckmassa för att stålet inte ska få kontakt med luft. Från gjutlådan rinner stålet ner i kokillen genom gjutröret. Utströmningen av stål från gjutlådan till kokillen regleras med stopparen. Gjutlådans funktion, förutom att fånga upp slagger, är att fungera som ett filter så att trycket vid stopparen är konstant vilket underlättar kokillnivåhållningen. I Figur 5 kan man se en principskiss från stränggjutningsmaskinen runt gjutlådan.
I Figur 6 syns gjutlådan så som den ser ut i verkligheten. Kokillen döljs under golvet som täcker gjutbanan. I bakgrunden kan man se skänken, märkt med 15. Gjutröret syns tydligt i bilden då det färgas gult av värmen från stålet. Skyddsröret är helt dolt bakom de plåtar som finns monterade runt gjutlådan för att skydda arbetarna mot stänk. Vidare kan man se en tvåa till vänster i bild, den markerar att det är arm 2 som gjutlådan hänger i. Gjutmaskinen har två armar för upphängning av gjutlådan och när man byter gjutlåda växlar man mellan de två armarna.

Figur 6. Gjutlådan på S4 i verkligheten under gjutning.

Kokillen består av kylda kopparplattor och bestämmer storleken på ämnet. I kokillen tillsätts även gjutpulver som fungerar som smörjmedel och bildar en hinna runt ämnet vilket förhindrar det att fästa i kokillplattorna. I kokillen stelnar ytan på stålet och sen dras det ner i gjutbågen där det kyls med vatten och stelnar helt. I skärstationen kapas sedan ämnet upp i slabs som levereras till adjustaget för syning och avsvalning. Varje slabs märks med ett id-nummer som sedan följer det under vidare bearbetning och leverans till kund. [17] [1]

2.2.2 Slaggbildning vid stränggjutning

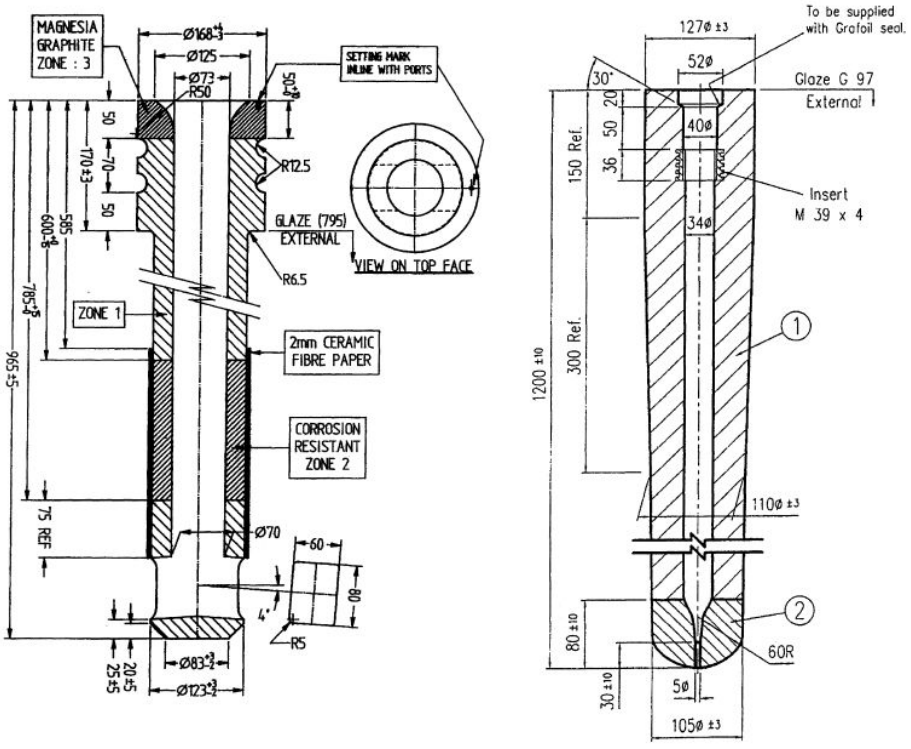
I stränggjutningsmaskinen försöker man fånga upp de sista orenheterna genom att skapa slagg på ytan i gjutlådan och i toppen på kokillen. Dessa ytor förmår inte fånga upp alla orenheter utan vissa fäster även på innerväggar på skänk och gjutlåda samt i skyddsrör och gjutrör. Det som fäster inuti skyddsrör och gjutrör kallas igensättningar och är ett stort problem vid gjutningen.

Igensättningar i gjutrör förhindrar stålflödet ut ur gjutlådan och förändrar dynamiken för nivåregleringen. Detta leder till begränsningar i gjuthastigheten samt försämringar av nivåregleringen i kokillen. Konstant gjuthastighet och god nivåhållning i kokillen är två viktiga faktorer för att kunna gjuta sprickfria ämnen.

Idag identifierar man en igensättning genom att studera hur börvärdet på ventilläget, det vill säga stopparläget, förändras över tiden. När en tillräckligt stor förändring skett kallar man det igensättning och vidtar åtgärder. Detta är en grov mätmetod som inte ger fullgod identifiering, speciellt som den inte tar hänsyn till medvetna hastighetsförändringar på gjutningen.

2.3 Beskrivning av gjutrör och stoppare

Figur 7 visar ritningarna över gjutrör och stoppare. Båda är tillverkade i keramiskt material för att klara den höga temperatur som flytande stål har. Gjutröret, till vänster, är ca en meter långt och har ett avrundat koniskt säte i toppen. Utloppet sker genom två öppningar, en åt höger och en åt vänster i botten på röret.



Figur 7. Ritningar över gjutrör och stoppare [16].

Stopparen, till höger i Figur 7, är drygt en meter lång och rund i botten. I stopparen finns ett rör genom vilket argongas leds ner. Argongasen förhindrar att igensättningar fastnar i änden på stopparen.

3 Bakgrund till och beskrivning av igensättningar

Arbetet inleddes med en litteraturstudie där både litteratur om stränggjutning, SSAB:s interna utbildningsmaterial för stränggjutare och de senaste rapporterna inom ämnet studerades. Dessutom intervjuades en rad personer som har kännedom om stränggjutning och då specifikt igensättningsproblematiken metallurgiskt eller signalmässigt. Kapitlet är en sammanställning av detta och behandlar orsaker till igensättningar, olika modeller för deras uppbyggnad, modeller för identifiering och motmedel.

3.1 Igensättningar

Detta arbete handlar om igensättningar och det är därför viktigt att definiera vad man menar med en igensättning, hur de kan delas in i olika kategorier och var de uppstår för att kunna identifiera dem.

3.1.1 Definition av igensättning

En igensättning är när slagg, stål eller oxider fäster på gjutrörsväggen eller stopparen och på så sätt förhindrar flödet av stål genom gjutröret. Dessutom kan igensättningarna lossna och gjutas in i ämnet vilket orsakar kvalitetsfel. Figur 8 visar ett gjutrör vars mynning är kraftigt igensatt.

Figur 8. Igensättningar av oxidationstyp i gjutrörets mynning. Det vita är aluminiumoxid och det blågråa är stelnat stål som fastnat efter det att gjutröret tagits ur kokillen.

3.1.2 Problem orsakade av igensättningar

Om en större igensättning byggts upp inne i röret finns det risk att den lossnar och ramlar ner, detta kallas släpp. Ett släpp orsakar alltid en viss oro i kokillnivån och de ämnen som lossnar

är slagger som riskerar att gjutas in i ämnet vilket leder till dåligt stål. Ett större släpp kan orsaka sådan oro i kokillen att stålet stiger över kokillkanten och svämmar ut på gjutplan. Ett sådant släpp kallas övergjutning och kan i många fall leda till driftstopp.

Dessutom orsakar igensättningarna ett modellfel vilket stör kokillnivåregleringen som bygger på fysikalisk modellering av gjutröret. Dålig kokillnivåreglering ger dålig ytkvalité på slabsen. I värsta fall kan detta leda till sprickor i slabsen som orsakar ett genombrott. Ett genombrott är när slabsen spricker inne i kylkammaren på stränggjutningsmaskinen och flytande stål rinner ut. Ett genombrott leder alltid till ett driftstopp.

3.1.3 Klassificering av igensättningar

Egentligen sätts gjutröret igen av två orsaker. För det första om oxider och föroreningar, eller slagg, fäster vid gjutrörsväggarna och för det andra om det sker en frysning i stålet, det vill säga att stålets temperatur sjunker under likvidus. Kemeny [13] har gjort en klassificering av orsaker till igensättningar.

Typ 1 Oxidbildning nära gjutrörsväggen

1.1 orsakat av luftinsläpp

1.2 orsakat av en reaktion mellan gjutrörsmaterialet och stålet

Typ 2 Oxider i stålet som transporteras till gjutrörsväggen

2.1 deoxidationsprodukter

2.2 reoxidationsprodukter

2.3 exogena inneslutningar

2.4 inneslutningsmodifikationer

Typ 3 Kallt stål och frysningar som fäster i gjutrörsväggen

3.1 låg superheat eller snabba temperaturfall

3.2 lokalt höjd likvidustemperatur orsakad av segregation

Enligt den avgränsning som gjorts för det här arbetet kommer främst igensättningar av oxidationstyp, det vill säga typ 1 och 2 behandlas. Därför blir temperaturen på stålet inte en viktig ingående parameter. Igensättningen i Figur 8 är av oxidationstyp.

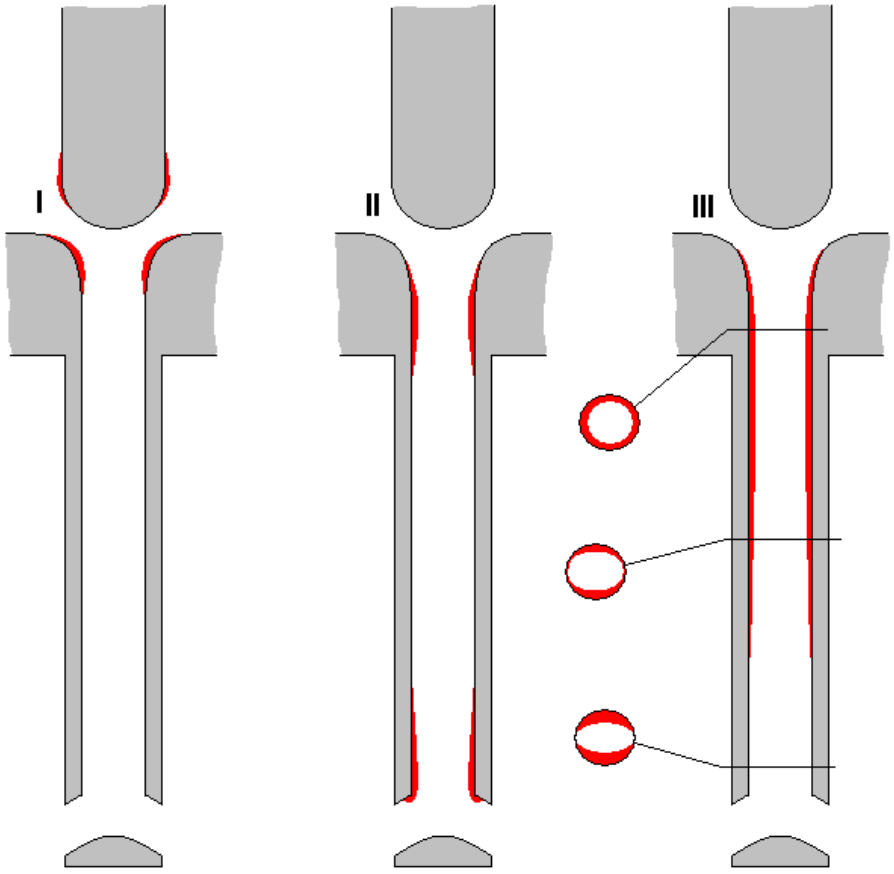
3.1.4 Var i gjutröret hamnar igensättningar

I Figur 9 kan man se tre olika igensättningstyper som beskrivs i den litteratur som studerats. Naturligtvis finns flera olika möjligheter men dessa tre beskriver de tre huvudstråken.

I. Andersson beskriver i sin avhandling [3] Uchiboris, Oguras och Miyanos modell från 1983. Hon säger att igensättningarna bildas i sätet på gjutröret och även på sidorna av själva stopparen. Denna typ av igensättningar är svåra att verifiera visuellt då sätet alltid lämnas täckt av slaggrester när gjutlådan byts. Många tekniker och operatörer på SSAB i Luleå tror att Ti-legerade stål tenderar att sätta igen på detta sätt något som stämmer med Basu, Choudhary och Girases undersökningar [6].

II. Andersson [3] beskriver också Hoggard, Rancule och Myers modell från 1987. Här beskriver man hur igensättningarna fastnar på två ställen, i de övre delarna på gjutröret strax nedanför sätet och precis runt utloppet.

III. Mefos gjorde en undersökning [2] på några igensatta gjutrör från S45 år 2000. Där kom man fram till att igensättningarna inte satte igen jämnt runt gjutröret utan att en oval form skapades. Hålet blev dessutom ovalare ju närmare botten på gjutröret man kom.



Figur 9. Skiss över tre olika igensättningstyper som beskrivs i den litteratur som studerats.

Igensättningar av typ I har undersökts av Burty et al. [8] som till största del undersökt lågkolhaltiga LC- och ULC-stål. Läckage i argontillflödet i stopparen kan orsaka inblandning av luft i gasen vilket också medför syrekontakt med stålet. Det betonas särskilt att även små syreinsläpp i argonet orsakar gjutrörsigensättningar. Mefos har tidigare gjort undersökningar kring detta. Man installerade tryck- och flödesmätare i gjutröret och följde beteendet. Man gjorde även provocerade försök där man släppte in syre i argontillflödet. Utifrån dessa undersökningar har man kommit fram till att framförallt tryckmätaren borde vara intressant att koppla till igensättningar. Ökat tryck i argontillflödet borde tyda på ökat mottryck från gjutprocessen vilket kan ha orsakats av igensättningar [24].

Inom ramarna för detta arbete har man valt att främst studera igensättningar av typ II eftersom denna modell är generellare än typ I men enklare än typ III.

3.2 Signaler för att identifiera en igensättning

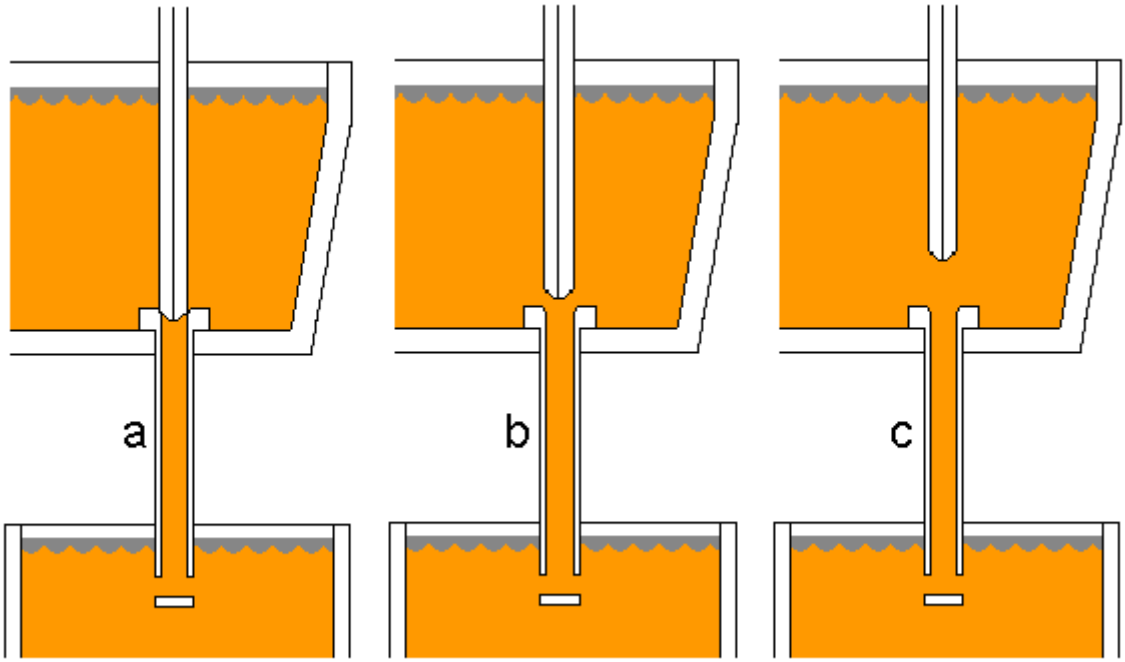
Runt gjutlådan görs en rad mätningar och dessa kan i olika grad kopplas till eventuella igensättningar i gjutröret. Idag används stopparläget ensamt tillsammans med operatörernas erfarenhet för att bedöma eventuella igensättningar. Men det skulle också kunna vara intressant att studera argontrycket, stålflödet och den kemiska analysen av stålet.

3.2.1 Vad som används idag

I nuläget försöker man detektera igensättningar genom att studera stopparstakens läge. Om stopparen stiger en viss procent gentemot ett förinställt värde, som man ställer in vid gjutstart, säger man att man har en igensättning. När en igensättnings byggs upp i gjutröret minskar flödet genom gjutröret och stopparen måste lyftas högre för att flödet ska kunna hållas konstant. Detta sker automatiskt via kokillnivåregleringen.

3.2.2 Alternativa signaler

Genom samtal med Kjell Lindström och Mats Kågström på svagström på SSAB [22] [23] dök en idé upp om att studera argontrycket för att identifiera en igensättning. De visste även att Mefos tidigare har gjort undersökningar kring detta [24]. Argonflöde genom stopparen är ett välkänt motmedel mot igensättningar som bland annat diskuteras mycket ingående i Margareta Anderssons avhandling [3].



Figur 10. Tre olika stopparlägen, a stopparen helt stängd, b stopparen i operativt läge och c stopparen helt öppen.

Att titta på trycket i argontillflödet är inte helt enkelt. Det påverkas olika av processen beroende på hur stopparstaken står. När stopparen är helt stängd, a i Figur 10, och flödet av stål i kokillen är noll är mottrycket på stopparen $-\rho_{stål} g h_{gjutrör}$, där $h_{gjutrör}$ är avståndet mellan kokillnivån och stopparen. När stopparen är helt öppen, c i Figur 10, beror flödet ut ur gjutröret endast på diametern av gjutröret eftersom stopparen är ovanför sitt operativa område och inte kan påverka flödet. Mottrycket på stopparen blir då $\rho_{stål} g h_{stoppardjup}$, där $h_{stoppardjup}$ är läget på stopparen i gjutlådan. När stopparen är i operativt läge, b i Figur 10 blir mottrycket ett mellanting. Detta mellanting beror av tre faktorer. För det första, nivån i gjutlådan som formar ett yttre tryck på stopparen. För det andra, motståndet för stålet att ta sig igenom gjutröret, det vill säga rördiametern. För det tredje, beror mottrycket på stopparens läge i det operativa området. Detta ger ett olinjärt beroende av stopparstaken läge. Matematisk kan man beskriva argontrycket enligt

$$p_{Ar} = \begin{cases} -\rho g h_{gjutrör} & för \quad h_{stoppare} = h_{stoppare-stängd} \\ f(n_{gjutlåda}, F_{gjutrör}, s_{stoppare}) & för \quad h_{stoppare-stängd} < h_{stoppare} \le h_{stoppare-\max} \\ \rho g h_{stoppare} & för \quad h_{stoppare} > h_{stoppare-\max} \end{cases} \qquad (3.1)$$

där

p_{Ar} = mottryck på argonet
$\rho_{stål}$ = densiteten för flytande stål
g = tyngdaccelerationen
$h_{gjutrör}$ = avståndet mellan kokillnivån och stopparhuvudets läge
$n_{gjutlåda}$ = stålbadets nivå i gjutlådan
$F_{gjutrör}$ = motståndet i gjutröret
$h_{stoppare}$ = stopparens läge
$h_{soppare\text{-}stängd}$ = det stopparläge som motsvarar att stopparen är i sitt bottenläge
$h_{stoppare\text{-}max}$ = det stopparläge som motsvarar att stopparen är helt utanför sitt operativa område

Flera olika faktorer påverkar igensättningarna och man har inget klart linjärt trycksamband där enbart mottrycket på argonflödet kan säga något [24].

En flödesförändring i gjutröret som inte går att relatera till en stopparrörelse eller hastighetsförändring borde också tyda på en igensättning [8]. Vidare kan olika egenskaper hos stålet vara värda att beakta. Den kemiska sammansättningen och den värmebehandling stålet utsatts för påverkar i yttersta grad huruvida stålet är igensättningsbenäget eller inte. Genom att studera den kemiska analysen för stålet kan man säga mycket [6] [12]. Förekomst av vissa ämnen tyder på förekomst av andra, till exempel kan en hög koncentration av kväve i analysen tyda på hög syrehalt [19]. Att studera stopparens beteende i växlingar kan också ge ledtrådar till hur igensättningarna ser ut. Detta kan t.ex. göras genom att betrakta sambandet mellan stålflöde och stopparläge [21].

3.3 Metoder för att förutsäga igensättning

All feldetektering bygger på att man studerar och jämför insignaler med beräknade utsignaler, förväntade beteenden och verkliga utsignaler. Det finns två huvudtyper av fel, additiva- och multiplikativa fel. Additiva består av okända signaler som tillförs systemet medan multiplikativa fel är förändringar av en signal. Till detta kan man lägga att orsakerna till felet antingen kan finnas i själva processen eller vara ett mätfel orsakat av en sensor eller ett felaktigt kalibrerat instrument.

Generella metoder för feldetektering beskrivs bland annat av Chiang [9]. Han separerar datadrivna, analytiska och kunskapsorienterade metoder. I verkligheten består många system av kombinationer av dessa tre. Med den tillgång på snabba mikroprocessorer som finns idag har möjligheten att utnyttja traditionella teoretiska metoder avsevärt förändrats på senare år. Vanliga metoder bygger på studier av residualer, det vill säga skillnaden mellan nominella processmodellen och estimerade modellparametrar. Ett vanligt sätt att göra detta är att bygga en observerare för systemet [5].

Nedan följer några fallspecifika metoder för igensättningar i gjutrör som tagits fram för industriellt bruk.

3.3.1 NCF och NCI

En igensättning i gjutröret kommer att påverka flödet genom gjutröret. En förändrad rörgeometri kan ändra virvelns utseende och när röret sätts igen måste stopparen höjas för att flödet ska förbli oförändrat. Det finns en maximal nivå där det inte hjälper att höja stopparen

mer, det betyder att stopparen kommit utanför sitt operativa område. Kemeny [13] beskriver en indikator som bygger på flödesförändringar. Han har tittat på trender i högre grad än realtidsmätningar. Han tar fram ett mätvärde han kallar NCF, ”Nozzle Clogging Factor”, som jämför ett teoretiskt flöde genom gjutröret med ett verkligt. Flödesjämförelsen räknas sedan om till ett procenttal, NCF, som representerar %-igensättning av gjutrörets area. I ett gränssnitt som presenteras för operatören visas sen:

1. Skänkvikt
2. Gjutlådevikt
3. Gjuthastighet
4. Kokillinställningar och kokillnivå
5. NCF
6. Förändringshastighet på NCF
7. Argontryck och –flöde
8. Larm för att motåtgärd mot igensättning är nödvändig
9. Larm för hastig sänkning av gjuthastighet

Operatörerna på S45 saknar information 5, 6 och delvis 8. Mätning på bör- och ärvärde på stopparen ger en typ av larm som påminner om 8, dock väldigt sent. Det finns faktorer som tyder på att om larmet kom tidigare skulle motåtgärder mot igensättningar ge bättre effekt. Bolger [7] använder sig också av skillnader i beräknat och verkligt flöde när han tar fram vad han kallar NCI, ”nozzle clogging indicator”. NCI beräknas enligt

$$NCI = \frac{q_{teoretiskt} - q_{verkligt}}{q_{teoretiskt}} \tag{3.2}$$

där $q_{teoretiskt}$ beteknar ett beräknat stålflöde utifrån stopparläget och gjutlådenivån och $q_{verkligt}$ är det stålflöde som kommit ut ur gjutröret. NCI betecknar % av maximal flödeskapacitet som förlorats på grund av igensättningar. Bolger vill inte koppla NCI direkt till hur mycket igensättningar det är, då sambandet anses vara svårt att fastställa. Däremot påpekar Bolger att kontrollbarheten på stopparen kommer att tappas när NCI uppnår 60%.

3.3.2 Teoretisk flöde genom gjutrör

Avenberg och Johansson beskrev en modell över flödet genom gjutröret i sitt examensarbete [4]. Modellen bygger på tryckskillnader i gjutlåda och kokill samt en matematisk beskrivning av turbulent strömning genom gjutröret. Enligt resonemanget i kapitel 4.1 är strömningen i gjutröret dock inte turbulent utan laminär.

Först betraktar man ventilöppningen för stopparen som beskrivs som arean av en kon som stryps av stopparen, se Figur 11 längst till höger. Konen kan beskrivas enligt följande formel

$$A_s = \pi \sin(\varphi)((R_s + l)^2 - R_s^2)\,. \tag{3.3}$$

där φ är markerat i Figur 11, R_s är radien på stopparhuvudet och l är avståndet mellan stoppare och gjutrör längs X i Figur 11. Alltså är

$$l = X - R_s - R_{gj} \tag{3.4}$$

då R_{gj} är radien på konan på gjutröret och

$$\sin(\varphi) = \frac{Y}{X} = \frac{Y}{\sqrt{(h_{stoppare} + h_0)^2 + Y^2}} \tag{3.5}$$

det vill säga

$$X = \sqrt{(h_{stoppare} + h_0)^2 + Y^2} \ . \tag{3.6}$$

Y finns markerat i Figur 11 och är radien på gjutröret plus krökningen på gjutrörets avrundade säte. $h_{stoppare}$ är stopparens höjd över h_0. När stopparen är helt stängd är $h_{stoppare}$ noll. h_0 beskrivs

$$h_0 = \sqrt{(R_{gj} + R_s)^2 - Y^2} \ . \tag{3.7}$$

X kan ur (3.4) skrivas om till

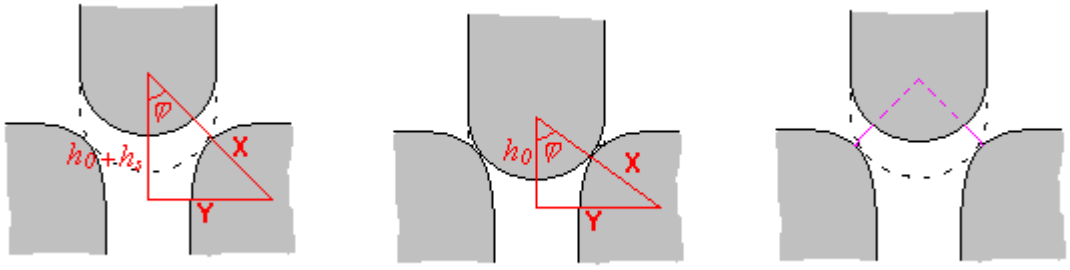
$$X = R_{gj} + R_s + l \tag{3.8}$$

och när stopparen är helt stängd är

$$X = R_{gj} + R_s \, . \tag{3.9}$$

A_s kan alltså skrivas om till

$$A_s = \frac{\pi Y}{X}((X - R_{gj})^2 - R_s^2) \, . \tag{3.10}$$



Figur 11. Symbolförklaring för matematisk beskrivning av ventilöppningen för stopparen. Längst till höger finns det stympade konen markerad. $h_{stoppare}$ markeras i figuren h_s.

Tillsammans med kännedom om hur den stympade konens area förändras med stopparrörelserna, det vill säga hur $A_s(h_s)$ förändras beroende på stopparrörelser, kan man räkna ut det teoretiska flödet genom gjutröret. Flödesformeln

$$q_{in} = \sqrt{\frac{p_1 - p_4}{\frac{\rho_{stål}}{2C_q^2 A_s^2 (h_{stoppare})} + \frac{\lambda L \rho_{stål}}{2dA_r^2} + \frac{8\rho_{stål}}{\pi^2 d^4}}} \tag{3.11}$$

beskriver detta.

Formeln bygger på en sammanslagning av tre formler som beskriver trycket i punkterna p_1-p_4, finns markerade i Figur 12 till vänster, och dess relation till flödet q_{in}. För det första, formeln som beskriver flödet förbi strypningen vid stopparen

$$q_{in} = C_q A_s(h_{stoppare}) \sqrt{2\frac{p_1 - p_2}{\rho_{stål}}} \, , \tag{3.12}$$

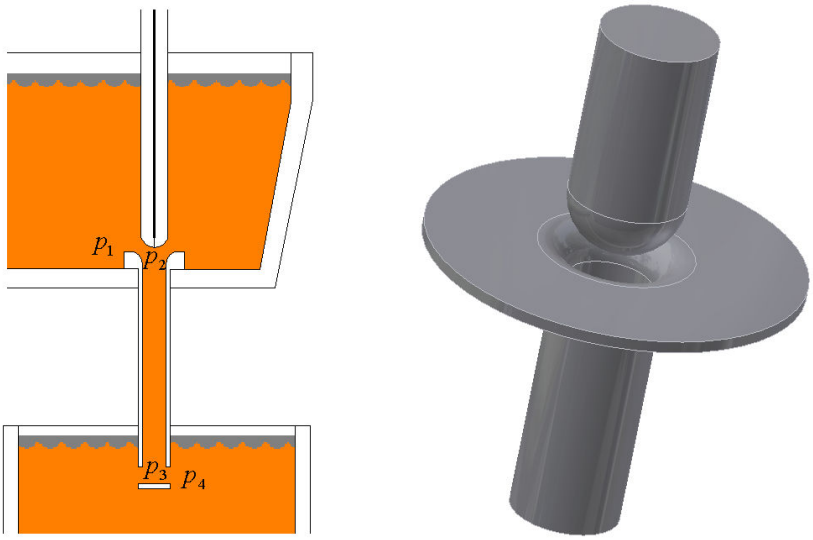
där C_q är en flödeskoefficient. För det andra, formeln som beskriver den turbulenta strömningen genom gjutröret

$$p_2 - p_3 = \frac{\lambda L}{d} \frac{\rho_{stål} q_{in}^2}{2A_r} \tag{3.13}$$

där, λ är friktionsfaktorn för stål och gjutrörskeramik, L är gjutrörets längd och A_r är gjutrörets innerarea. För det tredje, formeln som beskriver den dynamiska dämpningen i gjutrörets botten

$$q_{in} = \pi d^2 \sqrt{\frac{(p_3 - p_4)}{8\rho_{stål}}} \tag{3.14}$$

och d är gjutröret innerdiameter. Enligt de teorier som Bolger [7] och Kemeny [13] lagt fram och som beskrivs i kapitel 3.3.1 ska en identifiering av igensättningarna kunna göras utifrån beräkningar som bygger på verkligt och beräknat flöde genom gjutröret.



Figur 12. Till vänster, markering av tryckpunkter i gjutlåda och gjutrör. Till höger, stoppare och gjutrör vid sätet.

3.3.3 Logisk identifierare

Carl-Erik Grip [19] har presenterat en teori där man, genom sammanslagning av flera olika signaler som kan anses vara troliga tecken på en igensättning, kan få en tydlig bild på om det är mycket eller lite troligt att det verkligen är en igensättning. Detta kan vara ett komplement till en dynamisk modell. Han anser att en sådan modell bland annat bör ta med:

1. Kväveanalysen på stålet, eftersom syret inte mäts och kväve och syre är relaterade.
2. Temperaturen, eftersom låg temperatur ökar risken för frysning.
3. När, det vill säga vid vilken temperatur, oxidbildning för aluminium respektive titan sker.

Detta är ännu inte vidare utrett eller beprövat. Däremot använder sig operatörer av sin erfarenhet på ett liknande sätt när de bedömer läget. Denna modell för identifiering påminner om vad som populärt brukar kallas för ”fuzzy-logic”.

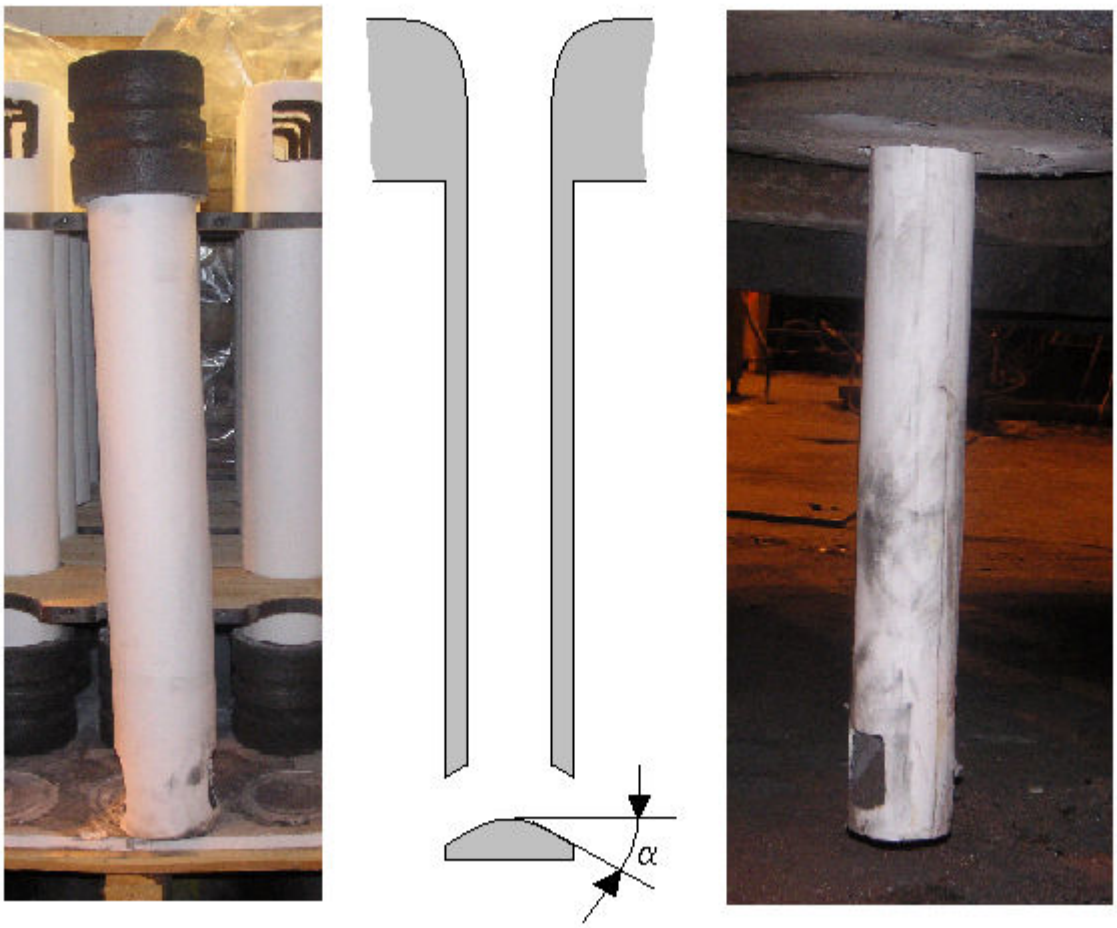
3.4 Motåtgärder mot igensättningar

För att försöka hindra en igensättning så använder man sig av olika parametrar. Stålets sammansättning, vad det gäller legeringar och förekoms av slagg. Samt stålprocessen vad det gäller värmebehandlingar. Man kan styra detta med gjutrörets och stopparens form och konstruktion samt tillförsel av argongas under gjutning.

När man identifierat en igensättning finns det två kända sätt att försöka bli av med den, nämligen sotning och klappning som kort beskrivs i slutet på detta kapitel.

3.4.1 Gjutrörets och stopparens utformning

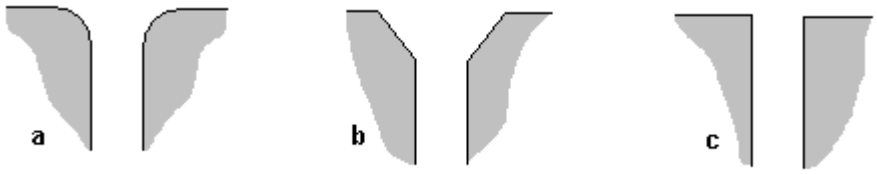
I gjutröret bildas en virvel av stål och argongas från stopparen. Gjutrörets utlopp är utformat så att virvelns övergång till kokillen ska bli optimal. Vinkeln α som finns markerad i Figur 13 optimeras för bästa utströmning. På de gjutrör som används på sträng 4 och 5 idag är optimal vinkel α=15° [20]. Till höger i Figur 12 kan man se hur stoppare och gjutrör ser ut runt sätet, det vill säga själva ventilöppningen. Sätet är sfäriskt och kontaktytan mot stopparen blir därför liten vilket gör att stopparen inte kan frysa fast lika mycket mot sätet när stopparen är helt stängd. En utförlig matematisk beskrivning över stopparen och sätets ventilöppning finns i kapitel 3.3.2.



Figur 13. Från höger visas, omonterat gjutrör direkt efter leverans från tillverkare, en skiss av ett gjutrör med markerad vinkel α och gjutrör monterat i gjutlådan före påbörjad gjutning.

Det finns ett antal olika utformningar av gjutrör. Figur 14 visar tre förekommande utseenden på sätet. I Europa dominerar konstruktioner med stoppare, då är säten av typ Figur 14a och Figur 14b vanligast, medan ”sliding gate” är vanligare i Nordamerika och Asien. En ”sliding

gate” stänger med en skiva som täcker en del av gjutröret som vanligtvis är cylindriskt, se Figur 14c. Gjutröret påverkas av faktorer som vilket keramiskt material som röret består av samt dess utformning [3] Det finns slitsade gjutrör där argongas tillförs inne i själva röret. Dessa används för gjutning av grovplåt i bl.a. Oxelösund [20].



Figur 14. Olika utformning av sätet på gjutrör, a) sfärisk, b) konformad c) cylindrisk.

Stopparens spets kan också ha olika form, vanligtvis spetsig eller rund eventuellt med en liten kula i toppen. I moderna anläggningar är rund stoppare vanligast förekommande men experiment med andra former förekommer [10].

3.4.2 Argongas genom stoppare

Genom stopparen flödar argongas för att förhindra att stålet får syrekontakt. Utan argongas är det risk att en virvel uppstår genom gjutröret som kan dra med sig luft och slagg från ytan på gjutlådan. Dessutom förhindrar argongasen att igensättningar uppstår. Argonet genom stopparen på S45 är flödesreglerad idag, men inom kort kommer en tryckregulator som är utvecklad av Mefos att provas [22]. Det är relativt sett små mängder argon det handlar om och en enkel lösning för att minska igensättningarna är att öka flödet [3]. Detta leder dock till ett annat problem. För högt argonflöde gör att nivån i kokillen blir orolig av de bubblor som följer med stålet genom gjutröret vilket ger försämrad ytkvalité på de ämnen som gjuts. Dessutom finns det teorier om att små argonbubblor gjuts in i ämnen vilket orsakar kvalitetsproblem längre fram i tillverkningen. Små hål bildas vid valsning som senare leder till att syra kan tränga in i plåten vid betning vilket gör att plåten blir svagare och inte uppfyller de hållfasthetskrav som ställs. Detta är en teori som dock inte kunnat verifieras på SSAB i Luleå trots försök med slipning och analys.

Argontrycket fungerar som ett mottryck mot trycket på stopparen vilket är en reaktion av hur svårt det är för stålet att ta sig igenom gjutröret. Alltså är mottrycket på argonet beroende av dels igensättningarna, dels stopparstakens rörelse och dels stålnivån i gjutlådan. En igensättning orsakar ett ökat mottryck eftersom tvärsnittsarean på gjutröret minskar. Om stopparstaken höjer sig minskar mottrycket eftersom stålet lättare far igenom gjutröret. Om gjutlådenivån sjunker blir den drivande tyngdaccelerationen för stålet mindre, alltså blir det tyngre för stålet att ta sig igenom gjutröret och mottrycket ökar. [24]

3.4.3 Sotning

En sotning går ut på att man stänger stopparen och lyfter upp gjutlådan och sedan för in syrgas under högt tryck genom en lans upp i gjutröret. Denna bränner bort slaggbildningar på innerväggarna i gjutröret. Under sotningen håller man en sandfylld spade under gjutrörsöppningen och de slagger som lossnar faller ner i spaden. Om en sotning görs på rätt ställe i gjutningen, egentligen vid en skänkväxling, påverkar den inte de ämnen som ska vidareförädlas.

3.4.4 Klappning

En klappning innebär att man snabbt slår ner stopparen mot sätet och på så sätt slår loss slagger som fastnat där. Slaggerna som lossnar ramlar ner i kokillen och riskerar att gjutas in i ämnet vilket orsakar stora kvalitetsfel. Eftersom slagger kan komma att ligga och flyta i kokillen en stund innan de gjuts in går det inte att förutsäga var de kommer att hamna efter en klappning. Klappning kommer eventuellt att förbjudas på grund av detta. En klappning kan också orsaka att man slår sönder keramiken i stopparen då denna kan vara försvagad efter körning av flera charger.

4 Underlag för framtagande av modell

En igensättning i gjutröret är en typisk multiplikativ felsignal. Nedan följer resonemang kring olika mätsignaler och hur de kan användas för att tolka igensättningsrelaterade fenomen. Dessutom har flödesdynamiken analyserats och en ventilkurva för stopparen har tagits fram.

4.1 Laminär strömning i gjutrör och kokill

Flytande stål har ungefär samma kinematiska viskositet som vatten och beter sig strömningsmässigt på samma sätt [10]. I kokillen vill man ha laminär strömning. Detta sätter en övre gräns för hur hög gjuthastigheten får vara. Om volymflödet genom gjutrör och kokill är samma gäller

$$A_{gjutrör} v_{gjutrör} = A_{kokill} v_{kokill} . \tag{4.1}$$

Insatt

v_{kokill} =1.4 m/min

A_{kokill} =0.22*1.2 m^2 $\Rightarrow$ $v_{gjutrör} = \frac{A_{kokill} v_{kokill}}{A_{gjutrör}} \approx 44.15$ m/min

$A_{gjutrör}$ =2πr^2=2π(0.0365)^2 m^2

och enligt definition beräknas Reynolds tal för ett rör enligt

$$\mathrm{Re}_{rör} = \frac{v_{gjutrör} d_{rör}}{\mu_{stål}} \tag{4.2}$$

där $\mu_{stål}$ är den kinematiska viskositeten. Sätter man in hastigheten som beräknas med 4.1 och använder

$d_{rör}$ = 0.073 m

$\mu_{stål}$ =0.0064 m^2/s

i 4.2 får man $\mathrm{Re} \approx 8.4$. Reynolds tal för andra former än runda rör är

$$\mathrm{Re} = \frac{v_{gjutrör} d_h}{\mu_{stål}} \tag{4.3}$$

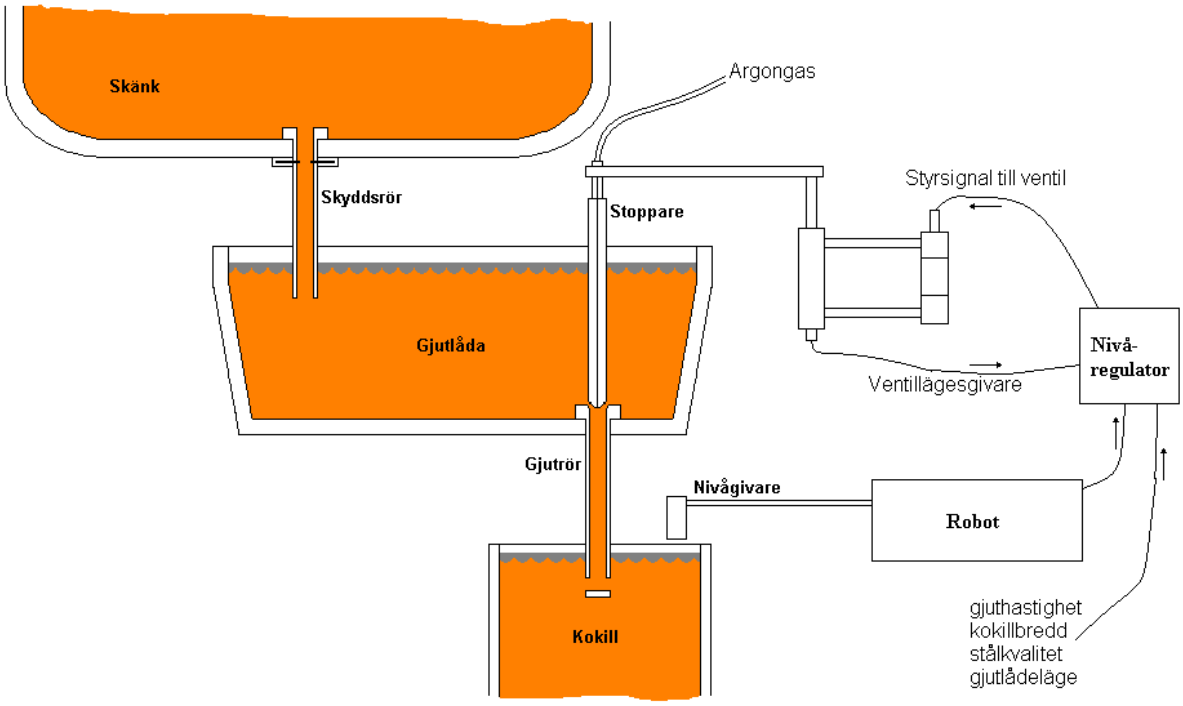
om A är tvärsnittsarean och Ω den ”våta omkretsen”, det vill säga totala omkretsen av det tvärsnitt där mediet strömmar, är

$$d_h = \frac{4A}{\Omega} . \tag{4.4}$$

Reynolds tal för kokillen blir lägre än det för gjutröret oberoende av kokillinställning. Enligt definition innebär ett Reynolds tal på under 2300 laminär strömning och över 2500 turbulent strömning [11]. Turbulent strömning innebär att en virvel, vortex, bildas genom gjutröret. Om en virvel bildas kan den dra med sig slagg och luft från ytan i gjutlådan om inte argon tillsätts i tillräcklig mängd. I de fall en virvel bildas verkar det inte bero på att det skulle vara turbulent strömning. En tillräckligt liten rördiameter eller tillräckligt långsam hastighet ger alltid laminär strömning vilket verkar vara fallet.

4.2 Mätdata och prioriteringar för identifiering av igensättningar

I Lindgrens examensarbete som gjordes 1991 [14] som handlar om kokillnivåreglering tas det upp en mängd faktorer som påverkar processen i och kring gjutröret. Utifrån dessa faktorer har en lista på intressanta parametrar tagits fram. Lindgren har betraktat givare och mätutrustning som en egen kategori medan det i denna sammanställning behandlas under respektive del av processen.



Figur 15. Styrsystemet för kokillnivåregleringen.

I Figur 15 ses gjutlådan och alla de kringliggande delar av maskinen som påverkar gjutröret och stopparen. I detta kapitel följer en genomgång av påverkande parametrar samt de prioriteringar som gjorts. Eftersom man beslutat att inte fokusera på temperaturorsakade igensättningar, egentligen frysningar, i detta examensarbete följer inget ytterligare resonemang kring prioriteringar som rör temperaturer.

Båda maskinerna, S4 och S5, har två uppsättningar gjutarmar, det vill säga två upphängningsarmar för gjutlådor. Vid gjutlådeväxling växlas dessa. Detta innebär att det finns två uppsättningar mätdata, en för arm 1 och en annan för arm 2.

4.2.1 Skänk

Påverkande faktorer:

- Vikt på skänk
- Temperatur i skänk
- Ventilläge för tappning genom skyddsrör

Skänkvikten räknas ut från den vägning som görs med traversvågen vid traverslyftet från LD-hanteringen till CAS-vagnen. Man lägger sedan till legeringar och drar ifrån tappad mängd. Denna vägning är ganska inexakt och dessutom förs inte alltid in hur mycket legeringar som lagts till. Styrningen via vridtärningen till nivån i gjutlådan fungerar bra, man använder en P-regulator. Alltså är inga av de mätningar som görs kring skänken väsentliga för modellering

av gjutröret. Däremot är det viktigt att påpeka att om skänken inte öppnar spontant, det vill säga om det är svårt att få stålet att börja strömma från skänk till gjutlåda genom skyddsröret eller om det bildas igensättningar i skyddsröret brukar problem uppstå även i gjutröret.

4.2.2 Gjutlåda

Påverkande faktorer:

- Gjutlådevikt
- Lådans placering i kokillen
- Gjutlådans dimensioner
- Temperatur i gjutlåda
- Antal körda charger och erosion

Gjutlådevikten mäts i ton på mätområdet 0-20 ton. Vågen har en noggrannhet på ±10 kg. Däremot är osäkerheten på den verkliga vikten på stålet större då fodringen på gjutlådan slits under gjutningen. Alltså kan en förändring i gjutlådevikten på ett kort tidsintervall mätas bättre än momentanvikten. Det finns ingen kontinuerlig mätning av temperaturen i gjutlådan utan detta görs med provsond, prov 1 tas 20 min in på gjutning av en charge, det vill säga i halvtid och prov 2 då det återstår 5 minuter av gjuttiden. Innan prov 1 går man på riktvärden från det prov som tas på CAS-OB-anläggningen eller RH-anläggningen.

Gjutlådan förs sakta upp och ner i kokillen, vanligtvis är vandringen 90 mm på 240 minuter. Detta är för att inte slaggen ska fräta sönder gjutröret då det största slitaget sker i slagglinjen. Gjutlådans placering i kokillen är viktigt då den påverkar trycket i utloppet på gjutröret, detta kallas även doppdjup. Nollnivån är när gjutröret är maximalt nedsänkt i kokillen, normaldrift innebär att man startar på 100 mm och sen sänker lådan.

Maximalt körs sex charger på en gjutlåda eftersom stålet sliter inte bara på gjutröret utan också på gjutlådan. Antalet charger som körts på gjutlådan avgör hur stort slitaget är. Vissa stålkvalitéer kräver ny gjutlåda därför byter man ibland tidigare än efter sjätte chargen.

4.2.3 Gjutrör

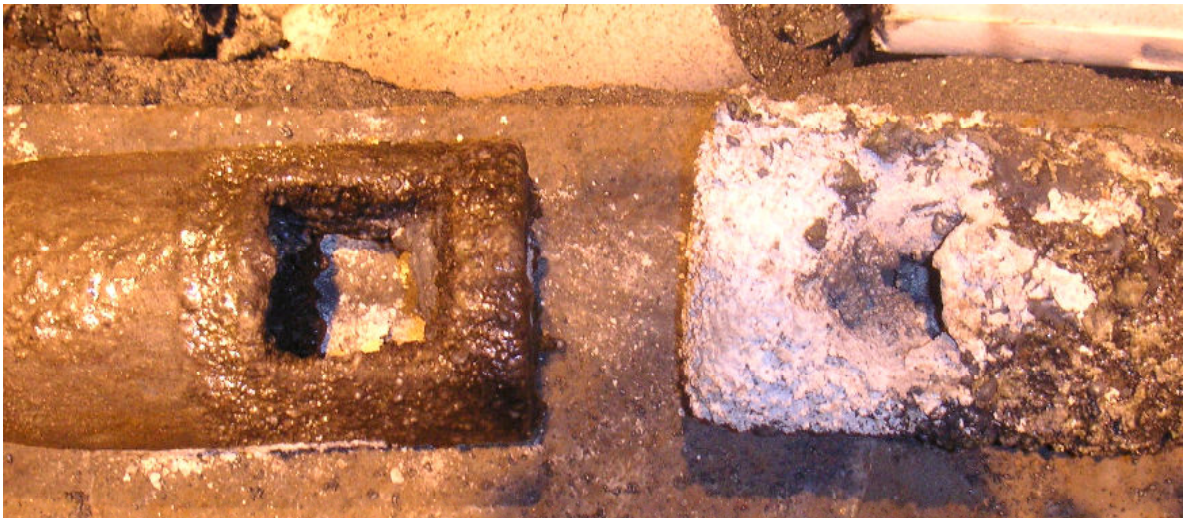
Påverkande faktorer:

- Dimensionerna
- Frysning eller igensättning och utseende
- Temperaturdifferens mellan utloppshålen
- Flödesvariationer
- Friktionen i gjutröret
- Antal körda charger och erosion

Gjutrörets dimensioner finns specificerade i ritningar och det viktigaste måttet är innerdiametern. Hur en eventuell igensättning ser ut påverkar hur den kan modelleras. Temperaturdifferens mellan de två utloppshålen på gjutröret kan tyda på en igensättning i det ena utloppet. Detta kan vara värt att ta i beaktning trots att temperaturberoende igensättningar inte är i fokus i detta arbete. Om man kan mäta flödesvariationer i gjutröret är dessa förmodligen direkt relaterbara till igensättningar. Friktionen inne i gjutröret påverkar flödet men är svår att mäta på grund av den höga temperaturen. Erosionen påverkar framförallt i

slagglinjen. Eftersom man har en gjutlådeåkning, se 4.2.2, sker erosionen över ett bredare område och gjutröret riskerar inte att brytas på grund av den.

Genom att plocka ut ett gjutrör efter gjutning och studera det kan man bilda sig en uppfattning om hur mycket igensättningar det är i röret. Detta säger dock inget om när de uppstod. Figur 16 visar två gjutrör som påverkats helt olika under gjutning.



Figur 16. Två gjutrör som påverkats väldigt olika under gjutning. Det vänstra röret är kraftigt eroderat och väggarna runt mynningen är ungefär hälften så tjocka som ursprunget. Det högra däremot är kraftigt igensatt, det vita på bilden är aluminiumoxid som nästan satt igen mynningen helt.

4.2.4 Stoppare

Påverkande faktorer:

- Stopparens läge
- Argonflöde genom stopparen
- Argontrycket
- Stopparens dimensioner
- Antal körda charger och erosion
- Släpp
- Mekaniska och hydrauliska fel

Stopparens läge är det som styr flödet genom gjutröret, detta mäts väldigt noggrant på en skala 0-100 mm där 0 är helt stängt. Vanligtvis så ligger operativt läge för stopparen på mellan 35 och 65 mm, högre upp tappas styrförmågan. Hamnar man för högt upp blir flödet helt oberoende av stopparläget och beror endast på nivå i gjutlåda och kokill. En ventilkurva som visar förhållandet mellan stopparläge och stålflöde säger mycket om det sambandet. Det är även troligt att det finns ett dynamiskt samband för hur fort en förändring i stopparläget påverkar processen.

Argonet i stopparen är flödesreglerat och ligger på mellan 5 och 7 l/min beroende på stålsort. För att kunna studera argonflöde och -tryck krävs snabb sampling då det är snabba förlopp. Argonflödet mäts på mätområdet 0-30 Nl/min (normalliter) och trycket på mätområdet 0-400 mbar övertryck. Om det läcker in luft i argontillförseln kan det orsaka igensättningar, därför är det viktigt att slangar och givare är i gott skick.

Stopparens dimensioner kan förändras pga. erosion. Väsentligt är speciellt om nosen fräts bort vilket kan göra argonutflödeshålet större. Ibland kan också stopparen vid montering hamna snett i gjutlådan, eftersom den kan vara svår att rikta in. Hamnar stopparen snett slits den också ojämnt.

Släpp, det vill säga att en igensättning inne i gjutröret plötsligt lossnar, gör att kokillnivån förändras hastigt och när regleringen försöker kompensera för detta sker en kraftig stopparrörelse, trots att det egentliga flödet genom kokillen inte förändrats.

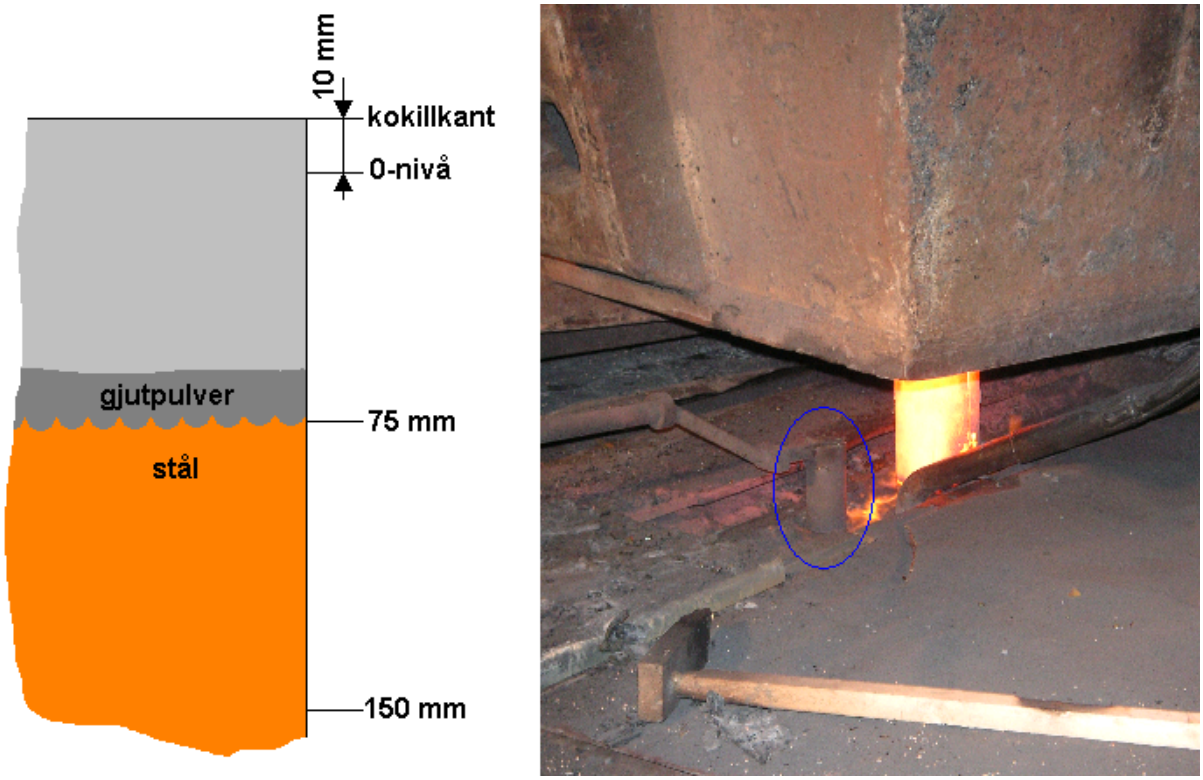
Mekaniska eller hydrauliska fel på stopparen kan också väsentligt påverka processen.

4.2.5 Kokill

Påverkande faktorer:

- Nivån i kokillen
- Kokillinställningar, bredd och tjocklek
- Kokilloscillation
- Gjuthastighet

För att kunna gjuta sprickfria ämnen med bra ytkvalité är det viktigt att ha en jämn kokillnivå. Kokillnivån mäts med en sensor som sitter på en arm en bit ovanför kokillen. För att sensorn inte ska skadas tas den bort vid gjutlådeväxlingar, sotningar och andra situationer då det är risk för stänk eller extra oroligheter i nivån. Mätningen av kokillnivån är insignal i den regulator som styr kokillnivån och därför är gjutning i handläge enda alternativet när sensorn är bortagen. Nivån har ett börvärde på 75 mm vilket är 75 mm under nollnivån som är satt 10 mm under kokillkant. Totala mätområdet för kokillnivån är 0-150 mm. Figur 17 visar bättre hur detta ser ut.



Figur 17. Till vänster, mätområdet för kokillnivån och dess orientring i kokillen. Till höger, nivågivaren, inringad, placerad i kokillen under gjutning.

Kokillen är ställbar på bredden så man kan gjuta ämnen på 800-1700 mm. Alla ämnen som gjuts är 220 mm tjocka, men man har möjligt att gjuta även andra tjocklekar.

Kokillen oscillerar för att ämnena inte ska fastna på vägen och denna oscillation mäts med ett mäthjul. Oscillationen är sinusformad och ligger på 80-100 slag/min. Det finns numera möjlighet att också använda sig av andra typer av kokilloscillering på S4 efter senaste ombyggnationen. Gjuthastigheten mäts i m/min och de givare som finns har en noggrannhet på en decimal. Mätområdet ligger på 0-2 m/min men man gjuter maximalt 1.6 m/min på de smalaste ämnena, långsammare på breda. Hastigheten sätts alltid till ett fast värde och kan styras av operatörerna.

4.2.6 Stål

Påverkande faktorer:

- Densitet för flytande och fast stål
- Viskositet för stål
- Likvidus för stål

Densiteten för stål förändras lite beroende på vilka legeringar som tillsats, likaså viskositeten och likvidus. Dessutom ska man vara medveten om att temperaturen påverkar egenskaperna och att flytande stål inte har samma egenskaper som fast.

4.2.7 Operatörer

Påverkande faktorer:

- Den mänskliga faktorn
- Dokumentationssätt

Operatörer och skiftlag arbetar olika och även om det finns arbetsbeskrivningar så följs inte dessa på samma sätt av alla. Erfarna operatörer har en känsla för hur maskinen fungerar och hur man känner igen till exempel en igensättning. Denna känsla är inte en mätbar enhet. I loggsystemet ska man föra in när man gjort igensättningsmotverkande åtgärder som klappning eller sotning, detta görs för det mesta men det händer att det glöms bort. Det är operatörerna som med hjälp av mätutrustning och känsla avgör när åtgärder ska sättas in.

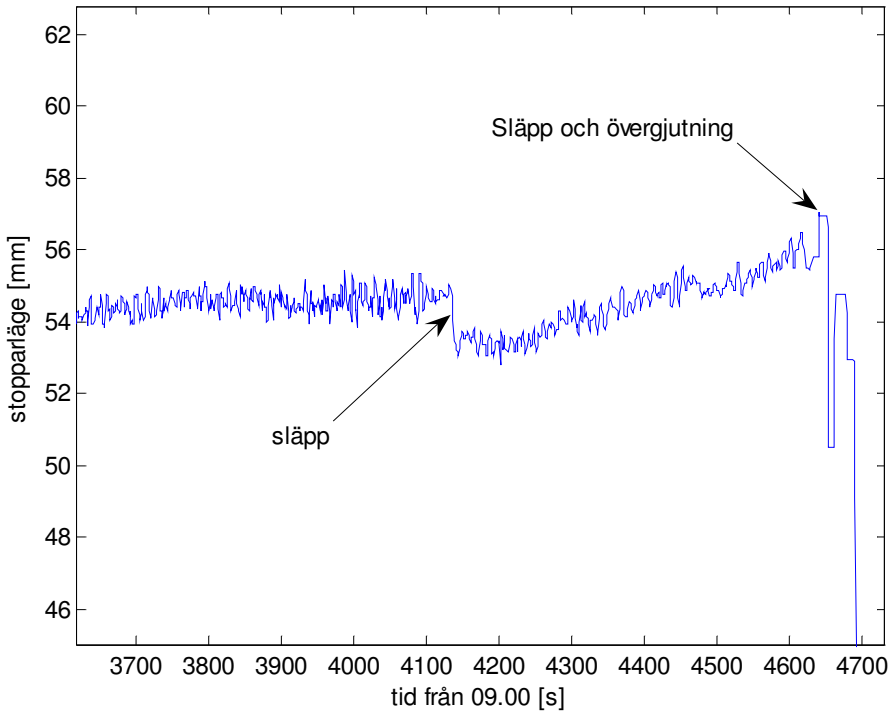
4.3 Igensättningsrelaterade beteenden hos systemet

Förutom rena signaler går det att observera några olika beteenden hos systemet som är direkt relaterbara till igensättningar. Som noterats, bland annat i kapitel 3.2.2 går mottrycket för argonflödet att härleda till igensättningar. Kapitel 4.3.1 beskriver och analyserar detta noggrannare. Kapitel 4.3.2 tar upp hur stopparen beter sig vid chargeväxlingar beroende på mängden igensättningar. Detta kommer att tas upp ytterligare i kapitel 4.5 där ett mera generellt samband för stopparläge och flöde tas fram i form av en ventilkurva. Vidare bygger metoderna NCF och NCI, se kapitel 3.3.1 på flödesrelaterade modeller där man studerar verkligt och teoretiskt flöde. Kapitel 4.3.3 tar närmare upp hur det verkliga flödet kan beräknas utifrån kokillnivån.

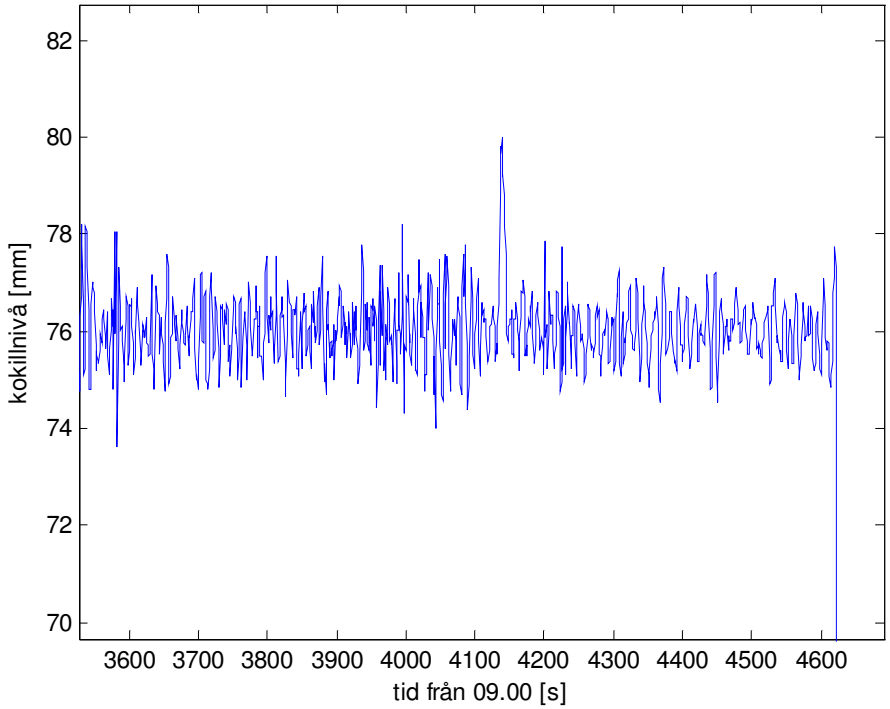
4.3.1 Igensättningsidentifiering genom att studera argontryck

Under igångkörningarna på S4 förekom en hel del driftstörningar i form av övergjutningar, när stålnivån i kokillen svämmar över kanten och rinner ut på gjutplan, och i form av genombrott. Efter en övergjutning som orsakats av en igensättning och ett släpp i gjutröret

studerades loggade mätdata från händelsen och det kunde konstateras ett samband mellan igensättningar och argontryck finns. För noggrannare teoretiskt resonemang se kapitel 3.2.2 .



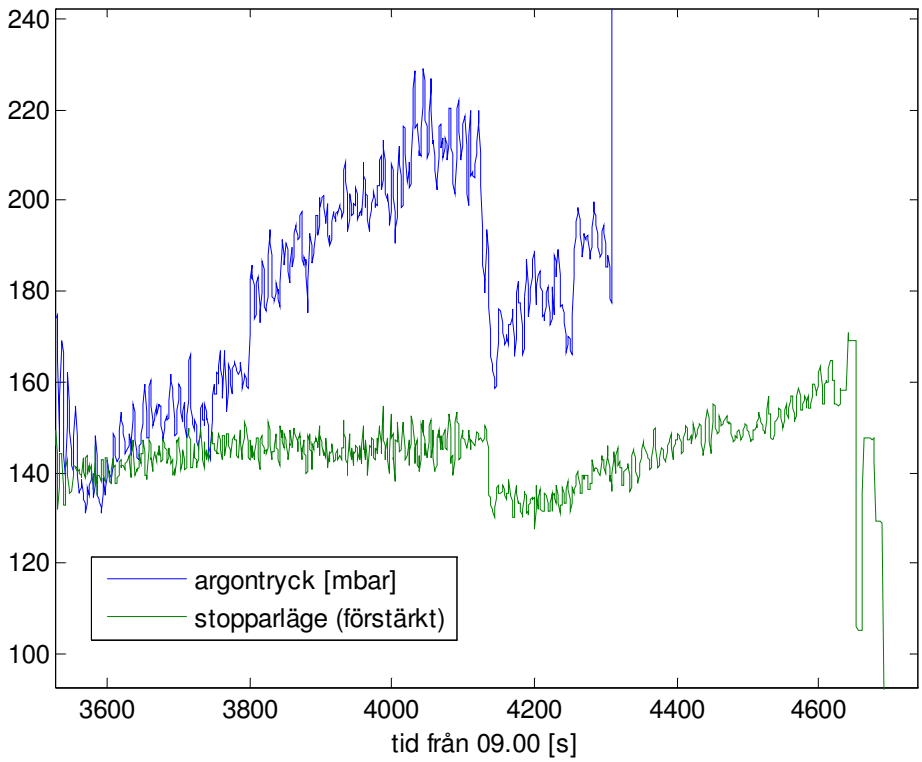
Figur 18. Stopparstakens rörelser vid gjutning på sträng 4, 2005-12-06. Vid 4137 (10:08:57) sker ett mindre släpp och i 4652 (10:17:32) sker ett större släpp som leder till en övergjutning.



Figur 19. Kokillnivån sett under tidsförloppet. Vi det första släppet syns en kraftig spik i kokillnivån, vid det andra släppet har man dragit undan nivåmätaren precis innan eftersom operatörerna förstod vad som höll på att hända och därför ville rädda givaren.

I Figur 18 ses stopparstakens rörelser precis innan den övergjutning som beskrivs ovan och i Figur 19 kan man se hur kokillnivån har reagerat. Den uppbyggnad som sker mellan det första och det andra släpet orsakar en stopparstakrörelse på 3 % vilket motsvarar 3 mm i verkligheten. Idag ligger larmgränsen för stora igensättningar på 12 %, det vill säga 12 mm. När denna gräns uppnåtts brukar man sota. Stigningen före det första släppet är ännu flackare och i princip omöjlig att se.

Om man istället studerar mottrycket på argongasen för samma förlopp kan man se tryckförändringarna som sker vid igensättningar och släpp väldigt tydligt. Figur 20 visar detta. Inför det första släppet sker en tydlig tryckökning och en kraftig tryckminskning när släppet väl sker. Sedan börjar trycket öka direkt igen. Efter det första släppet och före övergjutningen går nästan 10 minuter, men redan efter knappt 4 minuter försvinner tryckmätningen. Den rusar snabbt iväg och går utanför givarens mätområde. Detta beror förmodligen på att hålet genom vilket argongasen sprutas ut har satt igen. I detta skede har man på stopparen fortfarande inte sett någon som helst förändring som är så tydlig att man skulle vilja tolka den som en igensättning. I Figur 21 ser man hela förloppet från klockan 9 på morgonen fram till övergjutningen. 09:29 sker en chargeväxling vilket syns runt mätpunkt 1740. Fram till chargeväxlingen ligger både stopparläge och argontryck stabilt utan någon tydlig förändring, efter chargeväxlingen då igensättningen som förmodligen orsakade släppet började byggas upp ses inte speciellt mycket hos stopparen förrän precis i slutet medan argontrycket hela tiden ökar efter en tydlig linje, även inritad i figuren.



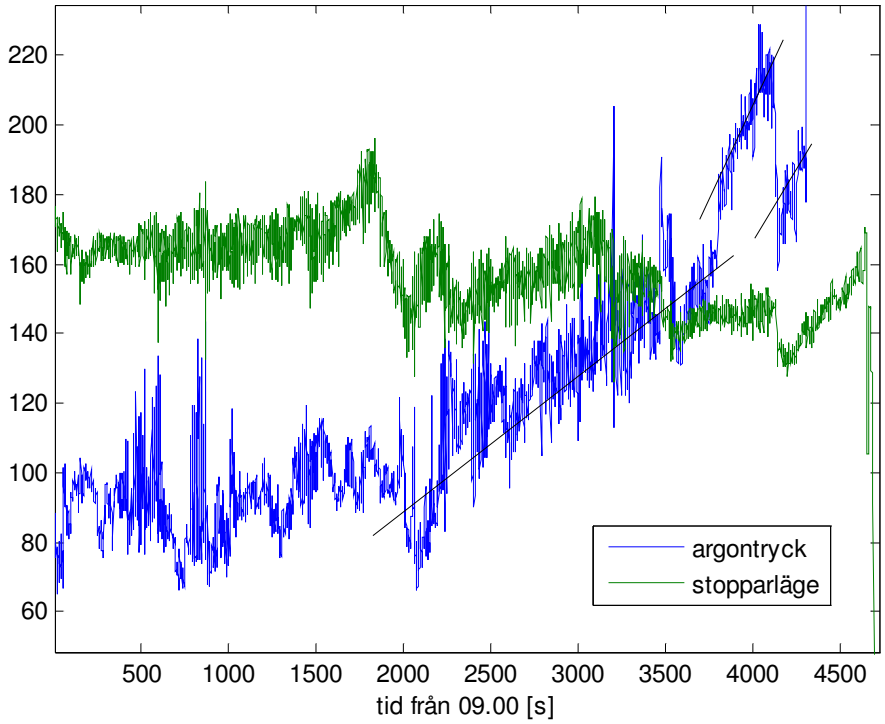
Figur 20. Mottrycket för argon i stopparen. I samma graf finns stopparläget förstärkt 10 gånger och inflyttat så det ska synas i bild bredvid argontrycket som referens.

Mottrycket på argon styrs av tre faktorer nämligen, nivån i gjutlådan, motståndet för flöde genom gjutrör och stopparrörelser, se kapitel 3.2.2. Trots att mottrycket på argonet beror av tre olika saker verkar igensättningarna i gjutröret, det vill säga motståndet för flödet genom gjutröret, vara den enskilt viktigaste faktorn. Normalt kan gjutlådans vikt pendla på ±300 kg

från normvikten under gjuttiden på en charge. Gjutlådevikten styrs av en enkel regulator som reglerar inflödet via en vridtärning på chargen. ±300 kg motsvarar höjdvariationer, Δh, på 2 cm och detta ger tryckvariationer på

$$P = \rho_{stål} g\Delta h = 7800 \cdot 9.81 \cdot 0.02 = 1.5kPa$$

vilket motsvarar 15 mbar. Detta borde inte inverka speciellt mycket på argontrycket som för igensättningen i Figur 20 steg 60 mbar på 5 minuter.

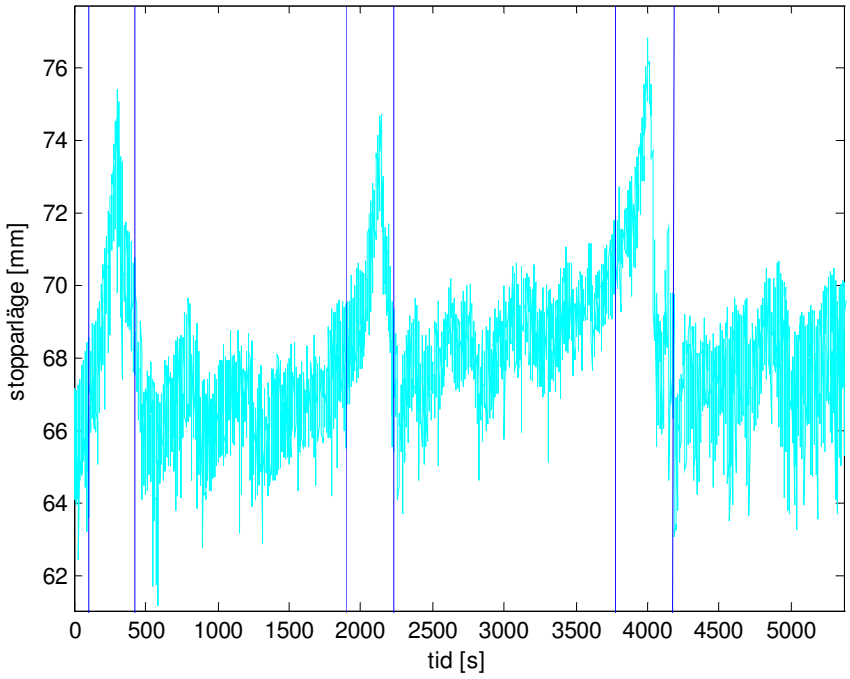


Figur 21. Mottrycket för argon i stopparen. I samma graf finns stopparläget förstärkt 10 gånger och inflyttat så det ska synas i bild bredvid argontrycket som referens. Linjerna i figuren visar lutningen på stigningen för argontrycket.

Vad det gäller förändringar i mottrycket på argonet som beror av stopparens rörelser ser man tydligt i Figur 21 att stora rörelser, som till exempel en chargeväxling ger liten inverkan på argontrycket medan uppbyggandet av igensättningar och släpp ger stort genomslag på argontrycket och mindre på stopparen. Alltså är inverkan av stopparens läge liten i jämförelse med igensättningarnas.

4.3.2 Chargeväxling vid igensättning

När en igensättning uppstår flyttas översta läget för stopparens operativa område nedåt. Om ett gjutrör är rent så behöver inte ett speciellt högt lyft av stopparen göras trots att gjutlådenivån sänkts kraftigt vid växling. Om gjutröret är igensatt och därmed har en inre areaförminskning så opererar stopparen redan nära sitt maximalläge och en växling kan därför innebära ett ganska högt stopparlyft. Figur 22 visar hur stopparen beter sig vid växlingar när gjutröret är lite igensatt.

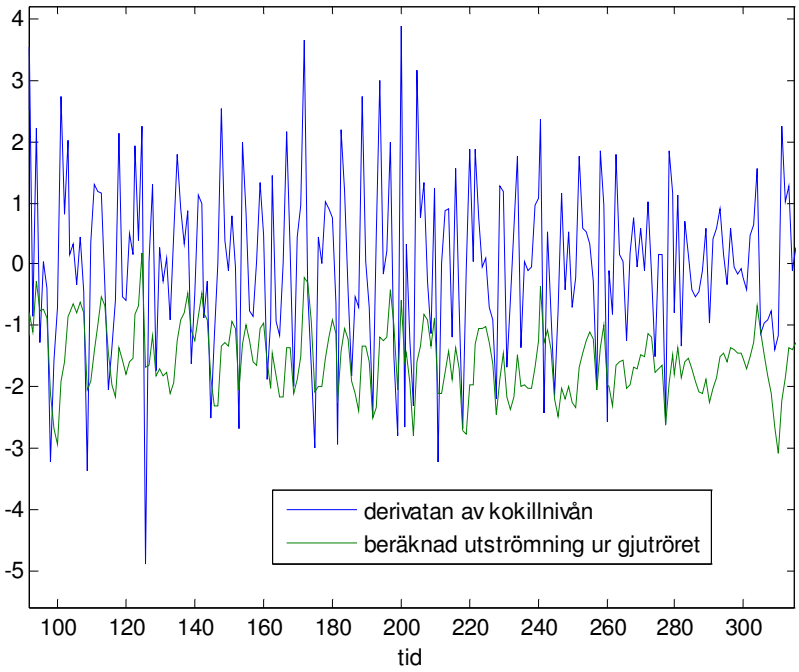


Figur 22. Stopparens beteende vid chargeväxling med igensatt gjutrör, de blå vertikala linjerna markerar växlingarna.

Naturligtvis beror lyftet på stopparen också på hur lågt gjutlådenivån går. Ska man därför koppla stopparlyftet till en igensättning måste man relatera det till gjutlådenivån.

4.3.3 Flödets beroende av kokillnivån

1 2 3 1



Figur 23. Flöden genom kokill beräknade utifrån kokillnivån och inflödesekvationen, samplingsintervall en sekund. Figuren är centrerad runt noll av simuleringstekniska skäl.

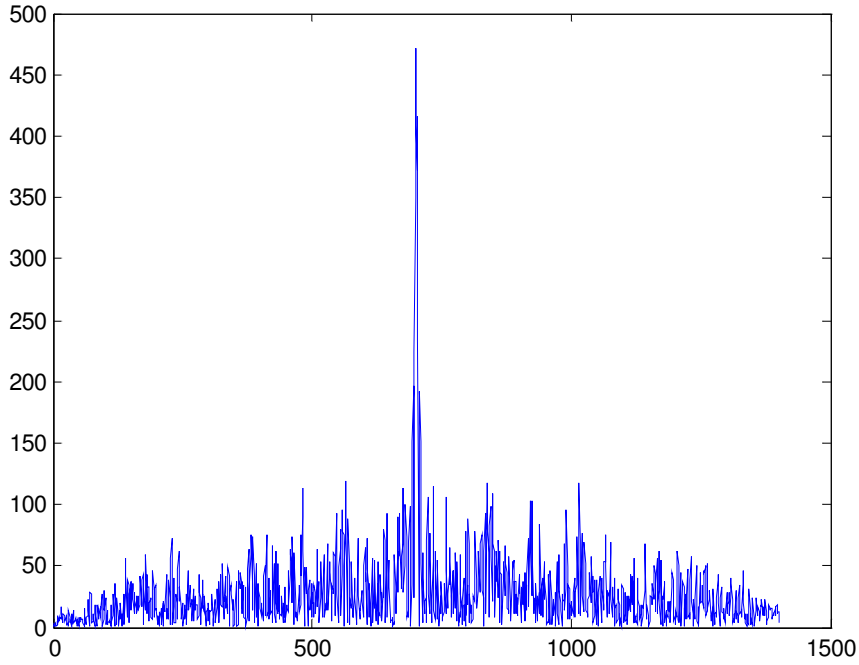
Kokillnivån är beroende av flödesförändringar. Utströmningshastigheten ur kokillen är konstant om gjuthastigheten är konstant vilket är det normala under drift. Om stopparen ändrar läge kommer nivåförändringen att vara integralen av flödesförändringen per tidsenhet delat med kokillarean. Det är enligt denna princip som den verkliga gjuthastigheten kan beräknas. Om utströmningshastigheten per tidsenhet ur kokillen är q_{ut}(t) och genomströmningen genom gjutröret är

$$q_{in}(t) = f(stopparläget)$$

då är nivåförändringar i kokillen

$$k_{nivåförändring}(t) = \int \frac{q_{in}(t) - q_{ut}(t)}{A_{kokill}} dt \,. \tag{4.5}$$

Derivatan av $k_{nivåförändring}$ är alltså direkt relaterbar till en flödesförändring. Tittar man på derivatan av kokillnivåmätningen och det beräknade flödet genom gjutröret enligt formel (3.11), Figur 23, ser man att de två signalerna följer varandra bra. Ett mer genomgående resonemang kring beräkningen av teoretisk flöde genom gjutrör och implementering av denna återfinns i kapitel 5.1.



Figur 24. Korskorrelationen för derivatan av kokillnivån och det beräknade flödet genom gjutröret, x-axeln avser antalet sampel.

Om man tittar på korskorrelationen mellan derivatan av kokillnivån och det beräknade flödet ser man ett tydligt samband också där. I Figur 24 ser man korskorrelationen uträknad enligt

$$\hat{R}_{kq_{in}}(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-m-1} k_{n+m} q_{in\,n}^{*} & m \geq 0 \\ \hat{R}_{kq_{in}}^{*}(-m) & m < 0 \end{cases} \tag{4.6}$$

det vill säga funktionen xcorr i MATLAB. $q_{in\,n}$ är element n av det samplade q_{in} och k_{n+m} det $n+m$:te element av kokillnivån. Spiken i mitten på kurvan men också det låga brusgolvet tyder på att derivatan på kokillnivån är ett bra mätvärde för det verkliga utflödet ur gjutröret.

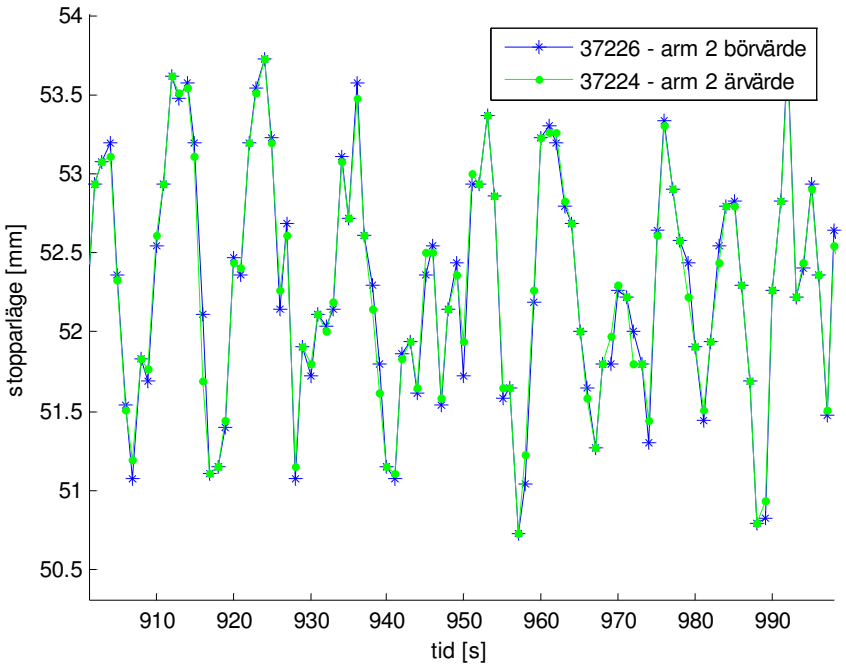
4.4 Flödesdynamik

För att bättre kunna beskriva vad som händer under gjutning krävs en dynamisk modell av gjutröret. Denna kan tas fram om man känner till några olika överföringsfunktioner för systemet nämligen:

$$\begin{aligned} \text{Styrsignal till stoppare} &\rightarrow \text{Stopparläge} \\ \text{Stopparläge} &\rightarrow \text{Kokillnivå} \\ \text{Kokillnivå} &\rightarrow \text{Nivågivare} \end{aligned}$$

Dynamiken för Styrsignal till stoppare → Stopparläge kan tas fram genom att man jämför driftsdata för dessa två värden. Börvärdet fås endast under drift där regleringen är inkopplad. Vill man ha tydligare svar på dynamiken där kan man få det genom att ändra börvärdet i steg. För undersökning och analys av detta se kapitel 4.4.1. Det enklaste sättet att ta fram dynamiken för Stoppareläge → Kokillnivå är att göra stegsvarsanalys på stegsvar gjorda i systemet. När det gäller dynamiken i nivågivaren för kokillnivån kan man anta att den är så snabb att den blir försumbar. Om man skulle vilja ta fram även den skulle det krävas ett försök där man loggar både den ”verkliga” nivån och mätvärdet.

4.4.1 Styrsignalens dynamik



Figur 25. Styrsignal (börvärde) och mätsignal (ärvärde) för stopparläget.

Data från normaldrift samlades in för bägge armarna. Både styrsignalen från givaren och mätsignalen från stopparläget samlades in. I Figur 15 kan man se var signalerna ”styrsignal till ventil” och ”ventillägesgivare” mäts. Figur 25 visar en autentisk loggning som illustrerar att skillnaden mellan de två signalerna är liten. För att ta fram hur stor eftersläpning det är

mellan de två signalerna jämfördes 14847 mätpunkter från arm 1 och 7286 mätpunkter från arm 2 på S4.

Alla mätdatapunkter jämfördes och summerades, medelvärdet på skillnaden för alla punkter kan anses vara den genomsnittliga eftersläpningen. En jämförelse mellan antal positiva och antal negativa skillnader gjordes och eftersom de var ungefär lika många kan man anta att eftersläpningen är oberoende av åt vilket håll stopparen rör sig. En jämförelse mellan arm 1 och arm 2 gjordes också och man kunde konstatera att skillnaden inte var anmärkningsvärt stor. Resultaten kan ses i Tabell 2.

	Arm 1 [mm]	Arm 2 [mm]
Skillnad bör- och ärvärde	0.054746	0.073859
Maximal skillnad	0.9278	0.7156

Tabell 2. Skillnad bör- och ärvärde för stopparen.

Eftersom som värdena skiljer så lite från varandra både i genomsnitt och vad det gäller extremvärden betyder det att stopparen är snabb att följa styrsignalen och eftersläpningen är liten. Detta tyder på att tidsfördröjningen är liten och dynamiken här kan anses vara försumbar.

4.4.2 Försöksplan för att ta fram stopparens dynamik

För att ta fram dynamiken Stoppare → Kokillnivå beslöts att göra ett stegsvarsförsök och en försöksplan upprättades. Försöket skulle genomföras en bit in på första chargen på en ny gjutlåda för att gjutröret skulle vara så rent som möjligt. Av samma skäl valdes en stålkvalité som inte är igensättningsbenägen. Nedan redovisas försöksplanen.

Viktigt när försök genomförs är att:

- Kokillnivågivaren är i läge.
- Försöket görs på ny gjutlåda, första chargen.
- Gjutlådevikten är stabil.
- Stålkoden är 37, 33 möjligen 35. 23 och 27 går också bra däremot bör 25, 36 och 38 undvikas.
- Gjutröret är nedkört i kokillbotten.

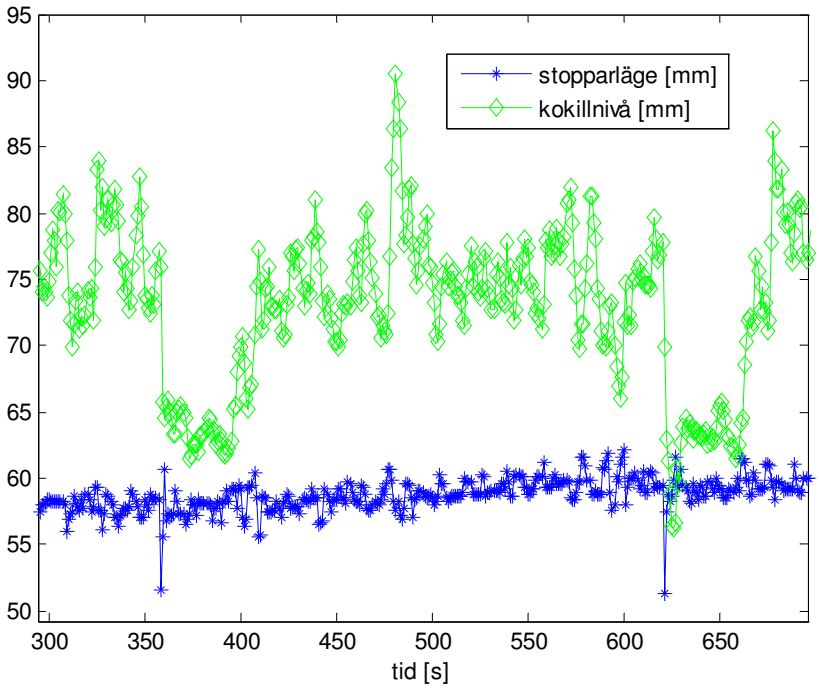
Försöksgång för framtagning av dynamik:

1. Kör i handgjutningsläge
2. Försök få kokillnivån att ligga stabilt
3. Sänk stopparen kraftigt och håll kvar medan kokillnivån sjunker
4. När nivån är nere på ca 40 mm under start, vänd tidigare om det känns osäkert, håll kvar några sekunder på den nivån och upprepa sedan rörelsen på stopparen uppåt så nivån börjar stiga igen.
5. När nivån når toppläget, håll still en stund och börja sedan om från 3 igen. Upprepa 2-3 gånger, helst fler under ca 20 min.

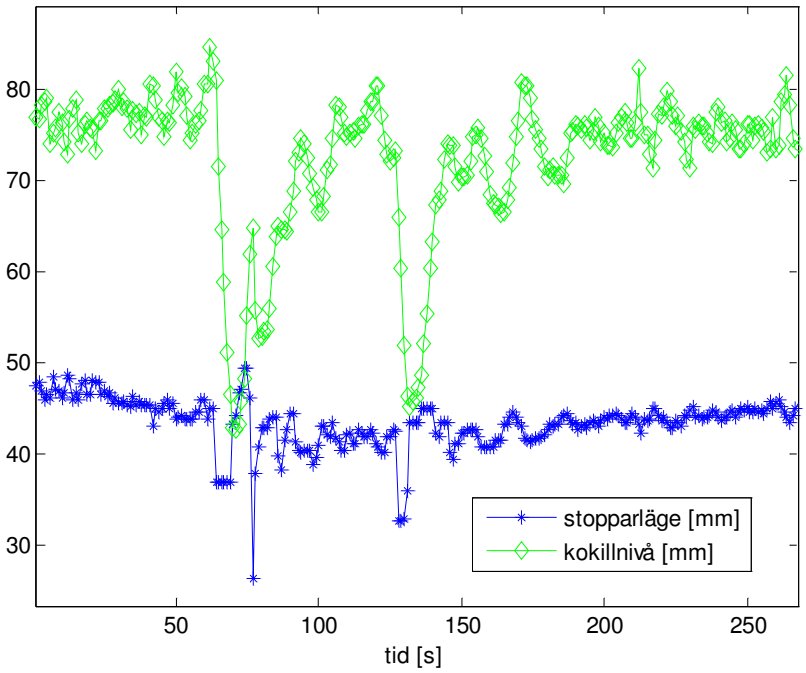
4.4.3 Genomförande av försök och resultat

Två försök genomfördes, det första enligt den försöksplan som beskrivs i kapitel 4.4.2. Det andra med de förändringarna att man väntade ca 10 minuter efter det att gjutlådebytet skett innan man gjorde försöket och att man sänkte gjuthastigheten till 1 m/min. Anledningen till den första förändringen var att när loggen från det första försöket studerades kunde man se att

inte alla värden hade stabiliserat sig. Därför insåg man att datat inte skulle kunna gå att använda för modellering av systemet. Det första försöket liknade mer ett impulssvar för systemet än ett stegsvar då operatören som skötte gjutning inte vågade hålla tillräckligt länge för att det skulle bli ett steg. Detta var orsaken till att man beslöt att sänka gjuthastigheten. Figur 26 visar loggningen från försöket.



Figur 26. Loggning från det första försöket. Stopparen gör en impulsliknade rörelse och kokillnivån reagerar med att sjunka ca 10 mm.

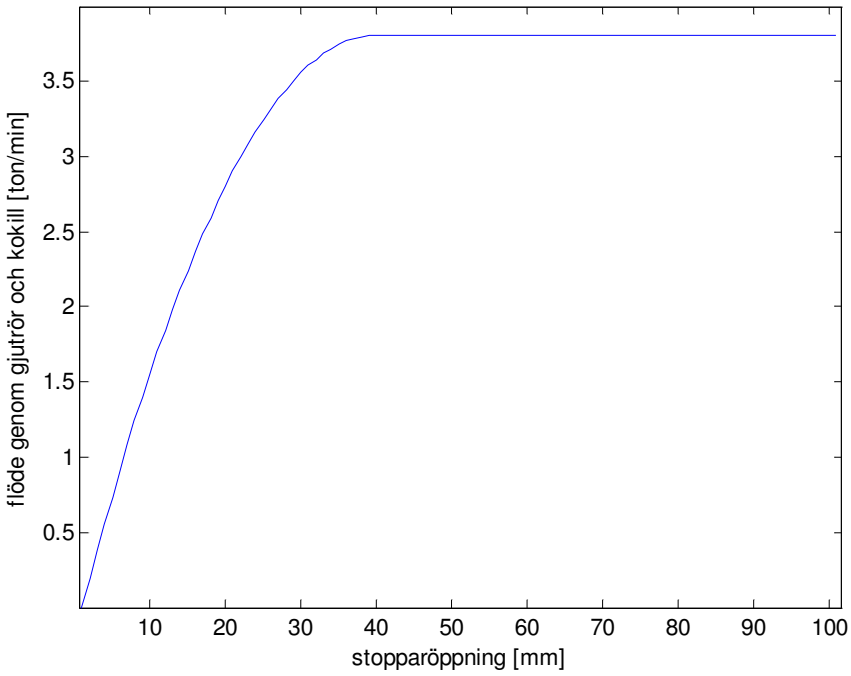


Figur 27. Loggning från det andra försöket. Stopparen gör stegliknande rörelser och kokillnivån reagerar med att sjunka kraftigt.

Det andra försöket gav bättre resultat tack vare förändringarna. Sänkningen av gjuthastigheten gjorde att gjutaren bättre hann med att reagera och man därför kunde låta nivån sjunka djupare. Gjutaren höll som längst i steget nästan 6 sekunder vilket gav ett tydligt stegsvar. Loggningen från försöket syns i Figur 27. Enligt teorin är det en integrerande verkan på kokillnivån och det stämmer väl med bägge försöken. En process som fungerar som en integral ska reagera som en ramp på ett steg och som ett steg på en impuls.

4.5 Ventilkurva för stopparen

Under de diskussioner som fördes kring hur man skulle kunna få bättre kännedom om processen kring gjutrör och stoppare beslöts att en ventilkurva för stopparen skulle tas fram. Detta för att ta reda på i vilket område stopparen opererar och vilket sambandet mellan stålflöde och stopparläge är. Figur 28 visar hur en sådan ventilkurva ser ut i teorin. Ventilkurvan gäller för stabilt flöde, alltså när nivån i kokillen är konstant. Det är rimligt att anta att dynamiken i stopparrörelsen gör att ett visst flöde inte omedelbart uppnås efter en förändring av stopparens läge.

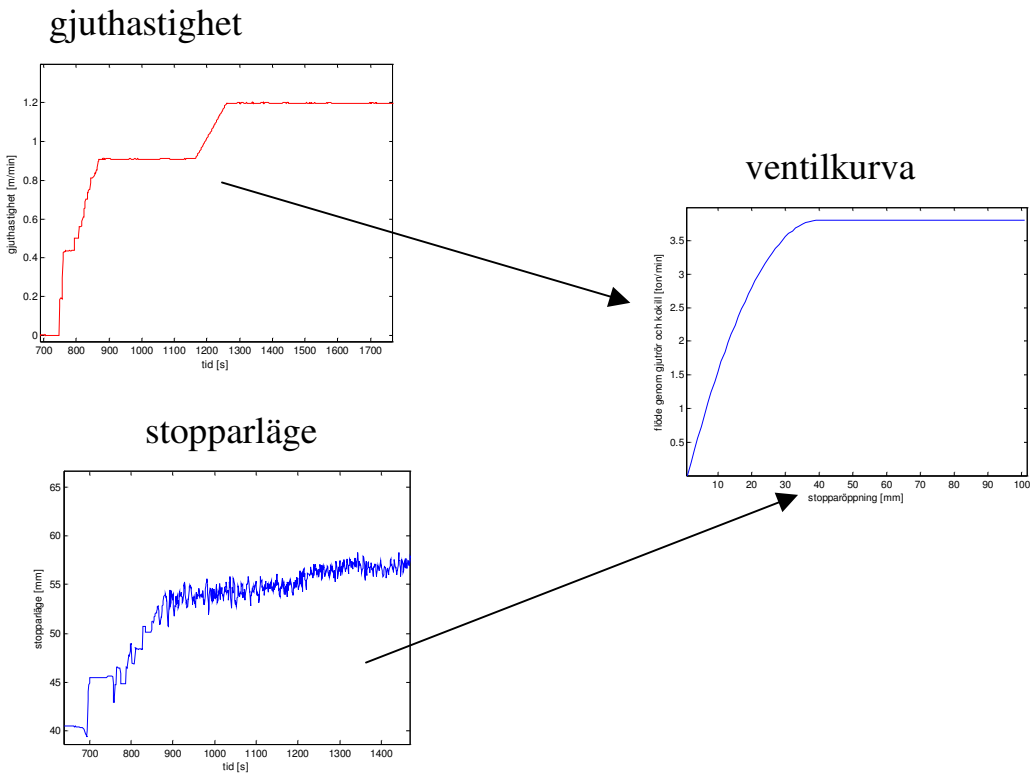


Figur 28. Ventilkurva för stopparen

4.5.1 Försöksplan för ventilkurva

För att ta fram ventilkurvan behöver man studera igångkörningsförloppet för strängen. Man kan hacka upp gjuthastigheten samtidigt som man höjer stopparen stegvis.

I Figur 29 visas hur man kan ta fram ventilkurvan ur gjutdata. Gjuthastigheten ökas och stopparen höjs samtidigt under uppstartsförlopp. Genom att medvetet styra detta förlopp kan en ventilkurva tas fram. Försöket måste genomföras efter ett gjutlådebyte för att gjutröret ska vara rent och inte hindra flödet. Under försöket ska kokillnivågivaren vara framkörd.



Figur 29. Framtagande av ventilkurva ur gjutdata. Gjuthastigheten och stopparläget kopplas samman till ventilkurva.

Tillsammans med Åke Lakso och Jari Kallunki på S45 togs den försöksplanen som visas nedan fram.

Viktigt när försök genomförs är att:

- Försöket genomförs på kokillbredd och kvalité som tillåter körning på upp till 1.5 m/min.
- Stålkoden är 37, 33 möjligen 35. 23 och 27 går också bra däremot bör 25, 36 och 38 undvikas.
- Försöket ska genomföras strax efter gjutlådeväxling .
- Kokillnivågivaren är framkörd.

Försöksgång för framtagning ventilkurva:

1. Höj gjuthastigheten till 0.4 m/min
2. Kör gjutning tills kokillnivån ligger stabilt
3. Höj hastigheten med 0.1 m/min
4. Kör gjutning tills kokillnivån ligger stabil
5. Upprepa punkt 3 tills hastighet på 1.5 m/min uppnåtts

Efter att ha genomfört de dynamikförsök som beskrivs i kapitel 4.3 och insett de svårigheter det innebär att provocera processen beslöts att man skulle skjuta på försöket och istället prova att ta fram dynamiken ur befintliga loggade data från produktionen.

5 Modelleringar

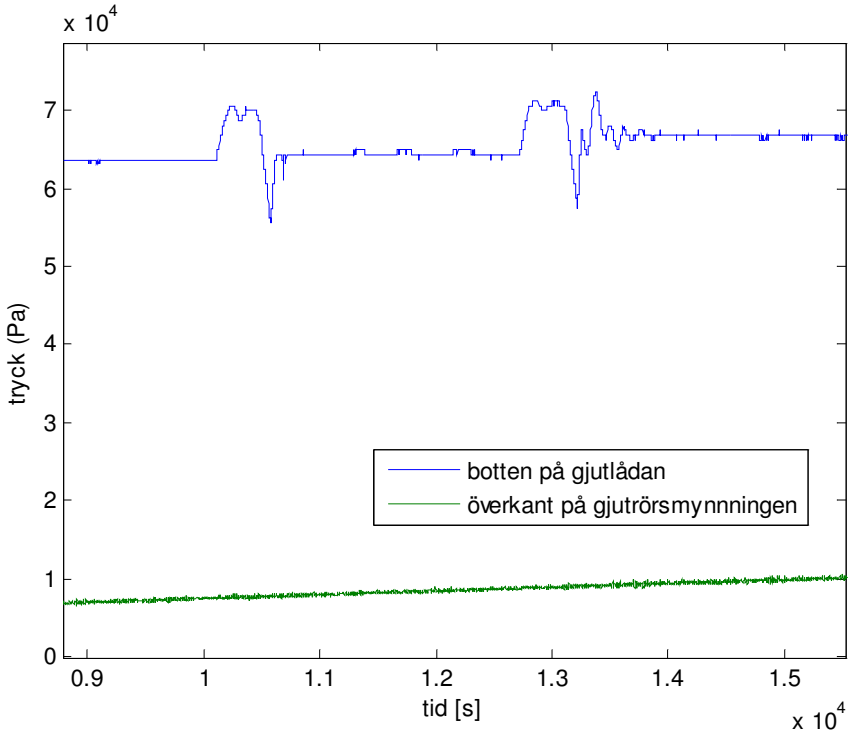
Eftersom all detektering bygger på att man skapar en modell av den process man vill studera beslöts att en modell över gjutröret skulle byggas upp.

5.1 Fysikalisk modell

Flödesmodellen som beskrivs i 3.3.2 implementerades och provades mot mätdata i MATLAB. Stopparläge, gjutlådeläge, gjutlådevikt, kokillnivå och kokillinställningar loggades. Utifrån detta kunde nivån i gjutlådan och nivån för utflödet ur gjutröret i kokillen räknas ut eftersom dimensionerna är kända. Enligt tryckformeln

$$p = \rho_{stål} g h \,, \tag{5.1}$$

där h är ett djup i stålbadet, kunde sedan trycket i botten på gjutlådan och trycket vid utloppet ur gjutröret räknas ut. Figur 30 visar trycken plottade i samma figur. Tryckskillnaden mellan de två kurvorna är det som driver flödet genom processen.



Figur 30. Trycket i botten på gjutlådan och trycket vid utflödet ur gjutröret för tre charger.

Eftersom gjuthastigheten är satt till ett konstant värde kommer alla flödesvariationer i gjutröret att leda till en nivåförändring i kokillen. Förutsatt att man betraktar flytande stål som en inkompressibel vätska kan det verkliga flödet genom gjutröret beräknas enligt

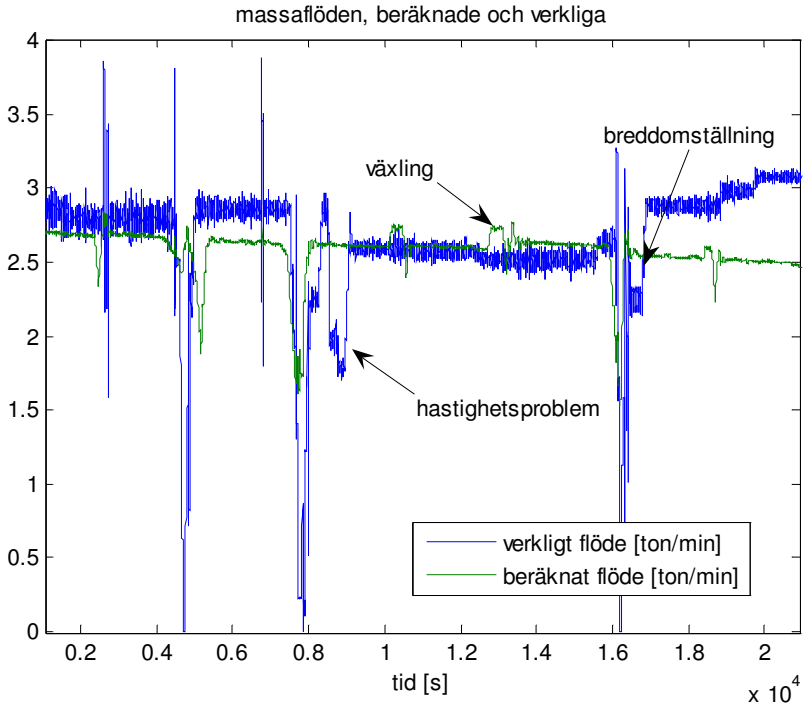
$$q_{ut} = b_{kokill} h_{kokill} (v_{kokill} + \frac{d}{dt}(k_{nivå})) \tag{5.2}$$

där

q_{ut} = flödet i kokillen
b_{kokill} = kokillbredden, det vill säga slabsens bredd
h_{kokill} = kokillhöjd, det vill säga slabsens höjd
v_{kokill} = gjuthastigheten, det vill säga den hastighet kokillen matar slabsen framåt

$k_{nivå}$ = kokillnivån, det vill säga nivån i kokillen.

Detta helt i enlighet med resonemanget i kapitel 4.3.3. Naturligtvis leder en nivåförändring till en viss verklig kompression av stålet men eftersom nivåförändringarna är så små kan den antas vara försumbar. Figur 31 visar en jämförelse mellan det beräknade värdet enligt den modell som Avenberg och Johansson [4] beskriver, (3.11), och det verkliga värdet enligt (5.2). Derivatan av kokillnivån i formel (5.2) har beräknats med numerisk approximation i MATLAB.



Figur 31. Verkligt och beräknat flöde för chargerna T8848-T8850. Man ser tydligt bredd och hastighetsomställningar på den gröna kurvan medan skänkväxlingarna tydligt syns i det beräknade flödet, blåa kurvan.

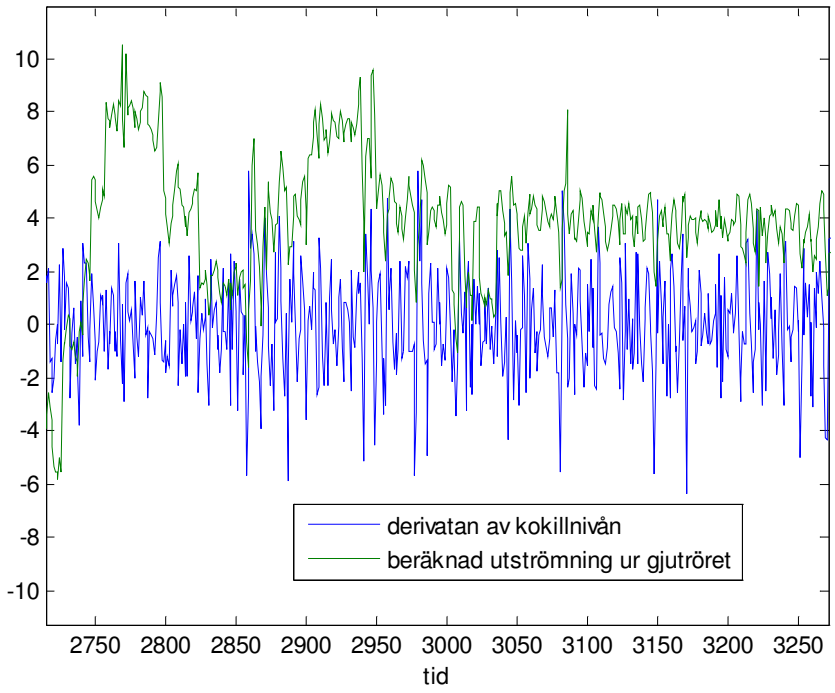
Man kan tydligt se att modellen och det verkliga värdet avviker från varandra vid händelser i systemet. De kraftigaste dykningarna i det verkliga värdet, den blå kurvan, beror inte på verkliga mätningar utan på att nivåmätaren alltid är frånkopplad vid skänkväxlingar. Skänkväxlingarna ger tydligt utslag i det beräknade flödet medan det inte alls får samma kraftiga utslag på det verkliga värdet. Däremot syns breddomställningar och gjuthastighetsförändringar tydligt i det verkliga värdet, medan de inte ger något som helst utslag i det beräknade värdet. Detta beror på två saker. Flödesmodellen bygger enbart på tryckskillnader och dessutom tar den inte med medvetna gjuthastighetsförändringar. Detta sätt att ta fram ett teoretiskt flöde genom gjutröret för att sedan kunna räkna NCF eller NCI fungerar därför inte. Vidare så verkar det inte vara möjligt att använda en formel som bygger på turbulent flöde. Vid trimning mot mätdata av de konstanter som förekommer i flödesbeskrivningen (3.11) visade det sig att man kunde approximera formeln till

$$q_{in} \approx \sqrt{\frac{p_1 - p_4}{\frac{\rho_{stål}}{2C_q^2 A_s^2(h)}}} \tag{5.3}$$

utan att få ett statiskt fel som är större än det som redan finns inbyggt i konstanternas storlek. Detta tyder också på att turbulens och dämpning i botten på gjutröret inte är påverkande

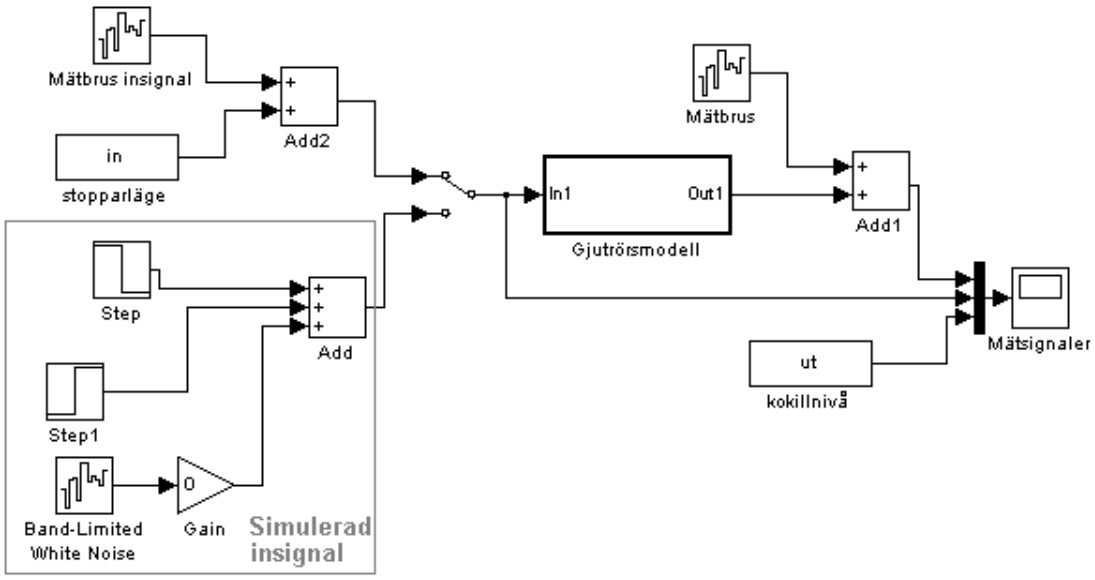
faktorer för flödesbeskrivningen. Vilket är helt i linje med konstaterandet att flödet är laminärt som framkom i kapitel 4.1.

Problemet med att förändringar i gjutlådan slår igenom för kraftigt återstår dock. Figur 32 visar ett insvängningsförlopp för nivån i gjutlådan. Insvängningen påverkar det beräknade värdet för flödet kraftigt medan kokillnivån är lite orolig men inte alls påverkas i samma utsträckning. Att notera är också att gjuthastigheten inte alls förändrades under förloppet.



Figur 32. Medelvärdesjusterade flöden genom kokill beräknade utifrån kokillnivån och inflödesekvationen. Samplingsintervallet är en sekund.

5.2 Modellbygge utifrån försöksdata



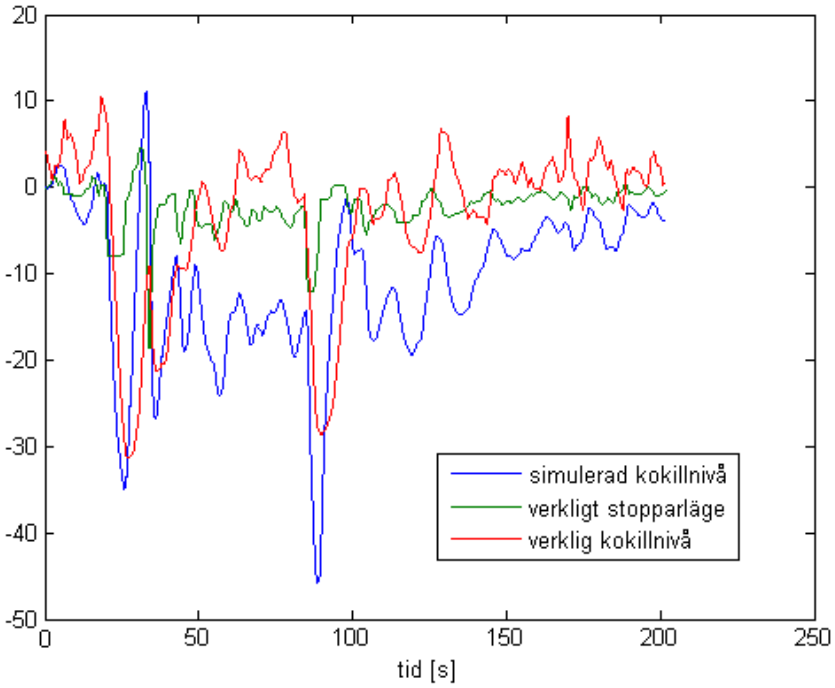
Figur 33. Modell för test av gjutrörsmodeller gjord i Simulink.

Utifrån de data som samlades in i försöken som beskrivs i 4.4.3 konstruerades en modell i Simulink. Figur 33 visar den modell som byggdes upp för att kunna testa olika modeller och insignaler. Med den manuella switchen kan man växla mellan en verklig insignal som hämtas från en fil och en simulerad mätsignal som görs direkt i Simulink. Möjlighet att prova modellens känslighet för brus finns också genom att mätbrus av olika intensitet kan läggas till.

De olika modellerna som skulle testas bygger på en integrerande verkan med olika tidsfördröjningar. Figur 34 visar resultat från den modell som har överföringsfunktionen

$$G(s) = \frac{2}{s+0.4} e^{0.38s}. \qquad (5.4)$$

Den simulerade kokillnivån stämmer bra överens med den verkliga.



Figur 34. Simulerat och verkligt data från modellen som beskrivs i formel (5.4). All värden är av simuleringstekniska skäl centrerade runt noll.

Eftersom kokillnivån ska reagera rent integrerande enligt formel (4.5) på stopparen stämmer inte denna modell med teorin. $q_{in}(t)$ kan anses ha ett direkt beroende på stopparens rörelser om gjutlådenivån förblir oförändrad.

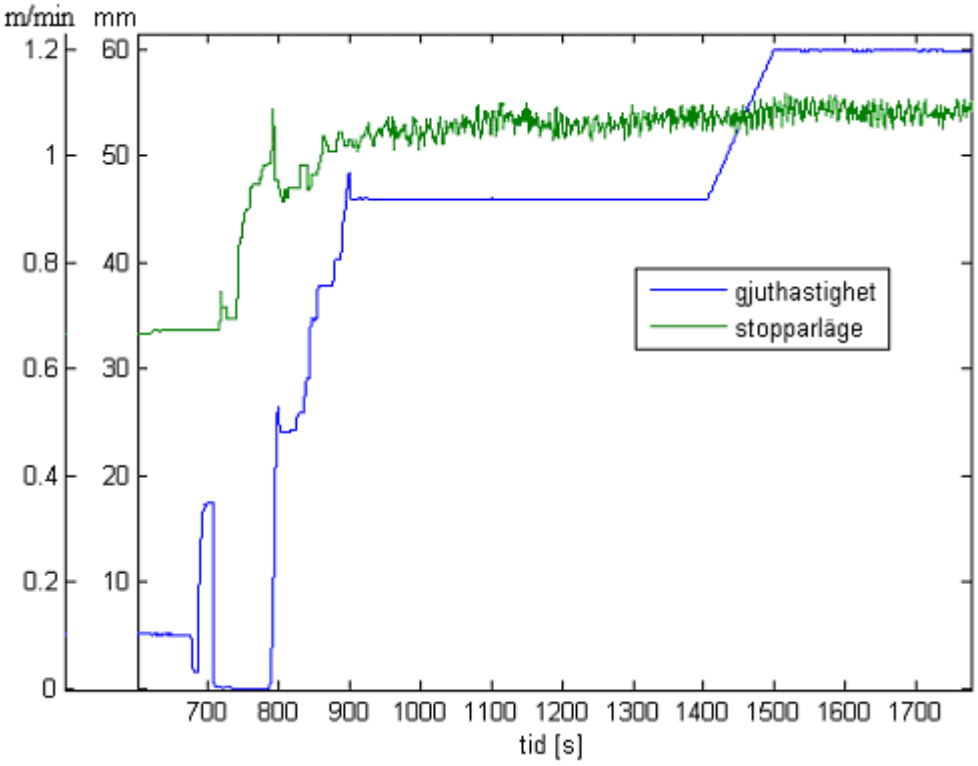
Vidare vet man att nivån i kokillen inte svänger in sig mot ett värde då man förändrar stopparen i ett steg utan den kommer att reagera rampartat eftersom utflödet ur kokillen inte ändras samtidigt. Anledning till att den modell som får bäst efterföljning av mätdatat inte kan anses vara den verkliga kan bero på att stegsvaret som används är väldigt kort och mer liknar en puls och att simuleringsverktyget Simulink inte kan tolka detta korrekt.

5.3 Ventilkurva framtagen ur kördata

Vid gjutstart görs en upprampning av gjuthastigheten där man ökar hastigheten samtidigt som stopparen automatiskt höjs av regleralgoritmen. Figur 35 visar hur ett typiskt sådant förlopp ser ut. Först rampas hastigheten upp till en nivå där man stannar för att göra justering av kokillbredden innan man fortsätter upp till maximal gjuthastighet. Stopparen gör en spik

alldeles i gjutstarten vilket beror på att den vanligtvis fastnar i sätet på gjutröret på grund av frysning. Man måste dra loss stopparen vilket ger den spik som syns i signalen.

Stålflöde, mät- och börvärde för kokillbredd, stopparläge, temperatur i gjutlåda samt gjuthastighet loggades från 14 gjutstarter mellan den 12 och 16 januari 2006. Anledning till att man valde att logga även temperaturen är att man trodde att ventilkurvan kan komma att få olika utseende beroende på stålets viskositet som är beroende av temperaturen.

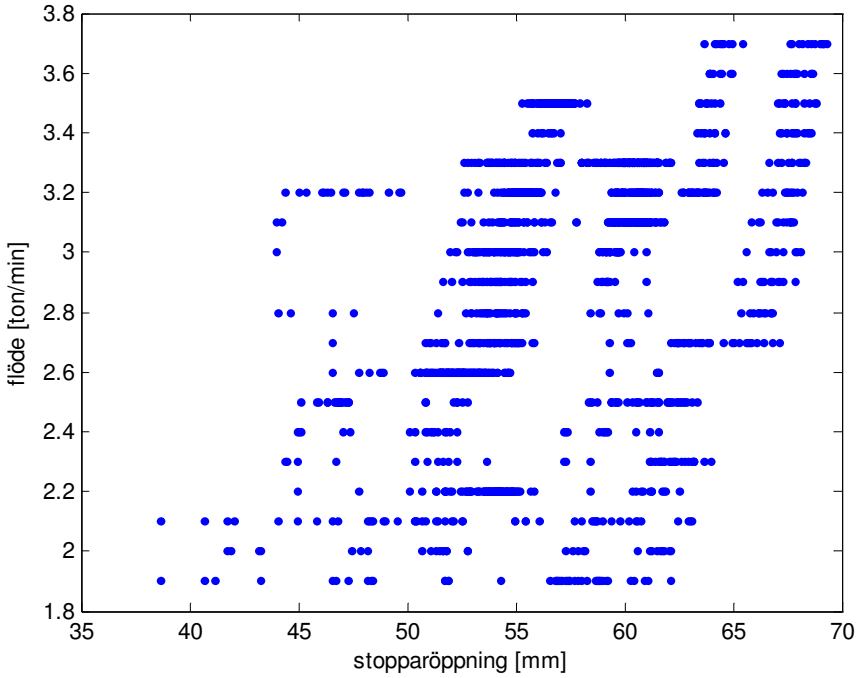


Figur 35. Start på S4 efter gjutlådebyte, stopparläge i mm av maximalt utslag och gjuthastighet i m/min.

Sedan klipptes data från rampningen ut från varje gjutstart. Områden där mycket transienter, oroligheter eller breddomställningar pågick togs inte med. Med rampning menas dels den manuella rampning som görs precis efter gjutstart och den automatiserade rampning som görs efter breddomställningen. I Figur 35 syns först den manuella rampningen som en skakig stigning och senare kommer ett plant område som markerar breddomställningen och till slut kommer den automatiserade rampningen. Anledningen till att man kör manuell rampning i början är att man inte vill ha nivågivaren utkörd då det är risk för stänk under gjutstart och därför har man ingen insignal till regleringen. Temperaturen observerades, men verkade inte variera speciellt mycket. Temperaturmätningarna i gjutlådan bygger dock på sondmätning vid enstaka tillfällen, därför vet man inte hur temperaturkurvan på stålbadet såg ut under gjutstarterna.

Sedan plottades stålflödet mot stopparläget. I Figur 36 kan man se hur de insamlade mätdata fördelade sig efter det att vissa extrempunkter tagits bort. Man kan se en trend i plotten men också att det är stor spridning. Gjuthastigheten mäts bara med en decimal. Detta är ett skäl till att spridningen blir stor. Dessutom är sambandet mellan stoppare och flöde inte helt statiskt under ett rampningsförlopp, en stor källa till spridningen är det dynamiska förlopp som endast går att tolka ur kokillnivån med nuvarande loggning. Eftersom nivågivaren inte är inkopplad under den lägre delen av stigningen, fram till 3.8 ton/min, blir spridningen större där. Manuell rampning där man använder visuell hållning av kokillnivån ger inte samma stabilitet som

automatiserad rampning. Om man medelvärdesbildar över varje punkt i gjuthastigheten får man den kurva som visas i Figur 37.



Figur 36. Plot över insamlat mätdata för framtagning av ventilkurva.

Genom estimering har en ventilkurva kunnat tas fram för området $1.1 < flödet < 3.6$ eller $49 < stopparläge < 67$. Denna ventilkurva kan beskrivas

$$Stålflöde = ah_{stoppare}^{\ 2} + bh_{stoppare} + c \qquad för \quad 45.5 \le h_{stoppare} \le 67 \tag{4.7}$$

där

$a = -0.00790426163$

$b = 1.060928059$

$c = -31.82472726$

där s är stopparläget och en rimlig gissning för kurvans område utanför mätområdets utseende har gjorts. I Figur 37 kan man se denna kurva som en heldragen svart linje. Om man extrapolerar resultatet kan man komma till följande ekvation för ventilkurvan

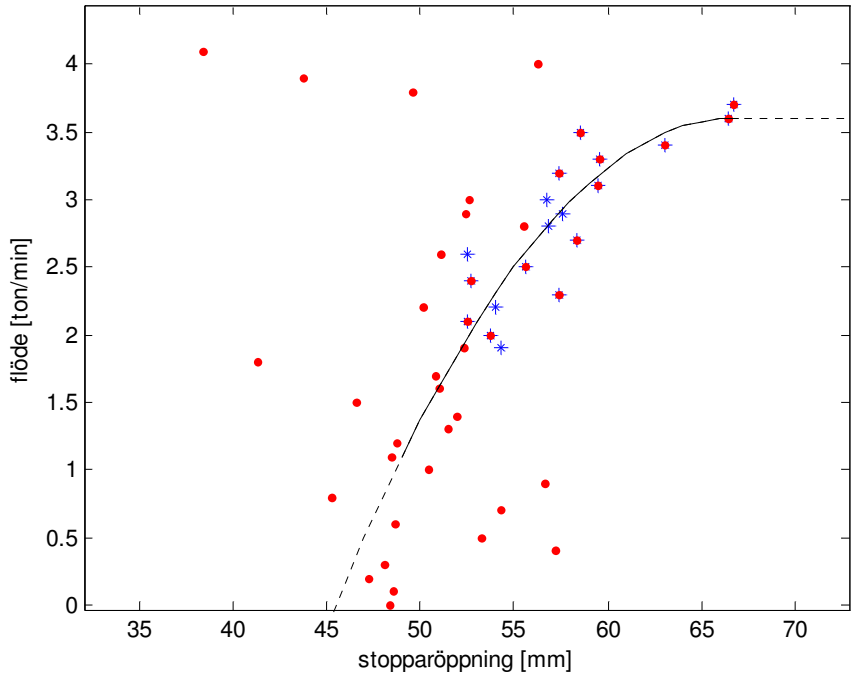
$$Stålflöde = \begin{cases} 0 & för \quad h_{stoppare} < 45.5 \\ ah_{stoppare}^{\ 2} + bh_{stoppare} + c & för \quad 45.5 \le h_{stoppare} \le 67 \\ k_1 & för \quad h_{stoppare} > 67 \end{cases} \tag{4.8}$$

där

$k_1 = Stålflöde(67) \approx 3.6030$

I figur 26 kan man se denna kurva inritad som en streckad svart linje. Detta är dock bara spekulationer och inte fastslagna fakta. Framförallt är det troligt att den övre delen för det operativa området för stopparen ligger något högre och att kurvan därför sluttar svagt ytterligare en bit innan den går över i horisontalläge.

Att ha god kännedom om ventilkurvan ger också god processkännedom. Detta skulle motivera noggrannare och mer styrda försök för att kunna ta fram hela ventilkurvan.



Figur 37. Ventilkurva framtagen ur mätdata. De röda prickarna är gjorda av alla insamlade mätdata medan de blå stjärnorna bygger på en filtrering där vissa extrempunkter plockats bort. Den svarta kurvan är en estimerad ventilkurva som bygger på de blå mätdatapunkterna.

För att ta fram en fullständig ventilkurva för stopparen krävs att man genomför försöket som beskrevs i kapitel 4.5.1 eftersom tagningar från kördata endast ger besked om sambandet i en del av det operativa området. Ytterligare någon typ av försök kan behöva göras för att ta fram toppläget på det operativa området. Detta toppläge är speciellt viktigt att känna till ifall man vill veta hur långt från maxkapacitet på S45 som dagens hastighet ligger, utan att man byter gjutlåda, stoppare eller gjutrör. Eftersom normalkörning idag ligger inom det område där kurvan börjar vika av är det troligt att man ligger mycket nära det maximala läget. Därför är det också lätt att man tappar styrbarheten på stopparen vid igensättningar. En igensättning leder ju till att gjutröret minskar i area och ventilkurvans topp flyttas nedåt.

5.4 Modelleringsosäkerhet i systemet

I modellerandet av gjutrör och stoppare har inte all teori stämt med praktiken. Tankarna för hur systemet ser ut har byggt på idé 1, se Figur 38, det vill säga en modell där hela gjutröret är fyllt med stål. Den argongas som leds ner genom stopparen bildar en liten bubbla. Argonbubblor sprids senare i stålet, en del bubblar upp i ytan på gjutlådan och en del bubblar upp i kokillen.

Det matematiska sambandet för detta är enligt (4.5)

$$k_{nivå} = \int \frac{q_{in} - q_{ut}}{A_{kokill}} dt$$

där $k_{nivå}$ är nivån i kokillen och q är flödet i gjutröret respektive kokillen. Eftersom gjutröret är fyllt med stål blir flödet genom gjutröret proportionellt mot stopparens läge. Detta samband kan beskrivas på olika sätt men generellt kan man säga att

$$q_{gjutrör} = k_0 \sqrt{h_{stoppare}} \qquad (5.6)$$

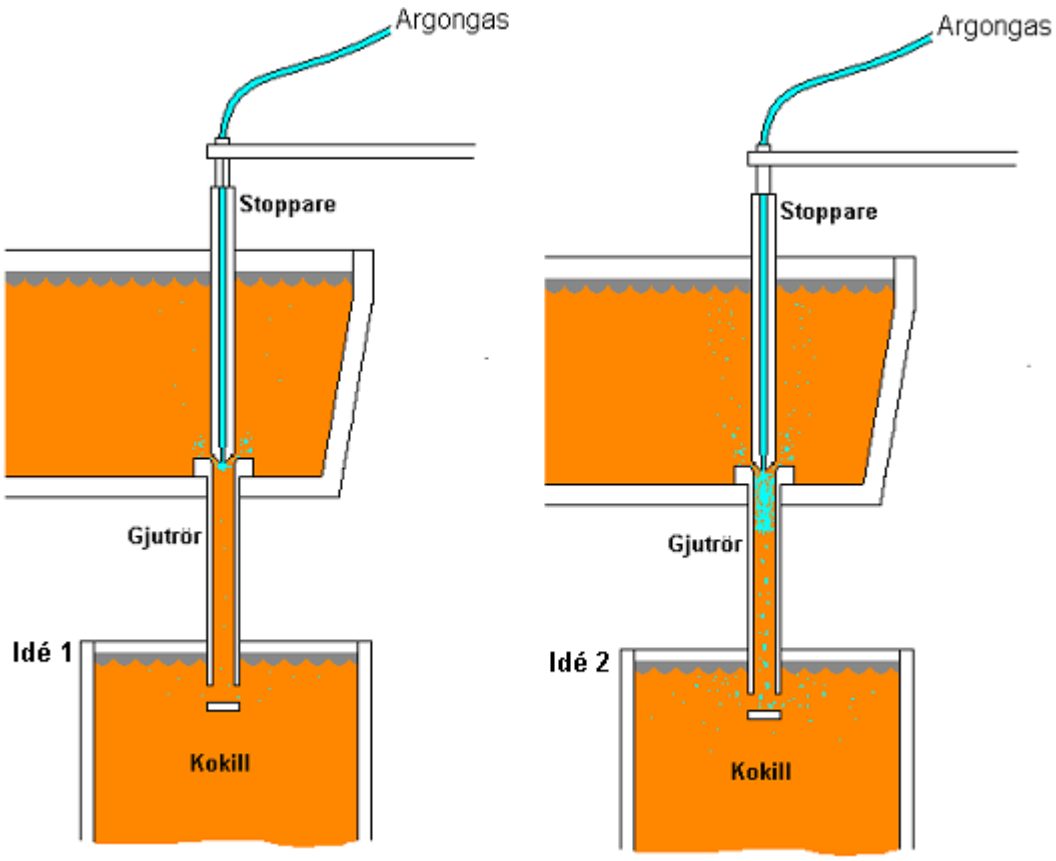
där k_0 är en konstant och $h_{stoppare}$ är stopparens läge.

En överföringsfunktion för Stoppare → Kokillnivå skulle då kunna vara

$$G(s) = \frac{k_1}{s} \tag{5.7}$$

eventuellt tidsförskjuten något. Denna modell kan till en början verka vara fullt rimlig men när dynamikförsök gjordes för att ta fram det dynamiska sambandet mellan stopparens läge och kokillnivån erhölls bäst överensstämmelse för överföringsfunktionen

$$G(s) = \frac{k_2}{k_3 + s}. \tag{5.8}$$



Figur 38. Två olika sätt att se fyllnadsgraden i gjutröret.

Efter en del funderingar och diskussioner med personal på SSAB i Luleå kom en annan bild av hur man borde betrakta fyllnadsgraden på gjutröret fram. Enligt denna teori så är gjutröret inte helt fyllt med stål utan det finns en yta inne i gjutröret. Stopparen begränsar hur mycket som kan komma ner i gjutröret. Idé 2 i Figur 38 beskriver denna modell. Kokillnivån kommunicerar med nivån i gjutröret som driver stålet framåt. Stopparen reglerar hur mycket stål som ska rinna ner och egentligen reglerar den nivån i gjutröret.

Kokillen rör sig normalt med konstant hastighet och därför verkar det rimligare att gjutröret inte är helt fyllt med stål. Detta skulle också kunna förklara det fenomen som uppstår när trycket som mäts på argontillflödet i stopparen och formar ett mottryck mot trycket i gjutröret plötsligt blir negativt. Om en igensättning uppstår i gjutröret kan nivån i gjutröret pressas uppåt och skapa någon form av ejektorverkan.

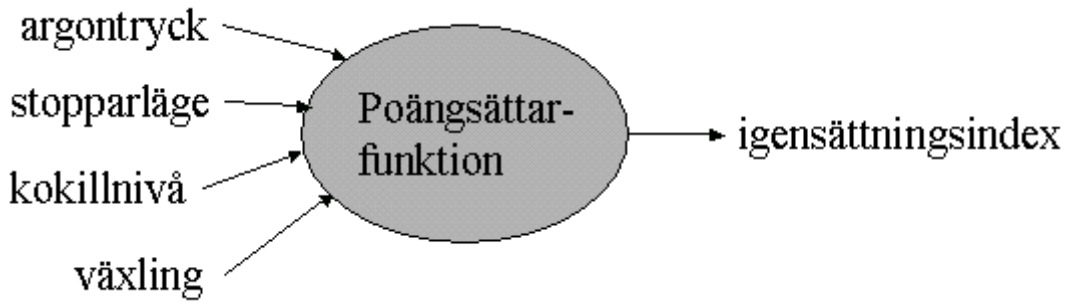
Det är svårt att mäta var denna yta i gjutröret skulle kunna ligga, förmodligen är den inte vare sig stillaliggande eller speciellt jämn med tanke på den mängd stål som rusar genom gjutröret. I området ovanför ytan finns en blandning av flytande stål och argon. Mot slutet av en gjutning har Ulf Sjöström från Mefos kunnat konstatera att en stadigare argonbubbla har bildats runt stopparhuvudet [24].

6 Poängsättningsalgoritm baserat på igensättningsindex

Utifrån de idéer som Carl-Erik Grip [19] kom med om en logisk identifierare som presenterades i kapitel 3.3.3 och de beteenden hos systemet som beskrivs i kapitel 4.3 har en poängsättande identifierare tagits fram. Identifieraren bygger på att ”igensättningspoäng” delas ut för trendhändelser som tyder på en igensättning, tex. ett högre minutmedelvärde för argontrycket eller att stopparläget ökar.

6.1 Framtagen algoritm

Med hjälp av alla de undersökningar av systemet som gjorts och Carl-Erik Grips [19] grundidé har en funktion som generar ett mätvärde på igensättningar tagits fram. Figur 39 visar principen för algoritmen.



Figur 39. Principen för en poängsättningsfunktion.

Poängsättarfunktionen bygger på att ett mätvärde kallat ”poang” och en matris kallad chargematrisen skapas. Mätvärdet ”poang” är summan av de igensättningspoäng som ett gjutrör fått under gjutning av en charge. Poängsättarfunktionen är uppdelad i tre delar förutom den överordnade del som skapar chargematrisen. Chargematrisen är uppbyggd som en 5 gånger n matris där n är antalet körda charger sedan mätstart. I chargematrisen finns uppgift om hur många igensättningspoäng chargen har fått, vid vilken tidpunkt mätdatainsamlingen för chargen påbörjades, hur många charger som körts på gjutlådan, vilken arm som används samt vid vilken tidpunkt mätdatainsamlingen för chargen avslutades. Poängsättarfunktionens fem delar är:

1. ARGON-del
2. STOPPAR-del
3. VÄXLINGS-del
4. KOKILLNIVÅ-del
5. ARV-del

Nedan följer en utförligare beskrivning av varje del i systemet. Tittar man på hur poängen delats ut under gjutning får man en kurva. Lutningen på den kurvan berättar när under gjutning som extra mycket poäng delats ut, det är då själva uppbyggningen av igensättningar sker. Modellen har sedan kunnat provas mot mätdata och man har kunnat ställa in poängsättningen så att den ger ett bra utfall.

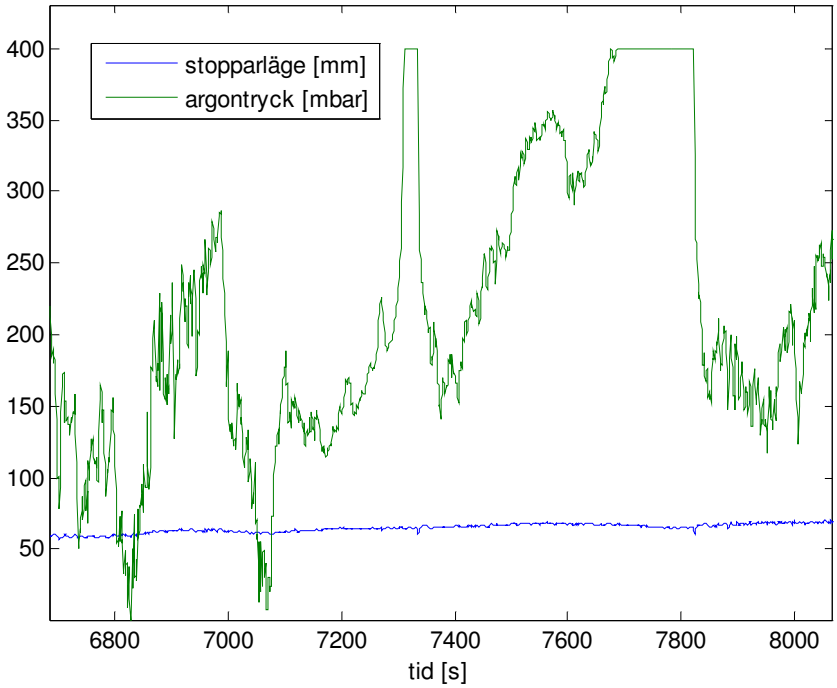
6.1.1 ARGON-del

Denna del bygger på de trender som går att läsa ut ur argontrycket. Igensättningspoäng ges om:

1. det filtrerade värdet är större än minutmedelvärdet.
2. minutmedelvärdet är högre än medelvärdet hittills på chargen.

Det finns funderingar kring att ett extra högt argontryck skulle ge mer poäng än ett lägre.

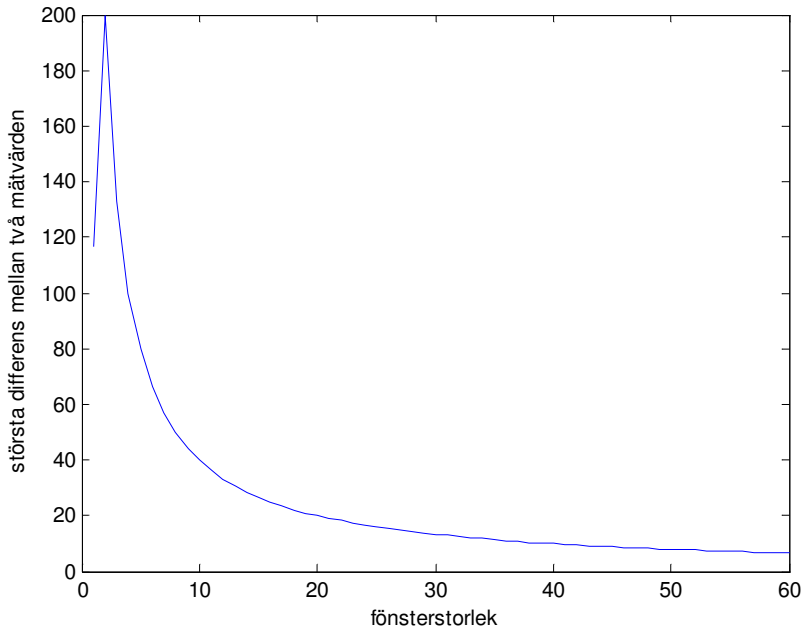
Denna del bygger på de tydliga samband mellan igensättningar och mottryck som teoretiskt beskrivs i kapitel 3.2.2 och praktiskt verifieras i kapitel 4.3.1. Argontrycket är inte alltid inom sitt mätområde. Mätningen sker mellan 0-400 mbar. Figur 40 visar argontrycket för en typisk gjutsituation.



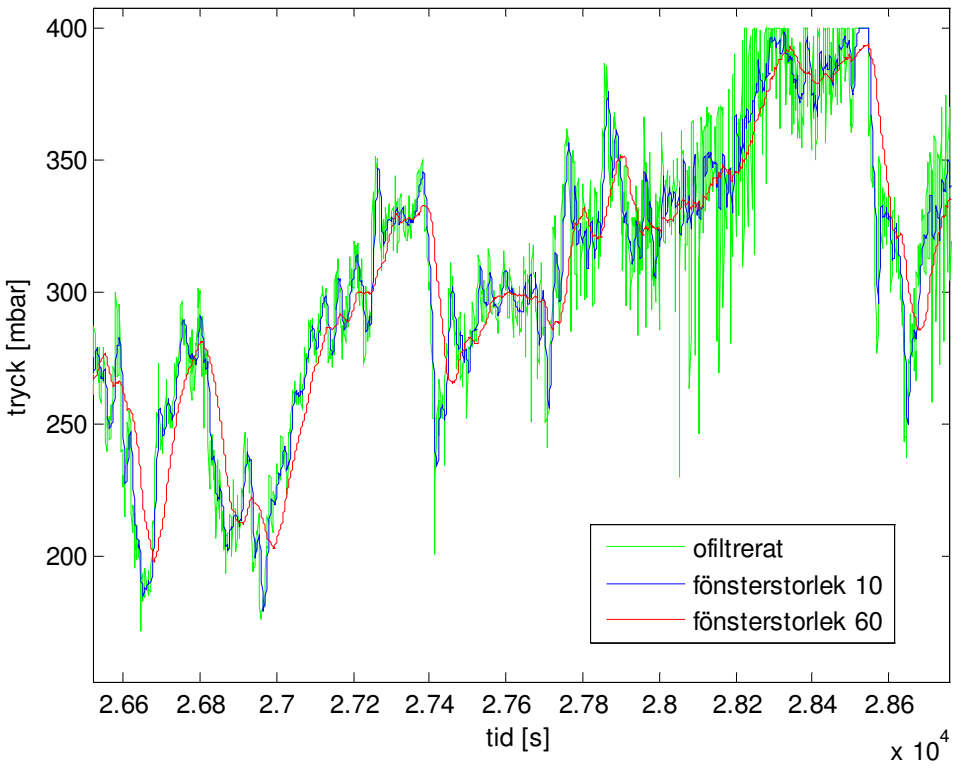
Figur 40. Argontryck och stopparläge för en typisk gjutsituation. Argontrycket vandrar mycket upp och ner och går flera gånger under och över sitt mätområde.

Vissa teorier säger att en igensättning högt upp i gjutröret skapar en ejektorverkan, motsatt tryckförhållande, och därför ett negativt tryck vilket blir noll på givaren medan en igensättning långt ner i röret orsakar ett högre mottryck och därför går givaren till slut i taket. Detta är teorier och spekulationer som inte finns belagda med mätningar och därför inte kan tas i beaktande när det gäller poängsättning för igensättningar.

För att kunna utläsa trender ur argontrycket behöver signalen filtreras. Till att börja med behövs en medelvärdesbildning över ett antal observationspunkter. En enkel simulering där fönsterstorlekar på mellan 1 och 60 observationspunkter testades, sambandet visas i Figur 41. Ett litet fönster ger en snabb uppdatering av trenden, men samtidigt ett fladdrigt utseende där det är svårt att tolka resultatet. Ett större fönster ger en mjuk och stadig trend men mycket långsam uppdatering. För det största fönstret som provades, 60 punkter, är tidsfördröjningen en hel minut. Detta visas i Figur 42. Utifrån detta resonemang och kurvan i Figur 41 beslöts att medelvärdesbilda över 10 värden, denna signal syns också i Figur 42. Tidsfördröjning blir 10 sekunder vilket kan antas vara rimligt med tanke på processen. Utifrån den filtrerade signalen skapas det minutmedelvärde som används i identifieraren.



Figur 41. Relation mellan antal värden för medelvärdesbildning och hur stort det största avståndet mellan två mätvärden på den filtrerade signalen blir.



Figur 42. Argontrycket ofiltrerat, medelvärdesbildat över 10 punkter och medelvärdesbildat över 60 punkter. Ju större fönster man använder desto tydligare ser man trenden för signalen men samtidigt får man en större tidsfördröjning.

6.1.2 STOPPAR-del

Denna del bygger på de trender som går att läsa ut ur stopparrörelser och bygger på samma princip som dagens identifiering. Igensättningspoäng ges om:

1. momentanvärdet på stopparen är större än medelvärdet för de senaste 20 sekunderna.
2. argontrycket är utanför sitt mätområde. Då ges ytterligare en poäng om momentanvärdet på stopparen är större än medelvärdet för stopparen 100 sekunder bakåt i tiden. Det medelvärdet bildas över 100 sekunder.

Om stopparens höjs kraftigt är det nästan garanterat en igensättning. Problemet med detta är att identifiering i de flesta fall sker för sent för att tillgängliga åtgärder ska kunna användas. Dagens identifieringsmetod för igensättningar beskrivs i kapitel 3.2.1.

6.1.3 VÄXLINGS-del

Denna del bygger på att ett antal poäng ges som motsvarar hur högt stopparen gått relativt startläget för en chargeväxling. Eftersom man idag kör nära toppläget på ventilkurvan, se kapitel 5.3, så innebär igensättningar att man kommer mycket nära slutet på stopparens operativa område när nivån i gjutlådan sjunker. Befinner man sig i slutet på ventilkurvan måste man göra mycket stora stopparrörelser för att påverka flödet vilket tydligt syns på växlingar som görs i slutet på en gjutlådeserie där man fått igensättningar.

Växlingsdelen tillför sina poäng i arvdelen av identifieraren. Det är alltså den senaste växlingen som tas med i beräkningen. Poängsättningen sker enligt följande formel

$$poäng = \begin{cases} k_{låg}(\max(h_{stoppare}) - mean(h_{stoppare})) & för \quad m_{gjutlåda} < m_{gräns} \\ k_{hög}(\max(h_{stoppare}) - mean(h_{stoppare})) & för \quad m_{gjutlåda} > m_{gräns} \end{cases} \tag{6.1}$$

där $k_{låg}$ och $k_{hög}$ är två konstanter som ger olika poäng beroende på om vikten i gjutlådan, $m_{gjutlåda}$, är över eller under ett visst gränsvärde $m_{gräns}$. max($h_{stoppare}$) är maximalvärdet på stopparläget under växlingsförloppet och mean($h_{stoppare}$) är medelvärdet på stopparläget under samma förlopp.

6.1.4 KOKILLNIVÅ-del

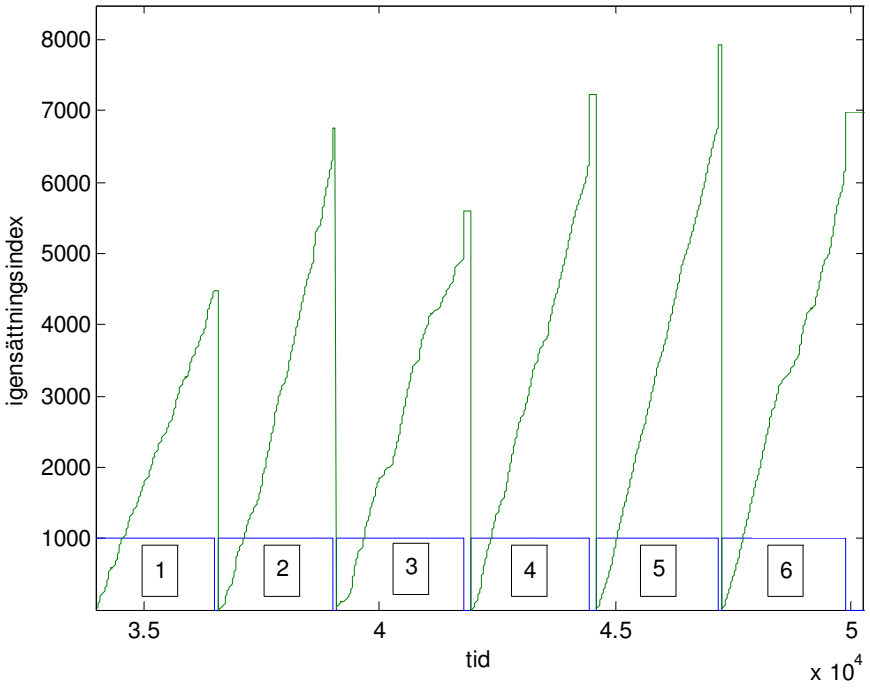
Denna del bygger på det samband mellan flödet och kokillnivån som kunnat konstateras i kapitel 4.3.3. Stora oroligheter i flödet innebär stora flödesförändringar. På grund av argonflödet genom stopparen så är kokillnivån ganska orolig. Delar av argonet följer med ner genom gjutröret och bubblar upp i kokillen. Dessutom orsakar själva kokilloscilleringen vågor på kokillytan. Mätsignalen för nivån i kokillen har därför lågpassfiltrerats något för att få bort en del av bruset. Sedan har min och maxvärdet jämförts för en relativt kort period och om differensen mellan dem är för stor har en poäng delats ut. Perioden har satts till ganska kort på grund av resultaten i kapitel 4.4.3 där det stod klart att nivån regerar fort och kraftigt även på små förändringar i systemet. Dessutom är det bra med en kort period så att inte samma mätvärdestransient ska få för stort genomslag.

6.1.5 ARV-del

Denna del handlar om att igensättningarna i ett gjutrör inte enbart beror på det stål som gjuts för stunden utan även hur det gått på tidigare charger som gjutits med samma låda. Därför ärver igensättningsindexet poäng från föregående charge om denna hade så höga poäng att det tyder på en igensättning.

6.2 Test av poängsättningsalgoritm

Algoritmen som togs fram och beskrivs i kapitel 6.1 har utvärderats och testas mot mätdata dels del för del och dels sammanslaget. Varje del utom ARV-delen kan var och en för sig identifiera igensättningar. VÄXLINGS-delen och STOPPAR-delen är de som bäst kan identifiera en igensättning ensamt, detta tyder också på att det inte varit fel att som enda signal välja att studera stopparläget. Sammanslagningen av signalerna ger dock en tydligare och tidigare identifiering.



Figur 43. Plot av igensättningsindexet för körning av sex charger på en gjutlåda. Samplingsintervallet är en sekund.

Figur 43 visar hur igensättningsindexet ser ut vid normalkörning på S4. En liten ökning i poängen kan ses under körningen vilket är normalt då en viss uppbyggnad av igensättning alltid sker. Tabell 3 visar vad Charge-matrisen visar under samma tid.

Igensättnings-Index	Tid för start	Charge sen lådbyte	Arm	Tid för stopp
4471	08:11:27	1	2	08:46:33
6749	08:48:35	2	2	09:26:51
5590	09:30:25	3	2	10:03:00
7224	10:05:34	4	2	10:40:40
7935	10:45:07	5	2	11:20:54
7782	11:28:48	6	2	12:00:47

Tabell 3. Utdrag ur Chargematrisen.

7 Slutsatser

I detta arbete har en algoritm för att ta fram ett igensättningsindex utvecklats. Dessutom har en ventilkurva och några ytterligare flödesmodeller tagits fram.

7.1 Framtagande av igensättningsindex

En algoritm för att identifiera igensättningar har tagits fram. Algoritmen bygger på databehandling av många olika mätningar som görs runt gjutlådan. Algoritmens fem huvuddelar är ARGON-del, STOPPAR-del, VÄXLINGS-del, KOKILLNIVÅ-del och ARV-del. En sammanviktning av dessa fem ger ett bra mätvärde på hur stora igensättningarna är och när de uppstått.

7.2 Ventilkurva

En ventilkurva för en del av det operativa området har tagits fram och det har kunnat konstateras ett matematiskt samband mellan flöde och stoppare. Dock är osäkerheten ganska stor och det är svårt att jämföra kördata med kurvan. Det är troligt att anta att stopparen opererar mycket nära sitt maximala operativa läge. Detta betyder att man förmodligen inte kan öka gjuthastigheten utan att göra förändringar i utformningen av gjutlåda och gjutrör. Vidare innebär det att om man har mycket igensättningar kan man inte köra maximal hastighet i växlingar då man i så fall förlorar möjligheten att styra flödet med stopparen.

7.3 Modellering av igensättningar

Det finns möjlighet att modellera igensättningar genom klassisk feldetektering. Två olika modeller för att modellera flödet genom gjutröret har testats. Ingen har gett ett bra värde, men med hjälp av observerarteknik skulle det vara möjligt att vidareutveckla dessa modeller. Dynamisk modellering kan vara kraftfull för att i framtiden kunna ta fram bättre modeller över både stänggjutningen och igensättningarna.

8 Förslag till fortsatt arbete

I detta kapitel presenteras kort trådar som inte kunnat följas upp i detta examensarbete, men som kan vara uppslag för fortsatta undersökningar på ämnet.

8.1 Modellosäkerhet

Att vidare utvärdera den modellosäkerhet som beskrivs i kapitel 5.4 skulle kunna ge en mycket bättre bild av hur gjutröret egentligen fungerar. Finns det en yta inuti gjutröret sker förmodlig slagbildning i denna yta. Att med någon form av ultraljud undersöka gjutröret och försöka separera slag, stål och argongas från varandra på bilden skulle förmodligen kunna bekräfta ifall denna idé är verklighetsanknuten eller inte.

8.2 Förbättrad ventilkurva

Att ta fram en bättre och mer statistiskt säker ventilkurva är motiverbart då denna dels skulle kunna ge bättre svar på sambandet mellan stoppare och flöde och dels skulle kunna svara på frågan om systemet är rätt dimensionerat idag. Det är troligt att man idag kör mycket nära maxkapacitet på stopparen vilket gör att man inte kan öka hastigheten på strängen utan att göra förändringar på gjutlåda och stoppare.

8.3 Vidareutveckling av poängsättningsmodell

Redan tidigt i arbetet intervjuades Carl-Erik Grip [19] och han hade idéer om en modell av samma typ som argontrycksmodellen men som skulle titta på den kemiska analysen av stålet och på så sätt väga risken för en igensättning. Detta är en kemisk modell och anses därför ligga utanför ramarna för detta arbete som främst skulle behandla frågan ur ett reglertekniskt perspektiv. Carl-Erik Grip kallade detta ”suddig logik” och ansåg att en kompletterande sådan modell skulle kunna minska riskerna för ”falskt alarm” vad det gäller igensättningar. Görs ett sådan system är det viktigt att det kan uppdateras efter nya stålkoder.

Kontinuerlig mätning av temperaturen i gjutlådan skulle kunna ge bättre information om när risken för frysning är stor, något som dagens modell inte tar med. Att ta fram en modell för frysning ingick heller inte i målet för detta arbete, men eftersom en stor del av igensättningarna kan härledas till frysningar är det väsentligt att en slutgiltig modell även tar hänsyn till detta.

8.4 Trimning av poängsättningsmodell

För att få bra mätvärden på igensättningsindexet måste den grova inställning av poängsättning och larmnivåer som kunnat göras i MATLAB kompletteras med en noggrannare testkörning med färdigimplementerad modell. Ett sätt att utvärdera modellen är att göra en tidig växling när modellen larmat och undersöka gjutröret med syning.

9 Referensförteckning

9.1 Skriftliga referenser

1. *Stålverket – här skapas kvaliteter för varje ändamål*, studiehäfte från SSAB Tunnplåt AB
2. (2000) *Annual report 2000 ECSC-prodject: "Improvement in cast product quality by the visualisation and control of the steel flow pattern in the tundish pouring nozzle (SEN/SES)"*, Luleå: Mefos
3. Andresson, Margareta (1991). *A study on tundish nozzle blockage during casting of aluminium deoxidized steel* Licentiate thesis. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan, Institutionen för processmetallurgi
4. Avenberg, B., Johansson R., (1994) *Optimering av nivåreglering i stränggjutningskokill* (1994:111 E) Luleå: Tekniska Högskolan i Luleå
5. Bask, M. (2005) *Dynamic Threshold Geneartors for Robust Fault Detection*, Doctorial thesis. Luleå: Luleå University of Technology
6. Basu, Somnath, Choudhary, Shiv Kumar och Girase, Narendra U. (2004). Nozzle Clogging Behaviour of Ti-bering Al-killed Ultra Low Carbon Steel. *ISIJ International*, vol. 44 nr 10, pp. 1653-1660
7. Bolger, D. (1994) *Stopper rod and submerged nozzle design and operation in continuous casting*, 1994 Steelmaking Conference Proceedings: WHI Steel, Inc.
8. Burty, M., et. al. (2005) *Some keys to reach long-sequence casting*, 5th European Continous Casting Conference, 20-22 juni 2005, Nice: La Revue de Métallurgie
9. Chiang, L.H. et. al. (2001) *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*, Storbrittanien: Springer
10. Ehrs, Kenneth (1994). *Strömningsbild vid stoppare/gjutrör i en stränggjutningsmaskin* (1994:173 E). Luleå: Tekniska Högskolan i Luleå
11. Henja, T., Fällström, K-E., Hermansson, R. (1996) *Grundläggande värmeöverföring*, Luleå: Tekniska Högskolan i Luleå
12. Hiraga, Y. Et. al. (1995) *Behaviour of Alumina-Deposition on Tundish Nozzls in Continous Casting of Ti-Added Al Killed Steel*, Taikabutsu Overseas, 15(1), pp.22-27
13. Kemeny, Frank L. (1998) *Tundish Nozzle Clogging – Mechurment and Prevention*, Alex McLean Symposium: Process Fundamentals, Liquid Metal Processing for Cleanliness, Novel and Conventional Casting, and Novel Process Technologies; Liquid Metal Processing for Cleanliness, Novel and Conventional Casting, and Novel Process Technologies, 12-14 July 1998, Iron and Steel Society/AIME pp 103-104
14. Lindgren, Eilert (1991) *Adaptiv kokillnivåreglering i kontinuerliga stränggjutningsprocesser* (1991:050 E). Luleå: Tekniska högskolan i Luleå

9.2 Elektroniska referenser

15. SSAB Tunnplåt AB:s hemsida. Tillgänglig på www.ssabtunnplat.se, hämtat 2006-01-19
16. SSAB Tunnplåt AB ritningsarkiv. Tillgänglig via SSAB Tunnplåt AB intranät.

17. (2005) *Stålboken*, Luleå: SSAB Tunnplåt AB

18. SSAB:s hemsida. Tillgänglig på www.ssab.se, hämtat 2006-01-19

9.3 Muntliga referenser

19. Grip, Carl-Erik, Adj. Professor Energiteknik LTU och senior metallurg SSAB Tunnplåt AB, Luleå, Telefonsamtal 2005-10-14

20. Hiraya, Isao, Senior Manager Refractory Engineer Flow Control Technical Center, Krosaki Harima Corporation, Kitakyushu City – Japan. Samtal 2005-12-13

21. Johansson, R. Reglertekniker SSAB Tunnplåt AB, samtal under examensarbetets gång.

22. Kågström, M. Svagströmselektriker SSAB Tunnplåt AB, samtal oktober-november 2005

23. Lindgren, K. Svagströmselektriker SSAB Tunnplåt AB, samtal oktober-november 2005

24. Sjöström, Ulf, Group manager Casting and Flow Simulation, Mefos, Luleå. Telefonsamtal 2005-10-14.