



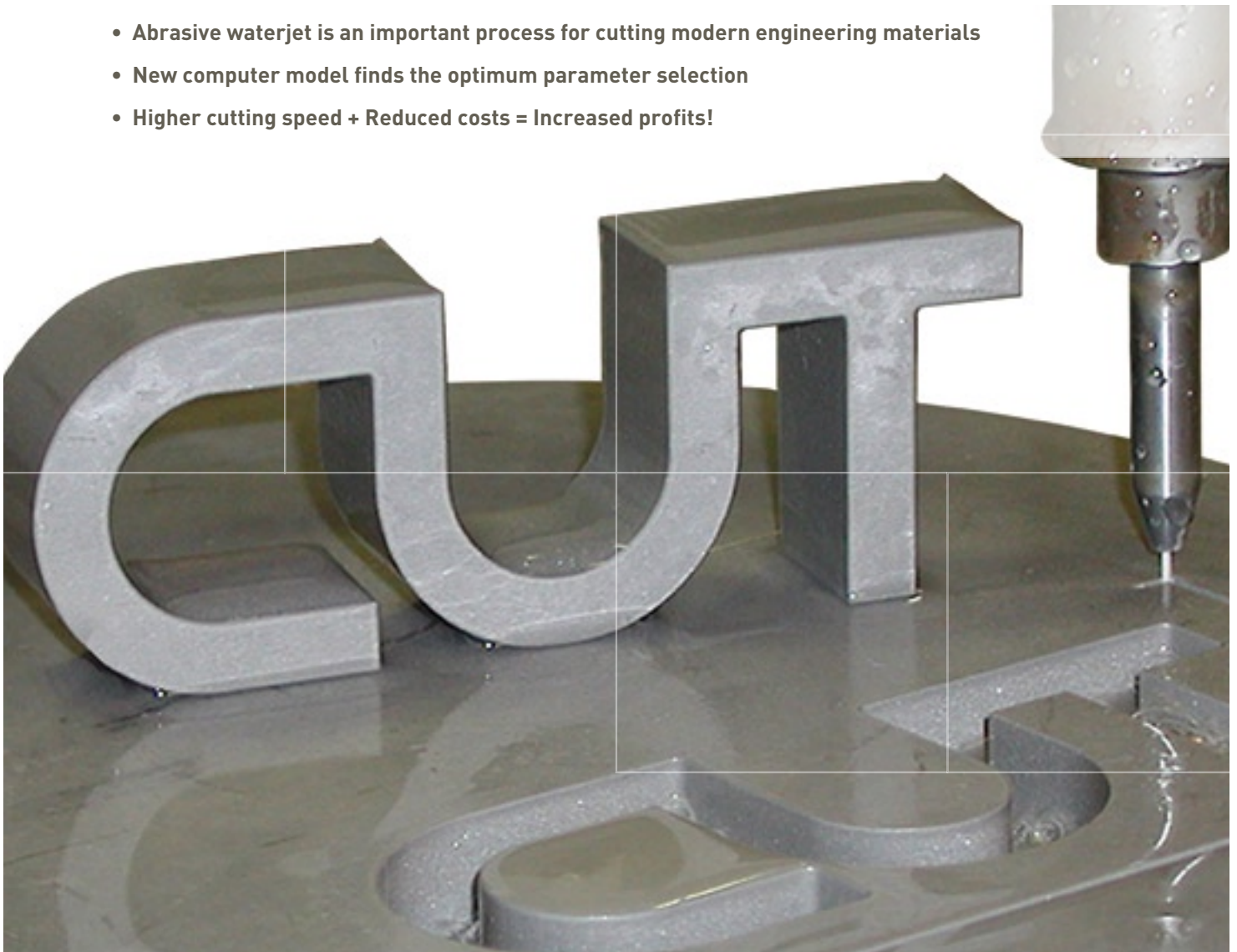
norden

Nordic Innovation Centre

January 2007

CUT – Competitive Use of Waterjet Technology

- Abrasive waterjet is an important process for cutting modern engineering materials
- New computer model finds the optimum parameter selection
- Higher cutting speed + Reduced costs = Increased profits!



Editors: Gustav Holmqvist and Ulf Honsberg, Chalmers University of Technology, Sweden

Participants

Sweden

Chalmers Tekniska Högskola AB

Gustav Holmqvist

Chalmers Tekniska Högskola AB

Ulf Honsberg

Chalmers Tekniska Högskola AB

Anders Kinnander

IGEMS Software AB

Bo Johansson

Kimblad Technology AB

Sven Kimblad

SSAB Oxelösund AB

Anders Blomqvist

Stans och Press AB

Johan Larsson

Swedish Waterjet Association

Christian Öjmertz

Tech Netork Ronneby

Mats Svensson

Outokumpu PSC Nordic AB

Lars-Åke Persson

Prodcut Skärteknik AB

Peter Lindstedt

Water Jet Sweden AB

Tony Ryd

X LIT AB

Gunnar Thunman

Norway

Lab-Miljö AS

Gunnar Bakken

Water Jet Norge AS

Håkan Ryd

Denmark

AB Vandskaering A/S

Finn Andersen

AB Vandskaering A/S

Jan Kristiansen

Finland

HT Laserteknikka Oy

Juha Kauppila

Title: CUT – Competitive Use of waterjet Technology		
Nordic Innovation Centre (NICE) project number: 03031		
Authors: Gustav Holmqvist, Ulf Honsberg		
Institution: Chalmers University of Technology, Materials and Manufacturing Technology		
Abstract: Abrasive waterjet (AWJ) is an important process for cutting modern engineering materials, such as stainless steel, hardened steel and aluminum. An efficient use of the current technology is considered a necessity for future success, foreseeing a growing competition from for instance Central and Eastern Europe. This network project thus focused on strengthening the competitiveness of the project members and of Nordic AWJ industry in general. The network of this project included the Swedish Waterjet Association and Tech Network Ronneby. These organizations played the major role in setting up the first Scandinavian Waterjet Conference, held in Ronneby in September 2006, where technical results of this project were displayed and presented. The most important technical result of the project is a computer model which has been developed and can be used for finding optimum parameter selection. The settings include for instance abrasive feed rate, water pressure and nozzle configuration. Examples have shown that the cost reduction potentially is in the range of 10-25%, which is higher than the initial expectations. The development has included discussions within the network concerning requirements on the model, as well as possible improvements working with preliminary computer models together with the companies.		
Topic/NICE Focus Area: Materials & Production		
ISSN:	Language: Swedish, English summary	Pages: 68
Keywords: abrasive waterjet cutting, waterjet, AWJ, modelling, cutting speed, traverse speed, optimisation, economy		
Distributed by: Nordic Innovation Centre Stensberggata 25 NO-0170 Oslo Norway info@nordicinnovation.net www.nordicinnovation.net	Contact person: Ulf Honsberg Chalmers University of Technology Department of Materials and Manufacturing Technology SE-412 96 Göteborg Sverige Tel. +46 31 772 2723 ulf.honsberg@chalmers.se www.chalmers.se	

Executive summary

Background

Abrasive waterjet (AWJ) is an important process for cutting modern engineering materials. It is widely used for cutting stainless steels, hardened steels, aluminium and titanium. Its main advantages are that it is not sensitive to the material alloying or hardening and associated machinability problems which are the case for conventional machining processes. Further it leaves the material without thermal or mechanical defects.

Although AWJ is considered to be the fastest growing machine tool process in the world, the machine shops using the technology in the Nordic countries are facing or foresee a growing competition from for instance Central and Eastern Europe. An efficient use of the current technology is considered a necessity for future success. Most of the machine shops are small and do typically not have own resources for knowledge development. For this reason, this network project has served an important purpose.

Network

The network within this project has collaborated with the Swedish Waterjet Association (SWA) and with Tech Network Ronneby (TNR). SWA is a national organisation in the field of waterjet in general which already includes a number of Nordic members. TNR organises local companies in Ronneby who are mostly working with designing and building waterjet machines. An important partial outcome of the CUT project in which these organisations played a major role is the first Scandinavian Waterjet Conference held in Ronneby in September 2006. Further, SWA has decided to strengthen its Nordic commitment. The organisation is for instance planning to change its name to Scandinavian Waterjet Association within the next year (suggested by the board of directors).

Technology

The AWJ process utilises high water pressures (up to 4100 bar), which is released through an orifice, creating a high speed waterjet. The jet is released in a mixing chamber in which abrasives are accelerated by the jet through an abrasive nozzle. The abrasive water jet is then capable of cutting for instance steel as thick as 250 mm.

AWJ is associated with a number of different process parameters, for instance; water pressure, abrasive feed rate, orifice diameter, abrasive nozzle diameter and number of jets. Secondly, the part to be cut has a material machinability, as well as a thickness and quality requirement of the surface. This together with the fact that the cutting parameters not only affect cutting speed but also the cost of the process (consumables and maintenance costs for instance) leaves a machine shop with a rather difficult task when choosing optimum settings. The network did therefore focus on developing an optimisation model for AWJ. The aim was to integrate this into a computer interface with the goal of a potential cost reduction of 5-10%.

Technical Results

The most important result in this context is that a complete model for optimisation has been developed. Project members have gotten early releases of the model which served the purpose of being a base for discussions in the project. The exchange of information in the project has taken place at project meetings as well as individual visits to all companies.

Now at the end of the project the participants have a final version of the computer model. The outcome of recommended parameter settings is naturally dependent on the input (e. g. cost situation of the work shop). However some typical results and recommendations can be given here.

The optimisation was divided in to three separate strategies: 1) Shortest cutting time, 2) Lowest total cost and 3) Lowest variable costs. This distinction was made to simplify the modelling for possible different situations concerning capacity utilisation.

The abrasive feed rate should always be selected in relation to the water flow rate. For shortest cutting time approximately 22% of the water-flow rate should be chosen as abrasive flow rate. For lowest total cost, this ratio decreases to 18-20% (depending on abrasive cost). For lowest variable costs, 14-16% is recommended.

The pressure must be chosen taking into consideration the condition of the pump. For a newer model and during the first 10.000 h, the following recommendations are given: For shortest cutting time, the maximum pressure should be used. For lowest total cost, a pressure at maximum level or just below is recommended. For lowest variable cost, a pressure in the range of 200-300 bar below the maximum pressure should be chosen.

The number of jets (cutting heads) will have a little influence on both cutting time and costs. Therefore the number of cutting heads should be chosen with care, taking in to account the plate material utilisation and set-up times when using multiple cutting heads. However, the model always suggests as cutting heads as possible. But the differences are quite small as long as the utilisation of the pump is the same

Goal Fulfilment

The goal fulfilment of the project is considered to be good. There is a computer model which can be used for parameter selection. Examples among the project members have shown that the cost reduction potentially is 10-25%. It has also been shown that not only the costs can be reduced with the recommended settings, but also the cutting speed can be higher (also when optimising towards cost). Thus the potential profit is higher while reducing costs.

Innehåll

1	INLEDNING	4
1.1	BAKGRUND	4
1.2	SYFTE	4
1.3	AVGRÄNSNINGAR	5
2	METOD	6
2.1	INFORMATIONSSAMLING	7
2.2	MODELLERING OCH OPTIMERING AV PROCESSEN	8
2.3	UTVÄRDERING	8
2.4	SLUTREDOVISNING	8
2.5	INFORMATIONSSPRIDNING	8
3	TEKNISK BAKGRUND OCH INFORMATIONSSAMLING	9
3.1	PROCESSBESKRIVNING	9
3.2	INDUSTRIELLA KRAV/ÖNSKEMÅL	10
3.2.1	Abrasivmedelstyp och abrasivmatning	10
3.2.2	Tryck	11
3.2.3	Material och materialtjocklek	11
3.2.4	Munstycks kombination	12
3.2.5	Parameterval och skärhastighetsberäkning	12
3.3	MODELLERING	13
3.3.1	Modellering av skärprocessen	13
3.3.2	Modellering av ekonomiska samband	14
3.3.3	Optimeringsmodellering	15
4	PROCESSMODELLERING	16
4.1	UTVÄRDERINGSMETODIK A V SNITTDJUP, H	17
4.2	UTVÄRDERING AV PROCESSMODELLEN UTIFRÅN FÖRSÖKSRESULTAT	19
4.2.1	Abrasivmatning	20
4.2.2	Materialtjocklek	21
4.2.3	Tryck	22
4.3	UTVÄRDERING AV PROCESSMODELLEN VIA MODELLKARAKTÄRISTIK	23
5	OPTIMERINGSMODELLERING	26
5.1	EKONOMISK OPTIMERING	26
5.1.1	Optimeringsstrategi 1: Maximera produktionshastigheten	27
5.1.2	Optimeringsstrategi 2a: Minimera de rörliga kostnaderna	27
5.1.3	Optimeringsstrategi 2b: Minimera den totala kostnaden	28
5.2	VIKTIGA PARAMETRAR MED AVSEENDE PÅ PRODUKTIVITET	28
5.3	ÖVERGRIPANDE ARBETSSÄTT	29
5.4	TEKNISKA SAMBAND OCH BEGRÄNSNINGAR	31
5.5	EKONOMISKA SAMBAND	31
5.5.1	Fasta kostnader	32
5.5.2	Rörliga kostnader - pumpunderhåll	32
5.5.3	Rörliga kostnader - övrigt	35
5.5.4	Total kostnad	37
5.6	DATORGRÄNSSNITT	38
5.6.1	Val av gränssnitt	38
5.6.2	Uppbyggnad	38
6	RESULTAT	44
6.1	EXEMPEL PÅ RESULTAT FRÅN DATORMODELLEN	44
6.1.1	Exempel 1	44
6.1.2	Exempel 2	46
6.2	TYPISKA OPTIMALA PARAMETERNIVÅER	47
6.2.1	Abrasivmatning	47

6.2.2	Tryck.....	48
6.2.3	Antal munstycken och munstycksstorlekar.....	51
6.3	TILLÄMPNING	52
7	DISKUSSION.....	53
8	SLUTSATSER.....	54
9	REFERENSER.....	56
10	BILAGOR.....	57
	BILAGA 1: FÖRSÖKSUPPSTÄLLNINGAR.....	58
	BILAGA 2: INDATA TILL BERÄKNINGAR GJORDA I OPTIMERINGSMODELLEN	62

Förord

Denna projektrapport har tagits fram som en del i nätverksprojektet CUT –Competitive Use of waterjet Technology. Först och främst vill vi rikta ett tack till Nordisk InnovationsCenter som har bidragit med finansiering till projektet. Eftersom projektet har bedrivits som ett nätverksprojekt vill vi lyfta fram två andra för projektet viktiga aktörer; branschföreningen Swedish Waterjet Association och nätverksbildningen Tech Network Ronneby. De har bidragit med resurser, finansiering och aktiviteter till projektet som har varit mycket värdefulla för det arbete som bedrivits. Vi vill naturligtvis också rikta ett varmt tack till de företag som varit med och stöttat idén och genomförandet av projektet med både tid, pengar, information och intressanta diskussioner som vi kunnat ta del utav under projekttidens gång.

De företag som medverkat i detta projekt är:

AB Vandskaering A/S	Finn Andersen/Jan Kristiansen
HT Laserteknikka Oy	Juha Kauppila
IGEMS Software AB	Bo Johansson
Kimblad Technology AB	Sven Kimblad
Lab-Miljö AS	Gunnar Bakken
SSAB Oxelösund AB	Anders Blomqvist
Stans och Press AB	Johan Larsson
Outokumpu PSC Nordic AB	Lars-Åke Persson
Prodcut Skärteknik AB	Peter Lindstedt
Water Jet Norge AS	Håkan Ryd
Water Jet Sweden AB	Tony Ryd
X LIT AB	Gunnar Thunman

Göteborg 2006-12-15

Författarna

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Abrasiv vattenskränning (AWJ – från eng. *abrasive waterjet*) är en viktig metod för bearbetning av moderna konstruktionsmaterial. AWJ-skärning utgör, genom sin kalla skärprocess utan nämnvärd termisk eller mekanisk materialpåverkan i snittytor, ett viktigt komplement till de termiska skärprocesserna. Tekniken är mångsidig då den möjliggör bearbetning av i princip alla kända material vilket gör den mycket användbar för bearbetning av moderna konstruktionsmaterial som till exempel olika typer av rostfritt, härdat och höglegerat stål, aluminium, titanlegeringar, konstruktionskeramer, kompositer etc. Företagen som tillverkar och använder skärmetoden är nästan samtliga små företag. På en hårdnande globaliserad öppen marknad, med växande konkurrens från Central- och Östeuropa kommer ett ökat kunnande om effektiv användning av AWJ-tekniken att vara en avgörande framgångsfaktor. De mindre företagen kan normalt inte besitta kompetens och resurser för metodisk kunskapsuppbyggnad och utvecklingsarbete. Idag är de mindre företagen i denna bransch i många fall beroende av sina systemleverantörer för sin kunskapsutveckling. Det har visat sig efter kontakter med företag i branschen att kunskap och djupare förståelse av hur man kan påverka sina kostnader vid abrasiv vattenskränning är efterfrågad.

1.2 Syfte

Det övergripande målet med projektet är att stärka nordisk industris konkurrenskraft inom teknikområdet abrasiv vattenskränning och via ett nätverk med samlad nordisk erfarenhet och kompetens lära sig utnyttja tekniken så effektivt som möjligt. Som incitament för samarbetet har en konkret uppgift genomförts där företagen snabbt har kunnat tillgodoräkna sig uppenbara fördelar av samverkan. Ett lättanvänt mjukvarustöd för att bestämma optimala bearbetningsbetingelser som baseras på en datormodell byggd på experimentella data (empirisk modell) har tagits fram. Genom att använda modellen ska företagen kunna minska sina produktionskostnader med i gynnsamma fall 5-10 %.

En stor del av projektets idé bygger på att knyta samman de 14 projektmedlemmarna i ett nordiskt nätverk. Den ursprungliga tanken var att skapa ett nytt nordiskt nätverk med CUT-projektet som bas. Projektet har här kommit att samarbeta med branschföreningen Swedish Waterjet Association (SWA).

En annan viktig ambition i projektet har varit att samverka i den redan befintliga nätverksmiljön inom vattenskränning. Tech Network Ronneby (TNR) är här en viktig aktör vars ambition är att förstärka befintliga och stimulera framväxten av nya företag som konkurrerar med hög kompetensnivå bland annat inom området vattenskränning. Samarbetet mellan CUT och TNR har även formaliserats med en avsiktsförklaring, där TNR har förbundit sig att bidra med att utföra en viss del av CUT-projektets aktiviteter.

1.3 Avgränsningar

I detta projekt har endast skärprocessen abrasiv vattenskärning (AWJ) studerats. Ren vattenskärning (utan abrasivmedelstillsats) har inte varit föremål för undersökning.

I projektrapporten beskrivs olika parametrar för processen AWJ. I detta arbete har aktuella parametrar och nivåer valts utifrån vad projektmedlemmarna själva använder idag. Detta baseras ofta i sin tur på vilka typer av maskiner (skärbord, pumptyper, styrning etc.) samt även vilken typ av kunder (vad som skall skäras) som de olika företagen har. Följande maskintyper och parameternivåer har beaktats i projektet.

Inställningsparametrar:

Vattentryck: 300-410 MPa

Vattenflöde per munstycke: 1,5 till 3,8 l/min

Kvot abrasivmedelsflöde/vattenflöde (R-kvot): 0,13-0,30

Följande approximativa samband för vattenflöde, $\dot{m}_w$, har utnyttjats:

$$\dot{m}_w = 1,475 \cdot d_w^2 \cdot \sqrt{P_w}$$

d_w = vattenmunstyckets diameter [mm]

P_w = vattentryck [MPa]

Material:

Olika typer av rostfritt stål, härdat stål samt aluminium

Materialtjocklek, $t=10-100$ mm

Modellering av skärhastighet:

Vid modelleringen har arbetssättet presenterat av Zeng och Kim (1993) använts som utgångsläge. I modellen utnyttjas ett bearbetningstal, N_m , för att bestämma hur svårbearbetat ett material är. En abrasivfaktor, f_a , beskriver i denna teori hur bra avverkningsegenskaper ett visst abrasivmedel har. I samtliga försök som gjorts har ett australiskt abrasivmedel (GMA Garnet) använts med abrasivfaktor 0,92.

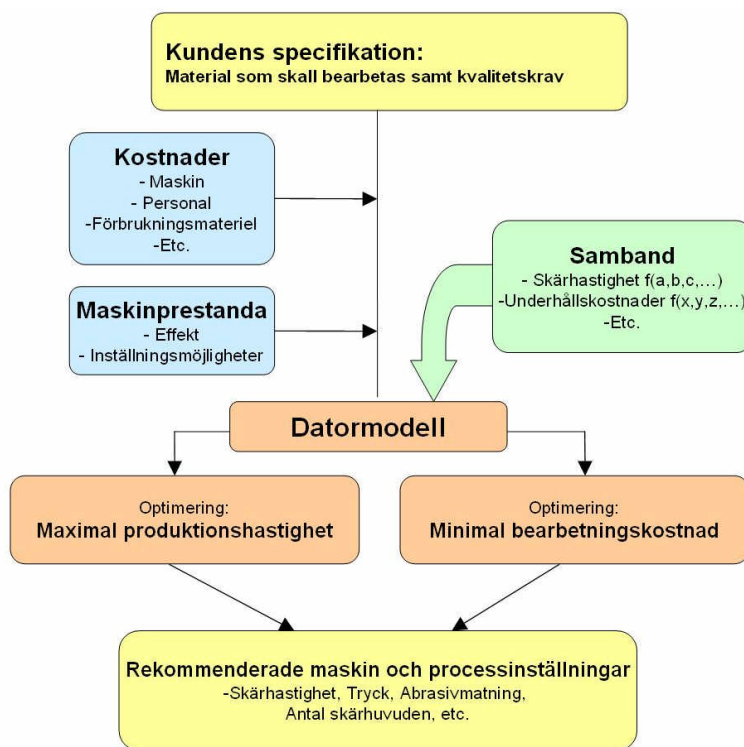
Ekonomisk modellering:

För att räkna ut kostnaden för pumpunderhåll har typen pump med tryckstegrare (intensifier pump) använts. De kostnader som tagits fram baseras på 50 hk pumpar tillverkade av KMT Waterjet Systems och Flow International Corporation, eftersom dessa varit representerade av maskinbyggare i projektgruppen. De beräkningar som gjorts baseras på pumpens första 10 000 driftstimmar. För att beräkna underhållskostnader för pumpar med en annan effekt än 50 hk görs ett antagande att kostnaderna är proportionella mot vattenflöde och i vissa fall pumpens maxeffekt.

Vid beräkning av kostnader för mer än ett skärhuvud finns inga extra kostnader upptagna som härrör sig från extra tidsåtgång för beredning och omställning av maskin, inte heller kostnader för sämre materialutnyttjande finns med. Högre tryck bör ge något högre munstyckskostnader. Detta har heller ej inkluderats i modelleringen då sambandet ansågs svårt att ta fram och skulle få en relativt liten inverkan.

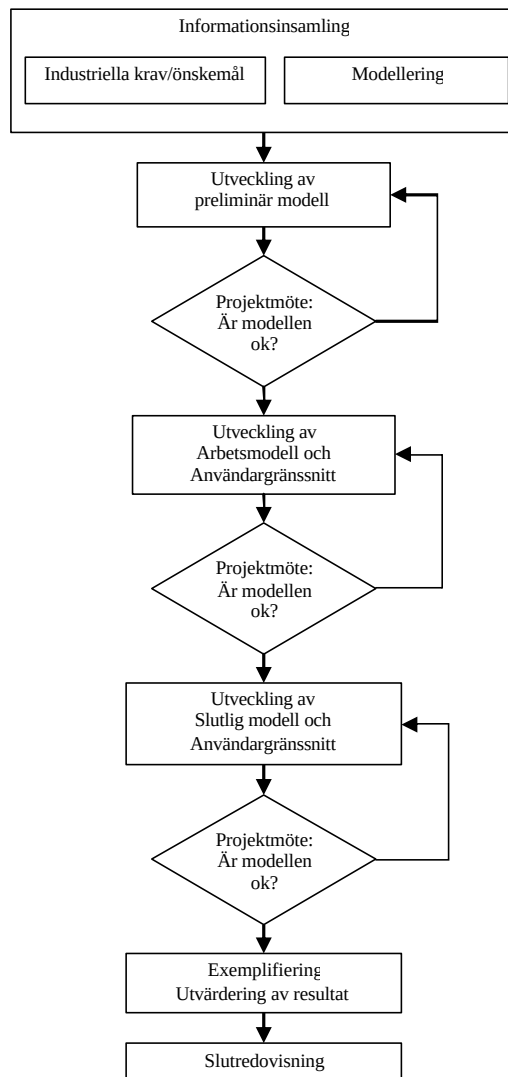
2 Metod

Inom den internationella waterjet-forskningen har ett antal studier gjorts som berör optimering av AWJ-processen. Dessa utgår ofta från ett resonemang kring optimering av abrasivmatning. De modeller som presenteras har både styrkor och svagheter, men en av de stora nackdelarna är att de är svåra att applicera direkt i verksamheten för en användare. I CUT-projektet har det däremot varit viktigt att komma fram till ett resultat som tar hänsyn till helheten och är användbart för, i första hand, de företag som medverkat i projektet. I planeringsfasen av projektet har fokus legat på att finna en lösning på problemställningen i projektet, se figur 2.1, samtidigt som det varit viktigt att skapa ett nära samarbete med de företag som medverkar i nätverket. Figuren visar en tidig tanke kring vilka indata en optimeringsmodell skulle kunna ha, samt vilka principiella optimeringsfall som skulle kunna vara intressanta.



Figur 2.1: Struktur för det grundläggande optimeringsproblemet

För att samla in information till de olika delarna i denna modell, har en tydlig gruppering i tidplanen gjorts för att skapa en så bred kunskapsbas som möjligt i projektet. De grupperade arbetsstegen visas i figur 2.2 och man kan även se hur projektets olika faser är kopplade till varandra. Utvecklingsarbetet av optimeringsmodellen har skett som en iterativ sekventiell process, med återkoppling vid projektmöten. Dessa möten har varit viktiga för informationspridning / informationsinhämtning i projektet och fungerat som avstämningspunkter i förhållande till projektplanen.



Figur 2.2: CUT-projektets olika faser

2.1 Informationsinsamling

Industriella krav och önskemål: Möten med intervjuer på plats hos de i projektet ingående företagen har utförts. Här har dagens arbetssätt för val av parametrar fastställts. Även praktiskt handhavande och produktionsbetingelser har noterats. Informationsinsamlingen har naturligtvis pågått under hela projektet, men den största delen, ansågs vara viktig att genomföra tidigt i projektet för att skapa förutsättningar för ett arbete som har sin tyngdpunkt inom områden där mest information efterfrågas.

Modellering: Denna punkt refererar till informationsinsamling kring hur det är möjligt att modellera denna typ av optimering. Information har inhämtats från internationell forskning främst inom området modellering av abrasiv vattenskarning. Denna informationsinsamling har pågått under hela projektet, men varit mest koncentrerad till den första fasen i projektet.

2.2 Modellering och optimering av processen

Kärnan i detta projekt har varit att skapa en så bra ekonomisk modell av abrasiv vattenskrining att det är möjligt att förutse hur en användare, för ett specifikt material och en viss maskinkonfiguration, skall ställa in sin maskin för att utföra det tänkta jobbet till så låg kostnad som möjligt. Som bas för detta har det visat sig bli centralt att ha en modell som beskriver hur skärhastigheten beror utav olika inställda parametrar såsom tryck, flöde, abrasivmatning etc. Arbetet med den totala optimeringsmodellen har gjorts i steg, vilket gjort det möjligt att kontrollera olika delresultat mot de företag som medverkar i projektet. Detta har gjorts främst vid de projektmöten som hållits. Här har det varit möjligt för projektmedlemmarna att testa modellen själva och påverka inriktning och fokus på det arbete som bedrivits, samt diskutera rimligheten i de delresultat som tagits fram. Dessa diskussioner har varit viktiga och har till stor del påverkat innehållet i de studier som fortsatt gjorts i projektet.

2.3 Utvärdering

Företagsbesök: För att undersöka om optimeringsmodellen fungerar som det är tänkt har ett antal företagsbesök genomförts i projektets slutfas för att undersöka detta på plats hos projektmedlemmarna. Denna utvärdering har dels fungerat som en validering av modellen gentemot projektmedlemmarna, men även som förmedling och kommunicering av projektresultatet till de enskilda projektmedlemmarna.

Exemplifiering: Ett antal räkneexempel har tagits fram som utgår ifrån hur tre ”typiska” projektmedlemmar utnyttjade sina maskiner tidigt i projektet. Dessa exempel har på slutredovisningen använts som exempel på hur man kan göra för att spara pengar på sina parameterinställningar. De har även utnyttjats ur ett pedagogiskt syfte, då det kan vara svårt att övertyga projektmedlemmarna om vilka vinster man kan förvänta sig genom att göra föreslagna justeringar.

2.4 Slutredovisning

Syftet med slutredovisningen var naturligtvis att sprida projektresultatet inom projektgruppen och förmedla resultatet utåt. Inom nätverksdelen i detta projekt ingick att genomföra en nordisk vattenskriningskonferens. Det visade sig att denna tidsmässigt var ett mycket bra forum att presentera projektets slutresultat. Detta arrangemang genomfördes i Ronneby den 8 september 2006 och samlade ca tio talare inom området vattenskrining och totalt ungefär 100 deltagare från hela Norden.

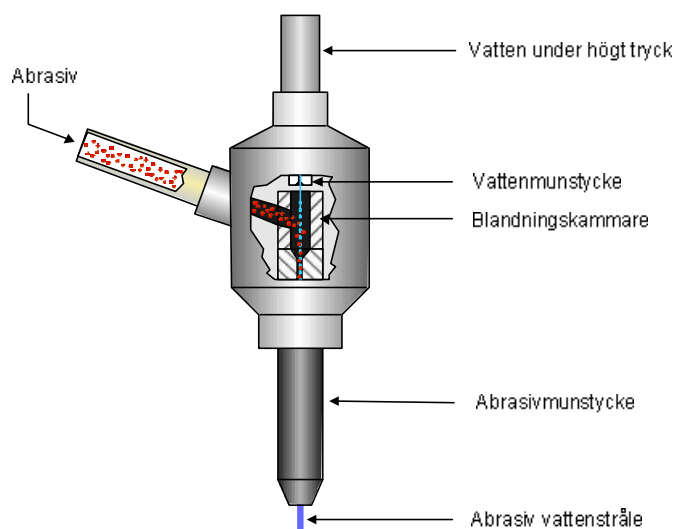
2.5 Informationsspridning

De aktiviteter som har bedrivits löpande under projektet för att sprida (och samla in) information i och kring detta projekt har gjorts via företagsbesök, projektmöten, publicering på konferenser, informationsutskick, posterutställning samt seminarier inom området vattenskrining och plåtbearbetning.

3 Teknisk bakgrund och informationsinsamling

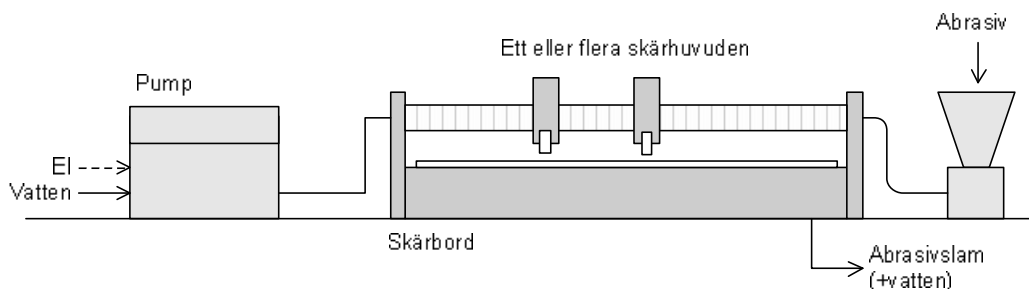
3.1 Processbeskrivning

Abrasiv vattenskärning bygger på att accelerera abrasivpartiklar med hjälp av en vattenstråle med hög hastighet i ett skärhuvud, se figur 3.1. I skärhuvudets s.k. blandningskammare mynnar vattenmunstycket, och den rena vattenstrålen som bildas skapar ett partiellt vakuum i blandningskammaren och suger in abrasivpartiklar i strålen. Dessa fokuseras sedan tillsammans med vattnet i abrasivmunstycket. Vattenmunstycken med olika diameter används, från ca 0.18 mm till ca 0.36 mm. Abrasivmunstyckets diameter väljs naturligtvis större, vanligen används ett diameterförhållande på 3 eller strax däröver. Båda munstyckena och skärhuvudets delar i stort kommer att slitas och byts ut efter lämpligt tidsintervall. Vattentrycket tillsammans med vattenmunstyckets diameter avgör vattenflödet. Abrasivmatningen ställs vanligen in på något sätt i förhållande till vattenflödet, och varierar därmed i ett stort intervall, från ca 200 g/min upp emot 800 g/min.



Figur 3.1: Skärhuvud för abrasiv vattenskärning.

Vattenstrålens höga hastighet erhålls med hjälp av ett högt tryck, upp emot 4100 bar (eller 410 MPa), vilket skapas av en speciell högtryckspump. I de Nordiska länderna används vanligen en s.k. tryckstegrare. Vanliga märkeffekter på pumparnas elmotorer är 50 och 100 hk. Det trycksatta vattnet leds i rörledningar under visst, men vanligen måttligt, tryckfall till skärbordet, se figur 3.2. Detta skärbord, med CNC-styrning, är normalt av en storlek anpassad till standard plåtdimensioner. Vanliga storlekar är t ex 3x2 och 6x4 m. Även större maskiner förekommer. Abrasiv (vanligen Garnet) matas till skärbordet från en bulkmatare, och matningen styrs individuellt för varje skärhuvud. Maskinen kan vara bestyckad med flera skärhuvud, vilket kan öka produktiviteten. Plåten placeras på skärbordets galler vilka vilar på en vattenfylld tank. Vattnet i tanken dämpar strålen och här samlas även rester från processen upp. Detta slam pumpas sedan oftast till en yttre container. Använt abrasiv återvinns idag inte i någon större utsträckning, utan betraktas som avfall.



Figur 3.2: Schematisk uppbyggnad av system för abrasiv vattenskärning

3.2 Industriella krav/önskemål

Under 2004 genomfördes en informationsinsamling kring de industriella förutsättningarna att genomföra ett arbete om parameteroptimering av abrasiv vattenskärning. Möten med intervjuer på plats hos de i projektet ingående företagen utfördes och här fastställdes hur varje företag valde sina processparametrar. Material insamlades från varje företag (testbitar) som sparades för jämförelse med senare resultat av den färdigutvecklade modellen. Även intervjuer med maskin- och pumpleverantörer i Norden har genomförts för att tillgodogöra projektet viktig kunskap och erfarenheter kring livslängd för i systemen ingående delar. Alla dessa delar har legat som grund för den ekonomiska optimeringen.

I följande avsnitt presenteras hur de lika företagen som medverkat i projektet valde att tillverka en testdetalj i 20 mm rostfritt stål. Följande parametrar kommer att redovisas:

- Abrasivmedelstyp och abrasivmatning
- Tryck
- Material och materialtjocklek
- Munstyckskombination
- Parameterval och skärhastighetsberäkning

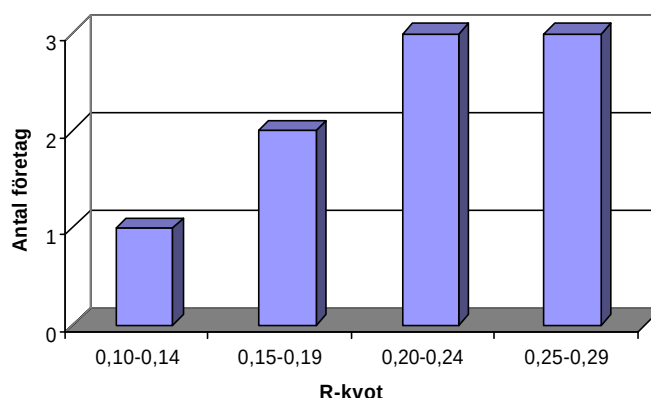
Ett av de mest iögonfallande resultaten i denna undersökning var att spridningen mellan de olika företagen för de nedan redovisade parametrarna är väldigt stor. Detta är intressant ur framför allt två aspekter:

1. Många företag har funnit ett " eget" sätt att använda processen, vilket förmodligen bottenar i tankar / kunskap kring hur den egna maskinen (processen) fungerar.
2. Det finns med stor sannolikhet en hel del att spara i en del av fallen på en optimering av inställda parametrar

3.2.1 Abrasivmedelstyp och abrasivmatning

Enligt företagen märks inga stora skillnader i skärförmåga beroende på var i världen abrasivmedlet ursprungligen kommer ifrån. Alla företag i projektgruppen använder dock till allra största delen natursand, vilket de anser ger den lägsta totalkostnaden. Vissa leverantörer tar tillbaka abrasivmedelsavfall, vilket medför något högre pris, men totalt sett kan detta ändå medföra lägre total kostnad. Den normala kornstorleken är mesh 80 eller mesh 60-80. Det finns undantag, främst i samband med skärningar i speciella material eller när speciella kvalitetskrav ställs.

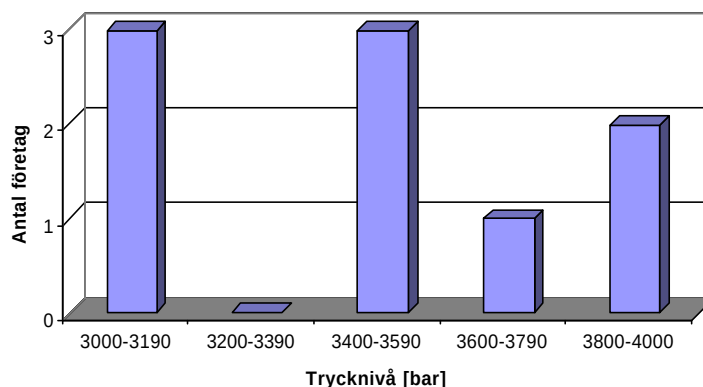
Abrasivmatningen tas oftast från rekommendationer av maskintillverkaren eller beredningsprogram. Den hålls oftast konstant för samma munstyckskombination, men ändras om munstyckskombinationen ändras. I figur 3.3 visas hur R-kvoten, som definieras som viktsandelen abrasivmedel i strålen, varierar mellan de olika företagen. Det är anmärkningsvärt att kvoten varierar inom ett så stort intervall (0,1-0,3).



Figur 3.3: R-kvot vid tillverkning av testgeometri

3.2.2 Tryck

Val av trycknivå tycks i de flesta fall ursprungligen baseras på rekommendation från leverantören av maskinsystemet. Vissa justeringar och tester har gjorts på flera företag, bl a utifrån upplevd kostnad för underhåll eller driftsäkerhet. I dessa fall har trycket snarast justerats nedåt. I figur 3.4 kan ses att trycket varierar mellan 3000 och 4000 bar. Samtliga företag håller trycket konstant. I denna undersökning hade 25 pumpar ett maxtryck på 3800 bar och fyra pumpar 4100 bar.



Figur 3.4: Trycknivå vid tillverkning av testgeometri

3.2.3 Material och materialtjocklek

Den absolut största materialgruppen volymmässigt inom företagsgruppen är rostfritt stål. Inga exakta beräkningar har genomförts, men andelarna av olika materialtyper har uppskattats till följande:

- Rostfritt stål: 70 %
- Aluminium: 10 %
- Härdat stål, typ Hardox: 5 %
- Övrigt: 15 %

De tjocklekar som skärs varierar mellan företagen. Spannet där 80 % av produktionen återfinns ligger mellan 5-50 mm.

3.2.4 Munstycks kombination

Det är svårt att säga något generellt om vilka munstycks kombinationer som används flitigast eftersom det beror mycket på vad som skall skäras, antal skärhuvuden och tillgänglig pumpeffekt. Vanligaste orsaken till byte av munstycks kombination är antalet skärhuvud som skall användas.

Det utslitningskriterium som används för abrasivmunstycken brukar oftast vara ett visst mått på diametern som inte skall överskridas. Detta varierar mellan olika företag och kan bero på vad som skall skäras, dvs om det är måttoleransen eller processens reducerade skärförmåga som utgör begränsningen.

De vanligast förekommande munstycks kombinationerna inom gruppen är:
(Diameter vattenmunstycke[mm]/diameter abrasivmunstycke [mm])

- 0,229/0,8
- 0,254/0,76
- 0,330/1,0
- 0,356/1,1
- 0,356/1,2

3.2.5 Parameterval och skärhastighetsberäkning

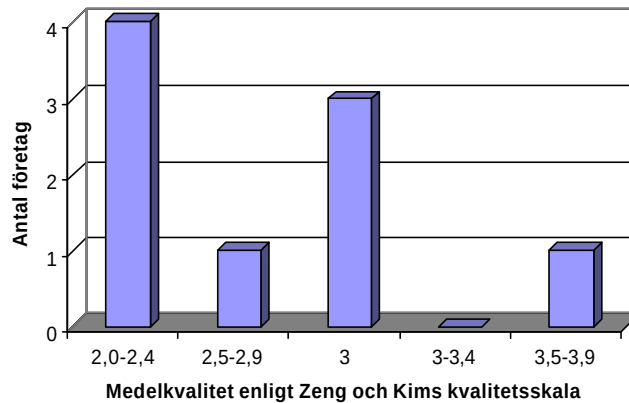
Generellt sett medger skärprocessen att ett flertal olika processparametrar kan väljas fritt utifrån egna önskemål. Det har dock visat sig under intervjuerna att följande mönster kan igenkännas:

- Trycknivån ändras inte.
- Munstycksdiametrar ändras endast beroende av antal munstycken för anpassning till pumpkapacitet.
- Abrasivmatning ändras endast utifrån vald munstycksdiameter. För en viss munstycksuppsättning används generellt ett fast värde på abrasivmatning.

Kännetecknande för valet av skärhastighet är att:

- Resultat från beredningsprogramvara används i hög utsträckning direkt.
- En del företag ha egna skärhastighetsdatabaser som tagits fram för att passa produktion och egna kvalitetsnivåer.
- Viss finjustering av skärhastighet av operatör förekommer i många fall.

Det är värt att notera att utifrån de val som görs fås en viss kvalitetsnivå på den färdiga produkten. Denna kvalitet sätts ofta i samtal med kunden, men utgångsläget kan vara en diskussion kring en ”medelkvalitet”. Det har visat sig att denna medelkvalitet skiljer sig väsentligt åt. En beräkning har genomförts, se figur 3.5, som visar att de flesta inom projektgruppen har en medelkvalitet som ligger under $q=3$ i kvalitetsskalan enligt Zeng och Kim (1993), se även tabell 3.1.



Figur 3.5: Uttalad medelkvalitet för skuren testgeometri beräknad utifrån kvalitetsskalan enligt Zeng och Kim (1993)

3.3 Modellering

För att få en komplett bild av hur olika samband påverkar den totala optimeringen har i första steget en omfattande litteraturstudie genomförts för att samla in information och data kring modellering av själva skärprocessen, men också kringliggande ekonomiska samband och hur det är möjligt att optimera olika typer av skärprocesser. I detta avsnitt lyfts de mest intressanta källorna fram som påträffats i denna litteraturstudie.

3.3.1 Modellering av skärprocessen

Ett centralt samband i de typer av beräkningar som skall genomföras är sambandet mellan de olika parametrar som definierar prestanda hos skärprocessen. Det har varit av stor vikt för projektet att finna ett så bra samband som möjligt. Den modell som främst studerats är framtagen av Zeng och Kim (1993). I denna beskrivs en empirisk modell av skärprocessen. En central del i denna modell är att utnyttja ett så kallat bearbetningstal (eng. machinability number). Detta tal beskriver materialets förmåga att motstå erosionsprocessen. Ju högre bearbetningstal desto lättare är materialet att skära. Sambandet beskriver hur olika parametrar (vattentryck, abrasivmedels-, och vattenflöde, kvalitet, materialtjocklek och munstycksdiameter) påverkar skärhastigheten. En förbättrad version av detta samband presenterades av Zeng m.fl. (1999). Redan i publikationen från 1993 definieras en kvalitetsskala för vattenskurna snitt med en kvalitetsfaktor q , se tabell 3.1.

Tabell 3.1: Kvalitetsskala enligt Zeng och Kim (1993)

Kvalitetsfaktor	Beskrivning
$q = 1$	Kriterium för separerande snitt. Vanligtvis skall $q > 1,5$ användas.
$q = 2$	Grov yta med striering på den nedre halvan av snittet.
$q = 3$	Övergång mellan grov och fin yta. Viss striering på snittets nedre del kan förekomma.
$q = 4$	Fin yta helt utan striering i de flesta material.
$q = 5$	Mycket fin yta.

Inom området prediktering av skärhastighet finns ett antal publicerade modeller, nedan följer ytterligare två som är intressanta att nämna:

Hashish (1984): Har tagit fram en något komplexare modell som bygger på att det går att beräkna skärhastigheten utifrån de erosionsprocesser som är aktiva vid skärning. Grunden till detta är att det förekommer två avverkningsmekanismer vid abrasiv vattenskarvning "cutting wear" och "deformation wear". Modellen beskriver sedan hur dessa två mekanismer utifrån materialegenskaper och hastighet på partiklarna verkar för att avverka material.

Hoogstrate (2002): Föreslår ett mer modulerat synsätt som egentligen bygger på att ett av ovan nämnda angreppssätt; erosionsmodell eller empirisk modell utnyttjas för att bestämma skärhastigheten. Den modell (modul) som används beror på tillämpbarheten i det specifika fallet. En intressant del av studien visar att det är möjligt att bestämma ett materials bearbetningstal via dess specifika smältenergi.

3.3.2 Modellering av ekonomiska samband

I princip finns det flera olika modeller som beskriver kostnadsbilden för abrasiv vattenskarvning, en del är relativt heltäckande och andra tar hänsyn till de olika kostnaderna på ett mer övergripande sätt. Följande tre publikationer visar intressanta resultat inom detta område:

Zeng och Kim (1993): I detta forskningspaper redovisas en ekonomisk modell som är tänkt att prediktera skärkostnaden per skuren meter. Kostnadsfunktionen är en summationsformel som innehåller termerna maskin-, personal-, material-, energi- och underhållskostnad. Den viktiga delen i denna studie är delen som behandlar hur skärhastigheten kan predikteras för ett givet material och tjocklek. Utifrån detta samband kan då kostnaden per skuren meter räknas fram. Det är värt att notera att kostnadsanalysen görs på en övergripande nivå, vilket innebär att denna endast ger en översikt över vilka termer som bör finnas med för att beskriva skärprocessens kostnader.

Singh m fl (1993): Författarna gör en uppdelning av den totala kostnaden i kostnadsslagen energi, vatten till skärprocess, kylvatten, abrasivmedel, abrasivmunstycke, vattenmunstycke, underhåll, personal och investering. Den sammantagna modellen ger en bra indikation på vad som bör finnas med i en modell som skall beskriva processen på ett relativt heltäckande sätt. Den senare delen i denna studie är en genomgång över hur dessa kostnader kan optimeras. Här görs reflektionen att problemet vid en första anblick kan synas hopplöst komplext, men sedan gör författarna en summering och kommer fram till att det går att lösa problemet med suboptimering. Slutsatsen i detta resonemang är att optimering för hela processen kan ske utifrån att endast optimera vattenmunstyckets diameter.

Ranney (1995): Den typ av uppställning som presenteras baseras på att en jämförelse mellan effektiviteten hos två (eller flera) typer av abrasivmedel. Analysen bygger på att kostnader per skärmeter beräknas. Författaren gör en relativt schematisk uppställning av kostnaderna och vill med detta visa vikten av att ha ett effektivt abrasivmedel. Inga exempel visas utan endast ett tillvägagångssätt presenteras på hur

en användare kan få fram ett beslutsunderlag för vilken typ av abrasivmedel som skall användas.

3.3.3 Optimeringsmodellering

Det finns ett relativt stort antal publikationer inom detta område som kan vara intressanta att diskutera. De skall observeras att lite olika utgångspunkt finns beroende på vad som anses vara mest intressant ifrån fall till fall. Ett vanligt tema i dessa publikationer är att utgå ifrån optimering av abrasivmedelskostnad, som motsvarar en stor del av de rörliga kostnaderna för processen. Exempel på ett annat angreppssätt är att ge en optimal parameterinställning utifrån den snittkvalitet som efterfrågas på den färdiga produkten. Det finns även de som beskriver sätt att göra en optimering av samtliga kostnader för skärprocessen. Nedan listas några intressanta publikationer inom detta område.

Henning m fl (2004): En relativt ny intressant studie som optimerar skärprocessen utifrån abrasivmedelskostnaden. Ett samband ställs upp som beskriver ekvationen för hur skärdjupet beror på vald abrasivmatning, och här kan varje användare själv sätta in minst två egna punkter för att göra en kurvanpassning. Författarna vill med detta att modellen skall kunna anpassas till varje enskild användares processeffektivitet, som alltså kan variera med ett flertal faktorer såsom tryck, vattenflöde och munstyckskombination etc. Den totala kostnadsfunktionen som utnyttjas i denna modell är av schematisk natur, och här beskrivs endast översiktligt resultatet av modelleringen då alla övriga kostnader inkluderas.

Brandt m fl (2000): En intressant och innehållsrik publikation med en ”state of the art”-del som fångar upp en bra bild av de modeller som fram till år 2000 var publicerade inom området beräkning av skärhastighet. Dessutom innehåller publikationen en intressant del om optimering av skärprocessen. Här presenteras två beräkningsmodeller som bygger på optimering utifrån snittkvalitet och bearbetningsekonomi. Resultatdelen diskuterar hur det är möjligt att använda resultatet. En möjlighet som presenteras, eftersom komplexitetsnivån tillåter det, är att använda formlerna i ett kalkylark.

Zeng m fl (1994): Inriktar sig mot att optimera förbrukningen av abrasivmedel. Totalt sett är detta en genomgång av hur olika typer av abrasivmedel samt inställningar påverkar effektiviteten av skärprocessen. Ett flertal olika munstyckskombinationer undersöks. De flesta försöken görs på en trycknivå vid ca 350 MPa. Ingen total optimering av skärprocessens kostnader görs.

Capello m fl (1996): En optimeringsmodell presenteras som utgår från att optimera kostnaderna mot en viss snittkvalitet. Måttet som används på snittkvalitet är i det här fallet R_a -värdet på snittytan. De parametrar som slutligen skall bestämmas i optimeringen är kornstorleken på abrasivmedlet (mesh size) och abrasivmedelsflödet.

4 Processmodellering

Det mest centrala i arbetet att ta fram en optimeringsmodell för AWJ har varit att finna ett samband som beskriver processen så bra att resultatet av optimeringen (som sker i nästa steg) kan betraktas som tillförlitligt. Eftersom det inom litteraturen inte har gått att finna ett tillräckligt bra samband har beslutet i det här projektet fattats att det varit viktigt att försöka ta fram en modell som beskriver processen bättre. För att kunna genomföra detta arbete inom ramen för projektet har utgångspunkten varit att förbättra en befintlig modell, så att den ger tillräckligt tillförlitliga resultat. Efter genomförd litteraturstudie och med de erfarenheter som fanns från tidigare inom projektgruppen, har modellerna presenterade av Zeng och Kim (1993) och Zeng m fl (1999) valts som utgångspunkt. Modellen predikterar en skärhastighet för abrasiv vattenskrining enligt följande samband, se tabell 4.1 för förklaringar:

$$v_f = \left(\frac{N_m \cdot f_a \cdot P_w^{1,25} \cdot \dot{m}_w^{0,687} \cdot \dot{m}_a^{0,343}}{C \cdot q \cdot t \cdot D^{0,618}} \right)^{1,15}$$

Tabell 4.1: Ingående parametrar i skärhastighetsmodell enligt Zeng & Kim (1993)

Parameter	Enhet	Förklaring	Kommentar
N_m	[-]	Bearbetningstal	Materialparameter; anger hur svårbehandlat ett material är (Stål ca 80, Aluminium ca 200)
f_a	[-]	Abrasivfaktor	Abrasivmedelsparameter; anger skärförmågan hos ett abrasivmedel (Barton garnet 1, GMA Garnet 0,92)
P_w	[MPa]	Vattentryck	
$\dot{m}_w$	[l/min]	Vattenflöde	
$\dot{m}_a$	[g/s]	Abrasivmedelsflöde	
C	[-]	Konstant	8800
q	[-]	Kvalitetsindex	1,2-5, där 5 är hög snittkvalitet
t	[mm]	Materialtjocklek	
D	[mm]	Diameter abrasivmunstycke	

Eftersom modellen är empiriskt framtagen, så har den svagheter utanför de parameterintervall som den från början utvecklats för. Inom detta projekt har det därför varit intressant att vidareutveckla och förbättra modellen inom följande områden:

- **Abrasivmatning:** Modellen har ett samband som gör att skärhastigheten alltid blir högre med en ökad abrasivmatning. Så är det inte i praktiken, utan möjligt snittdjup följer istället en mättnadsfunktion där en optimal abrasivmatning ger det största djupet. Överskrids denna optimala abrasivmatning så kommer processen att fungera sämre (ge ett mindre snittdjup) och dessutom bli instabil.

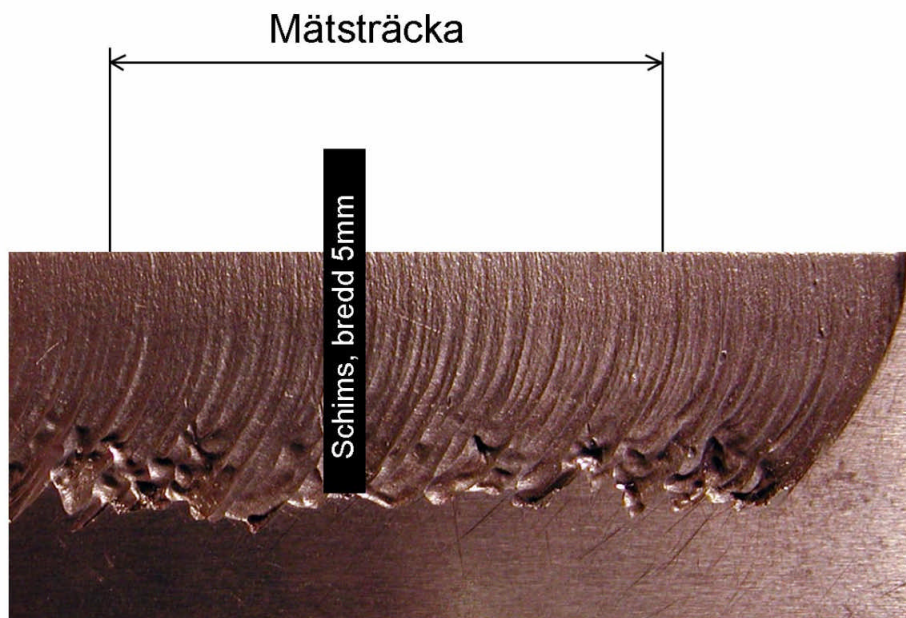
- Materialtjocklek: Sambandet är uppbyggt på observationer där materialtjockleken varit upp till 30 mm. Detta innebär att sambandet fungerar dåligt över denna tjocklek.
- Tryck: Modellen ger endast bra resultat för tryck på upp till ca 350 MPa

4.1 Utvärderingsmetodik av snittdjup, h

För att kunna utvärdera de snitt som har skurits har det varit nödvändigt att ta fram en mätmetod som kan skapa förutsättningar för stabila mätresultat. Det finns ett flertal olika sätt att utvärdera snittdjupet för abrasiv vattenskärning. En vanlig metod är att använda sig av en kilformad försöksgeometri. Tanken är sedan att det är möjligt att skära snitt med kontinuerligt ökande snittdjup. Vid den punkt som processen inte längre förmår skära igenom materialet återfinns det maximala snittdjupet. Eftersom abrasiv vattenskärning är en cyklisk process med varierande snittdjup, se figur 4.1, så har denna metodik svagheten att det krävs många snitt innan det med säkerhet kan sägas att ett representativt resultat av snittdjupet för en given parameterinställning hittats. I arbetet som utförts inom detta projekt har av den anledningen en annan metodik utnyttjats. Den bygger på en upprepade mätning av samma snitt. Grunden till detta är att man kan utföra flera mätningar längs en utvärderingssträcka och på så vis kan processens cykliska natur fångas upp och utvärderas. En liknande metod har presenterats i litteraturen av Brandt m fl (2000), där snittdjupet mäts med ett nålformat "schims" på fem punkter längs en mätsträcka.

I CUT-projektet har följande metod använts:

Tre till fem snitt har skurits med varje parameterinställning. tio mätpunkter var femte millimeter har markerats längs varje snitt i direkt följd efter varandra. Mätningen utfördes med schims som stacks ner i snittet vid varje mätpunkt, se figur 3.4.



Figur 4.1: Uppfräst snitt som visar mätmetod för snittdjupet, h

Vid utvärdering av mätningarna har ett medelvärde beräknats för de tre grundaste snittdjupen. Ett totalt medelvärde har sedan beräknats för alla snitt som gjorts med samma parameterinställning (3-5 stycken). Anledningen till att skapa medelvärden

enligt denna modell beror på att det varit viktigt att skapa en stabil modell av snittdjupet framförallt för tjocklekar över 30 mm där det annars är svårt att få en bra repeterbarhet på mätningen av spårens djup.

Fördelar

- Snabb per enstaka mätning.
- Om det skulle uppstå ett fel vid någon körning eller mätning, så att ett missvisande skärdjup uppstår kommer detta fel med stor sannolikhet att upptäckas med hjälp av replikaten.
- Resultaten blir relativt stabila. Om en mätning trots allt skulle bli fel påverkar detta resultatet i relativt liten utsträckning.

Nackdelar

- Många upprepade mätningar krävs.
- Risken finns att schimset sticks ner med ett litet vinkelfel, som i sin tur ger ett mätfel.
- Eftersom mätningen är en helt manuell process har varje mätning en tolerans på $\pm 0,5$ mm.
- Något osäker mätning framförallt då:
 - Snitten är djupare än 50 mm.
 - Snittbredden är mindre (fås med mindre munstyckskombinationer).

4.2 Utvärdering av processmodellen utifrån försöksresultat

Arbetet som lagts ner på att förbättra modellen har byggt på att utvidga den empiriska modellen med fler försök, så att giltighetsintervallet blir större och i stort även att överensstämmelsen mellan beräkning och skärning överensstämmer bättre överlag. Metodiken som använts för att ta fram en bättre modell för prediktering av skärhastighet har varit att göra en så kallad residualanalys. Detta angreppssätt bygger på att en modell (i utgångsläget Zeng och Kim's) jämförs med verkliga försök. När försöken är genomförda beräknas differensen mellan modellens prediktering och uppmätta värden. Resultatet plottas i ett diagram och eventuella systematiska fel som modellen innehåller kan på så vis spåras. För att gå vidare har sedan bättre ansatser tagits fram för att reducera dessa systematiska fel, och sedan har residualerna återigen analyserats. De försök som gjorts för att ta fram modellen kan ses i bilaga 1. För att underlätta implementeringen av denna nya modell har grundteorierna kring N_m och f_a bibehållits, vilket innebär att de kan användas enligt tidigare. Analysen som ligger till grund för denna modell baseras på experimentella data där inte bara den analyserade parametern utan även övriga parametrar varierats. Resultatet av modelleringen kan beskrivas enligt sambandet nedan. De olika ingående parametrarna förklaras i tabell 4.2.

$$v_f = \frac{N_m^{1,15} \cdot f_a^{1,15} \cdot P_w^{1,25} \cdot \dot{m}_w^{0,842} \cdot R^{10,406R^2 - 4,9R + 0,5}}{C \cdot q^{1,15} \cdot t^{0,8817R^{0,0715}}}$$

Tabell 4.2: Förklaring av ingående parametrar i ny skärhastighetsmodell

Parameter	Enhet	Förklaring	Kommentar
N_m	[-]	Bearbetningstal	Materialparameter; anger hur svårbearbetat ett material är (Stål ca 80, Aluminium ca 210)
f_a	[-]	Abrasivfaktor	Abrasivmedelsparameter; anger skärförmågan hos ett abrasivmedel (Barton garnet 1, GMA Garnet 0,92)
P_w	[MPa]	Vattentryck	
$\dot{m}_w$	[l/min]	Vattenflöde	
$\dot{m}_a$	[g/s]	Abrasivmedelsflöde	
R	[-]	Kvoten $\dot{m}_a / \dot{m}_w$	Beräknas så den blir dimensionslös (Samma enhet på båda flöden)
C	[-]	Konstant	6880
q	[-]	Kvalitetsindex	1,2-5, där 5 är hög snittkvalitet
t	[mm]	Materialtjocklek	

4.2.1 Abrasivmatning

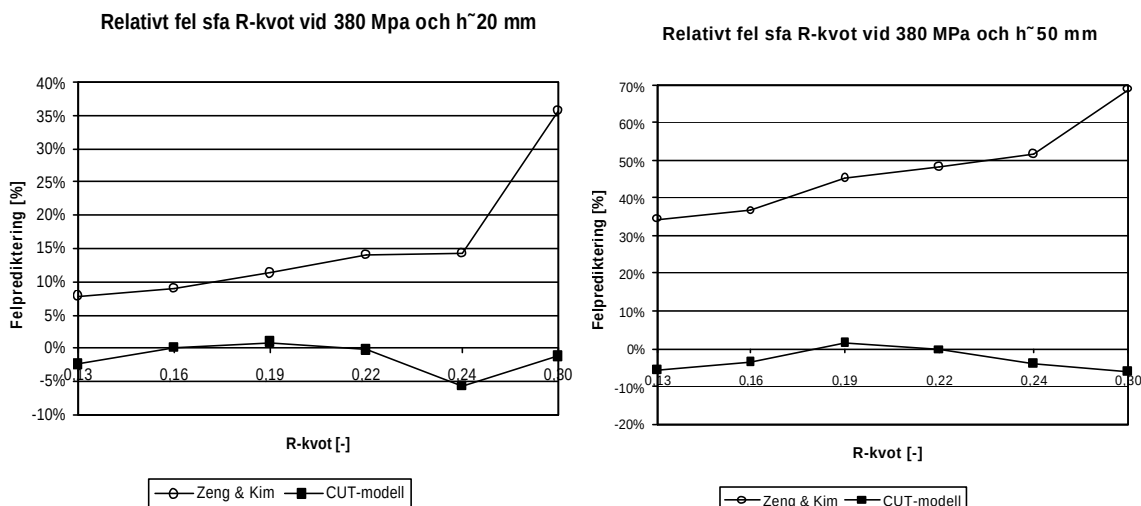
En viktig del av projektet har varit att bidra till bättre kunskap om hur skärhastigheten (snittdjupet) varierar med abrasivmatningen. Den modell som tagits fram bygger på en modellering utifrån R-kvoten. Detta är ett mått som beskriver förhållandet mellan abrasivmatningen och vattenflödet (viktandelen abrasivmedel i strålen) matematiskt kan detta skrivas som:

$$R = \dot{m}_a / \dot{m}_w \quad [\text{kg/min}]/[\text{l/min}]$$

Figureorna 4.2 och 4.3 exemplifierar resultaten utifrån den modell som tagits fram. Här kan ses hur stort det relativa felet i predikterad skärhastighet är för de olika modellerna. Notera att y-axlarna har olika indelning i de olika figurerna. Tabell 4.3 och 4.4 visar vilka inställningar som de olika försöken körts med. Generellt sett kan sägas att den nya modellen ger betydligt bättre resultat framför allt vid större R-kvoter och djupare snitt.

Tabell 4.3: Inställningar vid tester med olika abrasivmatning i rostfritt stål

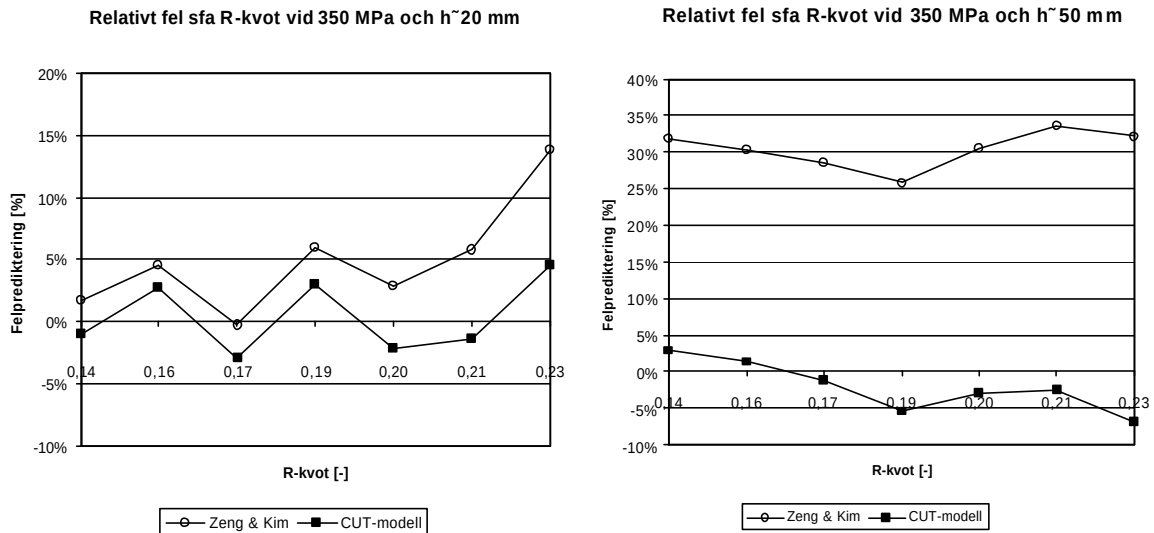
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q
380	0,254	1,1	250-550	1,86	0,135-0,296	35-140	79	0,92	1



Figur 4.2: Relativt fel vid olika R-kvoter för de två modellerna. Försöken utförda för munstyckskombinationen 0,25/0,76 mm, a) skärdjup ca 20 mm b) skärdjup ca 50 mm

Tabell 4.4: Inställningar vid tester med olika abrasivmatning i rostfritt stål

P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q
350	0,356	1,1	500-800	1,86	0,143-0,229	60-225	79	0,92	1



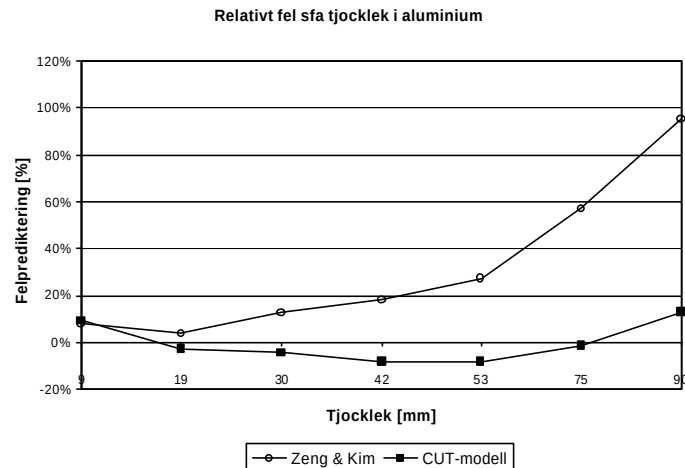
Figur 4.3: Relativt fel vid olika R-kvoter för de två modellerna. Försöken utförda för munstyckskombinationen 0,35/1,1 mm, a) skärddjup ca 20 mm b) skärddjup ca 50 mm

4.2.2 Materialtjocklek

Målsättningen med den nya modellen var att den även skulle kunna förutsäga skärhastigheter i material med en tjocklek över 30 mm. Försöksinställningarna enligt tabell 4.5 nedan ger ett intervall på snittdjupet mellan ca 10 och 100 mm. I figur 4.4 ses att det nya sambandet fungerar bra i hela detta intervall, med ett relativt fel som ligger inom ca 10 %. Inom ett så stort intervall måste detta betraktas som bra.

Tabell 4.5: Inställningar vid tjocklekstester i aluminium

P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	34-848	190	0,92	1



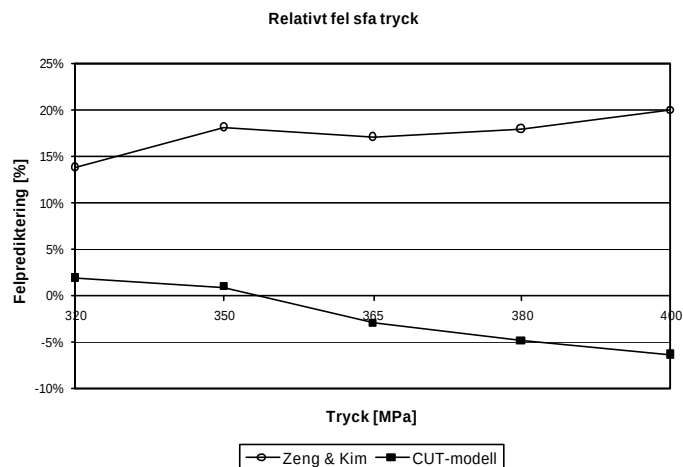
Figur 4.4: Relativt fel vid varierande materialtjocklek i aluminium för de två modellerna

4.2.3 Tryck

I tabell 4.6 nedan visas en försöksserie som använts för att utföra försök med varierande tryck. Resultatet av modelleringen visar, vilket presenteras i figur 4.5, att den nya modellen förutsäger skärhastigheten med ett relativt fel inom ca $\pm 5\%$. Det skall observeras att inställningarna innebär ett skärdjup mellan ca 25 och 35 mm (se bilaga 1), och man kan se att Zeng och Kim's modell redan överskattar skärhastigheten vid de lägre trycken, som innebär skärdjup kring 25 mm.

Tabell 4.6: Inställningar vid tryckförsök i Aluminium

P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q
320 - 400	0,254	0,762	350	1,70	0,206	200	190	0,92	1



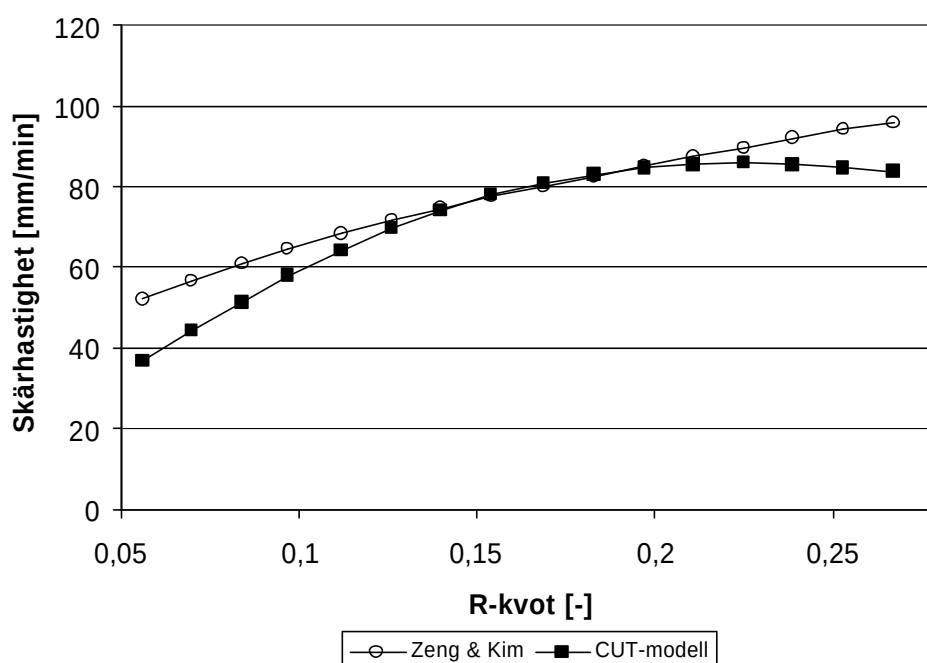
Figur 4.5: Relativt fel vid olika trycknivåer i aluminium för de två modellerna

4.3 Utvärdering av processmodellen via modellkaraktäristik

För att se hur den nya modellen fungerar vid beräkningar visas i följande avsnitt hur funktionen predikterar skärhastighet som funktion av tre olika parametrar; tryck, abrasivmatning och materialtjocklek. I tabell 4.7 visas grundinställningarna som gäller för samtliga tre plottade funktioner. Under figurena 4.6-4.8 finns kompletterande uppgifter för den parameter som varierats i respektive graf.

Tabell 4.7: Grundinställningar för beräkningar i figur 4.5 - 4.7.

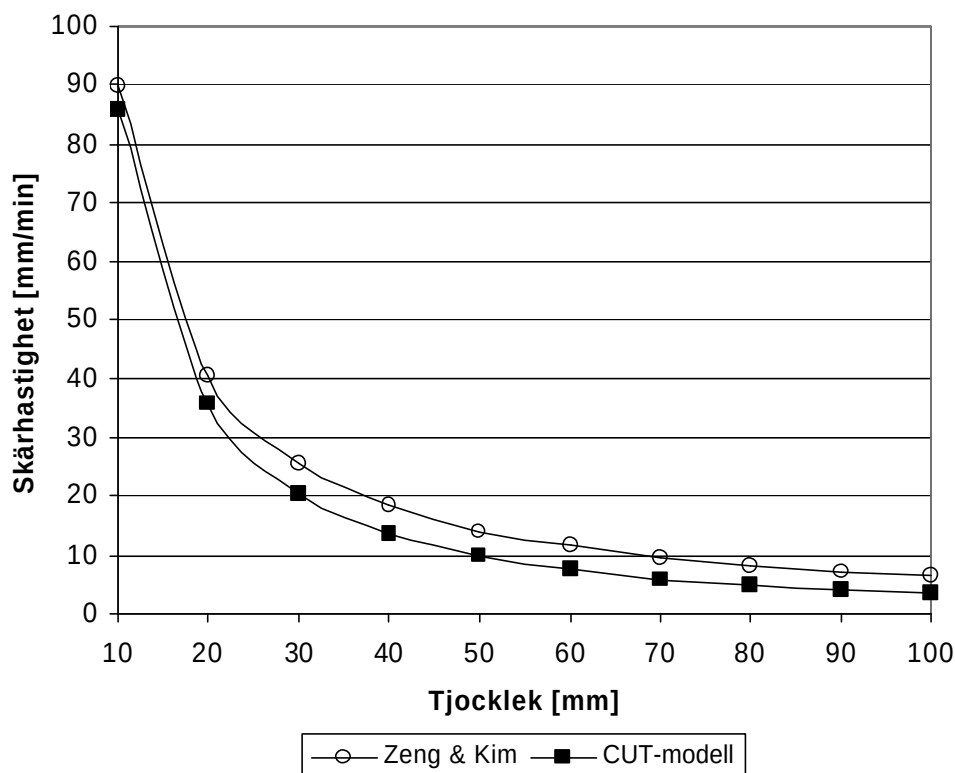
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	N_m	f_a	C	t [mm]	q
350	0,254	0,76	400	1,78	0,225	79	0,92	6880 8800	10	3



Figur 4.6: Skärhastighet som funktion av abrasivmatning. R-kvot varierad mellan 0,06 och 0,27 (innebär en abrasivmatning mellan 100 och 475 g/min).

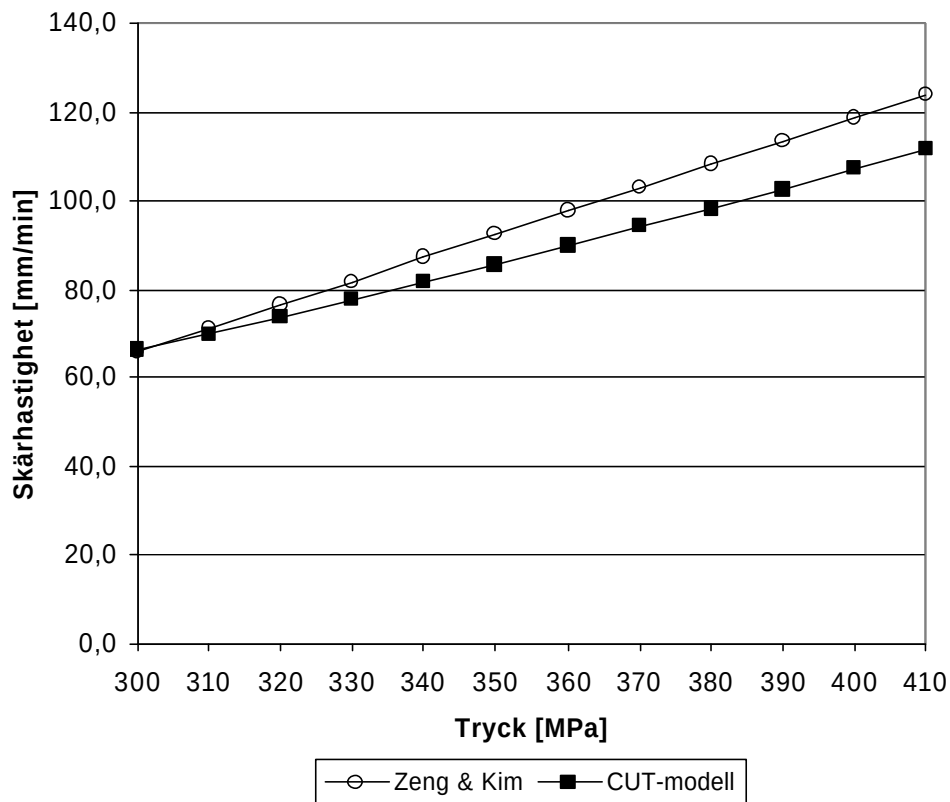
Sambandet mellan skärhastighet och abrasivmatning har vid optimeringsförsök visat sig vara viktigt att kunna modellera på ett tillförlitligt sätt för att få bra resultat vid den totala kostnadsoptimeringen. Det kan ses i figur 4.6 att överensstämmelsen mellan de två modellerna i det här fallet är god för R-kvoter mellan 0,15 och 0,20. Vid högre koncentration abrasivmedel i strålen ser man att de inte uppvisar samma beteende. Den nya modellen har här en styrka som är viktig i det fortsatta arbetet, nämligen att den ger en maxpunkt för en viss abrasivmatning (som alltid motsvarar en R-kvot på 0,225). När denna uppnåts så kommer skärhastigheten för en given kvalitet att återigen minska. Det principiella utseendet för denna funktion stämmer väl överens med teorin där det idag anses allmänt vedertaget att skärhastigheten (eller snittdjupet)

beror av R-kvoten. Strålen blir dock övermättad vid en för hög abrasivmatning (Zeng m fl (1994), Henning m fl (2004)) varpå möjlig skärhastighet återigen minskar. En nackdel med modellen är dock att den har en fast optimal R-kvot (oberoende av vattenflöde). Det är troligt att det går att visa att detta antagande inte stämmer fullständigt utan den optimala abrasivmatningen kan även bero på faktorer som till exempel tryck, vattenflöde och munstyckskombination etc.



Figur 4.7: Skärhastighet som funktion av tjocklek.

I figur 4.7 visas skärhastighet som funktion av tjocklek, som har samma principiella utseende för de två funktionerna. Det är dock viktigt att notera den relativa skillnaden mellan dessa två modeller. Vid materialtjocklekar kring 10 mm så ger modellerna bara ca 5 % skillnad i skärhastighet. Vid 100 mm däremot predikterar den nya modellen en skärhastighet som bara är hälften av Zeng & Kim's. I praktiken innebär detta en markant skillnad och det har visat sig, se figur 4.4, att den framtagna modellen stämmer mycket väl överens med de försök som genomförts.



Figur 4.8: Skärhastighet som funktion av tryck. R -kvot konstant (innebär en abrasivmatning mellan 375 och 450 g/min).

I figur 4.8 visas hur skärhastigheten varierar med trycket för ett 10 mm tjockt rostfritt material. De två olika modellerna ger samma skärhastighet vid de låga trycken runt 300 MPa. Vid tryck runt 400 MPa kan man se att den nya modellen ger en skärhastighet som är ca 10 % lägre än Zeng & Kim.

5 Optimeringsmodellering

5.1 Ekonomisk optimering

En allmän optimeringsstrategi för ett tillverkande företag är att maximera sin produktivitet. Produktivitet kan definieras på ett antal olika sätt, t ex;

$$PRODUKTIVITET = \frac{OUTPUT}{INPUT}$$

$$PRODUKTIVITET = \frac{ANTAL \text{ PRODUCERADE DETALJER}}{KOSTNAD}$$

Man kan emellertid konstatera att ett vanligt alternativt tankesätt är att försöka maximera sin vinst (overheadkostnader ej inräknade):

$$VINST = INTÄKT - RÖRLIGA KOSTNADER - FASTA KOSTNADER$$

Dock föreligger ofta ett antal osäkerhetsfaktorer:

- Man tillverkar en mängd olika detaljer, med kundorderstyrning, vilket gör att man kommer att ha olika beläggning under olika perioder, och man känner dessutom inte till denna annat under en kortare tid framöver.
- Intäkten per detalj är likaledes en okänd faktor för kommande order.

Detta ligger till grund till den förenkling vi valt att göra. Denna förenkling består i att dela upp optimeringen i två separata alternativ:

1. Maximera intäkten genom att maximera produktionshastigheten
2. Minimera kostnaderna

Denna uppdelning förekommer för övrigt i andra sammanhang, som t ex optimering av skärande bearbetning (Hägglund, 2002).

Avseende minimering av kostnaderna är det väsentligt att nämna att vi talar om **kostnaderna i kronor per skuren meter**. Orsaken till detta är att vi är ute efter produktivitetsmått. Användaren får sin intäkt per detalj (dvs per meter), och måste därför veta kostnaden per detalj (per meter).

En viktig distinktion som måste göras är att dela in kostnaderna i fasta respektive rörliga. Vi har valt att definiera dessa på följande sätt:

Fasta kostnader:

Kostnader som är oberoende av användande av utrustningen. Det vill säga, de finns även om maskinen ej används alls. Exempel på fasta kostnader är investeringskostnader, lokalhyra, mm.

Rörliga kostnader:

Dessa kostnader uppkommer som ett resultat av maskinens användande. Exempel på rörliga kostnader är abrasiv-, vatten- och elkostnader.

Nedan beskrivs de olika optimeringsfallen. Dessa förenklade fall förklaras nu med synsättet att maximera vinsten. I projektet valdes att dela upp optimeringsmetoden "Minimera kostnad" i två olika fall.

5.1.1 Optimeringsstrategi 1: Maximera produktionshastigheten

Denna optimeringsmetod blir intressant under förutsättning att man kan sälja alla de detaljer man tillverkar. Eller annorlunda uttryckt, den frigjorda maskinkapaciteten kan utnyttjas till att tillverka fler detaljer, dvs företaget har stor efterfrågan. Metoden är också särskilt lämplig då vinstmarginalen kan anses vara relativt hög.

Metoden bygger alltså på att maximera skärhastigheten, vilket resulterar i maximering av intäkten. Metoden tar därför inte någon hänsyn till kostnaderna.

5.1.2 Optimeringsstrategi 2a: Minimera de rörliga kostnaderna

Denna optimeringsstrategi, som presenteras schematiskt i figur 5.1, kan enklast förklaras och motiveras om man tänker sig ett fall där beläggningen är fast och relativt låg. Man har alltså viss överkapacitet, och därför blir det intressant att använda skärparametrar som ger en låg kostnad. Tillverkningstiden blir längre, men detta utgör inget problem p g a den låga beläggningen. De fasta kostnaderna är inte med i optimeringen här eftersom beläggningen betraktas som fast. Om man har ett begränsat, fast, antal detaljer att tillverka (antal meter att skära) kommer t ex investeringskostnaden bidrag per meter att bli densamma oavsett skärhastighet.



Figur 5.1: Minimering av rörliga kostnaderna för maximering av vinst.

5.1.3 Optimeringsstrategi 2b: Minimera den totala kostnaden

Denna strategi innebär att summan av fasta och rörliga kostnader (per meter) minimeras, se figur 5.2. Strategi är lämplig vid högre maskinutnyttjande och möjlighet att öka försäljningsvolymen. De fasta kostnaderna kan därigenom fördelas på fler detaljer (meter).



Figur 5.2: Minimering av rörliga kostnaderna för maximering av vinst.

5.2 Viktiga parametrar med avseende på produktivitet

Olika processparametrar kommer att påverka produktiviteten direkt, eller indirekt enligt nedan:

Högre pumptryck ger;

- högre skärhastighet
- högre vattenflöde (se nedan)
- högre driftskostnader i kr/h genom ökat pumpunderhåll. Detta samband måste bestämmas matematiskt.

Högre vattenflöde ger;

- högre möjlig abrasivmatning
- högre skärhastighet p g a den högre möjliga abrasivmatningen
- högre driftskostnader i kr/h genom ökat pumpunderhåll

Högre abrasivmatning ger;

- högre skärhastighet upp till mättnadspunkten
- en direkt högre kostnad i kr/h p g a högre abrasivmedelsförbrukning. Observera att det även tillkommer hanteringskostnader (och eventuell deponi).
- ett större abrasivmunstycksslitage, d v s en högre munstyckskostnad i kr/h.

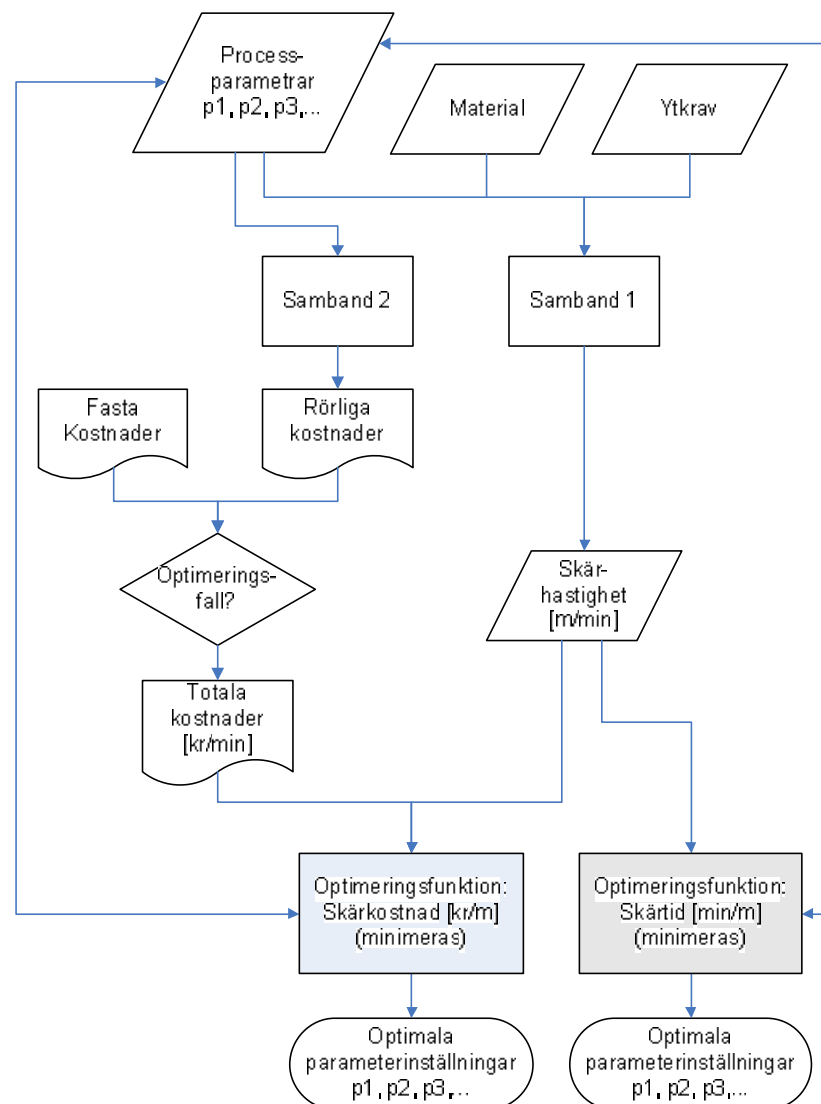
Antal munstycken och munstycksstorlek ger;

- Olika skärhastigheter och totala skärtider vid olika kombinationer.
- Något högre investering om maskinen ska utrustas med flera munstyckspositioner.

5.3 Övergripande arbetssätt

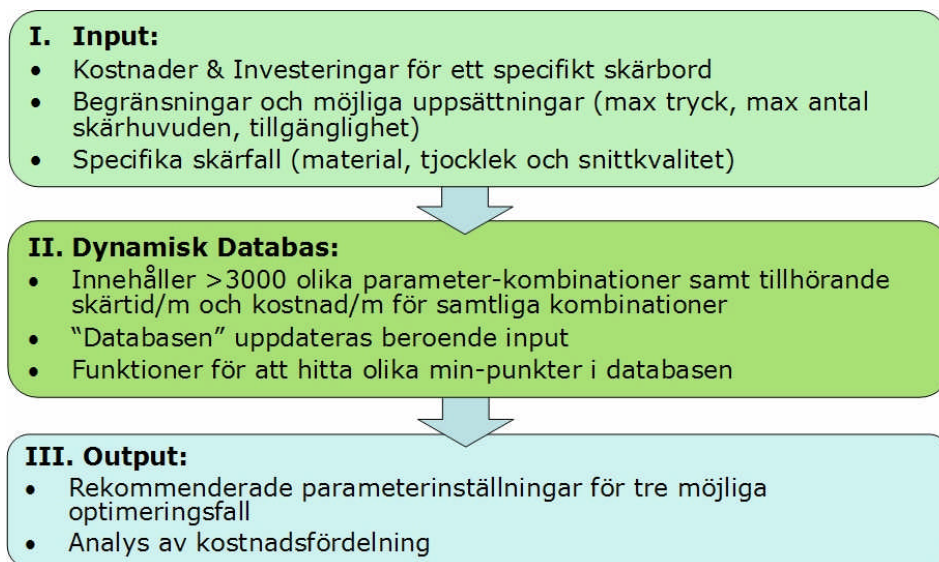
Modellens arbetssätt avseende optimering beskrivs i figur 5.3.

- De indata som ges till modellen är; det material och den tjocklek som ska skäras med visst kvalitetskrav. Dessutom anges investeringsnivåer och kostnader som enligt ekvationer som redovisas senare i kapitel 5.5 omvandlas till rörlig och fast timkostnad.
- Funktionen kallad "Samband 1" är det empiriska skärdatasamband som redovisats i kapitel 4.
- "Samband 2" rymmer flera funktioner för att ta hänsyn till hur t ex tryck eller abrasivmatning påverkar olika driftskostnader.
- Skärkostnaden i kr/m erhålls genom att dividera kostnaden i kr/min med skärhastigheten i m/min.



Figur 5.3: Övergripande arbetssätt hos datormodellen.

Optimeringen utförs genom användande av en databas, som är uppbyggd som listor med ett stort antal kombinationer av processparametrar. Totalt finns 3348 kombinationer. Tider och kostnader räknas ut för alla dessa kombinationer i det aktuella fallet. Därefter identifieras kortast tid och lägsta kostnad och korresponderande parametervärden returneras som resultat. Detta förklaras schematiskt i figur 5.4 och 5.5.



Figur 5.4: Schematisk uppbyggnad av optimeringsmodellen.

#	4 SKÄRHUVUD				Timkost	V-flöde	Koll			Skärhast	Tid	Kost	MIN	MIN
	p	ma	d	D	[Kr/h]	[l/min]	mw, #	sh, mp		[mm/s]	[sek/m]	[Kr/m]	TID?	KOST?
64	300	250	0,25	0,76	664,60	6,48	1,00			0,59	424,50	78,37		
65	320	250	0,25	0,76	668,91	6,69	1,00			0,65	383,33	71,23		
66	350	250	0,25	0,76	678,27	7,00	1,00			0,75	333,45	62,82		
67	360	250	0,25	0,76	682,35	7,10	1,00			0,78	319,34	60,53		
68	370	250	0,25	0,76	687,01	7,20	1,00			0,82	306,28	58,45		
69	380	250	0,25	0,76	692,31	7,30	1,00			0,85	294,17	56,57		
70	390	250	0,25	0,76	698,32	7,39	1,00			0,88	282,91	54,88		
71	400	250	0,25	0,76	705,11	7,49	1,00			0,92	272,43	53,36		
72	410	250	0,25	0,76	712,78	7,58	1,00			0,95	262,66	52,00		MIN KOST!
118	300	400	0,25	0,76	832,60	6,48	1,00			0,71	352,67	81,56		
119	320	400	0,25	0,76	836,91	6,69	1,00			0,79	318,46	74,04		
120	350	400	0,25	0,76	846,27	7,00	1,00			0,90	277,03	65,12		
121	360	400	0,25	0,76	850,35	7,10	1,00			0,94	265,30	62,67		
122	370	400	0,25	0,76	855,01	7,20	1,00			0,98	254,45	60,43		
123	380	400	0,25	0,76	860,31	7,30	1,00			1,02	244,39	58,40		
124	390	400	0,25	0,76	866,32	7,39	1,00			1,06	235,04	56,56		
125	400	400	0,25	0,76	873,11	7,49	1,00			1,10	226,33	54,89		
126	410	400	0,25	0,76	880,78	7,58	1,00			1,15	218,21	53,39	MIN TID!	

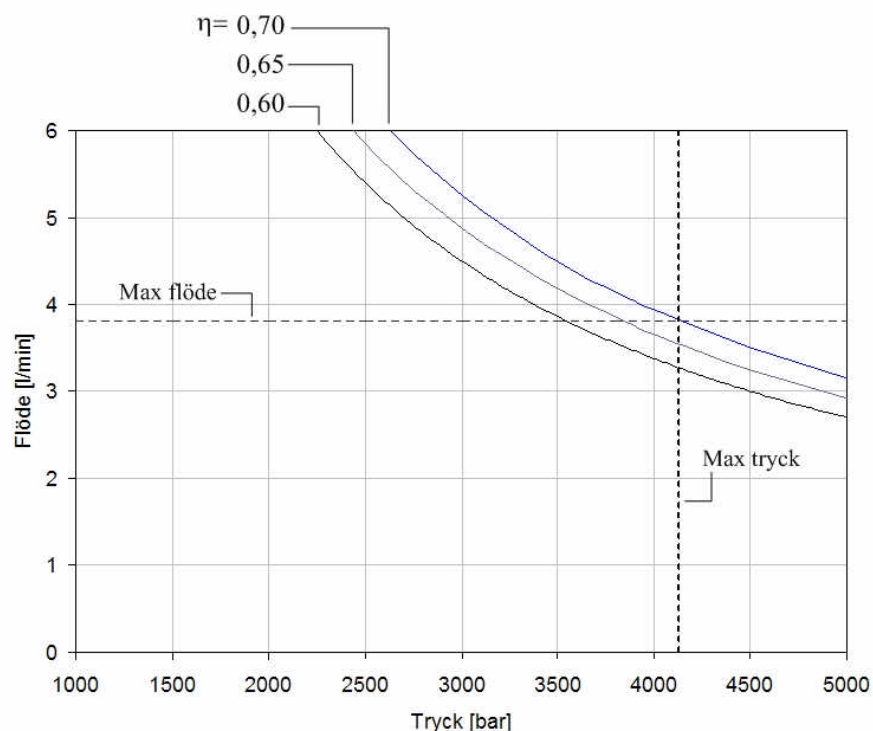
Figur 5.5: Del av lista i databas som visar hur optimala punkter hittas.

5.4 Tekniska samband och begränsningar

I modellen kan ansättas flera begränsningar:

- Maximalt tryck
- Maximalt antal munstycken
- Tillgänglig pumpeffekt

Bilden blir i realiteten något komplex vilket illustreras i figur 5.6. Pumpen har en naturlig tryckbegränsning. Även flödet är normalt begränsat, t ex via PLC eller på annat sätt. Vidare visas i figuren även linjer för olika verkningsgrad på pumpar vilka kan komma att begränsa det övre högra hörnet av processfönstret. I modellen kan denna begränsning utföras genom att stegvis sänka möjligt flöde vid höga tryck.



Figur 5.6: Typiska pumpbegränsningar för en 50 hk pump.

5.5 Ekonomiska samband

I detta kapitel redogörs för de matematiska samband som finns integrerade i datormodellen. Sambanden för fasta kostnader är relativt enkla men finns med för tydlighets skull. Den rörliga kostnaden är summan av ett antal delar. I beskrivningen nedan redovisas kostnaden för pumpunderhåll separat då denna är relativt sammansatt.

Sist i uppställningen, i kapitel 5.5.4, visas funktionen för totalkostnaden. Observera att det är först här som antalet munstycken (strålar) tas med i beräkningen.

5.5.1 Fasta kostnader

Denna består i denna modell av fyra delar vilka specificeras separat:

- Investering maskin
- Investering pump
- Övriga fasta kostnader (hyra mm)
- Operatör

Den fasta kostnaden i kr/h beräknas genom att ta fram annuiteten på investeringarna (utifrån given ränta och avskrivningstid), dividera med antalet tillgängliga skärtimmar/år och addera de fasta timkostnaderna för operatör och hyra mm.

5.5.2 Rörliga kostnader - pumpunderhåll

Kostnaden för pumpunderhåll har i projektet valts att delas i två delar;

1. Kostnad för komponenter (reservdelar)
2. Kostnad för arbete och driftstopp i samband med service

1. Kostnad för komponenter [kr/h]

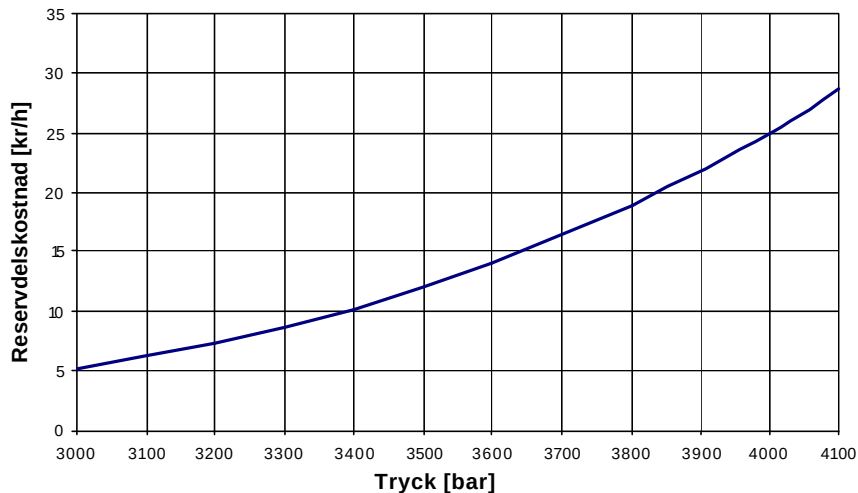
Denna är en funktion av tryck och av vattenflöde. Som funktion av trycket antas en potensfunktion gälla. Vattenflödet inverkar linjärt:

$$C_{pr} = k \cdot P_w^n \cdot \frac{\dot{m}_w}{3,8}$$

$\dot{m}_w$	vattenflöde [l/min]
P_w	vattentryck [bar]
k och n	konstanter, se nedan

Modellen kommer alltså först att räkna ut en komponentkostnad beroende av trycket för ett flöde på 3,8 l, och därefter multiplicera denna med kvoten mellan det verkliga flödet och 3,8. Detta görs eftersom modellen (och de data som ska anges) baseras på en 50 hk pump, vilken typiskt har ett maxflöde av 3,8 l.

Den antagna funktionen baseras på de data och erfarenheter som insamlats i projektet. I datormodellen finns integrerat (ej enkelt synligt) värden på konstanterna k och n , då trycket anges i enheten bar och kostnaden i kr/h. I figur 5.7 visas ett exempel på utseende hos funktionen.



Figur 5.7: Kostnad för komponenter (reservdelar) som funktion av tryck. Grafen visar basinställningen i modellen ($k = 4 \cdot 10^{-19}$, $n=5,5$).

Basinställningar, dvs värden på k och n i funktionen, har valts utifrån intervjuer med de två svenska maskinleverantörer som medverkat i projektet. Det avser som tidigare nämnts ett flöde av 3,8 l/min, eller ett fullt utnyttjande av en 50 hk pump. Det avser också:

- En pump av nyare modell
- De första 10 000 driftstimmar.

Användare av modellen kan dock enkelt styra denna funktion. Detta görs genom att ange reservdelskostnaden vid två olika tryck, 3500 och 4000 bar. Utifrån dessa värden räknar modellen ut nya värden på konstanterna k och n för ekvationen ovan.

2. Kostnad för arbete och stillestånd i samband med service

Här måste först ett medelintervall mellan servicetillfällen räknas ut. Detta görs genom att använda kostnadsfunktionen som bas. Det vill säga:

- Man anger ett känt serviceintervall vid 3500 bar
- Så många gånger som kostnaden för reservdelar ökar med trycket, så många gånger tätare blir serviceintervallet vid högre tryck.

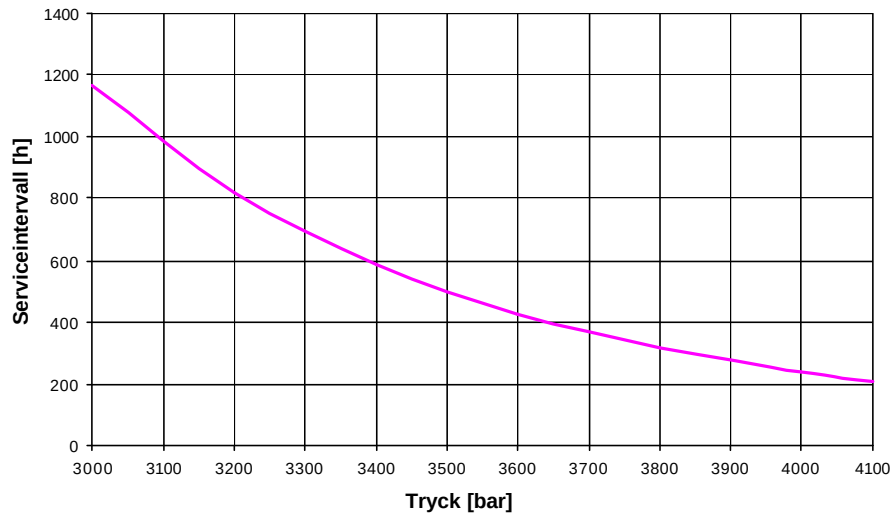
Vidare blir även serviceintervallen kortare med ökande flöde.

Intervallet mellan service i timmar räknat blir [kr/h]:

$$I_p = I_{3500} \cdot \frac{c_{pr,3500}}{C_{pr}} \cdot \frac{3,8}{\dot{m}_w}$$

I_{3500}	Angivet serviceintervall vid 3500 bar
$c_{pr,3500}$	Angiven komponentkostnad vid 3500 bar
C_{pr}	Kostnaden för komponenter vid aktuellt tryck

Ett exempel på utseendet av denna funktion visas i figur 5.8.



Figur 5.8: Serviceintervall som funktion av tryck (basinställning i modellen).

Kostnaden för arbete för service av pumpen blir [kr/h]:

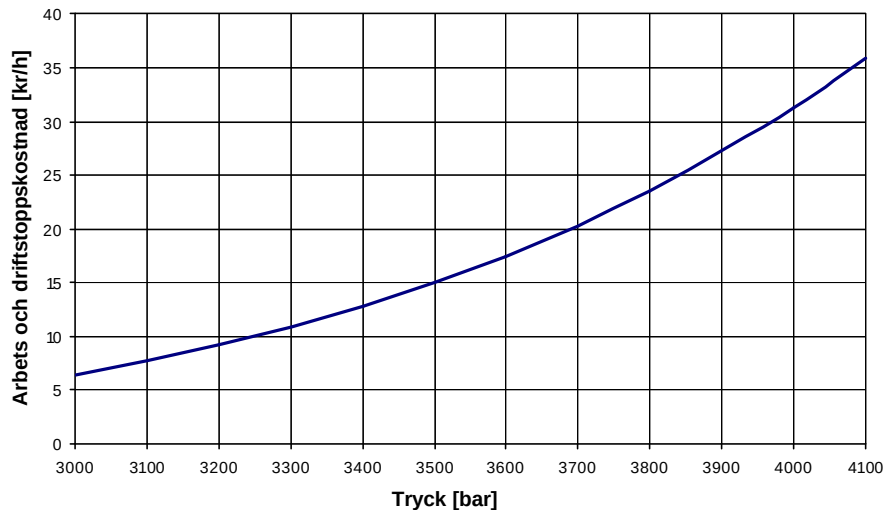
$$C_{pa} = \frac{c_{pa}}{I_p} \quad c_{pa} \quad \text{genomsnittlig arbetskostnad per service [kr]}$$

Flera användare har angivit att man kan vill kunna "straffa" modellen då allt för täta serviceintervall kan skapa irritation och olägenheter som t ex försenad leverans mm. Detta kan göras genom att ange en specifik driftstoppskostnad. Denna beräknas således som:

Driftstoppskostnad [kr/h]:

$$C_{pd} = \frac{c_{pd}}{I_p} \quad c_{pd} \quad \text{genomsnittlig driftstoppskostnad per service [kr]}$$

Summan av C_{pa} och C_{pd} som en funktion av trycket visas i figur 5.9.



Figur 5.9: Kostnad för arbete och stillestånd i samband med service som funktion av tryck (basinställning i modellen).

Den totala kostnaden för pumpunderhåll blir summan av kostnaden för reservdelar, arbete och driftstopp:

$$C_p = C_{pr} + C_{pa} + C_{pd}$$

5.5.3 Rörliga kostnader - övrigt

Nedan redogörs för övriga rörliga kostnader. Dessa utgörs av förbrukningsdetaljer och underhåll (ej pump), samt kostnader för förbrukningsmedel (abrasiv och vatten), samt el.

Kostnad abrasivmunstycken [kr/h]

Denna antas bero linjärt på abrasivmatningen, och användaren anger denna vid 300 g/min.

$$C_{am} = \frac{c_{am}}{t_{am,300}} \cdot \frac{\dot{m}_a}{300}$$

$\dot{m}_a$	Abrasivmatning [g/min]
c_{am}	Inköpspris munstycken [kr]
$t_{am,300}$	Utslitningstid vid $\dot{m}_a = 300$ g/min [h]

Kostnad vattenmunstycken [kr/h]:

Denna antas inte bero på några parameterinställningar.

$$C_{vm} = \frac{c_{vm}}{t_{vm}}$$

c_{vm}	Inköpspris munstycken [kr]
t_{vm}	Utslitningstid [h]

Kostnad för underhåll och reservdelar skärhuvud (ej munstycken) [kr/h]:

Denna kostnad fördelas ut på antalet timmar per år enligt nedan.

$$C_{skh} = \frac{c_{skh}}{A \cdot T}$$

c_{skh}	Underhåll per skärhuvud och år [kr/år]
A	Antal timmar per arbetsår [h]
T	Tillgänglighet [%]

Kostnad för underhåll och reservdelar skärbord [kr/h]:

$$C_{skb} = \frac{c_{skb}}{A \cdot T}$$

c_{skb}	Underhåll skärbord per år [kr/år]
A	Antal timmar per arbetsår [h]
T	Tillgänglighet [%]

Kostnad för abrasivmedel [kr/h]:

Abrasivmedelskostnaden beror direkt av abrasivmatningen.

$$C_a = c_a \cdot \dot{m}_a \cdot \frac{60}{1000}$$

c_{am}	Kostnad abrasivmedel [kr/kg]
$\dot{m}_a$	Abrasivmatning [g/min]

Viktigt att notera är att kostnaden för abrasivmedel i kr/kg ska inkludera:

- Inköpspris
- Hanteringskostnad
- Eventuell deponikostnad

Vattenkostnad [kr/h]:

Vattenförbrukningen utgörs av skärvattenflöde samt kylvattenflöde. Den senare är ca 2,5 l/min för en 50 hk pump. Den ökar eller minskar med pumpens märkeffekt, men är konstant för en viss pump.

$$C_w = \left(\dot{m}_w + 2,5 \frac{P_M}{50} \right) \frac{c_w}{60 \cdot 1000}$$

$\dot{m}_w$	Skärvattenflöde [l/min]
c_w	Vattenkostnad [kr/m ³]
P_M	Pumpmotorns märkeffekt [hk]

Elkostnad [kr/h]:

Denna är beroende av pumpmotorns märkeffekt och ej av uttagen effekt, då det antas att pumpen by-passar hydrauliska effekten vid sänkt skärvattenflöde. Faktorn 0,735 ger omräkning till kW från den oftast använda effektenheten hk.

$$C_{el} = c_{el} \cdot P_M \cdot 0,735$$

c_{el}	Elkostnad [kr/kWh]
P_M	Motorns märkeffekt [hk]

5.5.4 Total kostnad

Den sammanlagda rörliga timkostnaden (kr/h), blir med hänsyn taget till antal munstycken, n_j :

$$C_{rörlig} = n_j \cdot C_{am} + n_j \cdot C_{vm} + n_j \cdot C_{skh} + n_j \cdot C_a + C_{skb} + C_v + C_{el} + C_p$$

Det vill säga, de kostnader som påverkas direkt av antalet munstycken i modellen är; abrasivmunstycken, vattenmunstycken, skärhuvudunderhåll och abrasivmedel. De delar som ej påverkas direkt är; skärbordsunderhåll, vatten, el och pumpunderhåll.

Observera dock att pumpunderhållskostnaden, liksom vattenkostnaden beror på vattenflödet och således påverkas indirekt.

Den totala timkostnaden (kr/h) blir:

$$C_{tot} = C_{rörlig} + C_{fast}$$

Observera att modellen för optimeringsstrategin ”lägsta rörliga kostnad” inte kommer att räkna med den fasta kostnaden.

Den totala kostnaden per meter (kr/m) blir, med skärhastigheten v_f i mm/min:

$$C_{skär} = \frac{C_{tot}}{n_j \cdot v_f} \cdot \frac{1000}{60}$$

Det är denna kostnad som modellen kommer att minimera.

5.6 Datorgränssnitt

5.6.1 Val av gränssnitt

I inledningen av projektet valdes Microsoft EXCEL som gränssnitt för att utföra modelleringen. Anledningarna till detta val var:

- Möjlighet att definiera sökrymden av resultatparametrar som en databas med kända diskreta värden.
- Det gav en relativt enkel möjlighet att göra ett utkast till modell.

Under senare delen av projektet diskuterades under projektmöten att ändra gränssnittet till ett annat, mer användarvänligt eller ”professionellt”. Slutsatsen från projektmedlemmarna blev att det inte förelåg något behov av detta eftersom;

- Modellen kommer inte att användas vid daglig drift utan snarare vid tillfällen då man vill analysera verksamheten
- Modellen kan ges ett i princip helt öppet och enkelt gränssnitt, vilket ger vissa möjligheter för den mer intresserade användaren att ändra i modellen.

Därför valdes att behålla datorgränssnittet men att ge det ett logiskt och lättanvänt utseende, med möjlighet till enkel men även mer avancerad analys.

5.6.2 Uppbyggnad

Excel-dokumentet är uppbyggt i 5 separata blad, vilka förklaras mer i detalj nedan.

1. Parameterval, som är förstasidan (huvudmeny)
2. Analys kostnader
3. Snittytor kvalitet
4. Underhållskostnader
5. Datatabeller

Blad 1: Parameterval

I denna del definieras basinställningar avseende:

- Investeringar och kostnader
- Arbetstimmar/år och tillgänglighet
- Begränsningar hos utrustningen (max tryck, max antal skärhuvuden)
- Det aktuella skärfallet avseende material, tjocklek och önskad kvalitetsklass på ytan.

Här visas även resultatet i form av:

- Optimala processparametrar
- Kostnader och deras huvudsakliga fördelning på olika poster.

Tanken är att man i detta ark ska få en total översikt över input och resultat. Den information som finns här ska vara tillräcklig för de flesta fall. Det vill säga, övriga blad är tänkta att användas först vid en mer detaljerad analys. Se figur 5.10.

Skärdata-val för Abrasiv Vattenskarvning

© Ulf Honsberg och Gustav Holmqvist

KOSTNADER OCH KAPACITET				MATERIAL OCH SNITTKVALITET			
INVESTERING & FASTA KOSTNADER				DRIFTSKOSTNADER			
Investering maskin	1100	kk		Abrasiv	4	kr/kg	
Investering pump	500	kk		El	0.8	kr/kWh	
Avskrivningstid	5	år		Vatten	10	kr/m ³	
Ränta	6	%		Till specificera underhållskostnader			
Övriga fasta kostn. (tex hyra)	25000	kr/år		ARBETSKOSTNADER			
				Operatör	200	kr/h	
RESULTAT - Rekommenderade inställningar				RESULTAT - Kostnader			
KORTAST SKÄRTID				KORTAST SKÄRTID			
Tryck	3900	Bar	3900	Abrasivmedel	71.28	63.56	
Abrasivmatning	425	g/min	375	Underhåll pump	16.79	16.97	
Vattenmunstycke	0.254	mm	0.254	Övrigt	29.52	28.77	
Abrasivmunstycke	0.76	mm	0.76	Rörliga kostnader (Krim)	117.58	109.30	
Antal munstycken	2		2	Operatör (Krim)	93.17	94.16	
Skärhastighet	23.85	mm/min	23.6	Fasta kostnader (Krim)	107.77	108.91	
				TOTAL KOSTNAD (Krim)	318.53	312.37	
				TOTAL KOSTNAD (Kri/h)	911.64	884.64	
				Utnyttjande av maskinkapacitet	100%	99%	
				Utnyttjande av pumpkapacitet	99%	99%	

Ett resultat av projektet CUT - Competitive Use of Waterjet Technology

Finansiär: **norden** Nordisk InnovationsCenter

Utförare: **CHALMERS**

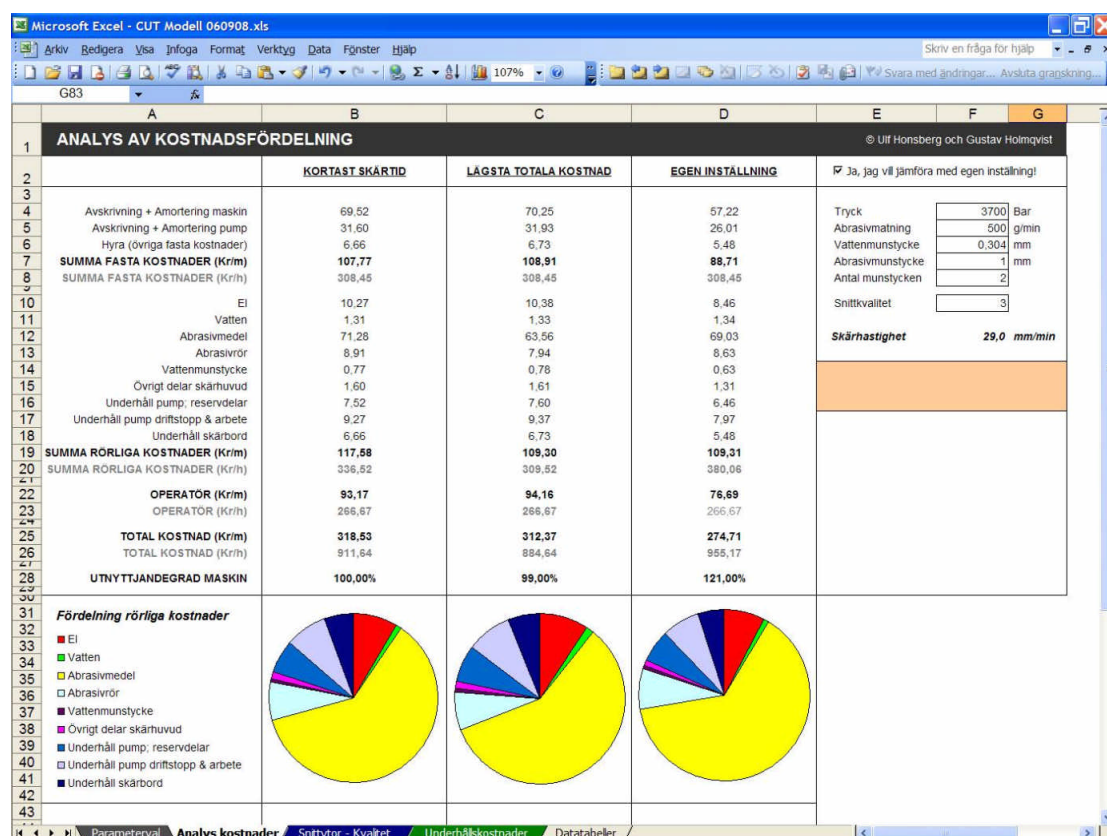
Figur 5.10: Startside i datorgränssnittet; Parameterval.

Blad 2: Analys av kostnadsfördelning

I detta blad kan användaren få en mer detaljerad bild av kostnadsfördelningen, uppdelad på fler detaljerade poster. Man får även en grafisk presentation av slutresultatet. Se figur 5.11.

Vidare finns en mycket viktig möjlighet till analys med i detta blad, nämligen att användaren kan jämföra vad resulterande kostnader och fördelning skulle bli vid egna processparameterinställningar. Användaren kan alltså t ex:

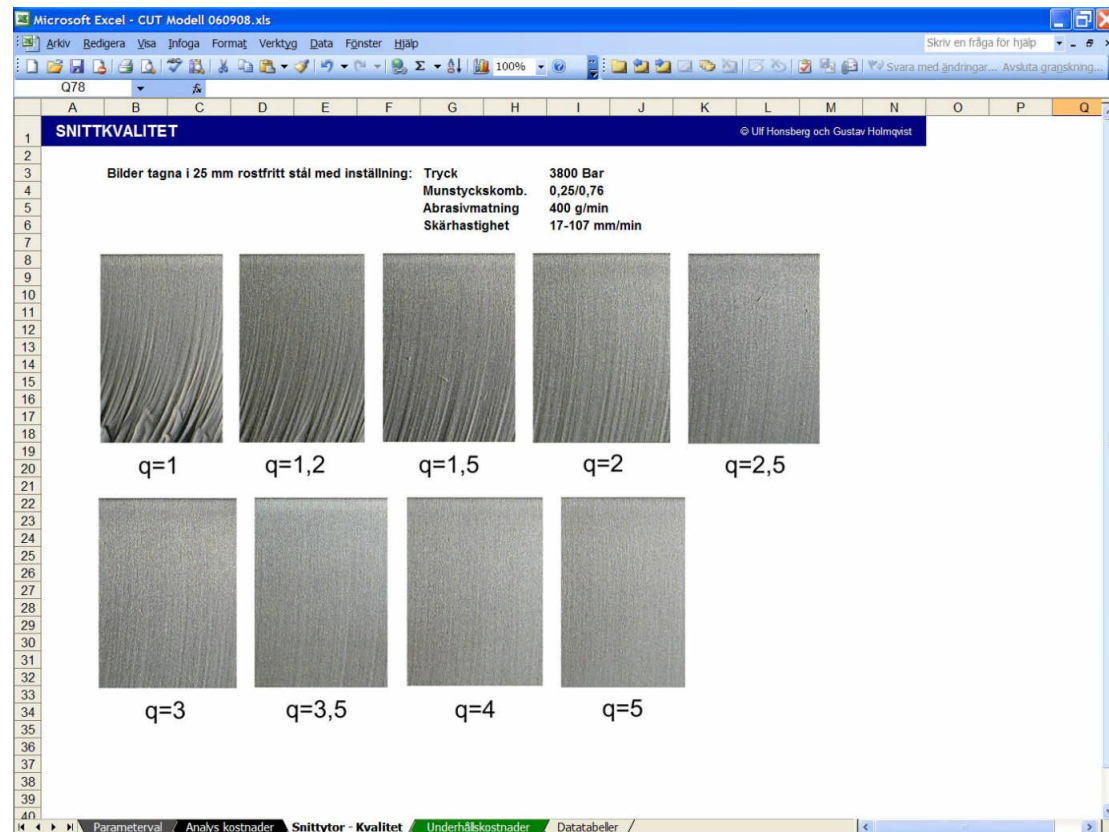
- Jämföra det ekonomiska resultatet utifrån de processparametrar som används i produktionen idag.
- Ändra någon av parameterinställningarna som angivits i något av de optimerade fallen, och se hur mycket just detta slår på resultatet, d v s utföra en egen känslighetsanalys.



Figur 5.11: Del av datorgränssnittet; Analys kostnader.

Blad 3: Snittytor – Kvalitet

Här finns bilder som ger en definition av kvalitetsskala som används i modellen. Inte enbart heltalsvärden för kvalitetsskalan finns inlagda. Orsaken är som tidigare nämnts att erfarenheten från projektet säger att det är vanligt att man använder andra mellanliggande kvalitetsnivåer. Se figur 5.12.

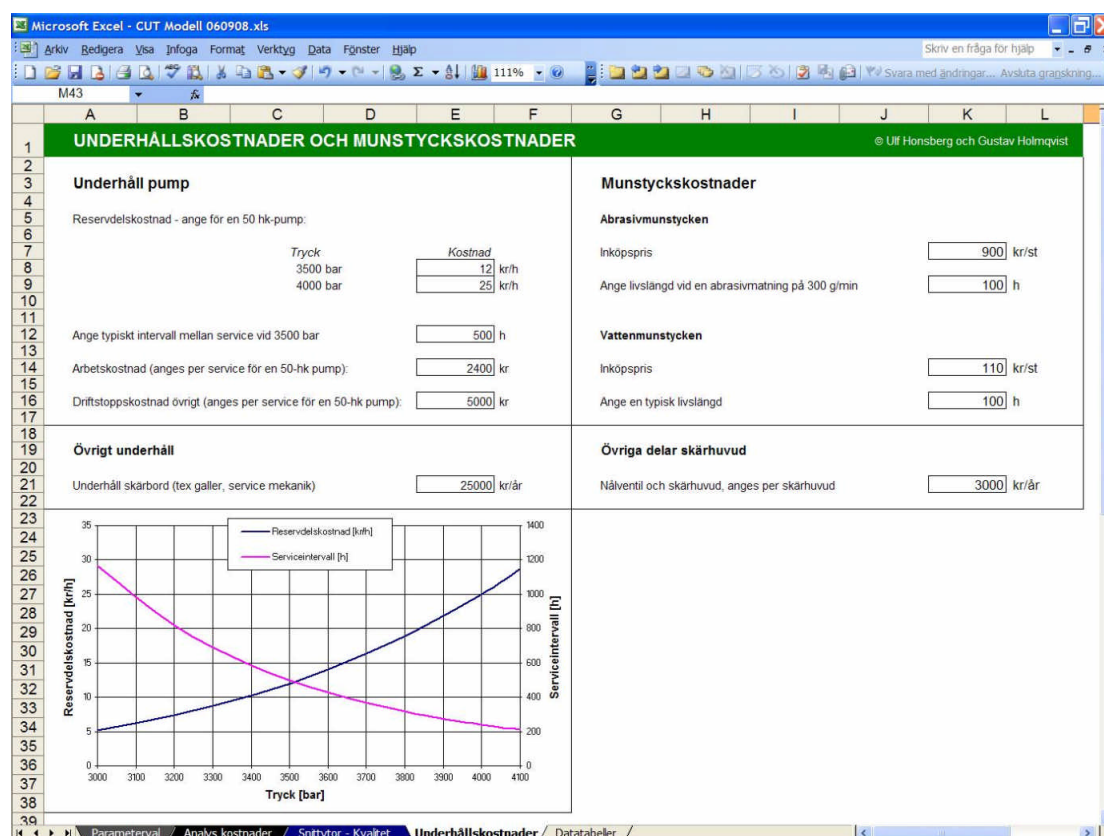


Figur 5.12: Del av datorgränssnittet; Snittytor – Kvalitet.

Blad 4: Underhållskostnader

I detta blad kan anges mer detaljerade egna underhållskostnader för pumpen. Detta kan göras så att tryckets påverkan på kostnaden kan ändras. Reservdelskostnaden per timma kan ändras vid två nivåer, samt intervallet mellan servicetillfällen kan styras.

Användaren måste alltså ha en viss detaljerad kunskap om vad den egna pumpen kostar i reservdelar, och då helst för två olika trycknivåer. Exempel på rimliga nivåer finns dock inlagda. Vidare kan användaren ange munstyckskostnader, kostnader för övriga reservdelar och underhåll för skärbord etc. Se figur 5.13.



Figur 5.13: Del av datorgränssnittet; Underhållskostnader.

Här utförs optimeringen enligt den metodik som beskrivits tidigare. Bladet ligger dock helt öppet då detta ger möjlighet för den intresserade användaren att detaljstudera de samband och ekvationer som finns. Vidare kan man tänka sig att det kan vara av intresse att ändra i den datalista som finns eller att utöka den. Detta skulle kunna bero på att man t ex vill ha med en "egen" munstycksstorlek. Inga hinder finns för detta, men ändringar kräver ju ändå viss vana vid att hantera Excel. Se figur 5.14.

Figur 5.14: Del av datorgränssnittet; Datatabeller

6 Resultat

6.1 Exempel på resultat från datormodellen

I detta avsnitt presenteras exempel på de resultat som datormodellen kan generera. Datormodellen kommer givetvis att ge olika resultat beroende på vilka indata som anges. Detta gör också att de resultat som presenteras här måste analyseras utifrån de inställningar som använts. Dock ges i senare kapitel även exempel på hur en variation i olika indata påverkar slutresultatet.

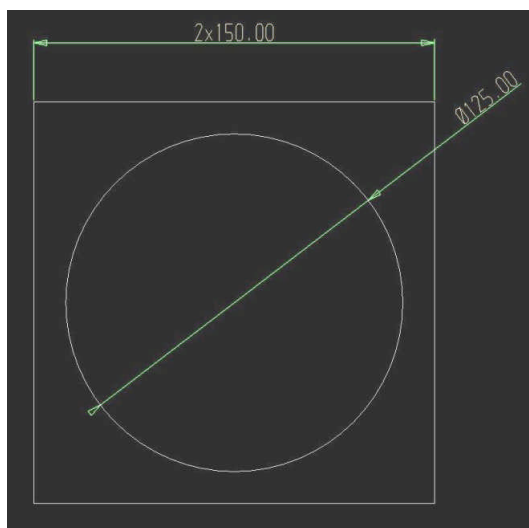
I nedanstående två exempel har använts indata enligt bilaga 2. Inställningar och geometrier har hämtats från företag i projektgruppen.

6.1.1 Exempel 1

Det första exemplet presenteras nedan i tabell 6.1 och figur 6.1.

Tabell 6.1: Exempeldetalj 1 med använda inställningar

Material	Rostfritt stål
Tjocklek	20 mm
Ytkrav	medelkvalitet (q=3)
Detalj	Se figur 6.1, skärlängd~ 1000 mm
Pump, max effekt	100 hk
Maskin, max antal munstycken	2 x 0,356/1,1 mm
Inställt tryck	3100 bar
Inställd abrasivmatning	700 g/min



Figur 6.1: Geometri exempeldetalj 1.

Resultatet från modellen med optimeringsstrategin lägsta totalkostnad redovisas i tabell 6.2 nedan.

Tabell 6.2: Resultat från optimering av lägsta totalkostnad för exempeldetalj 1.

	Tidigare inställning	Optimerade parametrar
Vattenmunstycke, mm	0,356	0,33
Abrasivrör, mm	1,1	1,0
Antal munstycken	2	2
Tryck, Bar	3100	4100
Abr.matning,g/min	700	600
Skärhastighet mm/min	48	66
Tid/detalj, min	20,8	15,2
Kostnader		
Abrasivmedel	58	37
Underhåll pump	4	14
Övrigt	23	16
Summa Rörliga (Kr/m)	82	67
Operatör (Kr/m)	46	34
Fasta kostnader (Kr/m)	81	59
TOTAL KOSTNAD (Kr/m)	212	160

Observera att den viktigaste skillnaden är att trycket har höjts väsentligt. Då en flödesbegränsning var satt till 6,8 l/min (en 100 hk pump) används något mindre munstycken vid det höga trycket. Abrasivmatningen har sänkts något.

Viktiga skillnader avseende kostnaderna:

- Kostnaden för pumpunderhåll ökar med en faktor 3,5, men bara med 10 kr/m.
- Abrasivkostnaden minskar med 21 kr/m.
- Den totala kostnaden minskar med ca 25%.

Genomslaget av denna skillnad kan bli olika, beroende på hur mycket man kan fylla upp frigjord maskinkapacitet. Som ett extremfall kan vi räkna på att hela den frigjorda maskintiden fylls med mer produktion. Detaljkostnaden är identisk med meterkostnaden då skärlängden är 1 meter. I räknefallet undersöks skillnaden under *en månad med antagandet 120 h skärtid*:

Tidigare kunde man på 120 h tillverka **346** detaljer ($120 \cdot 60 / 20,8$)

Man kan med de nya inställningarna på 120 h tillverka **473** detaljer

Antaget ett pris till kund på 300 kr/detalj (utan materialkostnad):

Tidigare vinst/månad = $346 \text{ st} \cdot (300 - \mathbf{212}) = 30\,448 \text{ kr}$

Nu, vinst/månad = $473 \text{ st} \cdot (300 - \mathbf{160}) = 66\,220 \text{ kr}$

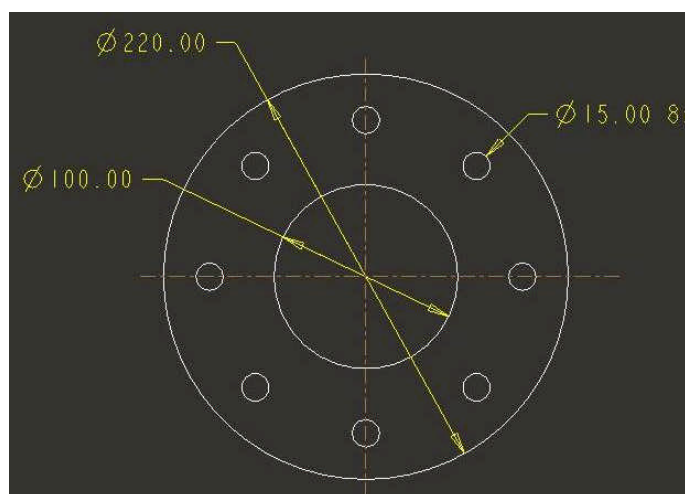
Med andra ord blir skillnaden dramatisk eftersom hastigheten har höjts samtidigt som kostnaden sänkts.

6.1.2 Exempel 2

Det andra exemplet presenteras nedan i tabell 6.3 och figur 6.2.

Tabell 6.3: Exempeldetalj 2 och inställningar.

Material	Aluminium
Tjocklek	30 mm
Ytkrav	medelkvalitet (q=3)
Detalj	Se figur 6.2, skärlängd~ 1400 mm
Pump, max effekt	50 hk
Maskin, max antal munstycken	2 x 0,254/0,76 mm
Inställt tryck	3500 bar
Inställd abrasivmatning	400 g/min



Figur 6.2: Geometri exempeldetalj 2.

Resultatet från modellen med optimeringsstrategin lägsta totalkostnad redovisas i tabell 6.4 nedan.

Tabell 6.4: Resultat från optimering av lägsta totalkostnad för exempeldetalj 2.

	Tidigare inställning	Optimerade parametrar
Vattenmunstycke, mm	0,254	0,254
Abrasivrör, mm	0,76	0,76
Antal munstycken	2	2
Tryck, Bar	3500	3800
Abr.matning,g/min	400	350
Skärhastighet mm/min	66,5	74,6
Kostnader (Kr/m)		
Abrasivmedel	24	19
Underhåll pump	3	5
Övrigt	9	8
Summa Rörliga (kr/m)	36	31
Operatör	33	30
Fasta kostnader (Kr/m)	37	33
TOTAL KOSTNAD (Kr/m)	107	94

Återigen har trycket har höjts. Abrasivmatningen är något lägre. Den totala kostnaden har i detta fall, trots små förändringar minskat med ca 12%.

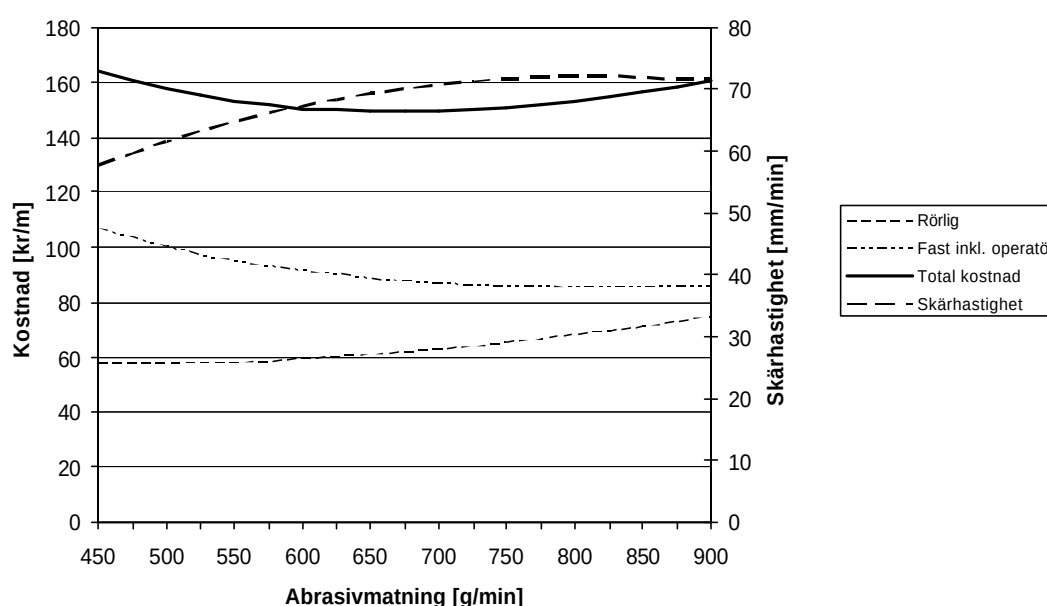
6.2 Typiska optimala parameternivåer

Vad som blir optimala parameternivåer kommer alltid att bero på indata. Dock kan utifrån typiska indata vissa generella förslag på optimala inställningar ges, samt förklaringar till dessa.

6.2.1 Abrasivmatning

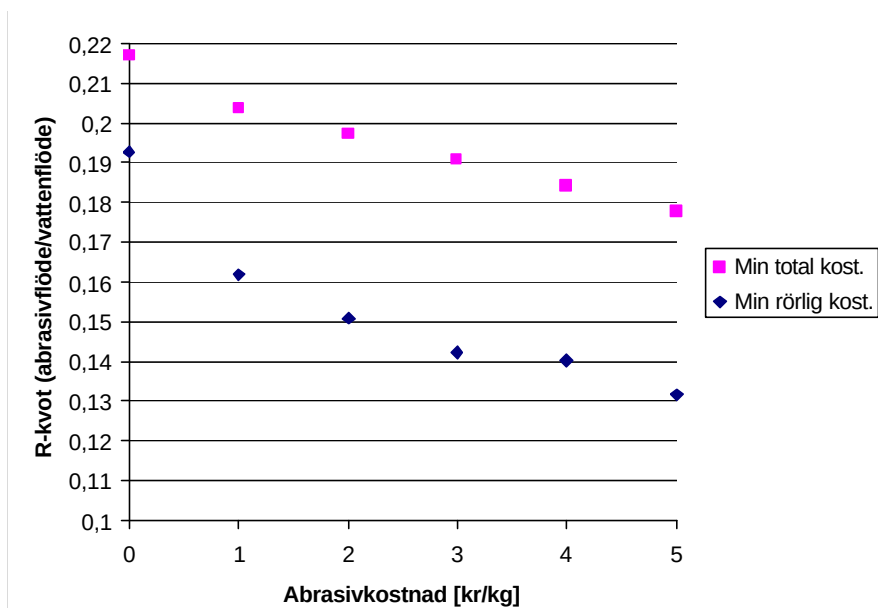
Rekommenderade abrasivmatningar kommer att skilja sig åt relativt markant mellan de tre optimeringsfallen. För att förklara abrasivmatningen inverkan visas i figur 6.3 tryckets påverkan på olika kostnader samt skärhastighet. Det kan konstateras att:

- Kortast skärtid kommer alltid att erhållas vid mättnadspunkten.
- Lägsta total kostnad erhålls vid en något lägre abrasivmatning.
- Lägsta rörlig kostnad erhålls vid en väsentligt lägre abrasivmatning.



Figur 6.3: Tryckets påverkan på kostnader samt skärhastighet.

Abrasivmedelskostnaden i kr/kg kan tänkas variera, och så låga inköspriser som 1,70 kr/kg har angetts i projektgruppen. Beroende på kostnader för hantering och deponi erhålls en mycket skiftande totalkostnad. I figur 6.4 visas hur olika abrasivkostnad påverkar rekommenderad abrasivmatning. Som resultat visas R-kvoten, som tidigare nämnts är kvoten mellan abrasiv- och vattenflödet. Inom ett intervall mellan 2 och 4 kr/kg kommer alltså rekommenderad abrasivmatning endast att variera ca 10%.



Figur 6.4: Rekommenderad abrasivmatning (R-kvot) för de två optimeringsfallen lägsta kostnad (rörlig eller total) som funktion av abrasivmedelskostnaden.

För bättre överblick presenteras i tabell 6.5 rekommenderade abrasivmatningar för 3 vanliga munstyckskombinationer. Dessa anges vid ett tryck på 3800 bar för samtliga fall.

Tabell 6.5: Rekommenderade abrasivmatningar (vid 3800 bar).

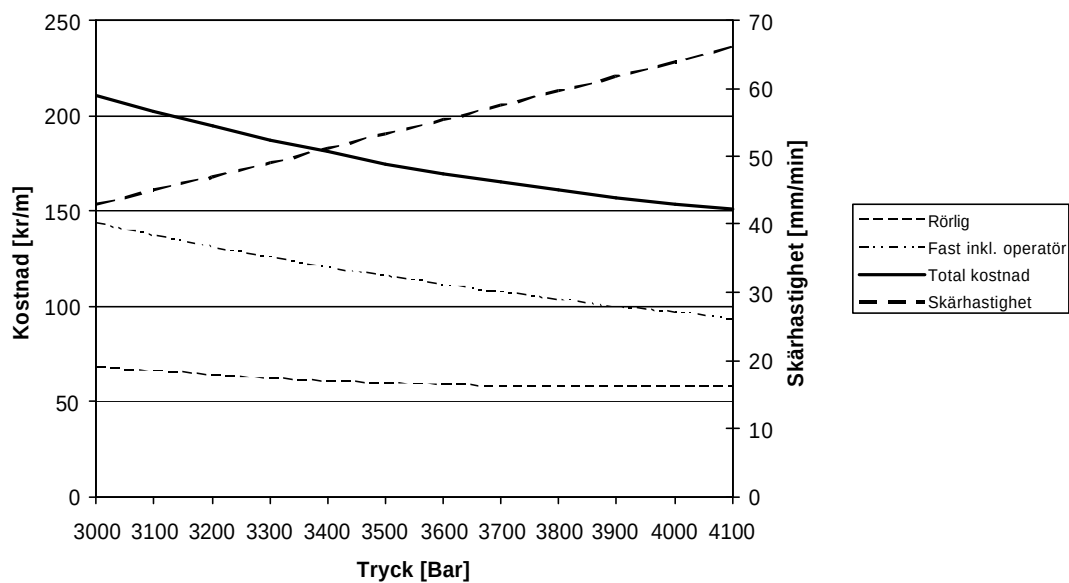
Munstyckskombination	Optimeringsfall	Rekommenderad abrasivmatning [g/min]
0,254/0,76	Minimal totalkostnad	650-720
	Minimal rörlig kostnad	500-580
0,33/1,0	Minimal totalkostnad	560-620
	Minimal rörlig kostnad	440-500
0,356/1,1	Minimal totalkostnad	330-370
	Minimal rörlig kostnad	260-300

6.2.2 Tryck

Allmänt sett kommer modellen att rekommendera relativt höga trycknivåer. För att förklara tryckets inverkan visas i figur 6.5 tryckets påverkan på olika kostnader samt skärhastighet. Notera alltså att:

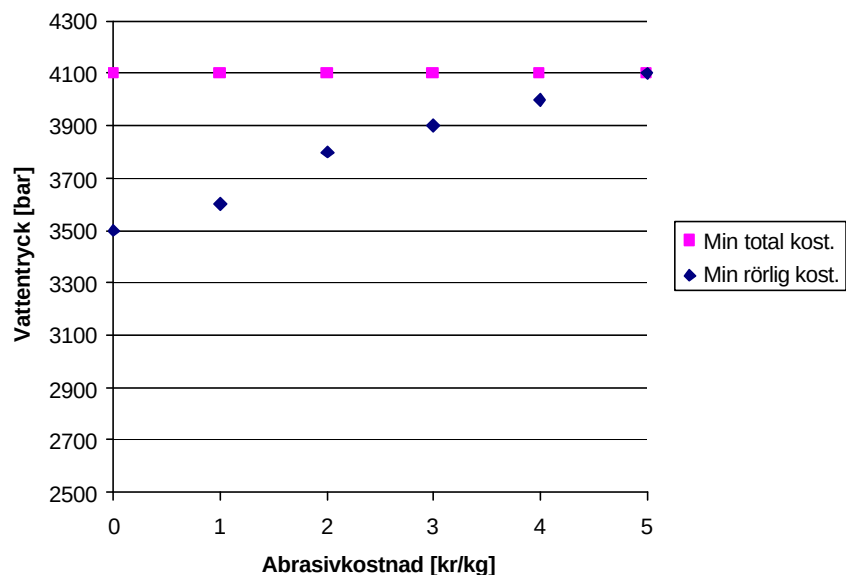
- Kortast skärtnid kommer alltid att ges av max tryck
- Lägsta total kostnad erhålls vid max tryck
- Lägsta rörlig vid ett högt tryck, i intervallet 3800-4000 bar

Orsaken till att trycket inte väljs lägre ens vid optimering av rörlig kostnad är att lägre tryck ger högre abrasivkostnad i kr/m p g a den lägre skärhastigheten.



Figur 6.5: Tryckets påverkan på kostnader samt skärhastighet.

Även rekommenderad trycknivå kommer att ändras utifrån abrasivkostnaden, för strategin lägsta rörlig kostnad. Förklaringen ligger i att det höga tryckets relativa fördel (högre hastighet) får mindre inverkan. Det vill säga underhållskostnaden för pumpen blir vid låga abrasivkostnader viktigare. Detta åskådliggörs i figur 6.6.



Figur 6.6: Rekommenderat tryck för optimeringsfallen lägsta kostnad (rörlig eller total) som funktion av abrasivmedelskostnaden.

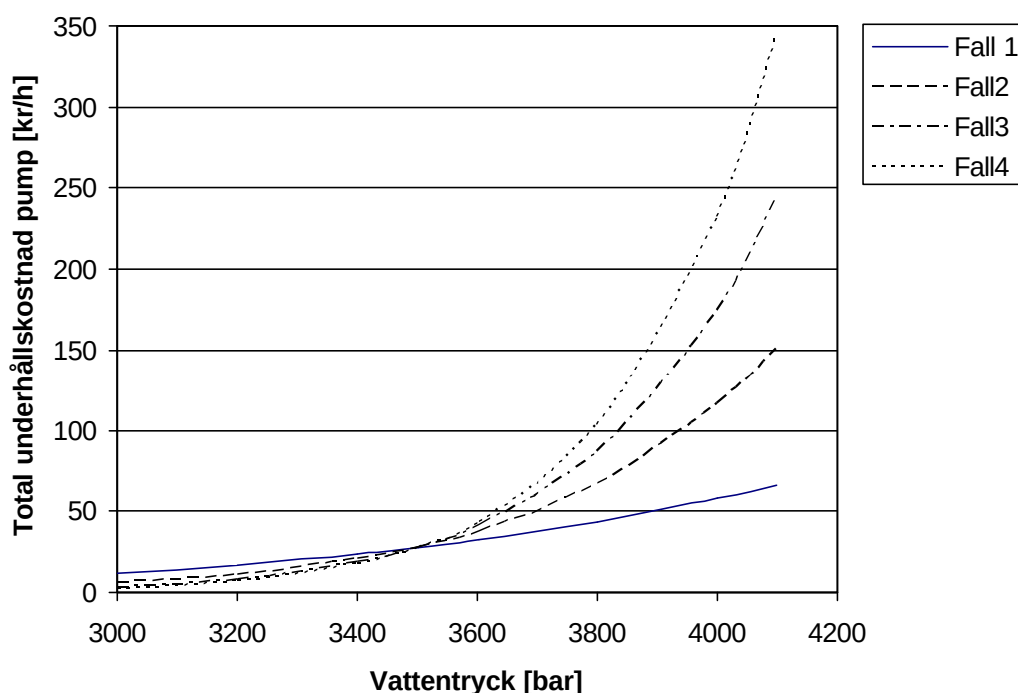
För att klargöra hur pumpunderhållskostnaden inverkar på rekommenderat tryck utfördes nedanstående analys, se tabell 6.6.

- Kostnaden vid trycket 3500 bar hölls konstant
- Kostnaden vid 4000 bar ökades i 3 steg (fyra fall).
- Intervallet mellan servicetillfällena minskades motsvarande vid 4000 bar, vilket resulterar i högre arbets- och driftstoppkostnad i kr/h.

Den totala underhållskostnaden för pumpen visas grafiskt för de fyra fallen i figur 6.7. Resultatet av analysen åskådliggörs i tabell 6.7. Man kan alltså säga att fall 2 till 4 försöker simulera pumpar av äldre modell eller med fler än 10 000 driftstimmar.

Tabell 6.6: Inställningar för att analysera hur en högre pumpunderhållskostnad påverkar rekommenderat tryck

		Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
3500 bar	Serviceintervall [h]	500	500	500	500
	Reservdelskostnad [kr/h]	12	12	12	12
	Arbets & driftstoppkostnad [kr/h]	16	16	16	16
	Total pumpunderhållskostnad [kr/h]	28	28	28	28
4000 bar	Serviceintervall [h]	240	120	80	60
	Reservdelskostnad [kr/h]	25	50	75	100
	Arbets- & driftstoppkostnad [kr/h]	33	66	100	133
	Total pumpunderhållskostnad [kr/h]	58	116	175	233



Figur 6.7 Total underhållskostnad för pumpen för de fyra fallen i tabellen ovan.

Tabell 6.7: Rekommenderat tryck för fallen beskrivna i tabell 6.6 ovan, med $\text{abrasivkostnad}=2,50 \text{ kr/kg}$

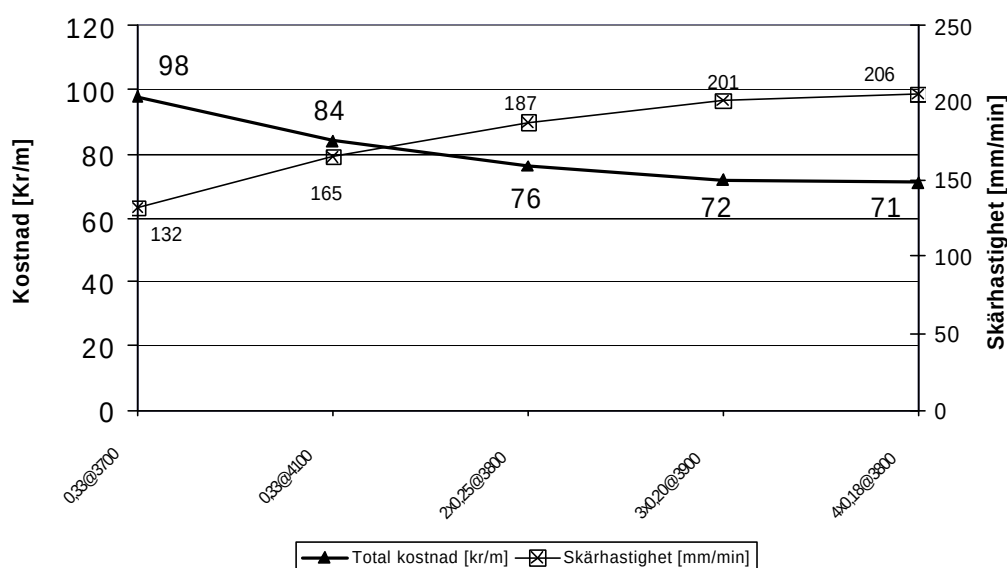
	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Lägsta total kostnad	4100	3900	3700	3700
Lägsta rörlig kostnad	3900	3500	3500	3200

6.2.3 Antal munstycken och munstycksstorlekar

Generellt kan sägas att modellen rekommenderar att använda så många munstycken som möjligt. Detta beror på den något högre skärhastighet total per meter som blir resultatet vid fler munstycken. Dock bör noteras att skillnaden är relativt liten mellan fall med olika munstycken. Det viktiga är dock att se till att utnyttja pumpens kapacitet avseende flöde så långt som möjligt. I exemplet i figur 6.8 visas hur kostnaden ändas utifrån ett fall där pumpen inte är maximalt utnyttjad.

Förutsättningarna för analysen var:

- Tillgänglig pumpeffekt: 50 hk
- Max flöde vid:
3800 Bar: 3,8 liter/min
3900 Bar: 3,67 liter/min
4000 Bar: 3,54 liter/min
4100 Bar: 3,4 liter/min
- Investering pump: 500.000 SEK
- Investering maskin: 1000.000 SEK
- Investering skärhuvud 50.000 SEK/st



Figur 6.8: Kostnad och skärhastighet för olika munstycksuppsättningar.

6.3 Tillämpning

Nedanstående möjligheter att använda den utvecklade datormodellen diskuterades före projektet. Det har under projektets gång klarnat vilka av dessa som kan anses av mest värde, vilket diskuteras för nedan.

För att analysera den egna verksamheten

Genom att använda datormodellen får man en bild av hur kostnadsfördelningen för den egna verksamheten ser ut tillsammans med hur ändringar i olika delar kan påverka kostnaden och kapaciteten. Man får förslag på rekommenderade inställningar, vilka typiskt bör kunna sänka kostnaden. I de fall man ligger långt från rekommenderade inställningar ger detta en viktig indikation på t ex vilken eller vilka parametrar som man själv bör analysera närmare och troligen förändra.

Daglig drift

Före projektet fanns en ansats att försöka integrera datormodellen direkt i en CAD/CAM-programvara. Datormodellens resultat kommer dock inte att ändras avseende ekonomiskt optimala parametrar p g a olika tjocklek, material eller kvalitet. Givetvis ändras skärhastigheten, men tryck, abrasivmatning eller munstycks-konfiguration påverkas ej. En total integrering av kostnadsoptimeringen i CAD/CAM-system blir därför inte av större värde. Ej heller kommer användande av modellen parallellt med en CAD/CAM programvara, d v s som en del av beredningen att vara av större intresse, av samma skäl som ovan. Detta var också projektmedlemmarnas åsikt.

Inför investeringsbeslut

De flesta företag kommer förr eller senare till ett läge då man kan behöva uppgradera eller utvidga sin kapacitet. I datormodellen kan ansättas investeringskostnad, effekt, maxtryck och driftkostnader. Detta kan således användas för att ge en bild av vad en nyinvestering skulle ge för utökad kapacitet respektive kostnader.

I samband med att företagets allmänna förutsättningar ändras

Detta kan röra t ex att man ser en ökad eller minskad efterfrågan och avser att t ex ändra antalet arbetade timmar per år. Som tidigare nämnts kan val av optimeringsstrategi radikalt påverka resultatet.

I samband med offertarbete

I några fall har detta nämnts som ett ytterligare intressant användningsområde för programmet. Det man bör ha i åtanke är att den meterkostnad (eller timkostnad) som presenteras i modellen är en kostnad vid skärning av raksträckor. Det vill säga, man bör endast använda resultaten för att jämföra hur mycket billigare eller snabbare relativt sett man kan utföra ett jobb genom att ändra inställningarna.

7 Diskussion

Detta projekt har innefattat flera delar; industriell informationsinsamling, experimentella tester, empirisk skärdatamodellering, ekonomisk modellering och optimering. Därför får projektet ses som relativt komplext, och stor ansträngning har lagts på att knyta samman de olika delarna. Det faktum att projektet drivits som ett nätverksprojekt har starkt bidragit till att få en verklighetsförankring vilket också ökat fokus på att få fram ett användbart slutresultat.

Det viktigaste slutresultatet från projektet är den datormodell som projektmedlemmarna har fått underhandsversioner av, och efter projektet har alla en färdig version att använda. Resultat från modellen som presenterats i denna rapport är därför bara exempel på vad man kan erhålla för rekommenderade skärdata. Resultatet beror i stor utsträckning av indata, som till stor del är företagsspecifik.

Avseende användandet och giltigheten av resultat från modellen finns också därför en svårighet att ta hänsyn till, nämligen att om det finns osäkerhet eller okunskap kring vilka indata att använda, kommer resultatet att kunna bli missvisande. Användaren måste därför söka information att använda som indata, även om det givetvis anges förslag på rimliga nivåer.

Den modell för optimering som presenterats ger resultat för tre olika strategier – kortast skärtid, lägsta totalkostnad och lägsta rörliga kostnad. Som visats skiljer sig resulterande rekommenderade skärdata åt för dessa tre fall. Kortast skärtid och lägsta totalkostnad ligger närmast varandra för samtliga parametrar i inställning. Både kortast skärtid och lägsta rörliga kostnad kan ses som extremfall, och den långsiktigt mest intressanta strategin bör vara att ligga nära lägsta totalkostnad. Givetvis gör ändå den initierade användaren en kompletterande egen analys för att se om en rekommenderad inställning kan justeras för att passa de egna behoven.

Ett viktigt delresultat av detta projekt är även den skärdatamodell som tagits fram. Den har bättre överensstämmelse med experimentella resultat i parameterintervall vilka används i de Nordiska länderna, än den tidigare ofta använda modellen. Det är författarnas förhoppning att denna kan komma till praktisk användning även utanför CUT-projektets optimeringsmodell.

8 Slutsatser

Även om rekommenderade skärdata i hög utsträckning beror på indata, är det på sin plats att ge förslag på lämpliga inställningar. Ligger man långt utanför dessa, kan det hela åtminstone tjäna som en tankeväckande möjlighet till besparing att själv undersöka närmare.

Avseende abrasivmatning gäller följande rekommendationer:

- För maximal skärhastighet rekommenderas en abrasivmatning motsvarande ca 22% av vattenflödet.
- För minimal totalkostnad rekommenderas mellan 18 och 20% av vattenflödet beroende på bl a abrasivkostnaden.
- För minimal rörlig kostnad rekommenderas ett abrasivflöde av 14-16% av vattenflödet.

Vad gäller tryck måste hänsyn tas till pumpens ålder. Nedanstående rekommendationer gäller en pump av nyare modell och de första 10 000 driftstimarna:

- För maximal skärhastighet rekommenderas alltid högsta möjliga tryck hos utrustningen.
- För minimal totalkostnad rekommenderas ett tryck på eller strax under maxtrycket.
- För minimal rörlig kostnad rekommenderas ett tryck på ca 3800-4000 bar i det fall maxtrycket är 4100 bar.
- Modellen kommer att ta hänsyn till maximal tillgänglig effekt vilket kan göra att den går ner i tryck.

För pumpar av äldre modell kan mycket väl lägre tryck bli optimala. Enligt analysen presenterad i denna rapport måste dock kostnadsbilden för pumpunderhåll ändras markant för att ge rekommendation om väsentligt sänkt tryck.

Antal munstycken har visat sig spela en relativt liten roll både vad gäller hastighet och kostnad. Antalet munstycken får därför väljas med viss omsorg, och till exempel ta i beaktande ökade omställningstider för maskinen och effektivt utnyttjande av plåtmateriäl. Modellen kommer som regel att rekommendera så många munstycken som möjligt. Men skillnaderna är relativt små, så länge pumputnyttjandet är det samma. Det är också viktigt i alla avseenden att pumputnyttjandet är högt vad gäller flöde.

Projektets måluppfyllelse får anses vara god. Det finns en färdig modell att använda för optimering av skärdata. Projektmålet var en besparing av kostnader på 5-10 %. De exempel som visats ligger på mellan 10-25 %. Som också visats kan det ofta vara så att inställningar för minimal total kostnad ger högre skärhastighet än tidigare använda inställningar. I sådant fall kan man potentiellt även nå en högre intäkt.

Under projektets slutskede har följande intressanta idéer till fortsatt arbete kommit upp:

- Ytterligare förfining av ekonomisambanden. Komplexitetsnivån har valts efter genomförbarhet i projektet, och det finns möjlighet att gå vidare inom t ex hur parameterinställningar påverkar driftskostnaderna.
- Vidareutveckling av skärdatasambandet, t ex avseende funktionen för kvalitetsindex, och dess koppling till tjocklek och material.

9 Referenser

Brandt, S., Maros, Z., Monno, M.: "AWJ Parameters Selection: a Technical and Economical Evaluation" Proceedings of the 15th International Conference on Water Jetting, Ronneby, Sweden, 2000

Capello, E., Monno, M., Polini, W., Semeraro, Q.: "AWJ Machining: Surface Quality as a Constraint" Proceedings of the 13th International Conference on Jetting Technology, Sardinia, Italy, 1996

Hashish, M.: "A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive-Waterjets" Journal of Engineering Material and Technology, ASME Transactions, Vol. 106, no. 1, pp. 88-100, January, 1984

Henning, A., Westkämper, E., Jarchau, M.: "Analysis of cutting performance of high power abrasive water jets" Proceedings of the 17th International Conference on Water Jetting, Mainz, Germany, 2004

Hoogstrate, A.M.: "Modelling of the abrasive waterjet cutting process in a modular way" Proceedings of the 16th International Conference on Water Jetting, Aix-en-Provence, France, 2002

Hägglund, S.: "Global Optimization of Cutting Processes", Licentiatuppsats, Institutionen för produkt- och produktionsutveckling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2002.

Ranney, W. A.: "Waterjet abrasives: Evaluating cost analysis procedures" Proceedings of the 8th American Waterjet Conference, WJTA, Houston, USA, 1995

Singh, P. J., Munoz, J.: "Cost optimization of abrasive waterjet cutting systems" Proceedings of the 7th American Waterjet Conference, WJTA, Seattle, USA, 1993

Zeng, J., Kim, T.: "Parameter Prediction and Cost Analysis in Abrasive Waterjet Cutting Operations", Proceedings of the 7th American Waterjet Conference, WJTA, Seattle, USA, 1993.

Zeng, J., Munoz, J.: "Optimization of Abrasive Waterjet Cutting –The Abrasive Issues" Technical paper reprinted from the conference on Waterjet Machining Technology, Society of Manufacturing Engineers (SME), Chicago, USA, 1994

Zeng, J., Olsen, J. och Olsen, C.: "The Abrasive Waterjet as a Precision Metal Cutting Tool", Proceedings of the 10th American Waterjet Conference, WJTA, Houston, USA, 1999

10 Bilagor

Bilaga 1: Försöksuppställningar

Bilaga 2: Indata till beräkningar gjorda i optimeringsmodellen

Bilaga 1: Försökssuppställningar

Notera: Vid samtliga försök har skärhuvud av typen KMT Autoline använts.

Abrasivmatning

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
350	0,254	0,762	250	1,78	0,140	140	79	0,92	1	1	13,8
350	0,254	0,762	300	1,78	0,169	140	79	0,92	1	1	17,0
350	0,254	0,762	350	1,78	0,197	140	79	0,92	1	1	18,0
350	0,254	0,762	400	1,78	0,225	140	79	0,92	1	1	17,7
350	0,254	0,762	450	1,78	0,253	140	79	0,92	1	1	18,0
350	0,254	0,762	500	1,78	0,281	140	79	0,92	1	1	18,5
380	0,254	0,762	250	1,86	0,135	140	79	0,92	1	1	18,3
380	0,254	0,762	300	1,86	0,162	140	79	0,92	1	1	19,3
380	0,254	0,762	350	1,86	0,189	140	79	0,92	1	1	20,0
380	0,254	0,762	400	1,86	0,216	140	79	0,92	1	1	20,5
380	0,254	0,762	450	1,86	0,243	140	79	0,92	1	1	21,3
380	0,254	0,762	550	1,86	0,296	140	79	0,92	1	1	19,7
398	0,254	0,762	250	1,90	0,132	140	79	0,92	1	1	19,0
398	0,254	0,762	300	1,90	0,158	140	79	0,92	1	1	20,7
398	0,254	0,762	350	1,90	0,184	140	79	0,92	1	1	21,7
398	0,254	0,762	400	1,90	0,211	140	79	0,92	1	1	22,2
398	0,254	0,762	450	1,90	0,237	140	79	0,92	1	1	21,3
398	0,254	0,762	550	1,90	0,290	140	79	0,92	1	1	21,3

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
350	0,254	0,762	250	1,78	0,140	35	79	0,92	1	1	47,7
350	0,254	0,762	300	1,78	0,169	35	79	0,92	1	1	48,0
350	0,254	0,762	350	1,78	0,197	35	79	0,92	1	1	49,3
350	0,254	0,762	400	1,78	0,225	35	79	0,92	1	1	50,7
350	0,254	0,762	450	1,78	0,253	35	79	0,92	1	1	48,7
350	0,254	0,762	500	1,78	0,281	35	79	0,92	1	1	51,0
380	0,254	0,762	250	1,86	0,135	35	79	0,92	1	1	50,5
380	0,254	0,762	300	1,86	0,162	35	79	0,92	1	1	53,0
380	0,254	0,762	350	1,86	0,189	35	79	0,92	1	1	53,0
380	0,254	0,762	400	1,86	0,216	35	79	0,92	1	1	54,5
380	0,254	0,762	450	1,86	0,243	35	79	0,92	1	1	55,7
380	0,254	0,762	550	1,86	0,296	35	79	0,92	1	1	54,3
398	0,254	0,762	250	1,90	0,132	35	79	0,92	1	1	51,0
398	0,254	0,762	300	1,90	0,158	35	79	0,92	1	1	53,3
398	0,254	0,762	350	1,90	0,184	35	79	0,92	1	1	55,0
398	0,254	0,762	400	1,90	0,211	35	79	0,92	1	1	55,7
398	0,254	0,762	450	1,90	0,237	35	79	0,92	1	1	55,7
398	0,254	0,762	550	1,90	0,290	35	79	0,92	1	1	59,8

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
320	0,356	1,1	500	3,34	0,150	225	79	0,92	1	1	15,0
320	0,356	1,1	550	3,34	0,164	225	79	0,92	1	1	15,3
320	0,356	1,1	600	3,34	0,179	225	79	0,92	1	1	17,5
320	0,356	1,1	650	3,34	0,194	225	79	0,92	1	1	17,3
320	0,356	1,1	700	3,34	0,209	225	79	0,92	1	1	18,2
320	0,356	1,1	750	3,34	0,224	225	79	0,92	1	1	17,3
320	0,356	1,1	800	3,34	0,239	225	79	0,92	1	1	17,2
350	0,356	1,1	500	3,50	0,143	225	79	0,92	1	1	18,0
350	0,356	1,1	550	3,50	0,157	225	79	0,92	1	1	18,2
350	0,356	1,1	600	3,50	0,172	225	79	0,92	1	1	19,5
350	0,356	1,1	650	3,50	0,186	225	79	0,92	1	1	19,0
350	0,356	1,1	700	3,50	0,200	225	79	0,92	1	1	20,0
350	0,356	1,1	750	3,50	0,214	225	79	0,92	1	1	20,0
350	0,356	1,1	800	3,50	0,229	225	79	0,92	1	1	19,2
370	0,356	1,1	500	3,60	0,139	225	79	0,92	1	1	18,3
370	0,356	1,1	550	3,60	0,153	225	79	0,92	1	1	19,7
370	0,356	1,1	600	3,60	0,167	225	79	0,92	1	1	21,2
370	0,356	1,1	650	3,60	0,181	225	79	0,92	1	1	21,5
370	0,356	1,1	700	3,60	0,195	225	79	0,92	1	1	21,3
370	0,356	1,1	750	3,60	0,209	225	79	0,92	1	1	19,7
370	0,356	1,1	800	3,60	0,222	225	79	0,92	1	1	19,5

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
320	0,356	1,1	500	3,34	0,150	60	79	0,92	1	1	46,3
320	0,356	1,1	550	3,34	0,164	60	79	0,92	1	1	47,7
320	0,356	1,1	600	3,34	0,179	60	79	0,92	1	1	49,7
320	0,356	1,1	650	3,34	0,194	60	79	0,92	1	1	47,8
320	0,356	1,1	700	3,34	0,209	60	79	0,92	1	1	50,0
320	0,356	1,1	750	3,34	0,224	60	79	0,92	1	1	48,5
320	0,356	1,1	800	3,34	0,239	60	79	0,92	1	1	48,7
350	0,356	1,1	500	3,50	0,143	60	79	0,92	1	1	45,3
350	0,356	1,1	550	3,50	0,157	60	79	0,92	1	1	47,3
350	0,356	1,1	600	3,50	0,172	60	79	0,92	1	1	49,3
350	0,356	1,1	650	3,50	0,186	60	79	0,92	1	1	51,7
350	0,356	1,1	700	3,50	0,200	60	79	0,92	1	1	51,3
350	0,356	1,1	750	3,50	0,214	60	79	0,92	1	1	51,5
350	0,356	1,1	800	3,50	0,229	60	79	0,92	1	1	53,2
370	0,356	1,1	500	3,60	0,139	60	79	0,92	1	1	47,2
370	0,356	1,1	550	3,60	0,153	60	79	0,92	1	1	50,5
370	0,356	1,1	600	3,60	0,167	60	79	0,92	1	1	48,0
370	0,356	1,1	650	3,60	0,181	60	79	0,92	1	1	50,0
370	0,356	1,1	700	3,60	0,195	60	79	0,92	1	1	52,0
370	0,356	1,1	750	3,60	0,209	60	79	0,92	1	1	54,7

Tjocklek

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	848	190	0,92	1	1	9,0
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	382	190	0,92	1	1	18,7
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	204	190	0,92	1	1	30,1
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	132	190	0,92	1	1	42,0
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	95	190	0,92	1	1	52,7
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	52	190	0,92	1	1	74,5
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	34	190	0,92	1	1	89,9

OBS! Nedanstående tabell utförd med metodiken att precis skära igenom materialet.
Resultaten endast använda för verifikation av tjocklekssamband i rostfritt.

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	247	79	0,92	1	1	10,5
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	117	79	0,92	1	1	20,0
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	85	79	0,92	1	1	25,5
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	47	79	0,92	1	1	35,0
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	35	79	0,92	1	1	45,0
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	22	79	0,92	1	1	61,0
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	20	79	0,92	1	1	66,0
350	0,254	0,76	300	1,78	0,169	11	79	0,92	1	1	100,0
350	0,356	1,09	600	3,50	0,172	200	79	0,92	1	1	20,0
350	0,356	1,09	600	3,50	0,172	135	79	0,92	1	1	25,5
350	0,356	1,09	600	3,50	0,172	90	79	0,92	1	1	35,5
350	0,356	1,09	600	3,50	0,172	33	79	0,92	1	1	61,0
350	0,356	1,09	600	3,50	0,172	19	79	0,92	1	1	100,0

Tryck

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
320	0,254	0,762	350	1,70	0,206	200	190	0,92	1	3	26,3
350	0,254	0,762	350	1,78	0,197	200	190	0,92	1	3	29,4
365	0,254	0,762	350	1,82	0,193	200	190	0,92	1	3	31,7
380	0,254	0,762	350	1,86	0,189	200	190	0,92	1	3	33,6
400	0,254	0,762	350	1,90	0,184	200	190	0,92	1	3	35,9

Munstyckskombination

Inställningar											Resultat
P_w [MPa]	d_w [mm]	D [mm]	$\dot{m}_a$ [g/min]	$\dot{m}_w$ [l/min]	R $= \dot{m}_a / \dot{m}_w$	v_f [mm/min]	N_m	f_a	q	# [st]	h [mm]
375	0,254	0,762	400	1,84	0,217	35	79	0,92	1	5	56,2
375	0,254	0,889	400	1,84	0,217	35	79	0,92	1	5	57,4
375	0,254	1,092	400	1,84	0,217	35	79	0,92	1	5	55,9
375	0,254	0,762	400	1,84	0,217	140	79	0,92	1	5	20,4
375	0,254	0,889	400	1,84	0,217	140	79	0,92	1	5	19,0
375	0,254	1,092	400	1,84	0,217	140	79	0,92	1	5	18,5

Bilaga 2: Indata till beräkningar gjorda i optimeringsmodellen

Visar de olika poster som kan matas in samt de inställningar som använts i de redovisade exemplen.

Post	Exempel	Enhet	Förklaring / kommentarer
Baskostnadsposter			
Investering maskin	1600	kkkr	Beror av bordstorlek mm
Investering pump	900	kkkr	Beror av pumpeffekt
Övriga fasta kostn. (tex hyra)	25000	kr/år	
Operatör	200	kr/h	Kostnad för tid vid maskin, dvs blir lägre vid delvis obemannad körning.
Avskrivningstid	5	år	
Ränta	6	%	
Antal h/år	1750	h	
Tillgänglighet	75	%	Effektiv skärtid
Abrasiv	4	kr/kg	Inklusive hantering och deponi
El	0,75	kr/kWh	
Vatten	10	kr/m ³	
Begränsningar hos utrustning			
Total pumpeffekt	100	hk	
Max tryck (3000-4100)	4100	bar	
Max antal skärhuvud	2	st	
Underhåll pump			
Reservdelskostnad - anges för en 50 hk-pump vid: 3500 bar 4000 bar	12 25	kr/h kr/h	Vidstående siffror har inhämtats från maskinleverantörer, gäller nyare pump / 10 000 h.
Intervall mellan service vid 3500 bar:	500	h	- ” -
Arbetskostnad:	4000	kr	Anges per service (för en 50-hk pump)
Driftstoppskostnad övrigt:	4000	kr	Anges per service (för en 50-hk pump)
Övrigt			
Underhåll skärbord	25000	kr/år	T ex galler, service mekanik
Abrasivmunstycken	1000	kr/st	
Livslängd abrasivmunst. vid en abrasivmatning på 300 g/min	100	h	
Vattenmunstycken	100	kr/st	
Livslängd	100	h	
Övriga delar skärhuvud,	3000	kr/år	T ex nålventil och skärhuvud, anges per skärhuvud



norden

Nordic Innovation Centre

Nordic Innovation Centre

The Nordic Innovation Centre initiates and finances activities that enhance innovation collaboration and develop and maintain a smoothly functioning market in the Nordic region.

The Centre works primarily with small and medium-sized companies (SMEs) in the Nordic countries. Other important partners are those most closely involved with innovation and market surveillance, such as industrial organisations and interest groups, research institutions and public authorities.

The Nordic Innovation Centre is an institution under the Nordic Council of Ministers. Its secretariat is in Oslo.

For more information: www.nordicinnovation.net