



CHALMERS

Interpolerad eggavrundning

Undersökning av tillverkningsprocess för eggavrundning på dubbelkrökt skärepp med hjälp av försöksplaneringsmetodik

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Mekatronik 180 hp

TOM ÅGREN

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
AVDELNING FÖR KONSTRUKTIONSMATERIAL**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

Svensk titel: Interpolerad eggavrundning
English title: Interpolated insert ER-brushing

TOM ÅGREN

© Tom Ågren, 2021

Handledare: Per Melin, Sandvik Coromant
Examinator: Christer Persson, Industri -och materialvetenskap

Examensarbete 2021: IMSX20
Avdelning för Konstruktionsmaterial
Institutionen för Industri -och materialvetenskap
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000
Göteborg, Sverige 2021

Göteborg, 2021

Abstract

Sandvik Coromant is a world-leading manufacturer of carbide cutting tools for use in machining applications in metallic materials, such as turning, milling and drilling.

Edge reinforcement (abbr. ER) is a step in the manufacturing process for cutting tools. The edge reinforcement process gives the cutting tools improved properties by machining the cutting edge to achieve desired, uniform cutting edge geometry. The purpose of the degree project is to investigate whether the edge rounding can be executed in terms suited for a real-world manufacturing environment, by brushing the cutting edge with an interpolated movement to be able to control the process with greater freedom.

The impact goal of the degree project was to make advances toward a manufacturing process, suited for a manufacturing environment, for edge rounding on cutting edges curved in multiple planes, in order to develop competitive cutting tools. These tools can be used by customers to manufacture competitive products with improved productivity and reduced environmental impact, since edge rounding prolongs tool life. A design of experiments approach was utilized to evaluate measurable effects of process parameters in a structured way. The project has identified a number of key parameters that can be used to optimize the process. Furthermore, a number of key areas are discussed where additional exploration could accelerate the pursuit for a high quality and reliable production process for edge rounding on curved cutting edges.

The degree project was carried out at Sandvik Coromant's production site in Gimo, Sweden during the spring of 2021.

Sammanfattning

Sandvik Coromant är en världsledande tillverkare av skärverktyg i hårdmetall för bland annat svarvning, fräsning och borring i metalliska material.

Eggavrundning (*eng.* "edge reinforcement", förkortning ER) är ett steg i tillverkningsprocessen för skärverktyg, vars syfte är att ge skärverktygen förbättrade egenskaper genom att bearbeta skäreppen och uppnå önskad, uniform skäreppsgeometri. Examensarbetets syfte är att undersöka om eggavrundningen kan utföras *produktionsmässigt* genom att *borsta* skäreppen med en interpolerad rörelse för att styra processen med *större frihet*.

Arbetes effektmål är att ta steg emot en produktionsmässig process för eggavrundning på dubbelkrökta eggar, för att kunna utveckla marknadsmässiga och konkurrenskraftiga skärverktyg. Skärverktygen kan därefter användas av kunder för att tillverka marknadsmässiga produkter med förbättrad produktivitet och minskad miljöpåverkan, då eggavrundningen leder till skärverktyg med längre livslängd. Genomgående under arbetets gång har försöksplanering använts för att utvärdera mätbara effekter hos processparametrar på ett strukturerat sätt. Arbetet har identifierat viktiga processparametrar som kan användas för att optimera processen. Därtill diskuteras ett antal områden där vidare utveckling kan accelerera vägen mot en högkvalitativ och produktionsmässig eggavrundning på dubbelkrökt skärepp.

Arbetet är utfört på Sandvik Coromants tillverkningsanläggning i Gimo under våren 2021.

Nyckelord: eggavrundning, edge reinforcement, ER, borstning, skärverktyg, hårdmetall, försöksplanering, fleraxlig bearbetning

Förord

Jag vill tacka Sandvik Coromant för möjligheten att genomföra mitt examensarbete hos er! Jag vill rikta ett särskilt tack till Per Melin som har varit en utmärkt handledare och till Markus Ekström för mycket praktisk hjälp. Därtill alla operatörer och övrig personal på Sandvik Coromant som har tagit sig tid och visat engagemang för detta arbete.

Vidare vill jag även tacka min examinerare Christer Persson för bra samarbete och goda råd gällande rapportskrivning och opponering.

Till sist, tack Rebecca för all uppmuntran och värdefull feedback.

Tom Ågren, Göteborg, juni 2021

Innehåll

Figurförteckning	i
Tabellförteckning	iii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Precisering av frågeställningen	2
2 Teoretisk referensram	3
2.1 Introduktion till tillverkning av hårdmetallsskär	3
2.2 Eggavrundning	4
2.3 Statistisk försöksplanering	6
3 Metod	7
3.1 Planering inför försök	7
3.1.1 Mappning av faktorer	8
3.1.2 Specifikation av borste	8
3.2 Försök på enkelkrökt egg	9
3.2.1 Generell metodbeskrivning för försök 1 - 3	9
3.2.1.1 Framtagning av CAD-modell	9
3.2.1.2 CAM-programmering	10
3.2.1.3 Bearbetning	11
3.2.1.4 Mätning	12
3.2.2 Försök 1	13
3.2.3 Försök 2	15
3.2.4 Försök 3a	17
3.2.5 Försök 3b	19
3.3 Försök på dubbelkrökt egg	21
3.3.1 Försök 4	22

4	Resultat	24
4.1	Försök 1	24
4.2	Försök 2	27
4.3	Försök 3a	30
4.4	Försök 3b	32
4.5	Försök 4	34
5	Diskussion och analys	38
6	Slutsats	40
7	Referenser	41

Figurförteckning

1	Eggavrundning uttryckt i storlek Δr och formfaktor κ	1
2	Processflöde för tillverkning av skärvertyg i hårdmetall	3
3	Mikrogeometri på skäregg	4
4	Principskiss för traditionell ER-borstning	5
5	Processsteg i experiment utförda enligt försöksplanering	6
6	Planerad arbetsgång	7
7	SMNA-150616 med mått	7
8	Fiskbensdiagram för mappning av faktorer	8
9	Generellt försökupplägg	9
10	Parametrisk CAD-modell med parametrar	9
11	Bearbetningsväg längst skäregg	10
12	Kinematisk konfiguration av 5-axlig slipmaskin	11
13	Borstningsfixtur med SNMA-skär monterat	11
14	Borstningsfixtur (Toppvy)	11
15	Mätfixtur för hörn	12
16	Mätfixtur för rak egg	12
17	Mätsnitt P1-P7 på SNMA-skär	12
18	Konkav delsträcka av dubbelkrökt skäregg	21
19	Konvex delsträcka av dubbelkrökt skäregg	21
20	Tvärsnitt för fas i CAD-modell, A - E	21
21	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 1	24
22	Replikationsplott för försök 1	25
23	Koefficientplott för försök 1	26
24	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 2	27
25	Replikationsplott för försök 2	28
26	Koefficientplott för försök 2	29
27	Replikationsplott för försök 3a	30
28	Experiment N10 innan borstning	30
29	Experiment N10 efter borstning	30
30	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3a innan exkludering av icke-signifikanta termer	31

31	Koefficientplott för försök 3a innan exkludering av icke-signifikanta termer	31
32	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3a efter exkludering av icke-signifikanta termer	31
33	Koefficientplott för försök 3a efter exkludering av icke-signifikanta termer	31
34	Replikationsplott för försök 3b	32
35	Experiment N8 innan borstning	32
36	Experiment N8 efter borstning	32
37	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3b innan exkludering av icke-signifikanta termer	33
38	Koefficientplott för försök 3b innan exkludering av icke-signifikanta termer	33
39	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3b efter exkludering av icke-signifikanta termer	33
40	Koefficientplott för försök 3b efter exkludering av icke-signifikanta termer	33
41	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 4 innan exkludering av icke-signifikanta termer	34
42	Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 4 efter exkludering av icke-signifikanta termer	34
43	Replikationsplott för försök 4	35
44	Koefficientplott för försök 4 innan exkludering av icke-signifikanta termer	36
45	Koefficientplott för försök 4 efter exkludering av icke-signifikanta termer, sorterad i effekternas storleksordning	37

Tabellförteckning

1	Faktorer i försök 1	13
2	Respons i försök 1	13
3	Testplan för försök 1	14
4	Faktorer i försök 2	15
5	Respons i försök 2	15
6	Försöksplan för försök 2	16
7	Faktorer i försök 3a	17
8	Respons i försök 3a	17
9	Försöksplan för försök 3a	18
10	Faktorer i försök 3b	19
11	Respons i försök 3b	19
12	Försöksplan för försök 3b	20
13	Faktorer i försök 4	22
14	Respons i försök 4	22
15	Försöksplan för försök 4	23

1 Inledning

1.1 Bakgrund

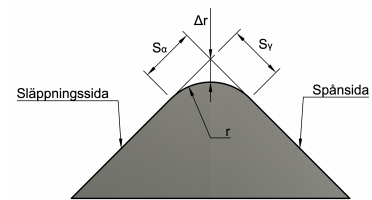
Sandvik Coromant är en världsledande tillverkare av skärverktyg i hårdmetall för bland annat svarvning, fräsning och borrar i metalliska material.

Hårdmetall är ett mycket hårt men också sprött material. Skärverktyg för metallbearbetning tillverkas ofta i hårdmetall eftersom materialet har mycket god slittålighet, vilket bidrar till hög produktivitet i processen som skärverktyget används i.

Eggavrundning (*eng.* "edge reinforcement", förkortning ER) är ett steg i tillverkningsprocessen för skärverktyg, vars syfte är att ge skärverktygen förbättrade egenskaper genom att bearbeta skäreppen och uppnå önskad, uniform skäreppsgeometri. En metod för att bearbeta eggen är borstning. [1]

Under borstningen ökar eggradien och ytfinheten. En ökad eggradie leder till ökad slittålighet och en starkare egg men leder också till ökad skärkraft. Optimal eggavrundning är en avvägning mellan skärkraftkrav och slittålighet. [1]

Eggavrundningen kan beskrivas med ett antal variabler. r och Δr beskriver storleken på avrundningen. Formfaktorn κ är ett förhållande mellan radiens storlek på släppningssidan (engelska flank face) S_α och spånsidan (engelska rake face) S_γ .



Figur 1: Eggavrundning uttryckt i storlek Δr och formfaktor κ

1.2 Syfte

Borstningen sker traditionellt genom att föra skäreppen mot en roterande borste samtidigt som skäreppen roteras kring sin egen centrumlinje. Metoden har dock begränsningar i precision och repeterbarhet av form och storlek på skäreppförstärningen på mikronivå.

Examensarbetets syfte är att undersöka om eggavrundningen kan utföras *produktionsmässigt* genom att *borsta* skäreppen med en interpolerad rörelse för att styra processen med *större frihet*.

Genom att interpolera borstens matningsrörelse i relation till skärvertyget är avsikten att kunna styra avverkningen för att uppnå en uniform avrundning längs skäreppen. Teknologin finns sedan tidigare på ett konceptstadium och målsättningen är att höja dess *manufacturing readiness level*, MRL.

Produktionsmässigt innebär, utöver att processen repeterbart kan producera en eggavrundning inom tolerans, att

- borstningsprocessens cykeltid ligger i linje med övriga processteg
- hög utnyttjandegrad och livslängd på borstverktyg för minimerade tillgänglighetsförluster till följd av borstbyte samt minimerade direktkostnader för färdig produkt
- processen går att automatisera till hög grad

Arbetes effektmål är att ta steg emot en produktionsmässig process för eggavrundning på dubbelkrökta eggar, för att kunna utveckla marknadsmässiga och konkurrenskraftiga skärverktyg. Skärverktygen kan därefter användas av kunder som kan tillverka marknadsmässiga produkter med förbättrad produktivitet och minskad miljöpåverkan, då eggavrundningen leder till skärverktyg med längre livslängd.

1.3 Avgränsningar

Arbetet begränsas till

- Specifik specifikation av avrundning
 - Storlek $r = 50 \mu m, \pm 5 \mu m$
 - Form $\kappa = 1.0$
- Utvärdering av olika borstvarianter och leverantörer undersöks inte, enbart filamentdiameters inverkan.
- Borstförslitning mäts men endast under andra tester, vilket enbart ger en uppskattning.
- Variation av avrundningens storlek och form till följd av variation i inkommande material undersöks inte.
- Variation av den resulterade avrundningens storlek till följd av repeterbarheter i maskin tas inte hänsyn till, effekten bedöms mycket låg.
- Produktionsmässighet (cykeltid, tillgänglighetsförluster kopplat till verktygsbyte etc) tas hänsyn till under arbetet men kan inte utvärderas i rapport. Istället presenteras matningshastighet, vilket kan användas för att approximera cykeltid, och uppskattad borstförslitning, vilket kan användas för att approximera vertygsbytesintervall.

1.4 Precisering av frågeställningen

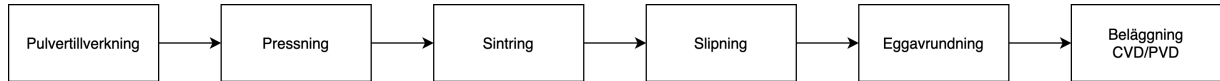
Utifrån målet preciseras följande frågor som ska utredas:

- Hur påverkar de identifierade processparametrarna eggavrundningen på rak och enkelkrökt egg?
- Uppskattning av borstförslitning
- Kan friheten i borstprocessen förbättras genom att optimera processparametrarna, såsom ingreppsvinklar, på en enkelkrökt egg med repeterbarhet?
- Går samma processprincip att tillämpa på en dubbelkrökt egg?

2 Teoretisk referensram

2.1 Introduktion till tillverkning av hårdmetallskär

I figur 2 presenteras en översikt över processtegen i tillverkningen av skärverktyg i hårdmetall.



Figur 2: Processflöde för tillverkning av skärverktyg i hårdmetall

Tillverkning av hårdmetallskär inleds genom att pulvermetallurgiska ämnen framställs. Hårdmetallen består till cirka 80% av volframkarbid och till cirka 20% av andra metaller såsom kobolt, som fungerar som ett bindemedel mellan de hårda volframkarbidkornen. Råmaterialen vägs och sammanblandas, varpå hjälpämnen såsom etanol, vatten och ett organiskt bindemedel tillsätts. Metallpulverblandningen mals till en så kallad pulverslamma som sedan spruttorkas. Blandningen mals under 8 till 55 timmar [2]. Processen resulterar i ett metallpulver bestående av finfördelade, homogena sfäriska granulpartiklar.

Det framställda pulvret formpressas i en pressform för att forma ämnen med önskad geometri. Upp till 12 ton appliceras under kompakteringen [2]. De pressade ämnena kallas för *grönkroppar* och hålls samman av bindemedlet som tillsattes under malningen. Grönkropparna är sköra och har en hårdhet som kan liknas vid krita.

Grönkropparna sintras för att sammanfoga de enskilda partiklarna till ett homogent hårdmetallämne. Sintringsprocessen sker under hög temperatur, cirka 1500°C, och tar cirka 13 timmar. [2]. Under processen krymper ämnena ungefär 50% i volym, vilket motsvarar ungefär 18 % i samtliga dimensioner [3]. Sintrad volframkarbid är extremt hårt, nästan lika hårt som diamant [2].

De råa sintrade hårdmetallämnena slipas för att uppnå önskad makrogeometri. Slipningen sker ofta i flera steg. Som tidigare nämnt är hårdmetallämnena extremt hårda, vilket ställer höga krav på slipskivor. Ofta används diamant som abrasivt ämne.

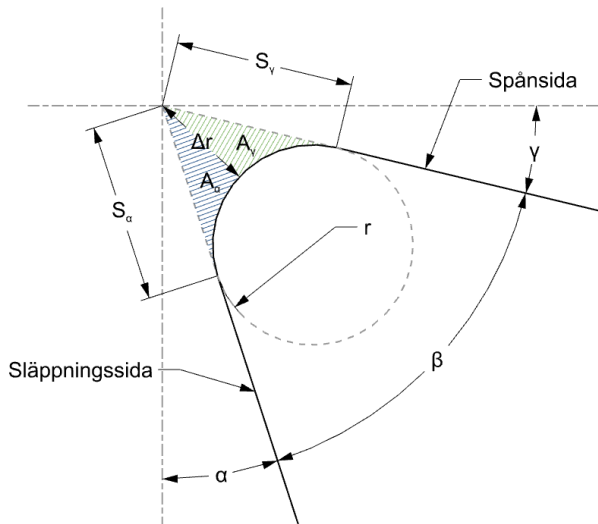
När önskad makrogeometri uppnåtts genom slipning sker eggavrundning för att uppnå önskad mikrogeometri. Detta beskrivs mer ingående i avsnitt 2.2 nedan.

Majoriteten av hårdmetallskären som tillverkas beläggs för att ytterligare öka hårdhet och slitstyrka. Beläggningen kan vidare leda till förbättrade värmeförmågens egenskaper och en smörjande effekt, vid exempelvis torr bearbetning[4]. Beläggningen kan ske genom två olika processer, PVD eller CVD. PVD står för *Physical Vapor Deposition* och kan översättas till fysikalisk ångdeponering. PVD-beläggning är mycket tunn, 2-6 μm , och appliceras vanligtvis på skär med vassa, skarpa skäreppor.[3, s. H26]. PVD-beläggning är vanligt på skärverktyg som används i finbearbetande applikationer. CVD står för *Chemical Vapor Deposition* och översätts till kemisk ångdeponering. CVD-beläggning är oftast tjockare, 2-20 μm , och är lämplig i grövre applikationer. CVD-beläggning bildas genom kemiska reaktioner i hög temperatur, mellan 750 - 1500 °C. PVD-beläggning bildas under något svalare förhållanden, mellan 400-600 °C[3, s. H27].

2.2 Eggavrundning

Ett skärverktygs prestanda beror till stor del på dess geometri. Utöver *makrogeometrier*, såsom spånvinklar, släppningsvinklar och spånbrutningsdetaljer, har skäreggens *mikrogeometri* en betydande roll i skärets slittållighet och skärkraftskrav.

Skäreggens geometri kan beskrivas med ett antal parametrar. Dessa parametrar presenteras i figur 3 nedan.



Figur 3: Mikrogeometri på skäregg

Skäreggens makrogeometri beskrivs ofta genom tre vinklar, spånvinkeln γ , kilvinkeln β och släppningsvinkeln α .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (1)$$

Parametrar för beskriva skäreggens mikrogeometri är standardiserade i standarden VDI/VDE 2654, del 2. r är skäreggens radie. Δr beskriver det kortaste avståndet mellan skäreggens radie och skärningspunkten där spånsidan och släppningssidan kolinjärt möts. S_α och S_γ är avståndet mellan skärningspunkten och punkten där radien möter släppningssidan respektive spånsidan.

Skäreggens form kan beskrivas genom förhållandet mellan S_α och S_γ . Detta förhållande betecknas κ och beräknas genom ekvation 2.

$$\kappa = \frac{S_\gamma}{S_\alpha} \quad (2)$$

En helt rund skäregg har således formfaktor $\kappa = 1$.

Ett annat sätt att beskriva eggens form är genom formfaktorn κ_a som är ett förhållande mellan de areor som spänns upp mellan linjen som utgör Δr och S_α respektive S_γ .

$$\kappa_a = \frac{A_\gamma}{A_\alpha} \quad (3)$$

κ_a är en mer robust mätparameter än κ eftersom små inpassningsfel av egggradien under mätning förstärks mer av κ än κ_a [5].

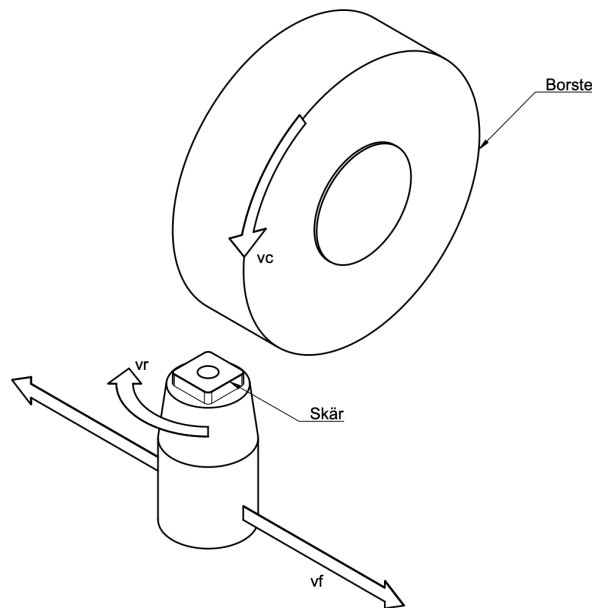
Under användning utsätts skärebben för stora skärkrafter och höga temperaturer. Skärkrafter som motsvarar vikten av en personbil och temperaturer runt 1000°C i skärzonen är inte sällsynt [3]. Extremt vassa skäreppor kan inte uppfylla dessa krav och har således mycket kort livslängd [1].

Vidare kan små defekter uppstå längs skäreppen under slipprocessen när skären tillverkas. Defekterna, som kan liknas vid urflisningar, kan bland annat bero på att hela karbidkorn slits loss ur bindemedlet [1].

För att uppnå önskad mikrogeometri bearbetas därför skäreppen under skärverktygets framställning i ett processteg som benämns eggavrundning. Under eggavrundningen får skäreppen en jämn och uniform avrundning med lämplig storlek och form. Eggavrundning måste inte nödvändigtvis utföras helt rund, $\kappa = 1$.

Eggavrundning kan utföras med ett antal olika bearbetningsprocesser, bland annat genom borstning och blästring [1].

En traditionell tillverkningsmetod för eggavrundning beskrivs i figur 4. Eggen avrundas genom att en borste borstar skäreppen, samtidigt som skäret förflyttas i sidled och roterar kring sin egen axel. Processprincipen är skalbar men är begränsad i noggrannhet. Exempelvis tenderar eggavrundningen bli kraftigare på hörn än på raka kanter.



Figur 4: Principskiss för traditionell ER-borstning

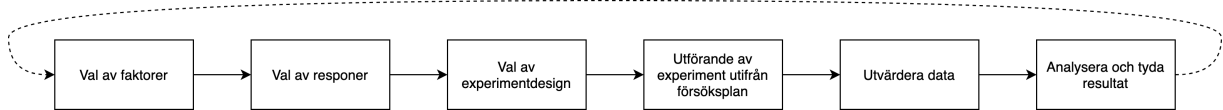
Blästring går också att använda för att producera eggavrundning men är begränsad i hur stor avrundning som går att producera.

Eggavrundning kan ha mycket stor inverkan på skärverktygets livslängd. I en svarvingsapplikation kan exempelvis en stor avrundning mot släppningssidan ($S_\alpha \gg S_\gamma \Rightarrow \kappa \ll 1$) reducera skärverktygets livslängd med en faktor 4. I gengäld kan en liten avrundning mot spånsidan fördubbla verktygets livslängd [6].

En ökad eggradie leder till ökad slittålighet och en starkare egg men leder också till ökad skärkraft under användning. Optimal eggavrundning är en avvägning mellan skärkraftskrav och slittålighet samt materialegenskaper hos materialet som bearbetas med verktyget. I skärapplikationer i stål utförs eggavrundning med en radie runt $\Delta r = 10 - 30 \mu m$ [1].

2.3 Statistisk försöksplanering

Försöksplanering (engelska *design of experiment*, förkortas DOE) är en metodik och en samling statistiska verktyg för att planera, utföra och analysera experiment. Försöksplanering används inom såväl utveckling av nya processer och produkter som vid förbättringsarbete [7]. Genom att variera ett antal identifierade **faktorer** som antas påverka ett mätbart resultat, en **respons**, för en process eller produkt, kan faktorernas effekt på responsen kartläggas. Försöksplaner där flera faktorer varieras under samma test är ett centralt koncept inom försöksplanering och medför ett antal fördelar. Dels kan både faktorernas individuella effekter identifieras men även samverkans effekter mellan de olika faktorerna [8, s. 4]. Dessutom kan färre experiment utföras jämfört med om enbart en faktor utreds åt gången [8, s. 183].



Figur 5: Processsteg i experiment utförda enligt försöksplanering

Experiment kan utföras i olika syften; **screening** görs för att bygga förståelse för faktorernas inverkan på responsen medan **optimering** görs för att identifiera optimala faktorförhållanden för att uppnå en specifik respons.

En **försöksplan** upprättas genom att använda en **försöksplansdesign** som beskriver hur faktorerna ska varieras under ett antal försök. En testplan kan innehålla flera responsvärden som utvärderas utifrån samma testplan. Olika försöksplansdesigner är olika lämpliga för screening respektive optimering. Det finns ett stort antal försöksplansdesigner, där fullfaktorförsök, reducerat faktorförsök, L-design och CCO är några.

Efter att alla försök i en försöksplan är genomförda utförs **regressionanalys** för att skapa en matematisk funktion som beskriver den observerade datan. Regressionsmodellen kan generellt tecknas på följande form.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_2 x_1^2 + \dots + e \quad (4)$$

y är responsvärdet, x -termerna är de olika faktorerna. $x_1 x_2$ är ett exempel på en sambandsfaktor. x_1^2 är en kvadratterm. β -värdena är koefficienter. e är modellens felterm.

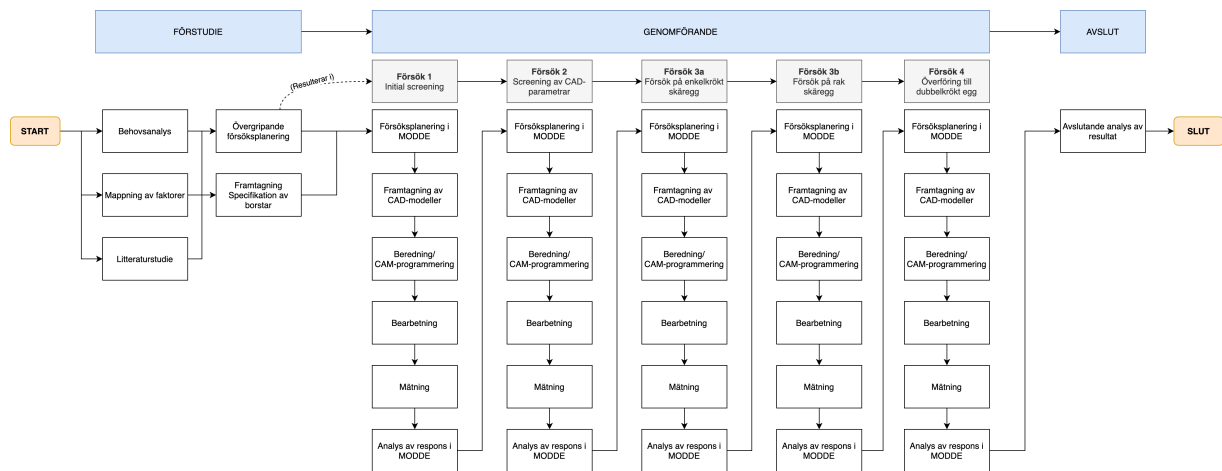
För att utvärdera hur väl regressionsmodellen beskriver sambandet mellan faktorerna och responsvärdet kan ett antal test användas.

R^2 kallas på engelska "*Goodness of fit*" och kan översättas till **förklaringsgrad**. R^2 beskriver hur träffsäker modellen är och är ett mått på hur väl regressionsmodellen är anpassad till de råa mätvärdena ($R^2 \in [0, 1]$). En brist är dock att R^2 beror på antalet termer i regressionsmodellen och kan därför optimeras till den grad att regressionsmodellen enbart beskriver just de uppmätta värdena.

Q^2 beskriver "*Goodness of prediction*" och kan översättas till **prediktionsgrad**. Prediktionsgraden benämns i viss litteratur som R^2_{pred} [9]. Q^2 är ett mått på regressionsmodellens generaliserbarhet, med andra ord hur väl modellen predikterar utfallet för förhållanden som inte undersökts ($Q^2 \in (-\infty, 1]$). [7].

3 Metod

Arbets arbetsgång presenteras i figur 6 nedan.

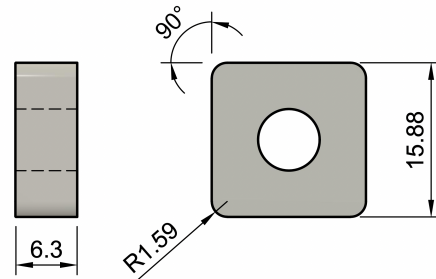


Figur 6: Planerad arbetsgång

3.1 Planering inför försök

En **övergripande försöksplan** togs fram under förstudien. För att minska antalet okända faktorer samt förbättra tillgången till testdetaljer valdes att utföra initiala test på enkelkrökt geometri. Valet av testdetalj med enkelkrökt egg föll på en skärplattan SMNA-150616 (obelagd) då detaljens dimensioner går att jämföra med de dubbelkrökta eggarna samt god tillgång. I figur 7 presenteras SMNA-150616 med mått. För att underlätta försöksplaneringen beslutades att använda en försöksplaneringsmjukvara, Umetrics MODDE.

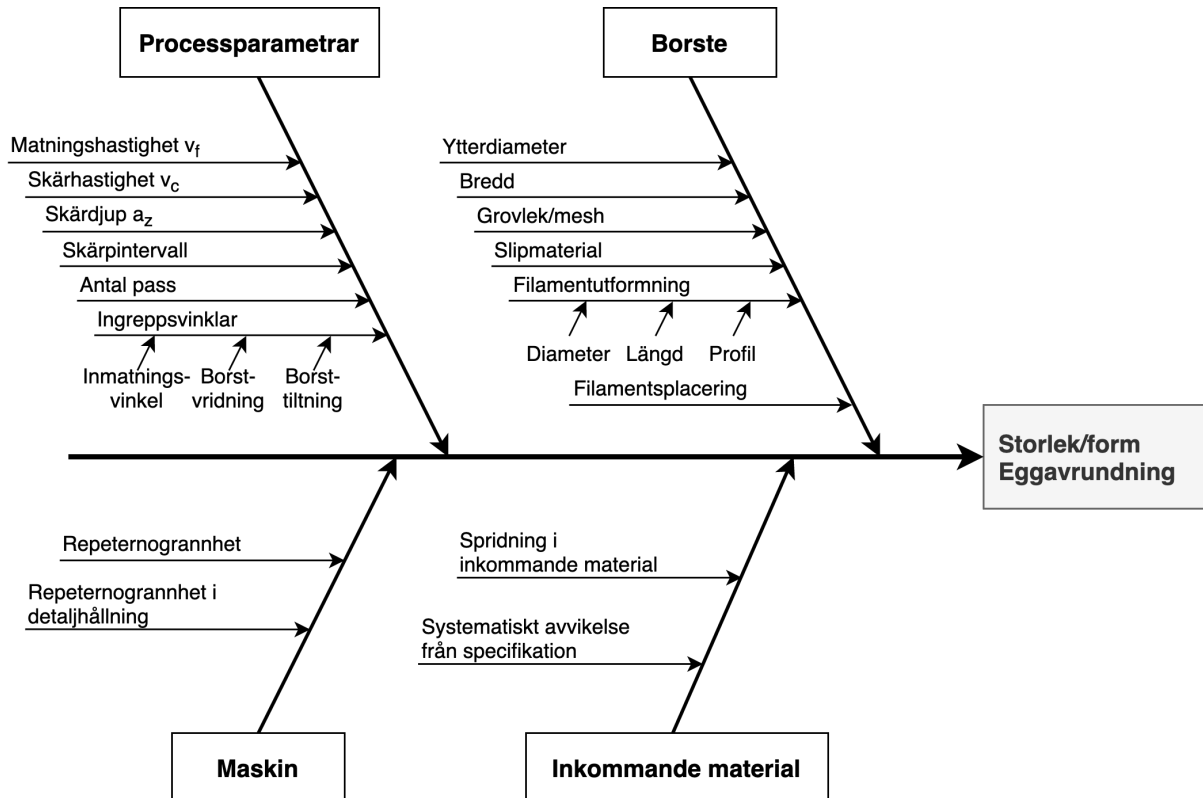
Arbetet inleddes med en **behovsanalys** för att förstå bakgrund, arbetets syfte, för att kunna sätta avgränsningar samt kunna precisera frågeställningar. Analys gjordes genom samtal med handledaren.



Figur 7: SMNA-150616 med mått

3.1.1 Mappning av faktorer

Mappning av faktorer sammanställdes i ett *fiskbensdiagram* som presenteras i figur 8 nedan. Faktorer identifierades dels under samtal med handledaren, men även utifrån resultat från de vetenskapliga artiklar som samlades in under litteraturstudien.



Figur 8: Fiskbensdiagram för mappning av faktorer

3.1.2 Specifikation av borste

Specifikation för borste togs fram genom att analysera de faktorer för borstar som mappats upp i fiskbensdiagrammet och väga dessa mot de önskade effekterna gällande produktionsmässighet och ökad frihet i processen. Specifikation gjordes tidigt under arbetet för att leverans av borstar skulle ske innan bearbetningstester behövde påbörjas.

En ideal borste bör bland annat ge en hög avverkningshastighet men även lämna accepterbar ytfinhet, ha små dimensioner för att ge god åtkomst till komplexa eggeometrier och ha lång livslängd för att maximera maskinens tillgänglighet.

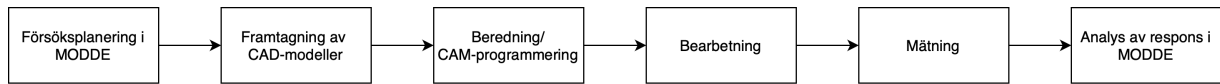
Lämpliga värden för ytterdiameter, slipmedel och grovlek valdes utifrån uppdragsgivarens tidigare erfarenhet. Filamentsdiametern identifierades som en viktig parameter för påverkan av form och valdes ut till en fri variabel. Borstens bredd minimerades för att förbättra åtkomsten och valdes i samråd med leverantör.

	Borste 1	Borste 2	Borste 3
Filamentdiameter	0.5 mm	0.4 mm	0.3 mm

3.2 Försök på enkelkrökt egg

3.2.1 Generell metodbeskrivning för försök 1 - 3

Samtliga försök på enkelkrökt egg följer samma övergripande upplägg som presenteras i figuren 9 nedan. I de följande avsnitten preciseras stegens innehåll.



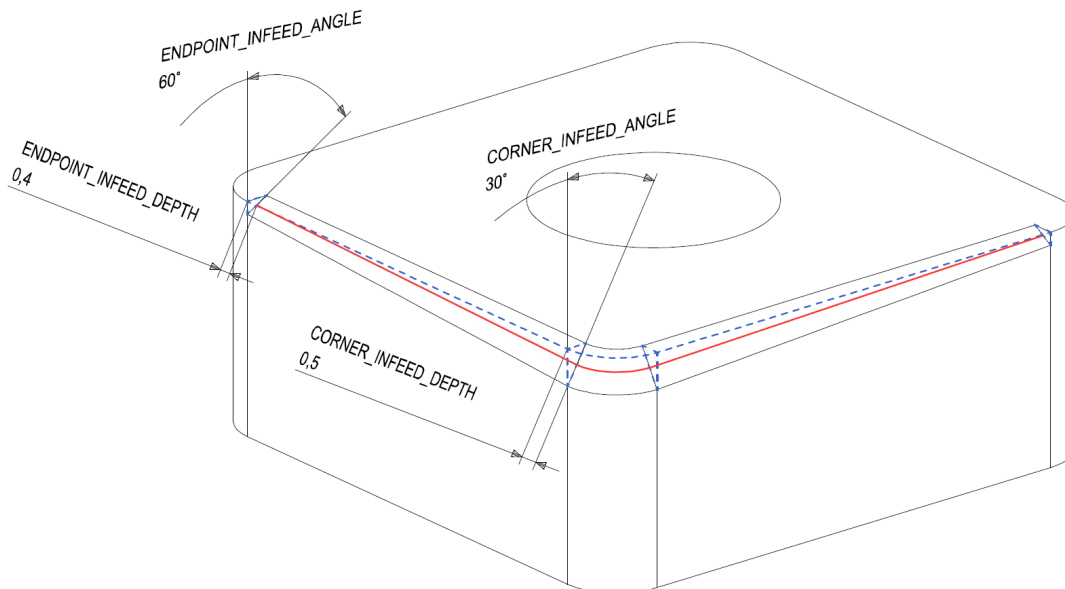
Figur 9: Generellt försökupplägg

3.2.1.1 Framtagning av CAD-modell

En parametrisk CAD-modell togs fram för att enkelt kunna generera CAD-modeller med olika fasgeometrier. En fas ritas in då CAM-programvaran programmeras genom att välja kanter i en CAD-modell som sedan följs. I figur 10 presenteras de fyra olika parametrarna i förhållande till geometrin.

- ENDPOINT_INFEED_DEPTH Inmatningsdjup vid ändpunkterna av bearbetningsvägen
- ENDPOINT_INFEED_ANGLE Inmatningsvinkel vid ändpunkterna av bearbetningsvägen
- CORNER_INFEED_DEPTH Inmatningsdjup vid tvärsnitten precis innan/efter hörn
- CORNER_INFEED_ANGLE Inmatningsvinkel vid tvärsnitten precis innan/efter hörn

För att kunna ändra inmatningsdjup och inmatningsvinkel längs skäreggen så modellerades fasen genom att rita tvärsnitt längst eggen. Dessa tvärsnitt är markerade som fyra blå, streckade trianglar i figur 10 och användes för att modellera ett svept urtag längst skäreggen. Den röda linjen i figuren är den kurva som sedan används i CAM-programvaran för att styra borstens bearbetningsväg.



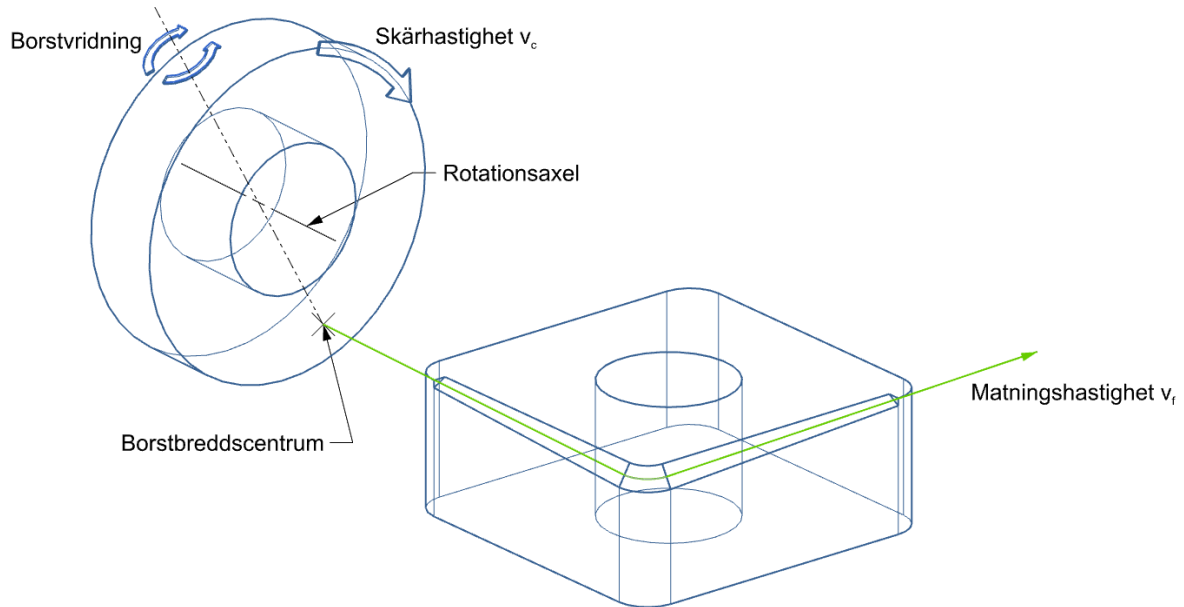
Figur 10: Parametrisk CAD-modell med parametrar

För att enkelt kunna skapa olika modeller utifrån samma grundmodell med olika storlek och vinklar på fasen användes en familjetabell. Individuella modeller genererades sedan automatiserat utifrån familjetabellen och konverteras till *.step-format med hjälp av ett Pythonskript.

3.2.1.2 CAM-programmering

För att översätta linjen mitt på fasen i CAD-modellen som borsten ska borsta längs till instruktioner som slipmaskinens styrsystem kan interpretiera användes en CAM-programvara.

I CAM-programvaran importeras de genererade CAD-modellerna och önskad verktygsväg väljs i CAD-geometrin. Verktygsväg är markerad med grön linjefärg i figur 11. Borsten modelleras i CAM-programvaran genom att mata in ytterdiameter, bredd och filamentslängd. Vidare väljs önskad skärhastighet och matningshastighet.



Figur 11: Bearbetningsväg längst skäregg

Borstningen sker med rotationsriktning mot spånsidan på skäret enligt figur 11.

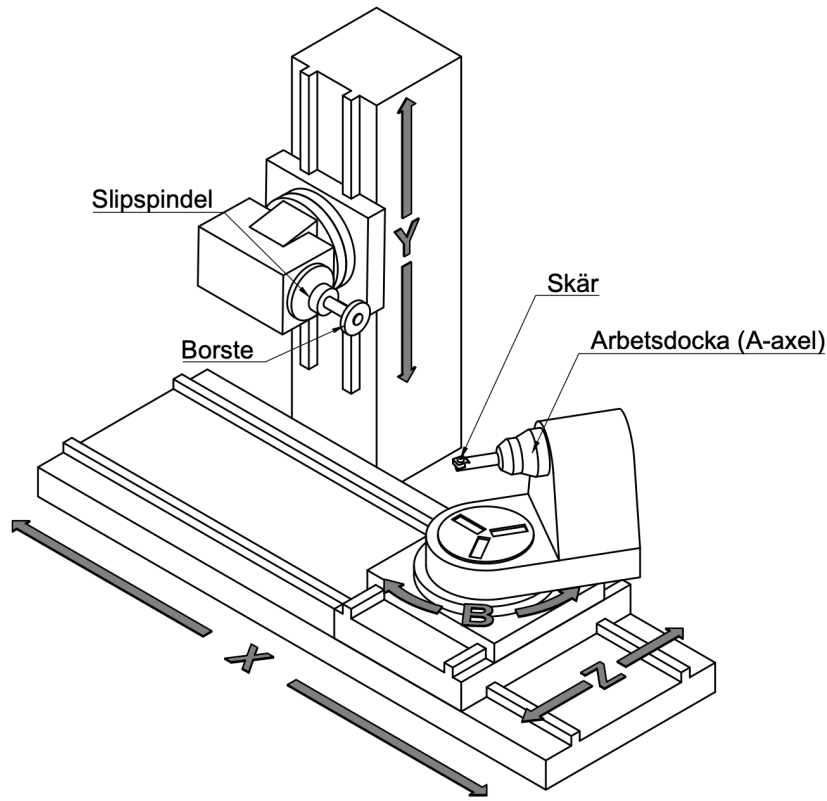
Utöver geometri och hastigheter kan även borstbreddscentrum och borstvridning väljas. Borstbreddscentrum är den punkt på borstens bredd som används för att interpolera borstens position gentemot skäreppen. Parametern anges som procentsats av borstens totala bredd. Borstvridning är borstens vridning kring axeln som utgörs av normalen till borstvägens vektor och är centrerad i borstbreddscentrum.

Till sist kan bearbetningsvägen förlängas i skäreppens riktning innan och efter för att säkerställa att hela eggen är i kontakt med borsten lika mycket.

Borstens väg längs skäreppen programmeras på sådant sätt att borstens ytterdiameter förs längs verktygsvägen med centrum i borstbreddscentrum, tangentellt mot det undre planet som fasen utgörs av.

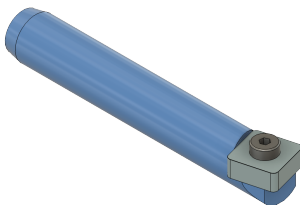
3.2.1.3 Bearbetning

Borstningen sker i en NC-styrd 5-axlig slipmaskin. Maskinens kinematiska konfiguration presenteras i figur 12 nedan.

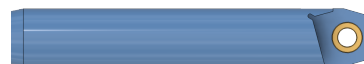


Figur 12: Kinematisk konfiguration av 5-axlig slipmaskin

För att hålla SNMA-skäret i maskinen under borstningen designades en fixtur som 3D-printades i en SLA-skrivare. Fixturen har ett 16 mm skaft som passar i en spännhylsa i slipmaskinens arbetsdocks. Skäret positioneras i fixturen genom ett urtag och fästs med en M3 insexskruv som gängas in i en invärmd insatsgänga. CAD-renderingar av fixturen presenteras i figur 13 och 14 nedan. Fixturens vridning kring A-axeln samt utstickslängden ur arbetsdockan mäts ut med hjälp av en vippindikator och matas därefter in i maskinens styrsystem.



Figur 13: Borstningsfixtur med SNMA-skär monterat



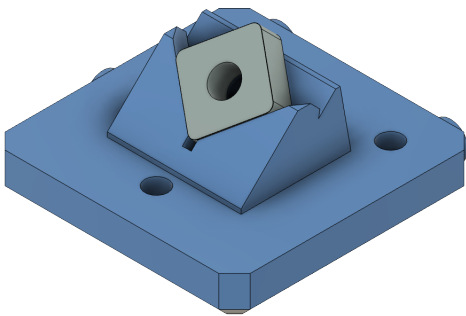
Figur 14: Borstningsfixtur (Toppvy)

Borstningen utfördes utifrån den slumpade ordningen från testplanen.

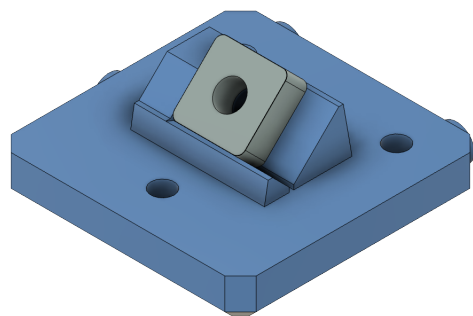
3.2.1.4 Mätning

Mätning av de borstade skären skedde i en optisk mätmaskin av modellen EdgeMasterX från Brunner Alicona. Mätmaskinen är speciellt utformad för att mäta skärverktyg och kan beräkna geometriparametrar, såsom r , Δr , och κ_a , utifrån mätresultatet. Dessutom genereras ett punktmoln som kan användas för att visualisera mätområdet digitalt.

För att höja reperternograntheten och förenkla mätningen designades två mätfixturer. En fixtur orienterar skäret med en raxida uppåt och den andra fixturen orienterar skäret med ett hörn uppåt. CAD-renderingar av fixturerna presenteras i figur 15 och 16 nedan. I de tre hålen på basplattan och i ett hål på planet som skäret placeras på i fixturen monterades magneter för att dels fixera fixturen mot mätmaskinen och dels fixera skäret i fixturen.



Figur 15: Mätfixtur för hörn

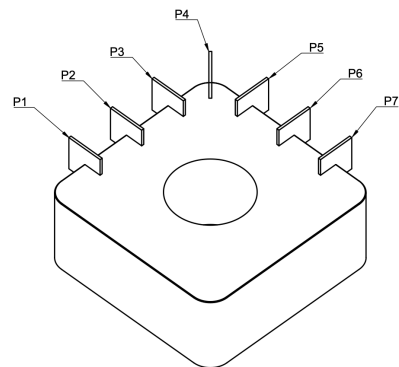


Figur 16: Mätfixtur för rak egg

Mätmaskinen är utrustad med en motoriserad XY-enhet som kan ompositionera detaljen som mäts till förprogrammerade positioner, vilket möjliggör att mäta flera sekvensiella mätsnitt utan behovet av manuell justering. Det går även att manuellt mäta vid enkla snitt.

Mätning gjordes i upp till sju mätsnitt, P1-P7, fördelade med tre mätsnitt per bearbetad rak egg och ett mätsnitt över hörnet. Mätsnittens placering presenteras i figur 17 nedan.

Mätresultatet exporterades till *.csv-filer som sedan sammanställdes till ett samlat Excelark med hjälp av ett Python-skript. Den samlade mätdata kan därefter enkelt återföras till testplanen i MODDE för analys.



Figur 17: Mätsnitt P1-P7 på SNMA-skär

3.2.2 Försök 1

Syftet med försök 1 var att skapa en grov översikt över de utvalda faktorerna från fiskbensdiagramet i figur 8. Dessa faktorer presenteras i tabell 1, tillsammans med dess testade intervall.

I tabell 2 nedan presenteras de uppmätta responserna. P1-P7 är mätsnittens placering längst skäreppen som presenteras i figur 17. Ursprungligen planerades att använda beräknade medelvärden och spridningsvärde på Δr och κ_a längst skäreppen men det resulterade i svårtydda resultat. Därför presenteras samtliga mätvärden separat.

Tabell 1: Faktorer i försök 1

Name	Abbr.	Units	Settings
EndpointInfeedDepth	EnDep	mm	0,1 to 0,4
EndpointInfeedAngle	EnAng	deg	10 to 30
CornerInfeedDepth	CoDep	mm	0,1 to 0,4
CornerInfeedAngle	CoAng	deg	10 to 30
CuttingSpeed	vc	m/s	8 to 12
FeedSpeed	vf	mm/min	10 to 30
BrushTwistAngle	bTwis	deg	0 to 45
BrushFilamentDiameter	dDiam	mm	0,3; 0,4; 0,5

Tabell 2: Respons i försök 1

Name	Abbr.	Units	Min	Target	Max
deltaR-P1	dR-p1	μm	15	20	25
deltaR-P2	dR-p2	μm	15	20	25
deltaR-P3	dR-p3	μm	15	20	25
deltaR-P4	dR-p4	μm	15	20	25
deltaR-P5	dR-p5	μm	15	20	25
deltaR-P6	dR-p6	μm	15	20	25
deltaR-P7	dR-p7	μm	15	20	25
ka-P1	ka-p1	n/a	0.80	1	1.20
ka-P2	ka-p2	n/a	0.80	1	1.20
ka-P3	ka-p3	n/a	0.80	1	1.20
ka-P4	ka-p4	n/a	0.80	1	1.20
ka-P5	ka-p5	n/a	0.80	1	1.20
ka-P6	ka-p6	n/a	0.80	1	1.20
ka-P7	ka-p7	n/a	0.80	1	1.20

Testplanen genererades i MODDE med hjälp av funktionen "Design Wizard". Funktionen rekommenderade försöksplansdesignen L27 med tre centrumpunkter, vilket resulterade i totalt 30 försök.

Tabell 3: Testplan för försök 1

Exp Name	Run Order	Endpoint Infeed Depth	Endpoint Infeed Angle	Corner Infeed Depth	Corner Infeed Angle	Cutting Speed	Feed Speed	Brush Twist Angle	Brush Filament Diameter
N1	29	0.10	10	0.10	10	7	10	0	0.30
N2	27	0.10	10	0.10	10	10	20	22.50	0.40
N3	6	0.10	10	0.10	10	13	30	45	0.50
N4	10	0.10	20	0.25	20	7	10	0	0.40
N5	4	0.10	20	0.25	20	10	20	22.50	0.50
N6	19	0.10	20	0.25	20	13	30	45	0.30
N7	22	0.10	30	0.40	30	7	10	0	0.50
N8	17	0.10	30	0.40	30	10	20	22.50	0.30
N9	11	0.10	30	0.40	30	13	30	45	0.40
N10	16	0.25	10	0.25	30	7	20	45	0.30
N11	2	0.25	10	0.25	30	10	30	0	0.40
N12	8	0.25	10	0.25	30	13	10	22.50	0.50
N13	9	0.25	20	0.40	10	7	20	45	0.40
N14	18	0.25	20	0.40	10	10	30	0	0.50
N15	7	0.25	20	0.40	10	13	10	22.50	0.30
N16	24	0.25	30	0.10	20	7	20	45	0.50
N17	5	0.25	30	0.10	20	10	30	0	0.30
N18	15	0.25	30	0.10	20	13	10	22.50	0.40
N19	23	0.40	10	0.40	20	7	30	22.50	0.30
N20	14	0.40	10	0.40	20	10	10	45	0.40
N21	26	0.40	10	0.40	20	13	20	0	0.50
N22	20	0.40	20	0.10	30	7	30	22.50	0.40
N23	21	0.40	20	0.10	30	10	10	45	0.50
N24	13	0.40	20	0.10	30	13	20	0	0.30
N25	28	0.40	30	0.25	10	7	30	22.50	0.50
N26	3	0.40	30	0.25	10	10	10	45	0.30
N27	12	0.40	30	0.25	10	13	20	0	0.40
N28	30	0.25	20	0.25	20	10	20	22.50	0.40
N29	25	0.25	20	0.25	20	10	20	22.50	0.40
N30	1	0.25	20	0.25	20	10	20	22.50	0.40

CAD-modeller genererades utifrån testplanen. Bearbetning utfördes enligt ordningen ur kolumn ”Run Order” ur testplanen i tabell 3. Mätdata sammanställdes till ett Excelark och återfördes till testplanen i MODDE för analys.

3.2.3 Försök 2

I försök 2 lades fokus på inverkan av CAD-parametrarna, det vill säga ingreppsdjup och ingreppsvinkel. Därför exkluderades de övriga kördatafaktorerna ur testplanen och ställdes till fasta värden.

- Skärhastighet $v_c = 10 \text{ m/s}$
- Matningshastighet $v_f = 28 \text{ mm/min}$
- Borstvidvinkel $= 0^\circ$
- Filamentdiameter 0.5 mm

Faktorer i försöket presenteras i tabell 4, tillsammans med dess testade intervall. Antalet faktorer minskade således i försök 2 jämfört med försök 1.

I tabell 5 nedan presenteras de uppmätta responserna. Responserna är de samma som i försök 1. P1-P7 är mätsnittens placering längst skäreppen som presenteras i figur 17.

Tabell 4: Faktorer i försök 2

Name	Abbr.	Units	Settings
EndpointInfeedDepth	EnDep	mm	0,1 to 0,4
EndpointInfeedAngle	EnAng	deg	10 to 30
CornerInfeedDepth	CoDep	mm	0,1 to 0,4
CornerInfeedAngle	CoAng	deg	10 to 30

Tabell 5: Respons i försök 2

Name	Abbr.	Units	Min	Target	Max
deltaR-P1	dR-p1	μm	15	20	25
deltaR-P2	dR-p2	μm	15	20	25
deltaR-P3	dR-p3	μm	15	20	25
deltaR-P4	dR-p4	μm	15	20	25
deltaR-P5	dR-p5	μm	15	20	25
deltaR-P6	dR-p6	μm	15	20	25
deltaR-P7	dR-p7	μm	15	20	25
ka-P1	ka-p1	n/a	0.80	1	1.20
ka-P2	ka-p2	n/a	0.80	1	1.20
ka-P3	ka-p3	n/a	0.80	1	1.20
ka-P4	ka-p4	n/a	0.80	1	1.20
ka-P5	ka-p5	n/a	0.80	1	1.20
ka-P6	ka-p6	n/a	0.80	1	1.20
ka-P7	ka-p7	n/a	0.80	1	1.20

Testplanen genererades i MODDE med hjälp av funktionen ”Design Wizard”. Funktionen rekommenderade ett fullfaktorsförsök på två nivåer med tre centrumpunkter, vilket resulterade i totalt 19 försök. Resultterande testplan presenteras i tabell 6.

Tabell 6: Försöksplan för försök 2

Exp Name	Run Order	Endpoint Infeed Depth	Endpoint Infeed Angle	Corner Infeed Depth	Corner Infeed Angle
N1	19	0.10	10	0.10	10
N2	4	0.40	10	0.10	10
N3	10	0.10	30	0.10	10
N4	15	0.40	30	0.10	10
N5	6	0.10	10	0.40	10
N6	9	0.40	10	0.40	10
N7	5	0.10	30	0.40	10
N8	8	0.40	30	0.40	10
N9	18	0.10	10	0.10	30
N10	7	0.40	10	0.10	30
N11	11	0.10	30	0.10	30
N12	16	0.40	30	0.10	30
N13	2	0.10	10	0.40	30
N14	14	0.40	10	0.40	30
N15	1	0.10	30	0.40	30
N16	3	0.40	30	0.40	30
N17	17	0.25	20	0.25	20
N18	13	0.25	20	0.25	20
N19	12	0.25	20	0.25	20

CAD-modeller genererades utifrån testplanen. Bearbetning utfördes enligt ordningen ur kolumn ”Run Order” ur testplanen i tabell 6. Mätdata samlades till ett Excelark och återfördes till testplanen i MODDE för analys.

3.2.4 Försök 3a

Under försök 3a avgränsades skäreggen till enbart hörnet. Inmatningsdjup och inmatningsvinklarna ställdes till samma värde för både ändpunkter och hörntvårsnitt, vilket resulterar i en likformig fas längs hela eggen. Följande kördata användes under försöket:

- Skärhastighet $v_c = 10 \text{ m/s}$
- Filamentdiameter 0.5 mm
- Borstvridning = 0°
- Borstbreddscentrum konstant = 0.5

Faktorer i försöket presenteras i tabell 7, tillsammans med dess testade intervall.

I tabell 8 nedan presenteras de uppmätta responserna. Storlek Δr och formfaktor κ_a mättes i ett tvärsnitt mitt på hörnet, placerat i snitt P4 enligt figur 17.

Tabell 7: Faktorer i försök 3a

Name	Abbr.	Units	Settings
Feedspeed	Feed		20 to 150
Angle	Angle		10 to 20
Infeed	Depth		0,1 to 0,25

Tabell 8: Respons i försök 3a

Name	Abbr.	Units	Min	Target	Max
Kappa	Kap	n/a	0.90	1	1.10
delta-R	del	μm	15	20	25

Testplanen genererades i MODDE med hjälp av funktionen "Design Wizard". Funktionen rekommenderade ett fullfaktorsförsök på två nivåer med tre centrumpunkter, vilket resulterade i totalt 11 försök. Resultterande testplan presenteras i tabell 9. Experimenten utfördes i den slumpade ordningen från kolumnen "Run Order" ur testplanen.

Tabell 9: Försöksplan för försök 3a

Exp Name	Run Order	Feedspeed	Angle	Infeed
N1	9	20	10	0.10
N2	8	150	10	0.10
N3	3	20	20	0.10
N4	7	150	20	0.10
N5	2	20	10	0.25
N6	5	150	10	0.25
N7	1	20	20	0.25
N8	10	150	20	0.25
N9	11	85	15	0.17
N10	6	85	15	0.17
N11	4	85	15	0.17

3.2.5 Försök 3b

Under försök 3b avgränsades skäreppen till enbart en rak skärepp. Inmatningsdjup och inmatningsvinklarna ställdes till samma värde för både ändpunkter och hörntvärsnitt, vilket resulterar i en likformig fas längs hela eggen. Följande kördata användes under försöket:

- Skärhastighet $v_c = 10 \text{ m/s}$
- Filamentdiameter 0.5 mm
- Borstvridning = 0°
- Borstbreddscentrum konstant = 0.5

Faktorer i försöket presenteras i tabell 10, tillsammans med dess testade intervall.

I tabell 11 nedan presenteras de uppmätta responserna. Storlek Δr och formfaktor κ_a mättes i ett tvärsnitt mitt på en av de raka delsträckorna av skäreppen, placerat i snitt P6 enligt figur 17.

Tabell 10: Faktorer i försök 3b

Name	Abbr.	Units	Settings
Feedspeed	Feed	mm/min	10 to 30
Angle	Angle	deg	7 to 20
Infeed	InfDp	mm	0,1 to 0,25

Tabell 11: Respons i försök 3b

Name	Abbr.	Units	Min	Target	Max
Kappa	Kap	n/a	0.90	1	1.10
delta-R	del	μm	15	20	25

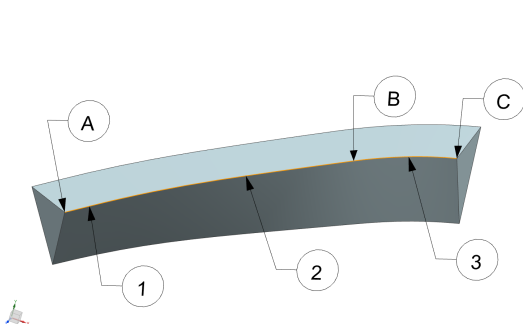
Testplanen genererades i MODDE med hjälp av funktionen "Design Wizard". Funktionen rekommenderade ett fullfaktorsförsök på två nivåer med tre centrumpunkter, vilket resulterade i totalt 11 försök. Resultterande testplan presenteras i tabell 12. Experimenten utfördes i den slumpade ordningen från kolumnen "Run Order" ur testplanen.

Tabell 12: Försöksplan för försök 3b

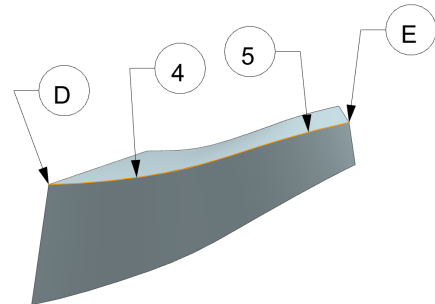
Exp Name	Run Order	Feedspeed	Angle	Infeed
N1	6	10	7	0.10
N2	5	30	7	0.10
N3	8	10	20	0.10
N4	11	30	20	0.10
N5	2	10	7	0.25
N6	7	30	7	0.25
N7	9	10	20	0.25
N8	3	30	20	0.25
N9	10	20	13.50	0.17
N10	4	20	13.50	0.17
N11	1	20	13.50	0.17

3.3 Försök på dubbelkrökt egg

Försök på dubbelkrökt egg följer samma upplägg som de tidigare presenterade försöken. Den viktigaste skillnaden är den dubbelkrökta geometrin. Skäregegen består av två delar som tillsammans utgör en dubbelkrökt egg, en konkav del och en konvex del. Dessa två delar presenteras i figur 18 och 19.

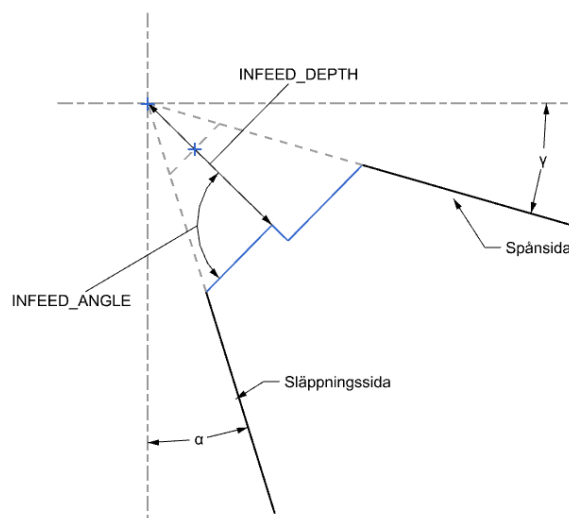


Figur 18: Konkav delsträcka av dubbelkrökt skäregegen



Figur 19: Konvex delsträcka av dubbelkrökt skäregegen

I CAD-modellen modellerades en fas, enligt samma princip som under de tidigare beskrivna försöken på enkelkrökt egg. Fem tvärsnitt med geometrin beskriven i figur 20 placerades i punkt A - E i figur 18 och 19. Mellan tvärsnitten sveptes därefter ett urtag ur eggen som bildar fasen. Ingreppsvinkeln `INFEED_ANGLE` mätts utifrån halva kilvinkeln β . `INFEED_ANGLE` och `INFEED_DEPTH` kopplades mot individuella parametrar i varje tvärsnitt vilket möjliggör att skapa en familjetabell där geometrin i varje tvärsnitt går att styra separat. Emellertid användes samma värde på inmatningsdjup och inmatningsvinkel för samtliga tvärsnitt under försök 4.



Figur 20: Tvärsnitt för fas i CAD-modell, A - E

Mätningen utfördes i punkterna 1-5 i figur 18 och 19 enligt samma princip som beskrivs i avsnitt 3.2.1.4.

3.3.1 Försök 4

Under försök 4 lades fokus vid CAD-faktorerna ingreppsdjup och ingreppsvinkel samt matningshastighet v_f , med andra ord samma faktorer som i försök 3a och 3b. Faktorerna presenteras i tabell 13, tillsammans med dess intervall. Övriga bearbetningsfaktorer ställdes till fasta värden enligt följande:

- Skärhastighet $v_c = 10 \text{ m/s}$
- Filamentsdiameter = 0.5 mm
- Borstvridning = 0°
- Borstbreddscentrum konstant = 0.5

Tabell 13: Faktorer i försök 4

Name	Abbr.	Units	Settings
Feed	Feed	mm/min	5 to 10
InfeedAngle	Angle	deg	50 to 70
InfeedDepth	Depth	mm	0,1 to 0,2

I tabell 14 nedan presenteras de uppmätta responserna. Storlek Δr och formfaktor κ_a mättes i fem tvärsnitt, placerat i snitt 1-5 enligt figur 18 och 19.

Tabell 14: Respons i försök 4

Name	Abbr.	Units	Min	Target	Max
deltaR-p1	dR-p1	μm		20	
deltaR-p2	dR-p2	μm		20	
deltaR-p3	dR-p3	μm		20	
deltaR-p4	dR-p4	μm		20	
deltaR-p5	dR-p5	μm		20	
ka-p1	ka-p1	n/a		1	
ka-p2	ka-p2	n/a		1	
ka-p3	ka-p3	n/a		1	
ka-p4	ka-p4	n/a		1	
ka-p5	ka-p5	n/a		1	

Till skillnad från förgående försök valdes försöksplansdesignen ”CCO” vilket står för *central composite orthogonal*. Försöksplansdesignen utökar ett traditionellt faktorförsök med ett antal *stjärnpunkter* som kan användas för att identifiera kvadratiska termer till regressionsmodellen [10], [11].

Testplanen genererades i MODDE med hjälp av funktionen "Design Wizard". Resultterande testplan presenteras i tabell 15 och består på totalt 17 försök, varav tre centrumpunkter. Experimenten utfördes i den slumpade ordningen från kolumnen "Run Order" ur testplanen.

Tabell 15: Försöksplan för försök 4

Exp Name	Run Order	Feed	InfeedAngle	InfeedDepth
N1	10	5	50	0.10
N2	3	10	50	0.10
N3	8	5	70	0.10
N4	7	10	70	0.10
N5	6	5	50	0.20
N6	17	10	50	0.20
N7	1	5	70	0.20
N8	2	10	70	0.20
N9	13	4.12	60	0.15
N10	15	10.88	60	0.15
N11	16	7.50	46.47	0.15
N12	5	7.50	73.53	0.15
N13	11	7.50	60	0.08
N14	14	7.50	60	0.22
N15	4	7.50	60	0.15
N16	9	7.50	60	0.15
N17	12	7.50	60	0.15

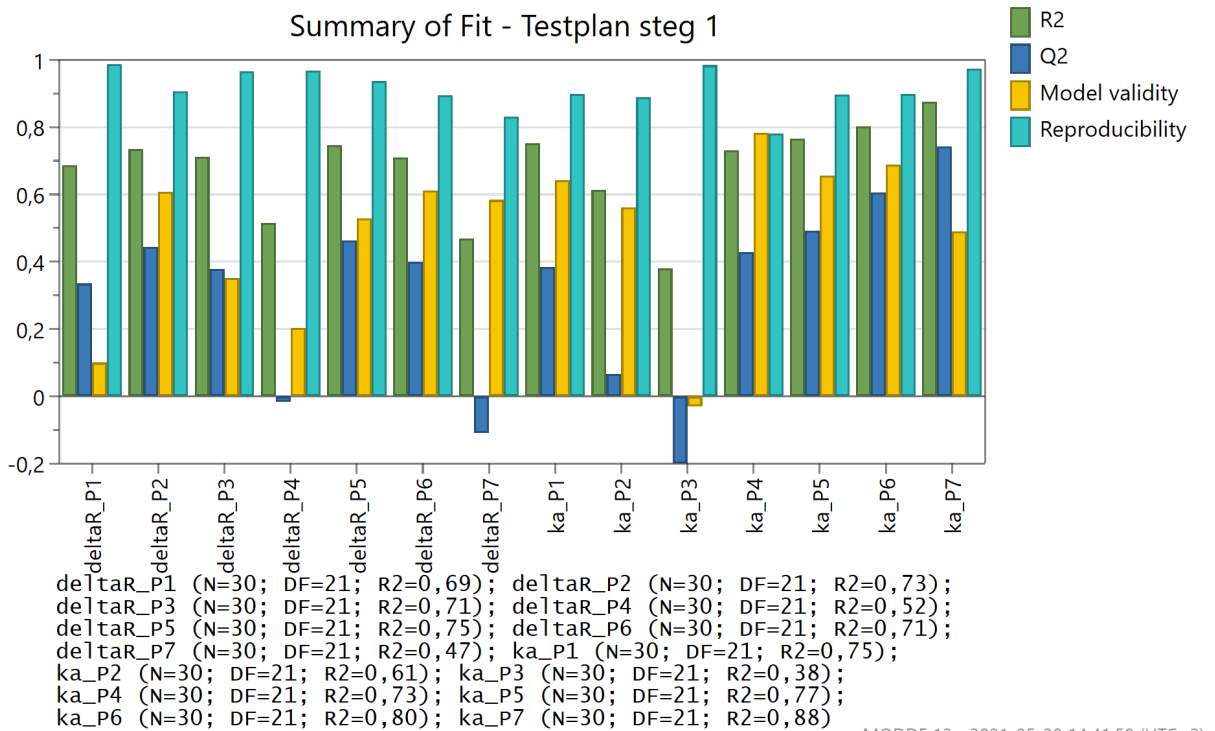
4 Resultat

4.1 Försök 1

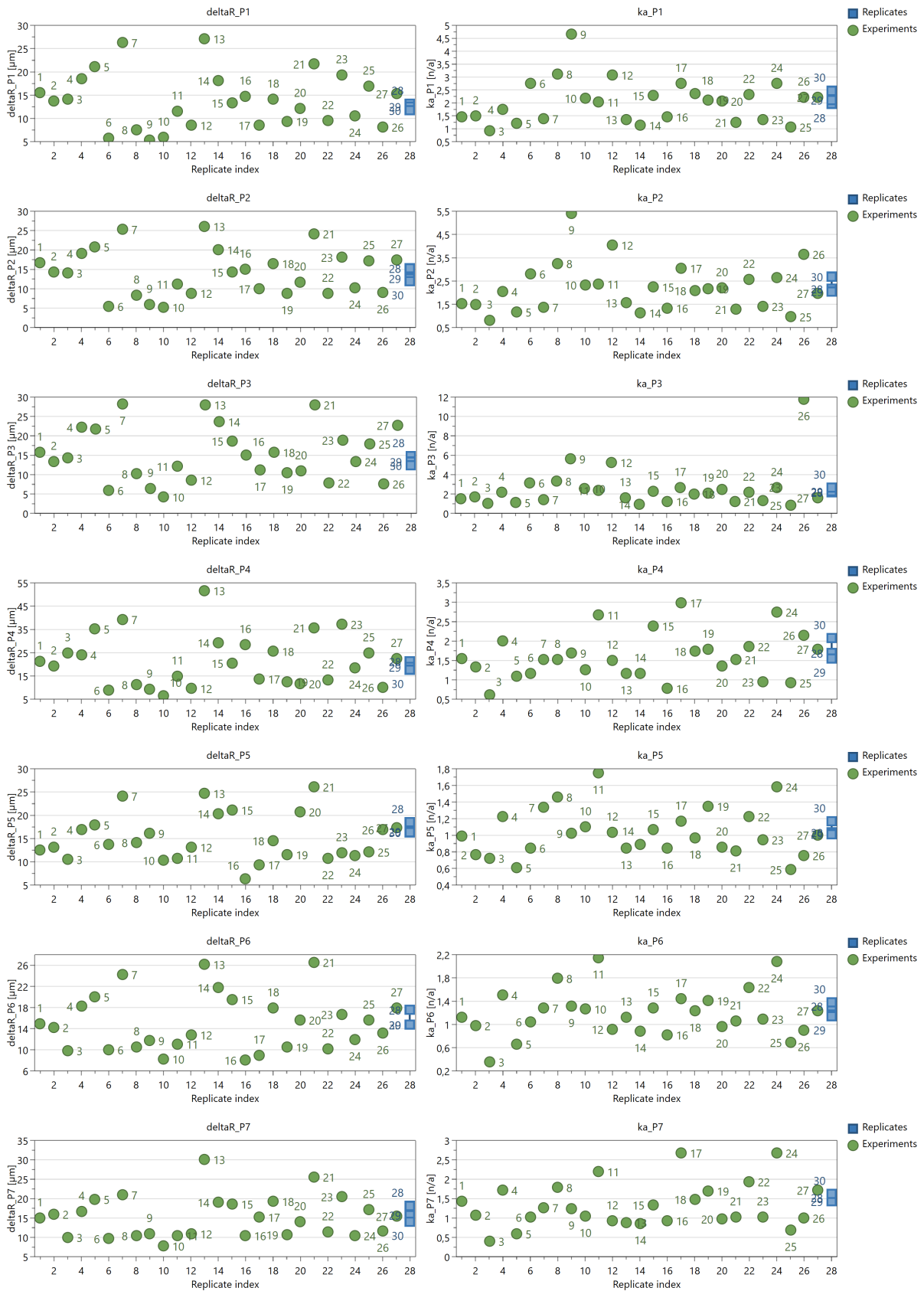
I figur 22 presenteras replikationsplott för försök 1. Plotten visar genomgående att centrumpunkterna ligger relativt centrerat bland mätvärdena. Det förekommer ett antal avvikande mätvärden, exempelvis mätvärdet för försök 9 i ka_p2 och försök 26 i ka_p3. Slutligen visar plotten att det finns relativt liten spridning mellan de replikerade centrumpunkterna för Δr , i genomsnitt $2,87 \mu m$ och maximalt $4,21 \mu m$ hos deltaR_P7. Spridningen bland centrumpunkterna för formfaktorn κ_a var relativt sett större, i genomsnitt $0,39$ och maximalt $0,62$ hos ka_P2.

I figur 23 presenteras koefficientplott för försök 1. Skärhastigheten v_c bidrog inte med en signifikant effekt på något mätvärde, varken för storleken Δr eller formfaktor κ_a . Genomgående leder ökad filamentsdiameter till ökad eggavrundningsstorlek Δr och minskad formfaktor κ_a . Minskad matningshastighet v_f leder genomgående till ökad eggavrundningsstorlek Δr . Inmatningsdjup och inmatningsvinkel på ändpunkterna EnDep och EnAng ger inte någon signifikant effekt på varken Δr eller κ_a men samma värden för hörntvärsnitten uppvisar större effekt. Slutligen visar borstvridningen bTwis motsatt effekt på första och andra raka delsträckan av skäregegn, vilket är förvånande.

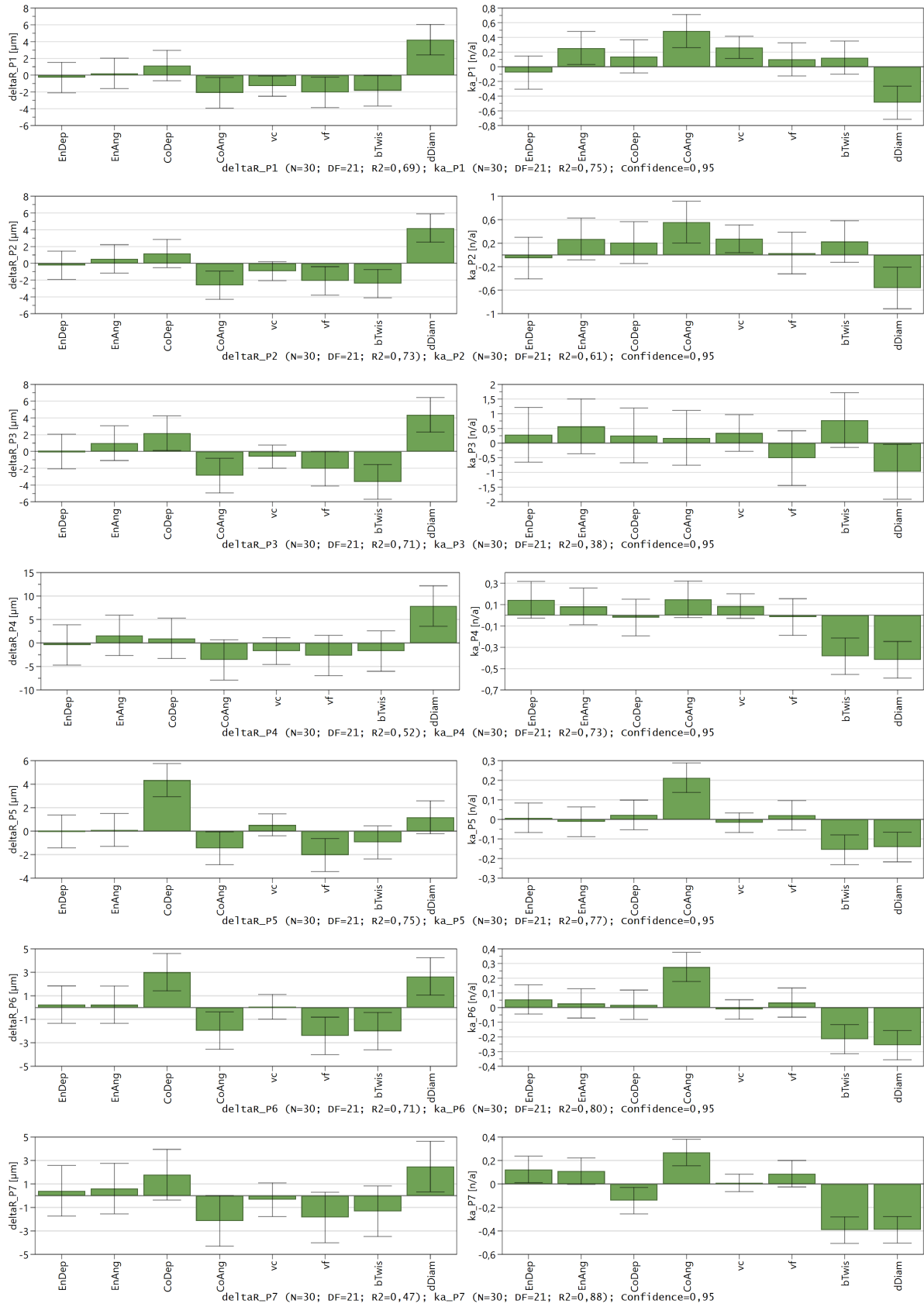
I figur 21 presenteras en summering av regressionsmodellernas anpassning till mätdata. Q^2 ligger mycket lågt för de flesta mätvärden och skiljer mer än 0.2 i från korresponderande R^2 -värde, vilket betyder att regressionsmodellerna inte är statistiskt goda.



Figur 21: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 1



Figur 22: Replikationsplott för försök 1



Figur 23: Koefficientplott för försök 1

4.2 Försök 2

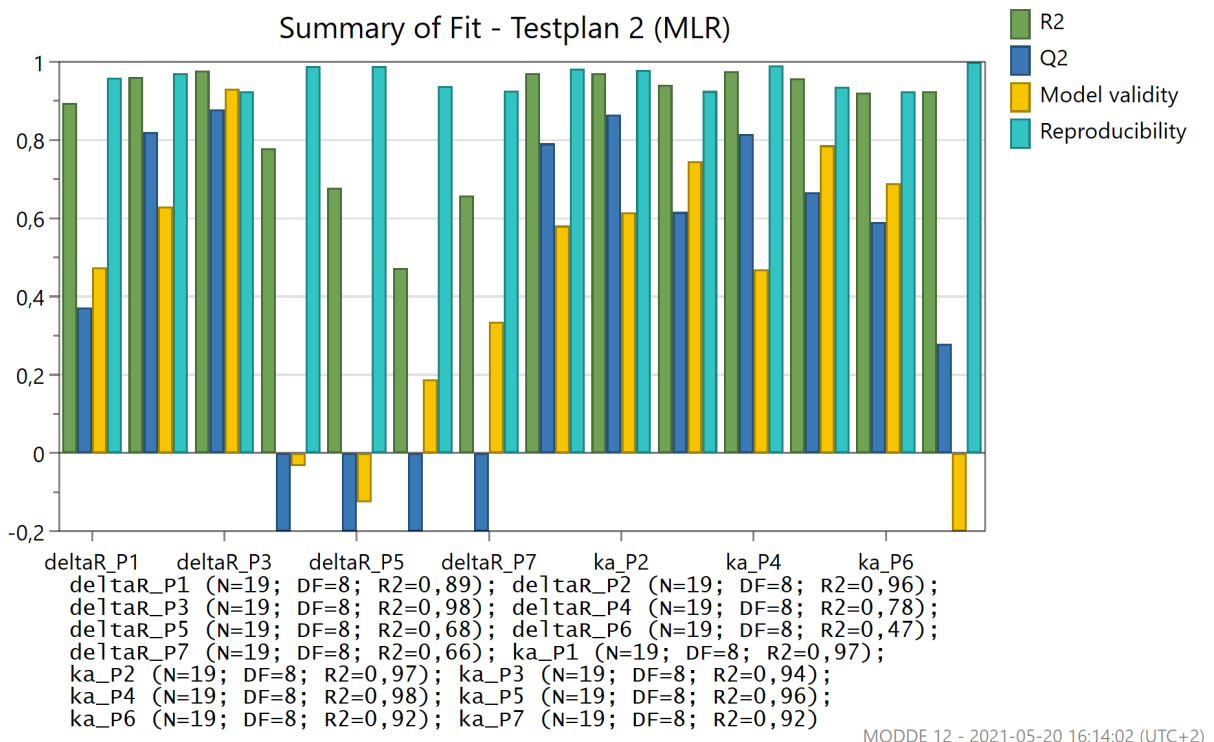
I figur 25 presenteras replikationsplott för försök 2. Plotten visar genomgående att centrumpunkterna ligger relativt centrerat bland mätvärdena, med undantag för `deltaR_P6`. Det förekommer ett antal avvikande mätvärden, exempelvis mätvärdet för försök 1 i `deltaR_P4` och försök 3 i `deltaR_P5`. Slutligen visar plotten att det finns mycket liten spridning mellan de replikerade centrumpunkterna för Δr , i genomsnitt $0,95 \mu\text{m}$ och maximalt $1,66 \mu\text{m}$ hos `deltaR_P3`. Spridningen bland centrumpunkterna för formfaktorn κ_a var också mycket liten, i genomsnitt $0,09$ och maximalt $0,17$ hos `ka_P5`.

I figur 26 presenteras koefficientplott för försök 2. Plotten visar att eggavrundningsstorleken Δr främst påverkas av inmatningsdjupet. Det går också att se att storleken främst beror på det inmatningsdjup närmast det aktuella mätningsnittet, vilket är väntat. Exempelvis är effekten av inmatningsdjupet vid bearbetningsvägens ändpunkt `EnDep` den faktor med störst effekt på storleken Δr i mätsnitt P1. Vidare är den största effekten i mätsnitt P3 inmatningsdjupet vid hörntvärsnittet `CoDep`.

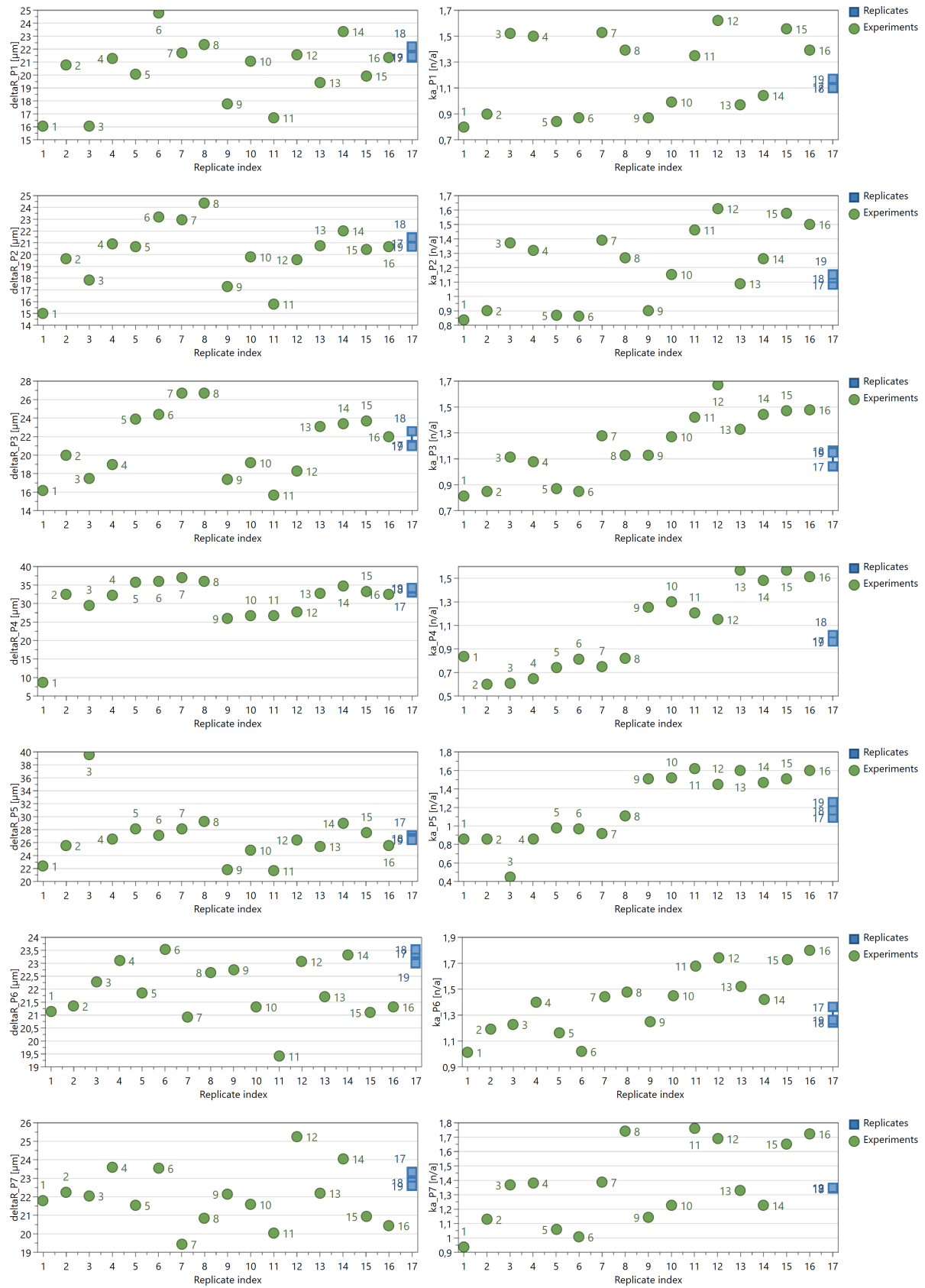
Inmatningsvinkeln är den viktigaste faktorn för formfaktorn κ_a . Precis som för storleken påverkas `ka_P1` och `ka_P7` mest av inmatningsvinkeln nära bearbetningsvägens ändpunkter, `EnAng`, och `ka_P4`, mitt på hörnet, mest på inmatningsvinkeln vid hörntvärsnittet `CoAng`.

Inga signifikanta sambandseffekter kan identifieras, varken för Δr eller κ_a .

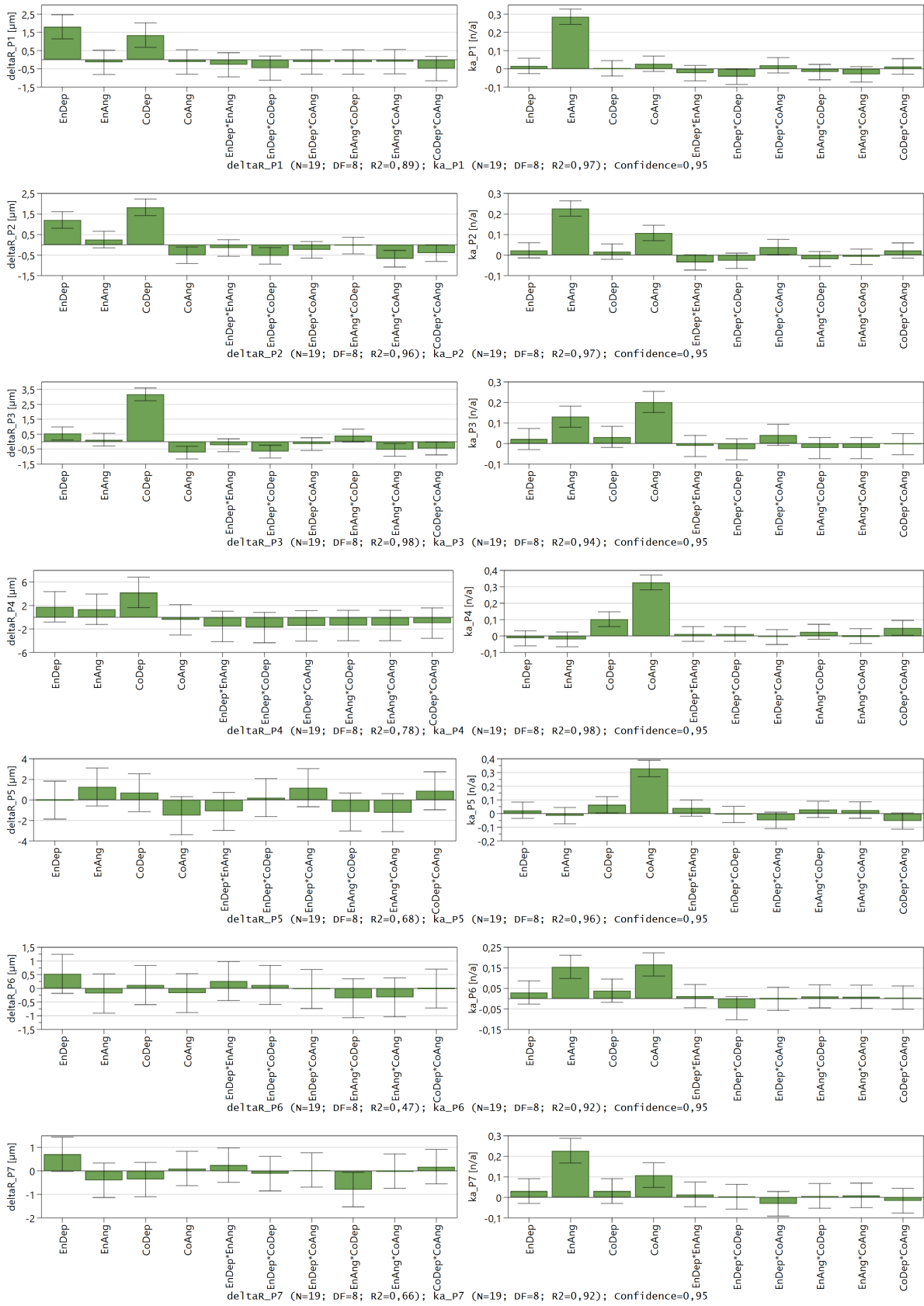
I figur 24 presenteras en summering av regressionsmodellernas anpassning till mätdatan. Q^2 ligger mycket lågt för de flesta mätvärden och skiljer mer än 0.2 i från korresponderande R^2 -värde, vilket betyder att regressionsmodellerna inte är statistiskt goda.



Figur 24: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 2



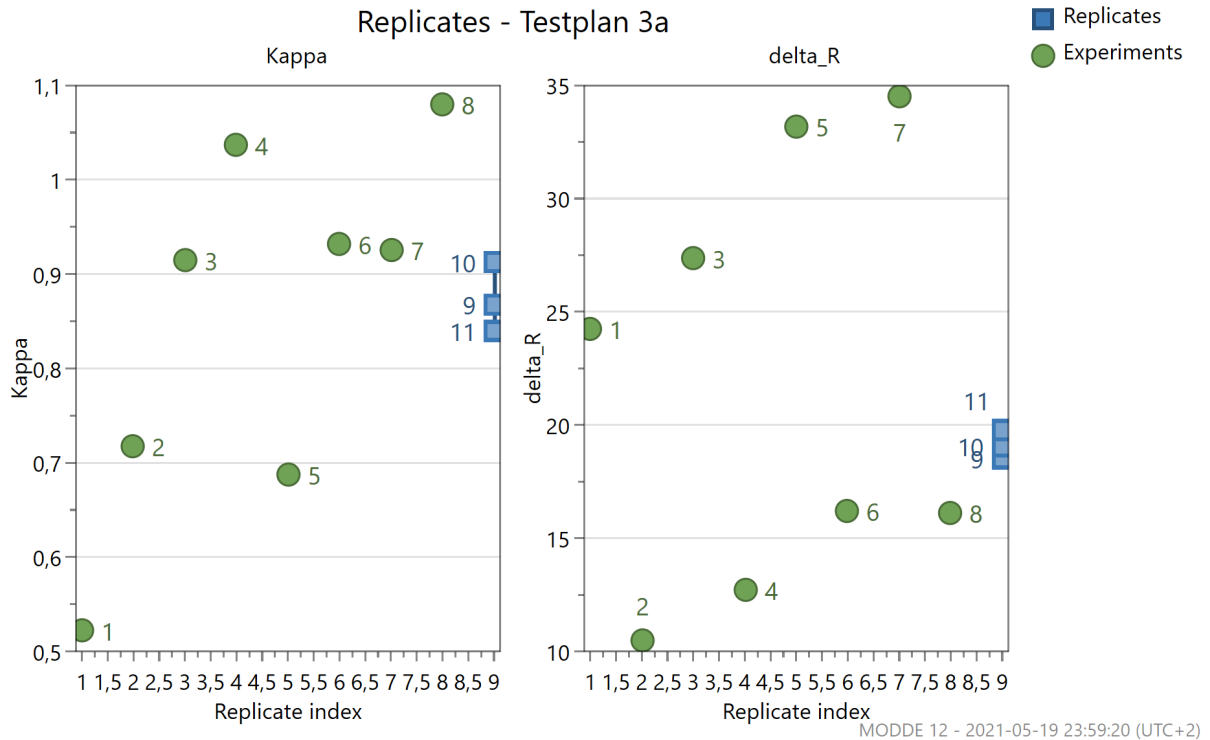
Figur 25: Replikationsplott för försök 2



Figur 26: Koefficientplott för försök 2

4.3 Försök 3a

I figur 27 presenteras replikationsplott för försök 3a. Plotten visar genomgående att centrumpunkterna ligger relativt centrerat bland mätvärdena. Det går inte att identifiera några direkt avvikande mätvärden för varken storleken Δr eller formfaktorn κ_a . Slutligen visar plotten att det finns mycket liten spridning mellan de replikerade centrumpunkterna. Spridningen för Δr är $1,3 \mu m$ och $0,07$ för κ_a .



Figur 27: Replikationsplott för försök 3a

I figur 28 och 29 nedan presenteras två 3D-bilder av en av de uppmätta eggarna, före och efter borstning. Skåreggen i bilderna är från experiment N10. Det går att visuellt se att eggen har blivit avrundad.

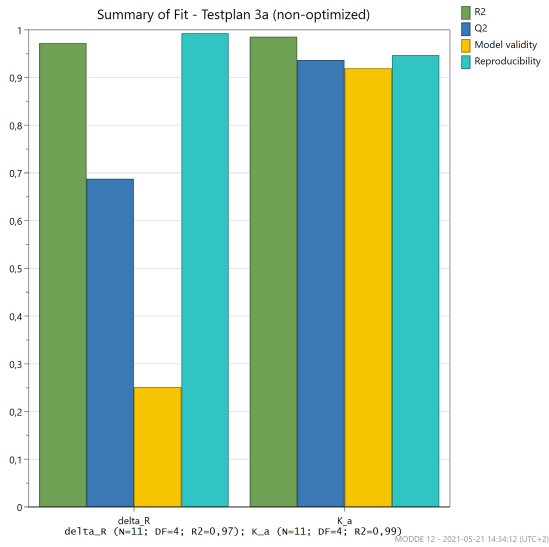


Figur 28: Experiment N10 innan borstning

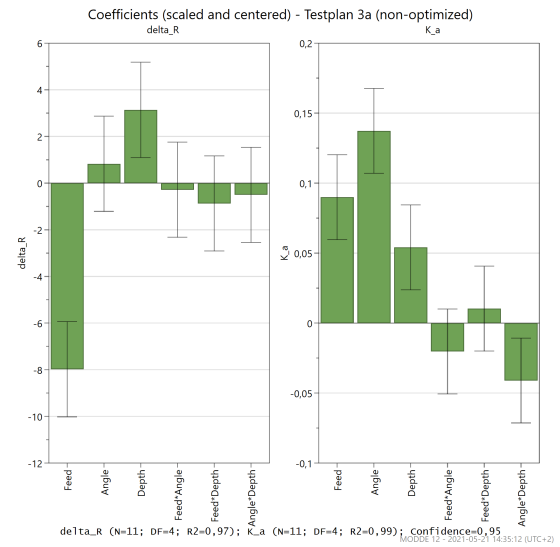


Figur 29: Experiment N10 efter borstning

I figur 30 presenteras en summering av regressionsmodellernas anpassning till mätdata. Q^2 för Δr är lågt och R^2 och Q^2 skiljer mer än 0.2, vilket tyder på att regressionsmodellen inte är statistiskt god. R^2 och Q^2 för κ_a är dock höga, båda över 0.95, vilket tyder på en statistiskt utmärkt regressionsmodell.



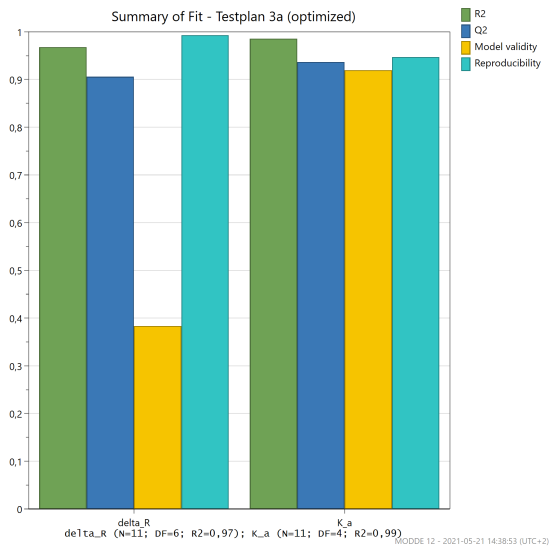
Figur 30: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3a innan exkludering av icke-signifikanta termer



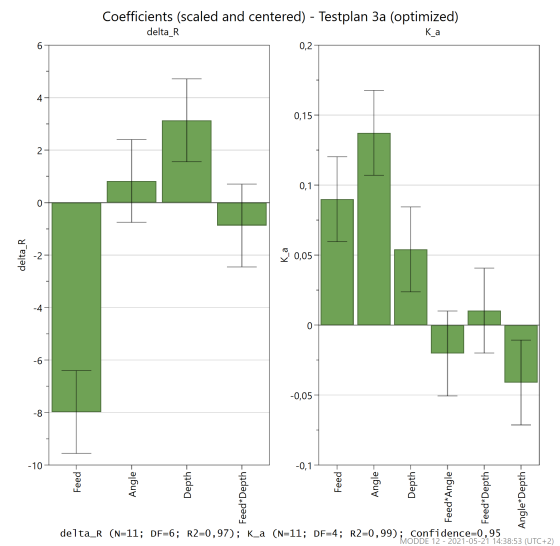
Figur 31: Koefficientplott för försök 3a innan exkludering av icke-signifikanta termer

Genom att utesluta icke-signifikanta termer ur regressionmodellen för Δr kan prediktionsgraden Q^2 förbättras. Samspelseffekterna Feed*Angle och Angle*Depth uteslöts.

I figur 32 och 33 presenteras de optimerade resultaten. Q^2 för Δr ökas således från 0.67 till 0.90.



Figur 32: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3a efter exkludering av icke-signifikanta termer



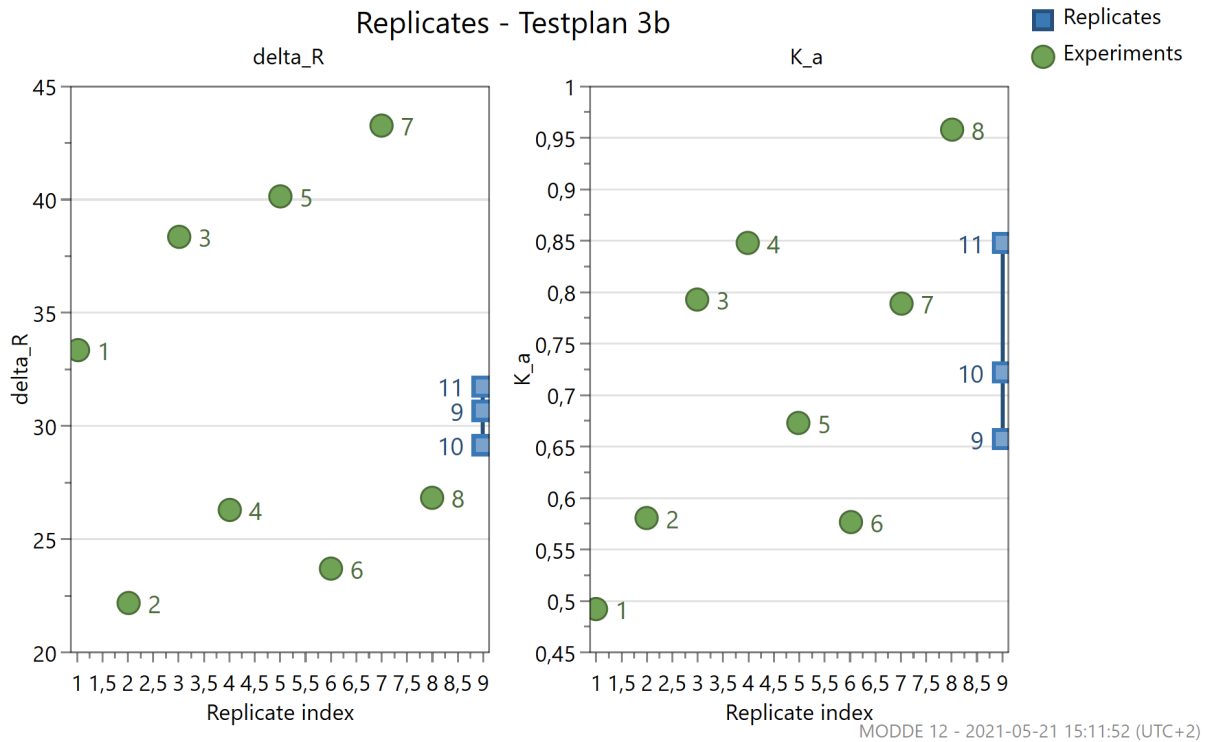
Figur 33: Koefficientplott för försök 3a efter exkludering av icke-signifikanta termer

Koefficientplotten i figur 33 visar att den viktigaste faktorn för storleken Δr är matningshastigheten v_f . Genom att minska v_f ökar Δr . Vidare påverkar inmatningsdjupet Δr signifikant. Ett ökat inmatningsdjup leder till ökad Δr .

Den viktigaste faktorn för formfaktorn κ_a är inmatningsvinkeln. Genom att öka inmatningsvinkeln ökar κ_a . Även matningshastigheten och inmatningsdjupet har signifikant effekt på κ_a .

4.4 Försök 3b

I figur 34 presenteras replikationsplott för försök 3b. Plotten visar genomgående att centrumpunkterna ligger relativt centrerat bland mätvärdena. Det går inte att identifiera några direkt avvikande mätvärden för varken storleken Δr eller formfaktorn κ_a . Slutligen visar plotten att det finns viss spridning mellan de replikerade centrumpunkterna. Spridningen för Δr är $2,6 \mu m$ och 0,19 för κ_a , vilket är ungefär dubbelt så stor spridning jämfört med försök 3a.



Figur 34: Replikationsplott för försök 3b

I figur 35 och 36 nedan presenteras två 3D-bilder av en av de uppmätta eggarna, före och efter borstning. Skåreggen i bilderna är från experiment N8. Det går att visuellt se att eggen har blivit avrundad.

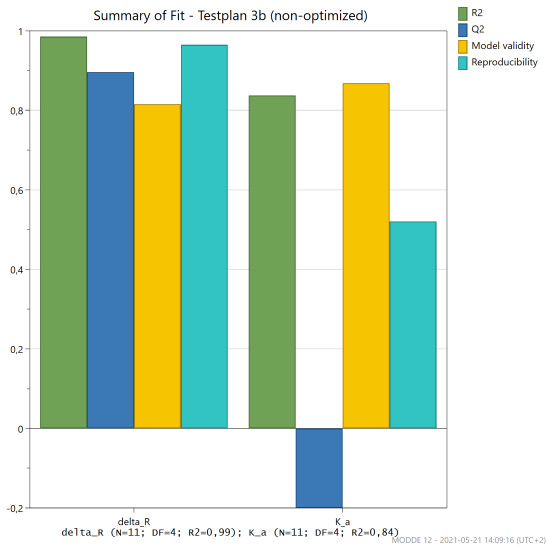


Figur 35: Experiment N8 innan borstning

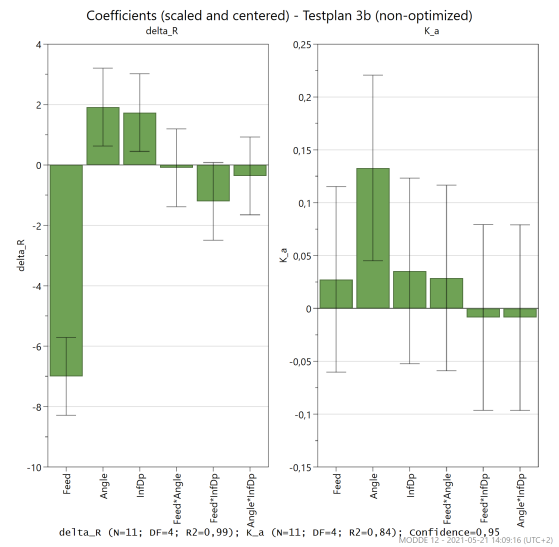


Figur 36: Experiment N8 efter borstning

I figur 37 presenteras en summering av regressionsmodellernas anpassning till mätdata. Q^2 för Δr är relativt hög och R^2 och Q^2 skiljer inte mer än 0,2, vilket tyder på en relativt god prediktionsgrad. Q^2 för κ_a är extremt låg ($Q^2 = -0,2$) och skillnaden mellan R^2 och Q^2 är långt större än 0,2. I figur 38 presenteras koefficientplott för försök 3b med samtliga huvudeffekter och sambandseffekter inkluderade.

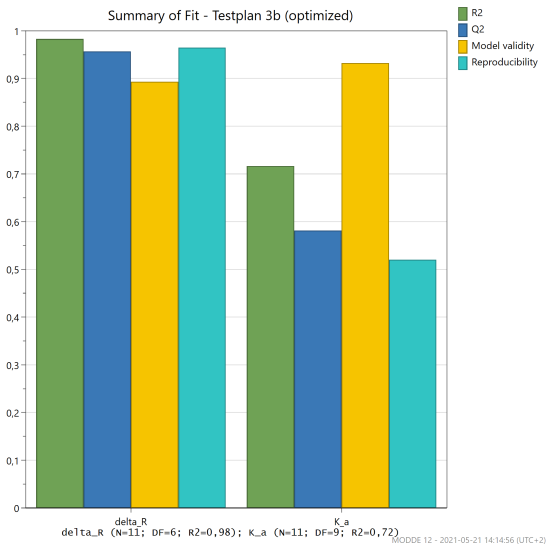


Figur 37: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3b innan exkludering av icke-signifikanta termer

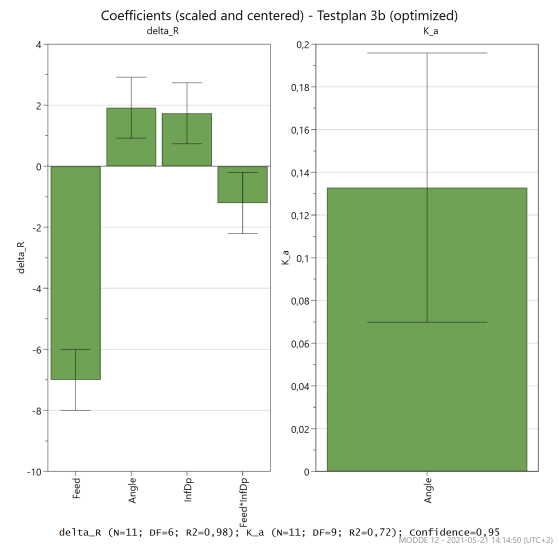


Figur 38: Koefficientplott för försök 3b innan exkludering av icke-signifikanta termer

Genom att utesluta icke-signifikanta termer ur regressionmodellerna kan prediktionsgraden Q^2 förbättras. Samspelseffekterna $\text{Feed} \cdot \text{Angle}$ och $\text{Angle} \cdot \text{InfDp}$ utesluts från Δr . Enbart inmatningsvinkeln Angle behålls i regressionsmodellen för κ_a , då resterande termer inte är signifikanta. Q^2 för Δr ökas således till 0,95 och till 0,58 för κ_a . I figur 39 och 40 presenteras de optimerade resultaten.



Figur 39: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 3b efter exkludering av icke-signifikanta termer



Figur 40: Koefficientplott för försök 3b efter exkludering av icke-signifikanta termer

Koefficientplotten i figur 33 visar att den viktigaste faktorn för storleken Δr är matningshastigheten v_f . Genom att minska v_f ökar Δr . Den viktigaste faktorn för formfaktorn κ_a är inmatningsvinkeln. Genom att öka inmatningsvinkeln så ökar κ_a .

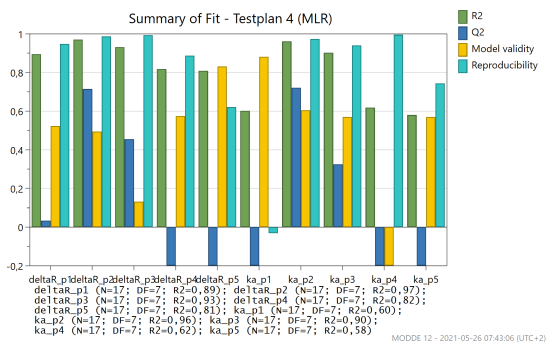
4.5 Försök 4

I figur 43 presenteras replikationsplott för försök 4. Plotten visar genomgående att centrumpunkterna ligger relativt centrerat bland mätvärdena, med undantag för `delta_P1`. Det förekommer ett antal avvikande mätvärden, exempelvis mätvärdet för försök 7 i `deltaR_P1` och `deltaR_P3`.

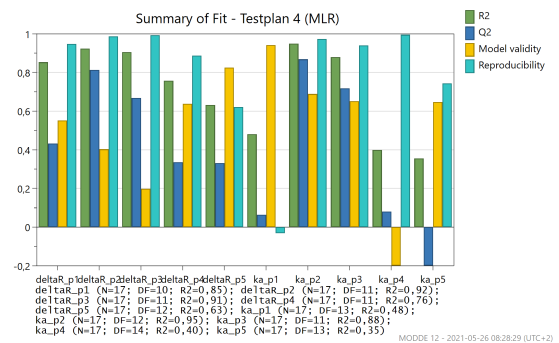
Plotten visar vidare att det finns viss spridning mellan de replikerade centrumpunkterna för Δr , i genomsnitt $2,29 \mu\text{m}$ och maximalt $4,09 \mu\text{m}$ hos `deltaR_P1`. Spridningen bland centrumpunkterna för formfaktorn κ_a var relativt stor, i genomsnitt $0,31$ och maximalt $0,76$ hos `deltaR_P1`. Centrumpunkterna för `deltaR_P1` och `deltaR_P5` ligger dessutom spridda på både över och under 1, vilket innebär resulterande skäreggar med helt olika form.

I figur 41 presenteras en summering av regressionsmodellernas anpassning till mätdatan. Prediktionsgraden Q^2 ligger mycket lågt för samtliga responser, med undantag för Δr och κ_a i mätsnitt P2 som har $Q^2 > 0.6$. Sammanfattningsvis bör endast slutsatser dras utifrån `deltaR_P2` och `ka_P2`.

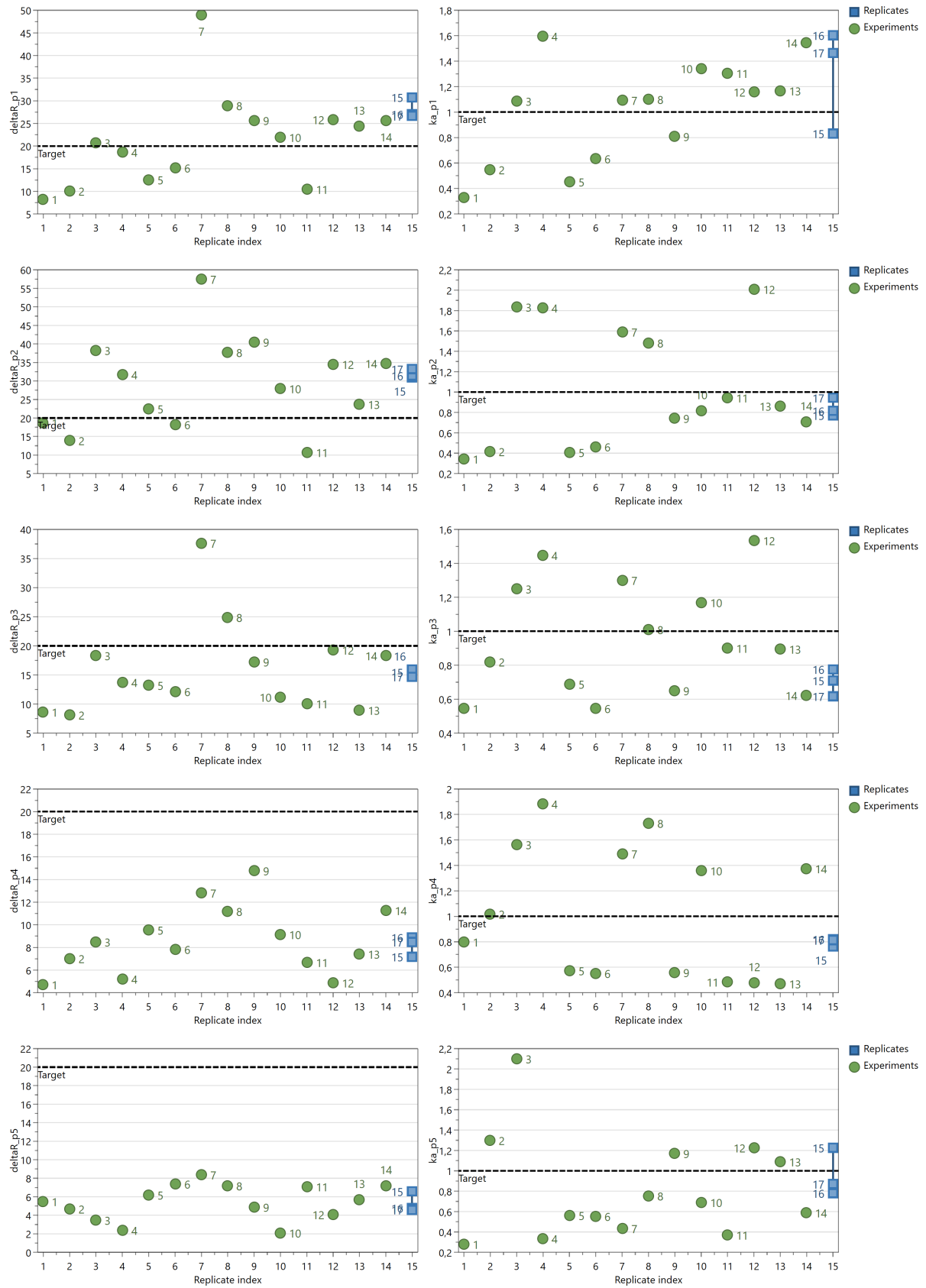
Koefficientplotten i figur 44 visar samtliga huvudfaktorer och kvadrattermer. Genom att utesluta icke-signifikanta termer ur regressionmodellerna för kan prediktionsgraden Q^2 förbättras. Q^2 för `deltaR_P2` ökas således till $0,81$ och till $0,86$ för `ka_P2`. I figur 42 och 45 presenteras de optimerade resultaten. Avslutningsvis skiljer R^2 och Q^2 mindre än 0.2 för både `deltaR_P2` och `ka_P2`, vilket tyder på relativt statistiskt goda regressionsmodeller för Δr och κ_a i mätsnitt P2.



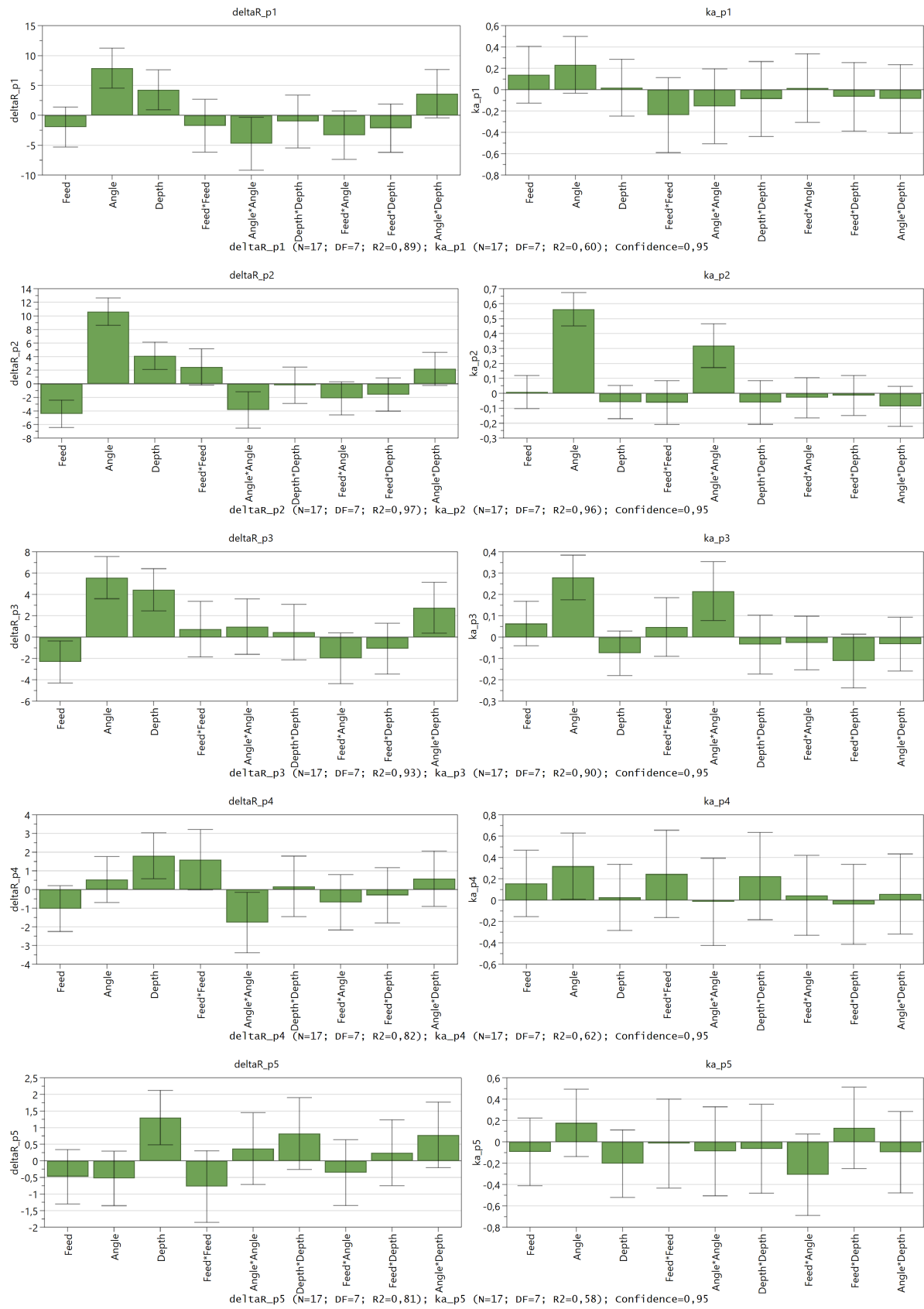
Figur 41: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 4 innan exkludering av icke-signifikanta termer



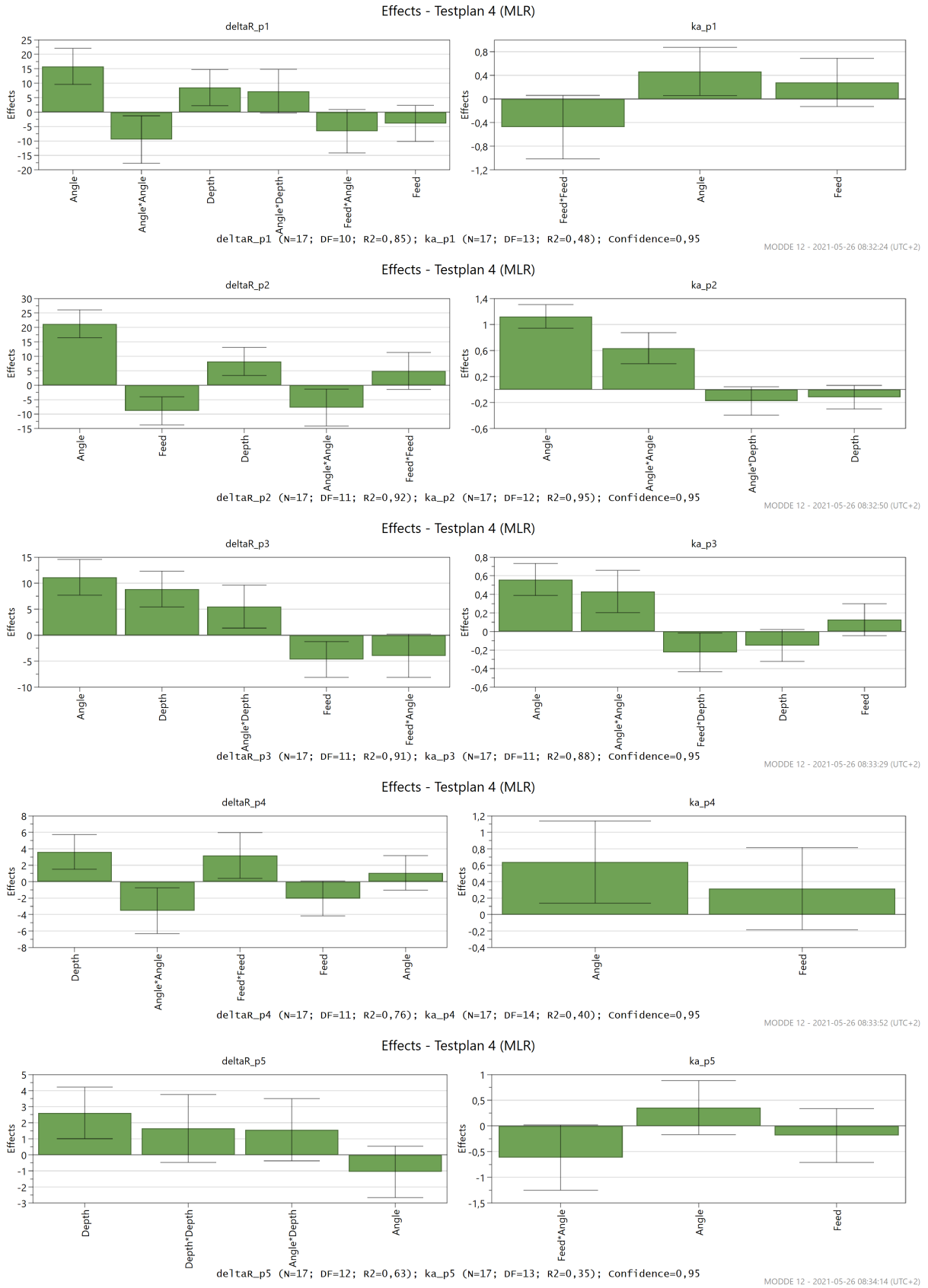
Figur 42: Anpassningsgrad R^2 och prediktionsgrad Q^2 för försök 4 efter exkludering av icke-signifikanta termer



Figur 43: Replikationsplott för försök 4



Figur 44: Koefficientplott för försök 4 innan exkludering av icke-signifikanta termer



Figur 45: Koefficientplott för försök 4 efter exkludering av icke-signifikanta termer, sorterad i effekternas storleksordning

5 Diskussion och analys

Genomgående visar resultaten ur koefficientdiagrammen i figur 23, 26, 32, 39 och 45 ett antal konsekventa effekter, beroende av variationer i de undersökta faktorerna, på eggavrundningens storlek r och form κ .

Ett flertal observationer kan göras avseende eggavrundningens storlek. Ökad matningshastighet v_f leder genomgående i alla försök till en minskad eggavrundning, r . Effekten kan förklaras genom att ökad matningshastighet leder till minskad avverkning. Vidare ses att ökat inmatningsdjup ökar storleken på eggavrundningen. Emellertid finns tidigare erfarenhet hos uppdragsgivaren som talar för att det finns ett maximalt inmatningsdjup för ökande eggavrundning, varefter avverkningshastigheten börjar avta med ökat inmatningsdjup. Detta är dock inte undersökt i denna uppsats. Vidare går det, i koefficientplotten för försöksplan 1 i figur 23, att utläsa att ökad filamentsdiameter ökar storleken på eggavrundningen. Effekten kan förklaras av att ökad filamentsdiameter leder till att avverkningen ökar.

Det går att observera att inmatningsvinkeln har större effekt på resulterande eggavrundningsstorlek på dubbelkrökt egg, jämfört med på enkelkrökt egg. En förklaringsmodell skulle kunna vara att skäregegens makrogeometri skiljer sig mellan försöken på enkelkrökt egg och dubbelkrökt egg. I försök 1 - 3 är skäregegens kilvinkel konstant 90° till skillnad från i försök 4, där kilvinkeln varierar längst skäregegen.

Resultaten ur försök 2, 3a, 3b och 4 visar genomgående att inmatningsvinkeln är den viktigaste parametern för att styra formen κ . Statistiskt goda exempel på detta är κ_a i försök 3a på enkelkrökt skäregegg med prediktionsgrad $Q^2 > 0.95$ och κ_{a_p2} i försök 4 på dubbelkrökt egg, med prediktionsgrad $Q^2 > 0.8$. Ökad inmatningsvinkel leder till en sänkt formfaktor κ_a , vilket innebär att radiestorleken på spånsidan S_γ växer i förhållande till radiestorleken på släppningssidan S_α . Även ökad filamentsdiameter leder till sänkt formfaktor, vilket tydligt visas i koefficientplotten för försöksplan 1 i figur 23. Samtliga försök är gjorda med en borstrotation där borstningen sker mot spånnytan. Tidigare forskningsresultat visar att borstens rotationsriktning spelar avgörande roll för eggavrundningens form och genom att vända på rotationsriktningen inverteras formfaktorn κ , men det är inte undersökt i denna uppsats [12].

Variation i skärhastigheten v_c visade mycket liten och oftast icke-signifikant effekt på både radiestorleken Δr och formfaktorn κ . Dock var det testade intervallet mycket smalt. Rimligtvis har skärhastigheten v_c inverkan på åtminstone radiestorleken Δr eftersom ökad skärhastighet bör ge större avverkningshastighet, vilket även går att finna belägg för i ett antal vetenskapliga artiklar [13][12][14][15].

Samtliga försök har genomförts med en matningshastighet mellan 5 - 30 mm/min. Matningshastigheten kan räknas om till tidsenhet per millimeter, vilket i sin tur kan användas för att beräkna tidsåtgång för borstningsprocessen eller "värdeskapande" cykeltid.

$$t = \frac{L_{egg}}{v_f} \text{ (min)} \quad (5)$$

Borstförslitningen uppskattades genom att jämföra borstens ytterdiameter innan och efter bearbetning. Totalt användes samma borste på 50 försök på enkelkrökt skäregegg och 17 försök på dubbelkrökt skäregegg.

$$L_{tot} = (27,9 \cdot (9 + 19 + 11 + 11)) + (8,9 \cdot 17) = 1395 + 151,3 = 1546,3 \text{ mm} \quad (6)$$

Det gick inte att uppmäta någon borstförslitning efter försöken. För att mäta borstens förslitning användes ett skjutmått, vilket är en bristfällig mätmetod. Därtill är den totala borstade sträckan i sammanhanget mycket kort och för att kunna göra en mer noggrann uppskattning behöver en längre sträcka borstas.

En svaghet i använd metodik under försök 1 och 2 är att tvärsnitten för fasmodelleringen i CAD-modellerna och mätsnitten inte är placerade på samma positioner längs skäregegen. Detta leder till att resulterade respons i aktuellt mätsnitt beror på förhållandet mellan fasens modellerade geometri vid skäregegens ändsnitt och hörnsnitt. Genom att istället placera modelleringsnitt och mätsnitt vid samma positioner bör effekterna bli tydligare och sambanden mindre komplexa.

Ett av syftena med studien var att undersöka sätt att öka processens produktionsmässighet. Denna är starkt beroende av parametrar som cykeltid och borstens livslängd. Cykeltiden är beroende av avverkningshastigheten. Avverkningshastigheten påverkas av skärhastigheten, vilken i sin tur beror av borstens varvtal och diameter. Borstens diameter påverkar dessutom antalet filament i borsten, vilket torde påverka

borstens livslängd. Det skulle därför vara av intresse att undersöka effekterna av ökad borstdiameter eftersom det skulle kunna leda till fördelar för såväl cykeltid, som borstens livslängd.

6 Slutsats

Utifrån de preciserade frågeställningarna i avsnitt 1.4 kan ett antal slutsatser sammanfattas.

- **Hur påverkar de identifierade processparametrarna eggavrundningen på rak och enkelkrökt egg?**

Resultaten visar att matningshastigheten och inmatningsdjupet är viktiga för att styra storleken på eggavrundningen och att ingreppsvinkeln är viktig för att styra formen. Variation i skärhastighet ledde i de under arbetet utförda försöken till mycket liten effekt på både storlek och form, vilket kan bero på ett litet testat intervall.

- **Uppskattning av borstförslitning**

Ingen borstförslitning har kunnat uppmätas. Under studien borstades som mest drygt 1,5 m med samma borste, vilket kan antas vara en mycket liten andel av borstens totala livslängd. Till följd av detta, samt bristfällig mätmetod har ingen borstförslitning kunnat påvisas.

- **Kan friheten i borstprocessen förbättras genom att optimera processparametrarna, såsom ingreppsvinklar, på en enkelkrökt egg med repeterbarhet?**

Jämfört med traditionell borstning för eggavrundning, beskriven i avsnitt 2.2, kan friheten i borstprocessen avsevärt förbättras med interpolerad borstning. Processparametrarna kan individuellt anpassas efter de krav som varje del av skäreppen ställer. I studien visar centrpunkterna i bland annat försök 2 att repeterbart resultat kan uppnås men samtidigt bör nämnas att underlaget, 3 replikerade försök, är synnerligen litet. För att med större säkerhet kunna utvärdera processens repeterbarhet krävs vidare undersökning, exempelvis en kapabilitetsstudie.

- **Går samma processprincip att tillämpa på en dubbelkrökt egg?**

Processprincipen går att tillämpa på dubbelkrökt egg, vilket visas i försök 4.

Generellt går det att se att variationer i processparametrar ger upphov till samma effekter på både enkelkrökt och dubbelkrökt egg. En observerbar skillnad var måttet av inmatningvinkelns inverkan på resulterande storlek på eggavrundningen, som är större på dubbelkrökt egg. Detta kan emellertid eventuellt förklaras av skillnader mellan skärepparnas makrogeometri snarare än just att skäreppen kröks olika. Vidare undersökning krävs för att med säkerhet kunna fastslå detta eventuella samband.

Avslutningsvis lämnas ett antal **förslag till vidare undersökning**.

- Placera modelleringsnitt och mätsnitt vid samma positioner. Detta bör leda till att de uppmätta effekterna blir tydligare och sambanden mindre komplexa.
- Undersöka effekterna av ökad borstdiameter. Detta skulle kunna leda till fördelar för såväl cykeltid, som borstens livslängd.

7 Referenser

- [1] B. Denkena och H. K. Toenshoff, *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. jan. 2013, s. 153–155, ISBN: 978-3-642-33256-2. DOI: 10.1007/978-3-642-33257-9.
- [2] Sandvik Coromant, “How carbide inserts are made by Sandvik Coromant,” jan. 2017. URL: https://youtu.be/0QrznzJ_1Z4 (hämtad 2021-05-24).
- [3] Sandvik Coromant, *Utbildningshandbok*. nov. 2017. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https%3A%2F%2Fcdn.sandvik.coromant.com%2Fpublications%2F08ef829f-3b15-45a7-9179-83f4ac92e881.pdf&fileName=C-2920-40.pdf> (hämtad 2021-05-22).
- [4] P. Zelinski, “PVD vs CVD: How to Choose the Right Tool Coating,” okt. 2018. URL: <https://www.mmsonline.com/articles/video-pvd-vs-cvdhow-to-choose-the-right-tool-coating> (hämtad 2021-05-22).
- [5] VDI/VDE 2654 Part 2:2020-06, “Characterization and measurement of cutting edges - Terms, characteristics and parameters,” Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, DE, Standard, juni 2020.
- [6] J. Köhler, “Cutting Edge Geometry,” i *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, L. Laperrière och G. Reinhart, utg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, s. 294–299, ISBN: 978-3-642-20617-7. DOI: 10.1007/978-3-642-20617-7_6398. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6398 (hämtad 2021-05-22).
- [7] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikström och S. Wold, *Design of Experiments - Principles and Applications*. febr. 2000, ISBN: 91-973730-0-1.
- [8] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, Inc., april 2017, ISBN: 978-1-119-58906-8.
- [9] Sartorius Stedim Data Analytics, *User Guide to MODDE 12*. URL: <https://blog.umetrics.com/hubfs/Download%20Files/MODDE%2012.0.1%20User%20Guide.pdf> (hämtad 2021-05-23).
- [10] NIST/SEMATECH, “5.3.3 How do you select an experimental design?” I *Engineering Statistics Handbook*. okt. 2013. DOI: <https://doi.org/10.18434/M32189>. URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri33.htm> (hämtad 2021-06-02).
- [11] NIST/SEMATECH, “5.3.3.6.1 Central Composite Designs (CCD),” i *Engineering Statistics Handbook*. okt. 2013. DOI: <https://doi.org/10.18434/M32189>. URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri33.htm> (hämtad 2021-06-02).
- [12] B. Denkena, A. Krödel och M. Hein, “Innovative method for cutting edge preparation with flexible diamond tools,” *Procedia CIRP*, årg. 86, s. 121–125, 2019, 7th CIRP Global Web Conference – Towards shifted production value stream patterns through inference of data, models, and technology (CIRPe 2019), ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.010>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712030010X>.
- [13] B. Denkena, L. de Leon, E. Bassett och M. Rehe, “Cutting Edge Preparation by Means of Abrasive Brushing,” *Key Engineering Materials - KEY ENG MAT*, årg. 438, s. 1–7, maj 2010. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.438.1.
- [14] H. Wang, A. Yu, L. Dong och L. Wu, “Edge preparation of carbide tools with abrasive brushing method,” *2011 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2011 - Proceedings*, juli 2011. DOI: 10.1109/MACE.2011.5986907.
- [15] B. Denkena och D. Biermann, “Cutting edge geometries,” *CIRP Annals*, årg. 63, nr 2, s. 631–653, 2014, ISSN: 0007-8506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850614001917> (hämtad 2021-06-01).

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
AVDELNING FÖR KONSTRUKTIONSMATERIAL

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

www.chalmers.se



CHALMERS