



Undersökning av Nötning i 3D-printade Plastkugghjul

Study of wear in 3D-printed plastic gears

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom Maskiningenjörsprogrammet

TARIK FILIPOVIC
OLA NILSSON

EXAMENSARBETE:152/2016

Undersökning av Nötning i 3D-printade Plastkugghjul

Undersökning och jämförelse av formsprutade och 3D-printade
plastkugghjul med avseende på nötning

Tarik Filipovic
Ola Nilsson



CHALMERS

Institutionen för Material- och Tillverkningsteknik
Avdelningen för avancerad oförstörande provning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sweden 2016

Summary

The emergence and establishment of a variety of 3D printing technologies, on the professional and private use markets, enables for a revolution in all industrial sectors. Small to large manufacturing companies all have a need for a mechanical service department and a stock of spare parts for their machines. These parts are often ordered in advance or on demand that can, in turn, sum up to high and unnecessary costs in shipping and storage. The 3D printing technology may allow companies to lower spare part costs and minimize delivery time by making their own parts. This brings a need for knowledge of how 3D printing, as a manufacturing tool, affects the mechanical behavior of materials and properties of the components manufactured. This bachelor thesis will, on behalf of PostNord AB, study the ability to 3D print competitive plastic spare parts. More precisely will the project test and verify how wear affects 3D printed gears. The studied gears will be tested and compared to the original, liquid injection molded, plastic gears (used as reference) that are currently used in the studied Neopost IJ65 machine. The original gears are prone to wear which in turn affects the drivability of the machine and the work environment for the operators.

Our initial hypothesis consisted of the components need to have isotropy, toughness and high heat resistance. After analyzing the results we could conclude that instead of focusing on heat resistance and toughness, the surface structure and isotropy are the significant variables to be considered when printing plastic gears. Assuming the variation in the material properties is not significant. These properties are influenced by the chosen printing type rather than the material properties.

Addema AB printed the gears by using a Selective Laser Sintering (SLS) printer and the material Duraform ®ProX. Addema's claim of 97% isotropy and the ability to include various strengthening composites such as glass fiber and carbon fiber, made SLS the chosen technique for printing the gears. It also provides a solid foundation for future research.

The results showed that the 3D printed gears could compete with the original gears within the recommended cycle interval. An interesting observation on the 3D printed gears was the better fitting on the shafts and in between the gears. This resulted in approximately 3 dB lower noises when driven. This is a significant decrease since 3 dB is half the noise level.

Sammanfattning

Uppkomsten och etableringen utav en mängd olika 3D-print tekniker, både på den industriella och privata marknaden, skapar utrymme för en revolution inom samtliga industriella sektorer. Små till stora tillverkningsföretag har alla ett behov av en avdelning för mekaniskt underhåll samt ett lager av reservdelar. Dessa reservdelar köps in i förebyggande syfte eller då akut behov uppstår vilket kan resultera i höga och onödiga lager- och leveranskostnader. 3D-printning skulle kunna ge företagen en möjlighet att minska lagerkostnader och korta ned leveranstider genom att själva tillverka reservdelar. Därför behövs kunskap och förståelse för hur 3D-printning, som tillverkningsmetod, påverkar diverse materials mekaniska egenskaper, i de framställda komponenterna.

Detta examensarbete utförs för PostNord AB och syftar till att undersöka möjligheten att 3D-printa konkurrenskraftiga reservdelar i plast. Närmare bestämt undersökes hur nötning påverkar 3D-printade kugghjul. Dessa testas och jämförs med formsprutade kugghjul som nu används i Neopost IJ65. När kugghjulen nöts ned under drift påverkas maskinens köregenskaper och arbetsmiljön för operatörerna.

Inledande hypotes utgår från komponenternas behov av isotropi, seghet samt värmebeständighet. Utifrån analys av resultaten drogs slutsatsen att fokus vid tillverkning bör ligga på komponentens ytstruktur och isotropi snarare än värmebeständighet och seghet. Förutsatt att de jämförda materialens mekaniska egenskaper inte avviker signifikant från varandra. Det kunde konstateras att dessa egenskaper påverkas mer av vald print teknik än materialegenskaperna.

Företaget Addema AB printade ut 3D-kugghjulen med Selektiv Laser Sintring (SLS) och använde materialet Duraform ®ProX. Addemas information om att 97% isotropi uppnås samt möjligheten att inkorporera förstärkande kompositer (glasfiber, kolfiber) avgjorde att valet av printteknik föll på SLS för tillverkning av kugghjulen. Det ger en bra grund för fortsatt forskning.

Resultaten visade att dessa 3D-printade kugghjul kan konkurrera med originalkugghjulen inom det rekommenderade cykelintervallet. En intressant observartion var att de 3D-printade kugghjulen har bättre infästning mot axelarna och mindre galapp i kuggingreppen. Det mindre glappet medför en lägre ljudnivå på ungefär 3 dB under körning. Det är en signifikant sänkning då 3 dB motsvarar en halvering av ljudnivån.

Keywords: 3D printing, Wear, Gear, Selective Laser Sintering, Plastic Gears, Plastic Wear

Förord

Denna rapport omfattar 15hp och presenterar vårt examensarbete vid institutionen för material- och tillverkningsteknik på Chalmers tekniska högskola.

Det är ett avslutande arbete på Högscoleingenjörsprogrammet i maskinteknik, 180hp. Arbetet har utförts på PostNord AB's avdelning för teknik och underhåll i Göteborg. Vi vill tacka de personer på PostNord AB, Addema AB och Chalmers tekniska högskola som varit till hjälp under projektets gång.

Framförallt vill vi tacka Mickael Nordqvist och Helena Holmberg på PostNord AB, Samuel Löfstrand och Claes Sjödahl på Addema AB och Gert Persson, Kjell Melkersson, Peter Hammersberg, Antal Boldizar och Kenneth Hamberg på Chalmers.

Tarik Filipovic & Ola Nilsson, Göteborg, Juni 2016

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Avgränsning	1
1.4	Precisiering av frågeställning	2
2	Teoretisk referensram	3
2.1	Maskinfunktion	3
2.2	3D printning	6
2.2.1	Printmetoder	6
2.2.1.1	FDM - Fused Deposition Modeling	6
2.2.1.2	SLA - Stereolitography	7
2.2.1.3	SLS - Selective Laser Sintering	7
2.2.1.4	Printmetodernas styrkor och svagheter	8
2.3	Nötning	9
2.3.1	Tribologi	9
2.3.2	Asperiteter	9
2.3.3	Nötning	10
2.3.4	Mekanismer av abrasiv nötning	12
2.3.5	Typer av abrasiv nötning	13
2.4	Kugghjul	14
2.4.1	Kugg-geometri	16
3	Metod	18
3.1	Printmetod	19
3.2	Kugghjul	20
3.3	Test	21
3.3.1	Smutsuppbyggnad	21
3.3.2	Nötning	21
3.4	Analysmetoder	22
3.4.1	Vägning	22
3.4.2	Mikroskopiering	22
3.4.3	Identifiering av originalkuggarnas plast	22
3.5	Statistisk säkerställning av data	23
3.5.1	Försöksplanering	23
3.5.2	Mätning	23

3.5.3	Test	24
4	Resultat & Diskussion	25
4.1	Smutsuppbyggnad	25
4.2	Nötning av kugghjul	27
4.3	Analys av nötningsmekaniskmer	28
4.3.1	Analys av formsprutade kugghjul	28
4.3.2	Analys av 3D-printade kugghjul	32
4.4	Diskussion	35
4.4.1	Val av printmetod och material	35
4.4.2	Tester	36
4.4.3	Analysmetoder	36
5	Slutsats	38
	Referenser	39
A	Appendix 1	I

1

Introduktion

1.1 Bakgrund

PostNord AB har till uppgift att leverera brev och försändelser mellan kunder runtom i landet. För att kunna göra detta på ett effektivt sätt samlas breven/försändelserna in till terminaler i olika områden där dessa sorteras och skickas vidare. Denna sorteringsprocess sker till största del i olika typer av sorteringsmaskiner.

Avdelningen teknik och underhåll på PostNord AB syftar till att sköta underhåll och reparationer på dessa maskiner. Maskinerna är ofta stora och väldigt komplext uppbyggda. De innehåller många reserv/slitdelar, i flera fall är dessa tillverkade i plast. Då tillverkarna av maskinerna ofta är utländska krävs relativt stora lager för reservdelarna, dessutom är kostnaden för många delar mycket hög.

Med nya tillverkningstekniker som 3D-printning, framförallt i plast, är det därför av intresse att studera om det skulle vara lönsamt att tillverka vissa delar själva.

1.2 Syfte

Studien syftar till att undersöka nötningen i 3D-printade plastkugghjul och jämföra detta med de kugghjul som sorteringsmaskinen "Neopost IJ65" använder i dagsläget. Dessutom undersöks om nötningen i de 3D-printade kugghjulen ligger så pass nära nötningen i originalkuggarna att 3D-printtekniken har potential att användas som tillverkningsmetod för kugghjul i plast. Arbetet skall användas som ett underlag för framtida utveckling av underhållsarbetet på PostNord AB.

1.3 Avgränsning

Undersökningen har endast behandlat Selective Laser Sintered 3D-printning (SLS) som tillverkningsprocess för kugghjulen. Skrivaren som använts heter ProXTM500. Ingen produktutveckling av originaldelens konstruktion eller materialval har utförts. Till grund ligger alltså den befintliga utformningen av kuggen och det material Ad-dema AB använder i SLS skrivaren, Duraform ®ProX. I mån av tid undersöks även glasfiberförstärkt material. De ekonomiska aspekterna av 3D-printning, inhandling av skrivare, material etc undersöks ej.

1.4 Precisiering av frågeställning

- Hur skiljer sig nötningen mellan originaldelen och 3D-printade kugghjul med avseende på körtid i maskin?
- Hur stor blir variationen av livslängden med avseende på material och tillverkningsprocess?
- Har SLS tekniken potential som tillverkningsteknik för delar som utsätts för originalkugghjulens belastning?

2

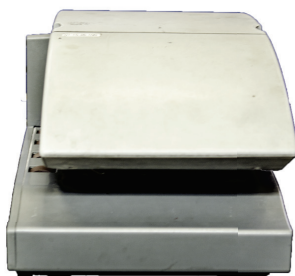
Teoretisk referensram

2.1 Maskinfunktion

Maskindelen som de studerade kugghjulen används i är en matardel. Den separerar och matar fram ett brev i taget till nästkommande maskindel i en brevstämplingssmaskin. I *Figur 2.1* A) ses maskinen i sin helhet och i B) den separata matardelen. I helhetsbilden ses först, sett från vänster, buffertenheten varifrån breven dras in i mataren (mittensektionen) för att separeras och matas fram till stämpelenheten på höger sida. Drivmotor och styrning för maskinen sitter i stämpelenheten och den mekaniska kraftöverföringen sker via ett kugghjul som sitter mellan mataren och stämpeldelen.



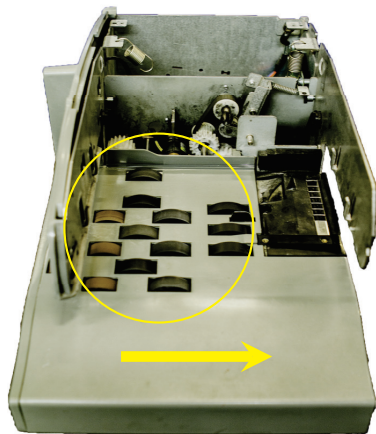
A) Komplet maskin



B) Matare, Neopost IJ65

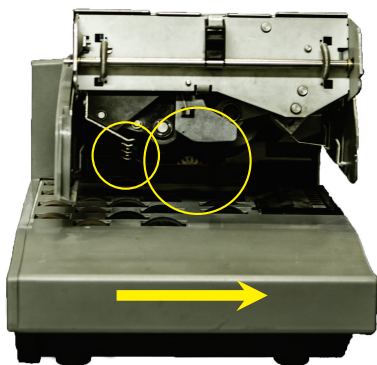
Figur 2.1: Brevmaskin

Frammatningen av breven sker via ett antal matarhjul i den undre delen av mataren. Hjulen markeras med en cirkel i *Figur 2.2*. Dessa drar fram breven i pilens riktning med hjälp av friktion. Matarhjulen drivs via ett system av kugghjul vilka har samma storlek och geometri. En koppling kopplar ihop systemet med drivningen från stämpelenheten. Till och frånslag av kopplingen styrs av en givare som påverkas av förbipasserande brev, på så sätt kan matningshastigheten av breven kontrolleras.

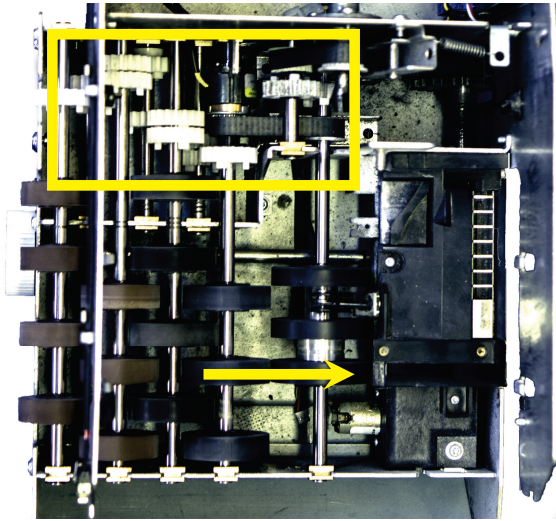


Figur 2.2: Matarbana

I matarens övre del sitter en fjäderupphängd vagga, *Figur 2.3*. Här sitter friktionsgummi, lilla cirkeln, och matarhjul, stora cirkeln, som skall separera breven från varandra så att endast ett brev åt gången matas fram.

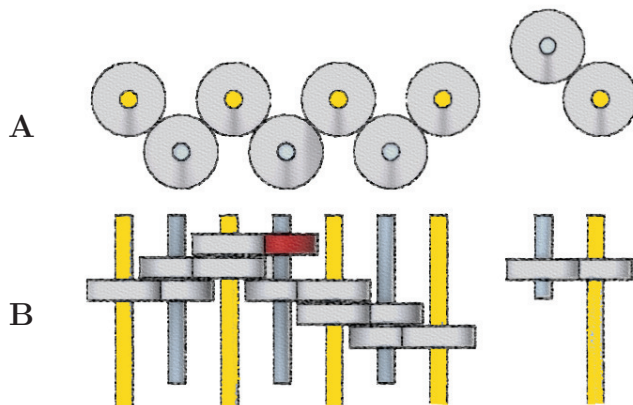


Figur 2.3: Matarbana med överdel monterad



Figur 2.4: Matarhjul och kuggsystem

I *Figur 2.4* ses mataren ovanifrån utan skyddsplast och visar systemet av matarhjul och kugghjul. Pilen visar brevens färdriktning. En förenklad schematisk bild av kuggsystemet som driver mataraxlarna kan ses i *Figur 2.5*. Systemet visas från sidan i *Figur 2.5 A)* och ovanifrån i *Figur 2.5 B)* som även förtydligar rutan i *Figur 2.4*. I den nedre vyn är udda axlar gulmarkerade och är axlar till matarhjulen. I den nedre vyn är det andra hjulet från vänster i den övre raden av kugghjul röd-markerat då det innehåller ett "oneway-bearing"¹ och har på grund av det inte printats.



Figur 2.5: Kuggsystem

¹Ett lager som gör att kugghjulet endast kan överföra moment och hastighet i en rotationsriktning.

2.2 3D printning

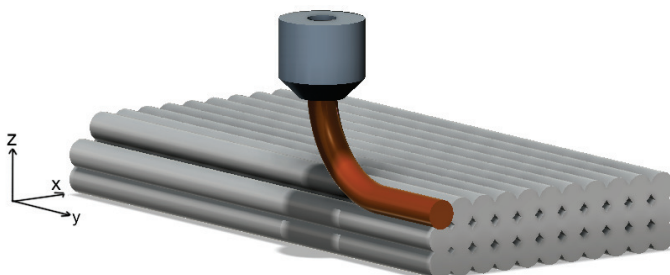
Vid traditionell tillverkning börjar processen med ett grundstycke från vilket material tas bort tills dess att den färdiga produkten trätt fram. 3D-printning fungerar precis tvärtom. Med denna metod byggs slutprodukten upp från grunden genom att tillsätta material lager för lager, så kallad additiv tillverkning. För att skrivaren skall veta hur varje lager skall skrivas ut behövs en programvara som kan "översätta" en 3D-modell till flera 2D-modeller som sedan staplas på varandra och på så sätt återskapar 3D-modellen. Denna översättning kallas slicing och programvaran som används för detta har stor inverkan på hur bra utskriften blir.

2.2.1 Printmetoder

Det finns flera olika printmetoder. Några av dessa är FDM, SLA, SLS. Gemensamt för dem alla är att de skriver ut ett lager i taget. I följande avsnitt beskrivs de olika metoderna.

2.2.1.1 FDM - Fused Deposition Modeling

En plasttråd matas genom ett upphettat printhuvud som placerar ut det halvsmälta plastmaterialet på en byggplattform. När första lagret är färdigt förflyttas antingen arbetsbordet eller printhuvudet i z-led och nästa lager börjar skrivas ut på det föregående. Processen upprepas till dess att detaljen är färdig. I *Figur 2.6* visas principen i förstoring, vid låg upplösning av utskrift kan denna struktur ses tydligt på den färdiga detaljen. Strukturen som bildas i xy-planet kallas raster och hur dess orientering skiljer sig mellan de olika lagren påverkar liksom upplösningen (lagertjockleken) detaljens hållfasthet genom att "hålrummen" blir olika stora, och storleken på "sammanfogningspunkterna" förändras.[1]

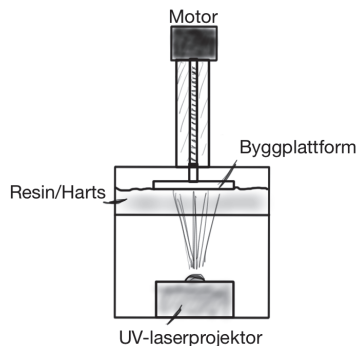


Figur 2.6: Printraster

2.2.1.2 SLA - Stereolithography

Byggplattformen doppas i ett resin eller hartsh som härdar när det bestrålas av UV-laser. Plattformen doppas därefter åter i resinnet och processen upprepas.

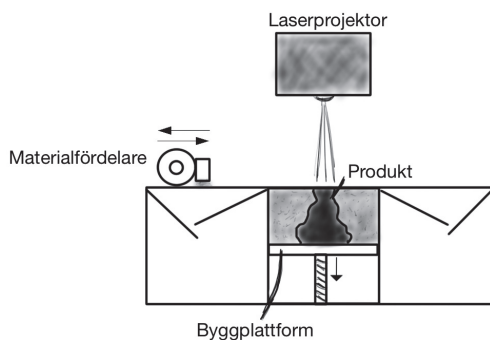
I *Figur 2.7* ses UV-projektorn under resin-badet och produkten skrivs ut på undersidan av byggplattformen. Det finns skrivare där projektorn är placerad överst, produkten skrivs då ut på ovansidan av byggplattformen.



Figur 2.7: Principiell SLA-printer

2.2.1.3 SLS - Selective Laser Sintering

Ett pulver av plastmaterial fördelas jämt över arbetsytan i ett utrymme uppvärmt till strax under smältpunkten för materialet. Med en laser tillförs den extra energi som behövs för att smälta ihop materialet. Lasern kan liknas vid en penna som ritar upp detaljens "lagergeometri" innan nästa pulveralager fördelas och processen upprepas. I *Figur 2.8* illustreras principen för SLS-printning. Byggplattan ses i mitten och materialfördelaren sprider ut ett jämnt lager av material över denna för varje lager. På sidorna ses uppsamlingskärslar som tar hand om överflödigt material.



Figur 2.8: Pricipiell SLS-printer

2.2.1.4 Printmetodernas styrkor och svagheter

FDM

- + Relativt billiga skrivare och material. Lätt att komma igång.
- Lång utskriftstid, hållfastheten skiljer sig i de olika riktningarna (anisotropi) [2]. Svårt att uppnå noggrannheter repetitivt. Det vill säga att två likadana detaljer utskrivna i samma skrivare inte kommer att ha exakt lika geometri.

SLA

- + Bra toleranser och ytfinhet. Relativt snabb process.
- Låg värmebeständighet

SLS

- + Goda mekaniska egenskaper i de material som används och relativt hög värme beständighet. Genomsmältningen medför hållfasthet näst intill lika för x, y, z-riktningarna (isotropi) [2].
- Skrivaren är dyr i inköp och kräver utbildning för att kunna användas

2.3 Nötning

I detta teoriavsnitt ges en bakgrund till de tribologiska fenomen som denna studie undersöker. Inblick ges i vad nötning är för något och när det sker. Även likheter och skillnader för olika typer av nötning behandlas. Fokus ligger på de delar som är relevanta för studien, alltså nötning som kan påverka plastkugghjul.

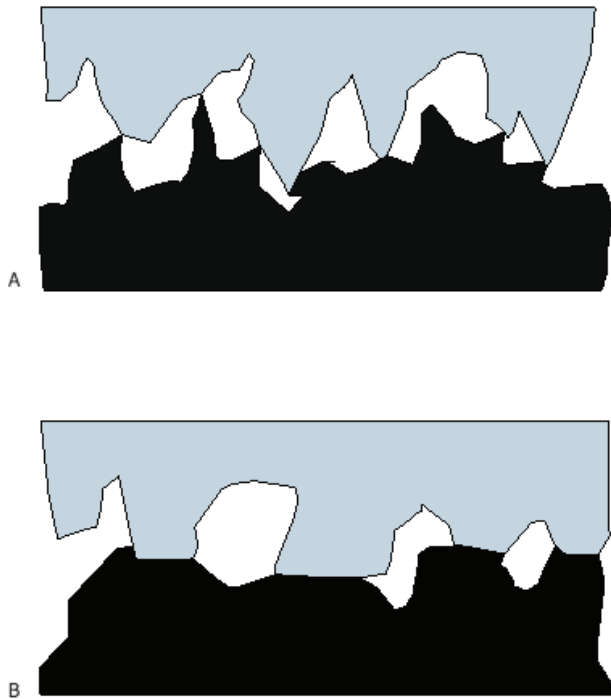
2.3.1 Tribologi

Tribologi är vetenskapen om mellanliggande ytors relativa rörelse. Ordet tribologi kommer från grekiskans "tribos" som betyder "att gnida". Mer precist kan detta definieras som vetenskapen om rullande och/eller glidande ytors kontakt. Tillämpningen av tribologi syftar till att ge inblick i hur friktion, nötning och smörjning kan optimeras i diverse tillämpningar för att förbättra tillförlitligheten samt kostnaderna för tillverkning, montering och underhåll. [3]

Studie av aktuellt exempel visar att det handlar om kugghjul vars ytor är i kontakt med varandra. Denna kontaktyta kallas för tribologiskt belastad zon. När maskinen körs kommer materialet att nästas bort från kuggarna, i enlighet med observationer. Detta resulterar i dåliga och opålitliga köregenskaper och prestanda hos maskinen. Systemet som observeras är ett öppet system, dvs. kugghjulen är inte isolerade av något "hus" och omkringliggande medium är luft. Systemet är heller inte smörjt och friktionskoefficienten mellan kuggingreppen är inte avsiktligt manipulerat. [3] Däremot förekommer en del damm. Mer om detta i avsnittet om abrasiv nötning nedan. Dessa faktorer är beskrivande för ett tribologiskt system då de ger en bild av vad för slags miljö systemet befinner sig i samt vad det är för slags ytor och material som rullar och/eller glider mot varandra.

2.3.2 Asperiteter

När det talas om material i nötningssammanhang är ytstrukturen en återkommande diskussionspunkt. Desto slätare yta en kugg har ju kortare tid tar det för kuggen att nästas in. Alltså att uppnå den ytstruktur som ger optimala körförhållanden ur bland annat friktionssynpunkt. Är det mycket material som nästas bort innan detta tillstånd uppnås kan man anta att det kommer finnas många tredjepartspartiklar i den tribologiskt belastade zonen [3]. Dessa partiklar bidrar till nötningen och är därmed en variabel man vill minimera.



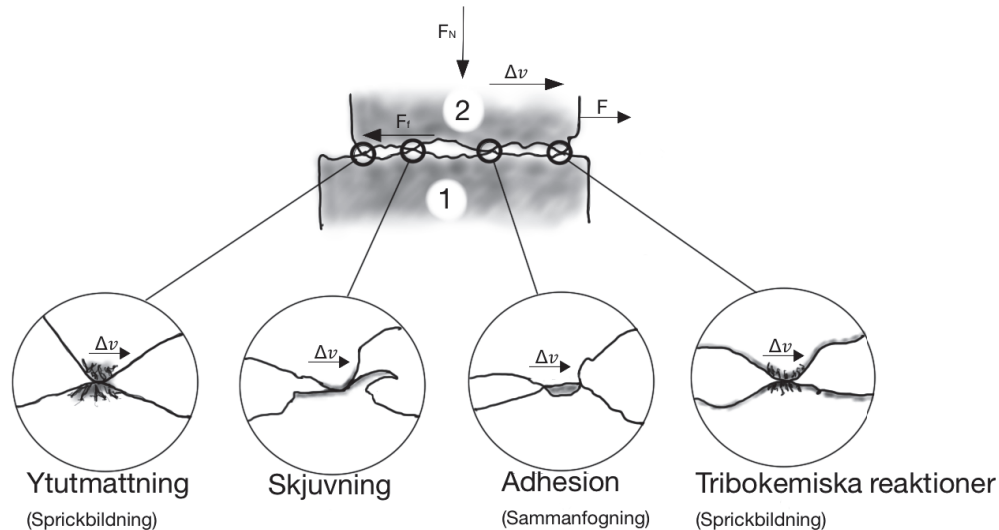
Figur 2.9: A) Asperiteter innan kontakt B) Asperiteter under kontakt

I *Figur 2.9* ses två ytor som är i kontakt med varandra. Asperiteterna, mikroskopiska toppar, är de "taggar" som sticker ut från materialets yta. När dessa kommer i kontakt med varandra bryts de av, beroende på kontaktkraften. De bildar då korn som bidrar till nötningen. Hur stor påverkan de har beror på hur hårda dessa korn är. Ett slätare material har asperiteter som inte är så höga och spetsiga jämfört med grövre material. I kapitlet *Resultat & Diskussion* presenteras detta tydligare.

2.3.3 Nötning

När två ytor kommer i kontakt och smörjfilmen blir för tunn eller obefintlig, uppstår nötning. Det är en gradvis ökande förlust av material som sker på grund av mekanisk påverkan via kontakt och relativ rörelse. Nötning kan identifieras som små lösgjorda partiklar och ändring av materialets form i det tribologiskt belastade området. Nötning kan kategoriseras i flera olika typer beroende på val av material och typ av tribologisk belastning [3]. Dessa fyra är dock de viktigaste:

- Surface fatigue - Ytutmattning
- Abrasion - Skjuvning
- Adhesive - Adhesiv (Sammanfogning)
- Tribochemical reaction - Tribokemisk reaktion



Figur 2.10: Fyra nötningsmekanismer

I *Figur 2.10* är dessa fyra tydligt visualiserade. Den verkliga nötningen (effektiv) kan ske med dessa fyra typer individuellt, successivt eller åtföljande av varandra. [3]

Ytutmattning bildar sprickor under ytan. Sprickbildningen utvecklas till avlägsning av ytfragment/partiklar genom växlande belastning i närheten av den tribologiskt belastade zonen.

Abrasiv nötning eller *skjuvning*, skapar så kallad "microcutting" där repetitiv plogning eller skjuvning av den ena ytan mot den andra skapar brott orsakade av hårda partiklar i det mellanliggande mediet. Vi får alltså långa raka urgröpta linjer.

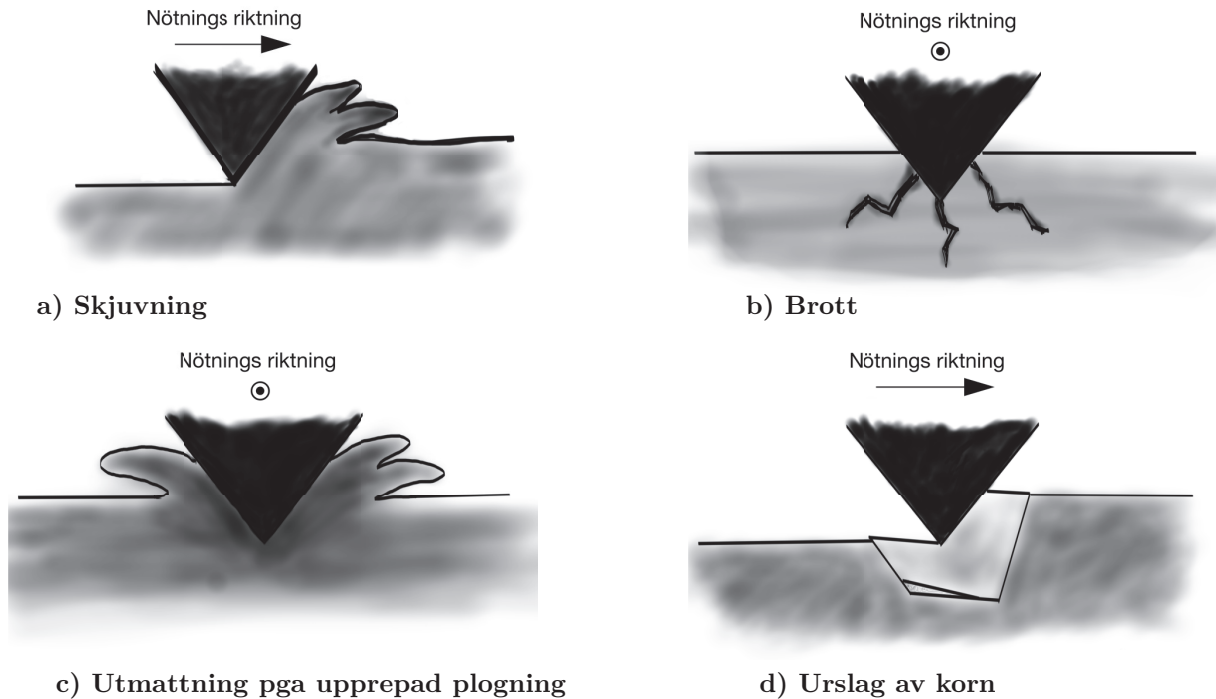
Adhesiv nötning bildar så kallade mikrosvetsar på de slitna kontaktytorna mellan kropparna. Om denna nya svetsade bit är starkare än materialet i kroppen den är fastsvetsad i kommer den att avlägsnas. Sedan kan den i sin tur svetsas fast i den andra ytan.

Tribokemisk reaktion är en kemisk reaktion mellan det belastade ytområdet och det kringliggande mediumet, orsakat (katalyserat) av friktionsvärme. Denna nya substans får andra egenskaper. Bildas det ett tillräckligt tjockt lager kan dess inverkan på friktionen vara stor. [3]

Abrasiv nötning sker då partiklar ligger an mot en yta med samma eller högre hårdhet. Ett exempel är en skopa på grävmaskiner. På dessa kan man efter en viss tids användning se tydliga spår av abrasiv nötning där sten, sand etc nötts bort metallen i ytskiktet [3]. Abrasiv nötning sker alltid tillsammans med några/alla av de ovan nämnda typerna. Ett problem är dock att det är svårt att avgöra vilken slags mekanism som är inblandad i processen.

2.3.4 Mekanismer av abrasiv nötning

Man kan tänka sig att abrasiv nötning sker på samma sätt som fräsning ("cutting"). Det har bevisats, med mikroskopiering, endast gälla för de allra vassaste av partiklarna. [3]



Figur 2.11: Nötningsmekanismer

Enligt *Figur 2.11a* kommer material avlägsnas via så kallad "cutting" då ett hårdare material rör sig mot en mjukare eller lika hård yta.

I *Figur 2.11b* är det nötta materialet skört, t. ex. en keram, som ger lösa partiklar till följd av en tillväxt av sprickor.

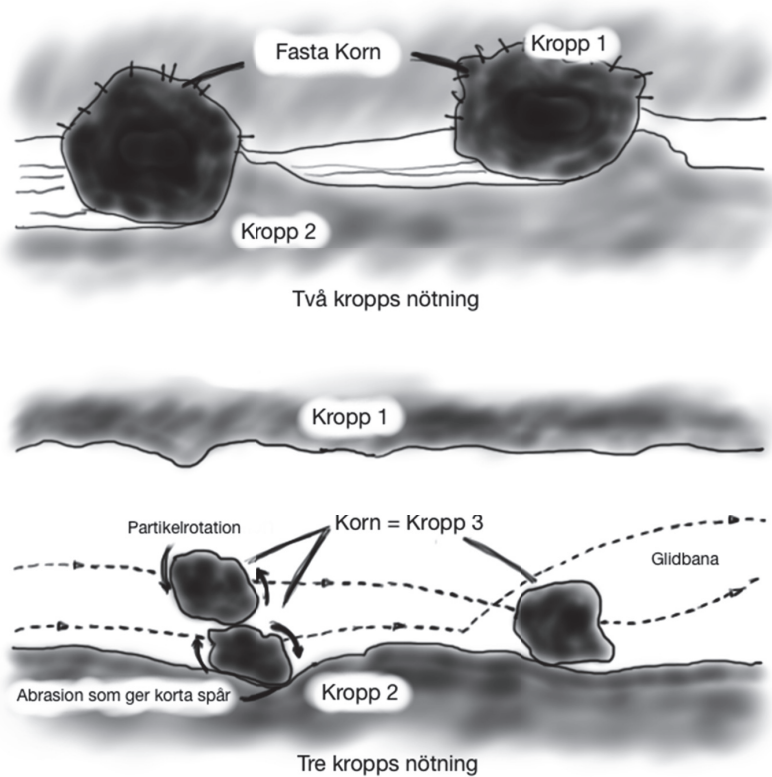
Då ett mer duktilt material används, bild *Figur 2.11c*, uppstår spår i materialet pga. repetitiv utmattning. *Figur 2.11d* visar kornavlägsning i keramer ty här är bindningskrafterna mellan kornen svaga vilket möjliggör en avlägsning av hela korn. I det studerade fallet är materialet plast och det förekommer därför inte att korn avlägsnas då mikrostrukturen inte består av korn som t.ex. metaller. Däremot sker det att större klumpar avlägsnas, då på grund av utmattning.

2.3.5 Typer av abrasiv nötning

Sättet som partiklar rör sig över en yta avgör hur den kommer att nötas. Man har lyckats identifiera två olika fall för abrasiv nötning.

- Två kropps nötning
- Tre kropps nötning

Två-kropps nötning kan beskrivas likt ett sandpapper som gnids över en yta. Tre-kropps nötning kan liknas vid samma sandpapper fast att sandkornen ligger lösa mellan pappret och arbetsytan [3]. Dessa korn kan i detta fall, till skillnad från det föregående, både rulla och glida över ytan.



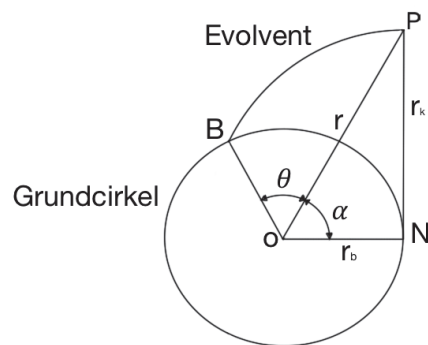
Figur 2.12: Typer av abrasiv nötning

På senare tid har det upptäckts att tre-kropps nötning är 10 gånger långsammare än två-kropps nötning då den måste konkurrera med andra mekanismer så som adhesiv nötning. Här efterliknar två-kropps abrasiva nötningen mer ett skärverktyg (tänk fräs) då den nötter bort material. [3]

2.4 Kugghjul

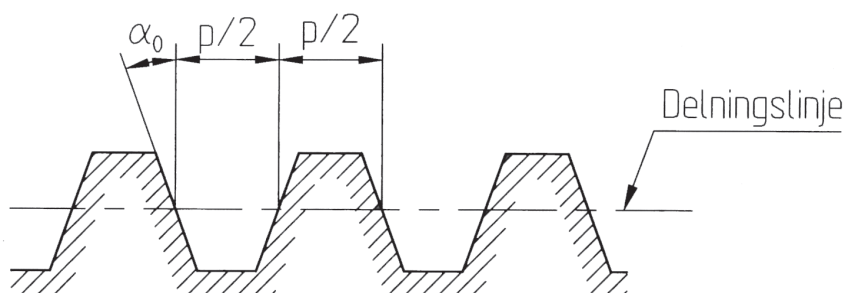
Kugghjul överför rotationshastighet och moment från en axel till en annan. För att få en jämn gång och konstant utväxling hos kugghjulen skall kuggarna rulla på och av varandra utan glidning. Hur bra de kan göra detta avgörs av kuggarnas utformning. Det finns flera varianter av kuggformar men den i särklass vanligaste formen är evolventformen och är den form som de studerade kuggarna har. För att de printade kuggarna skall kunna jämföras med originalen, måste även dessa ha evolventkuggform. Formen illustreras i *Figur 2.13*.

Evolvent kallas en kurva genererad av en punkt på en rät linje som utan glidning rullar på en cirkel. [4]



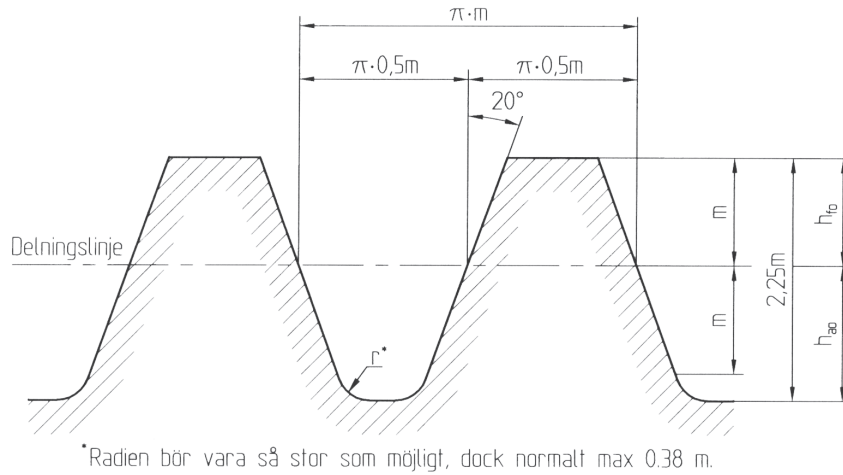
Figur 2.13: Evolvent

Då grundcirkelradien r_b går mot oändligheten kommer krökningsradien r_k också göra det vilket medför att evolventen övergår till en rät linje. En del av ett hjul som uppfyller dessa förutsättningar kallas kuggstång. I *Figur 2.14* är pressvinkeln α_0 , delningen p och delningslinjen markerad.



Figur 2.14: Kuggstång [4]

En kuggstång kan alltså användas för att tillverka kugghjul med evolventkuggar. För en sådan kuggstång har det tagits fram en standardiserad referensprofil för att begränsa antalet varianter och underlätta tillverkningen av kuggar. SMS (Sveriges Mekanförbunds Standardcentral) har fastlagt pressvinkeln α_0 till 20° och standardiserat delningen $p = \pi m$, där m är modulen. En sådan referensprofil visas i *Figur 2.15*.

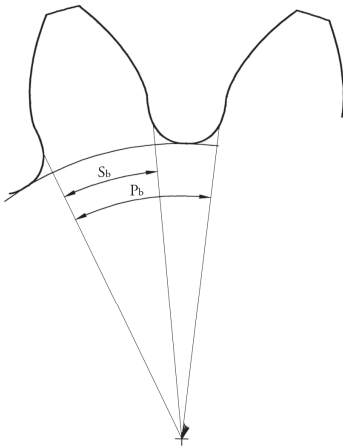


Figur 2.15: Referensprofil enligt SS 296 [3]

2.4.1 Kugg-geometri

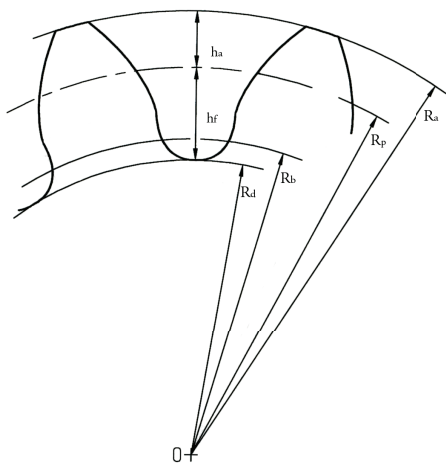
När kugggeometrin studeras kan två system användas, det naturliga systemet och modulsystemet där det senare baseras på den standard SMS slagit fast. Den geometriska datan för kuggen kan delas in i två grupper.

- Primära storheter: Data för att beskriva växelns funktion (kuggtal z , grunddelnig p_b och grundtjocklek s_b)



Figur 2.16: Primära storheter

- Sekundära storheter: Data för att komplettera kugghjulets form (ytterradie r_a , delningsradie R_p , grundradie R_b , bottenradie R_d , topphöjd h_a och fothöjd h_f)



Figur 2.17: Sekundära storheter

Nedan listas de primära storheter hos de två systemen som ett rakkugghjuls kuggflanker entydigt bestäms av.

$$\text{Naturliga systemet} \quad \left\{ \begin{array}{l} z \text{ kuggtal} \\ p_b \text{ grunddelning} \\ s_b \text{ grundtjocklen} \end{array} \right.$$

$$\text{Modul systemet} \quad \left\{ \begin{array}{l} z \text{ kuggtal} \\ m \text{ modul} \\ \alpha_0 \text{ pressvinkeln} \\ x \text{ profilförskjutningsfaktorn} \end{array} \right.$$

Om antalet kuggar z och modulen m är känd kan övriga parametrar i *Figur 2.9* för ett standardkugghjul utan profilförskjutning räknas fram enligt:

$$Rp = \frac{m \cdot z}{2} \quad (2.1)$$

$$Rb = \cos 20 \cdot Rp \quad (2.2)$$

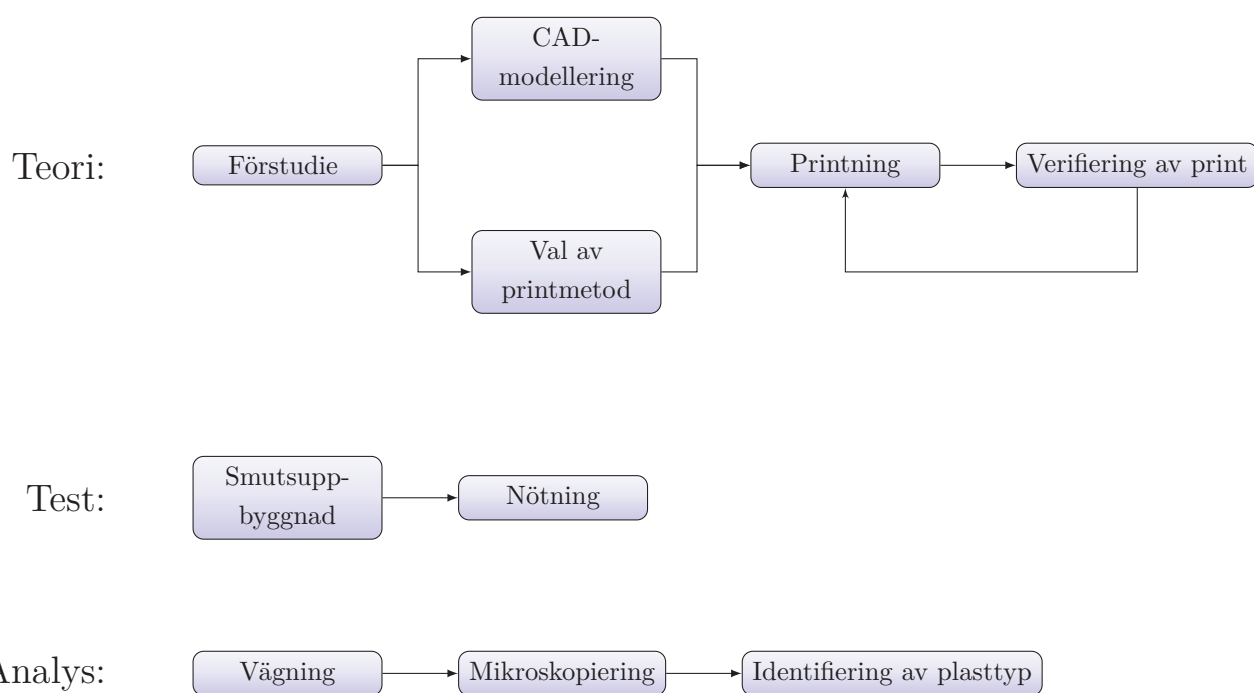
$$Ra = Rp + m \quad (2.3)$$

$$Rd = Rp - 1.25 \cdot m \quad (2.4)$$

3

Metod

Nedan i *Figur 3.1* visas ett flödesschema på projektets arbetsgång. De ingående momenten förklaras detaljerat i de följande avsnitten. Översiktligt delas arbetet upp i tre steg. Teoretisk bearbetning, fysiska tester och analys av resultaten.



Figur 3.1: Flödesschema

3.1 Printmetod

En förstudie genomfördes på 3D-printtekniken. För och nackdelar med de olika metoderna listades utifrån de avgränsningar som styr projektet. Detta avgjorde valet av printmetod föll på SLS. Metoden SLS valdes på grund av att produkter printade med denna metod i stort sett får en homogen materialstruktur vilket medför att de mekaniska egenskaperna hos materialet är nästintill identiska, oberoende av belastningsriktning (isotropa). En fördel med detta är att 3D-modellens orientering i skrivarutrymmet inte blir beroende av hur detaljen skall belastas (hänsyn till rasterorientering behöver ej tas). Val av orientering bestäms istället av andra parametrar, t.ex. effektivt utnyttjande av maskinens printvolym och axelhålets orientering, hålet skall ligga axiellt i z-riktning. Dessutom har Addema med SLS tekniken möjlighet att förstärka nylonmaterialet med antingen glas eller kolfiber vilket är intressant för fortsatta studier. I *Tabell 3.1* nedan, visas fyra material som används i SLS och SLA skrivarna. FDM står inte med eftersom dess raster ger anisotropi vilket gör materialet för beroende av belastningsriktning.

	SLS - Selective Laser Sintring		SLA - Stereolitografi	
Material	PDX (Polyamid)	Duraform ProX (Polyamid)	Visijet Clear (PC)	Visijet Tough (PP/ABS)
Mekaniska egenskaper				
Slagseghet	132 MPa	45 J/m	46 J/m	44 J/m
Hårdhet, Shore D		73	85	86
Sträckgräns	85 MPa	41.1 MPa	52 MPa	41 MPa
E-Modul	8300 MPa	1740-1905 MPa	2560 MPa	1890 MPa
Isotropi	JA	JA	JA	JA
Värmebeständighet	175 C	175 C	51 C	62 C

Tabell 3.1: 3D-printrarnas material samt deras egenskaper

Ytterligare observeras att SLA-materialen har bra mekaniska egenskaper. Däremot gäller dessa värden för en provbit av materialet. Det visar på materialegenskaper ur vilka det ej går att avgöra hur tillverkningstekniken påverkar den slutliga produkten. Anledningen till att Duraform ®ProX och inte PDX användes var helt enkelt för att Addema inte var klara med hur maskinerna skulle kalibreras.

3.2 Kugghjul

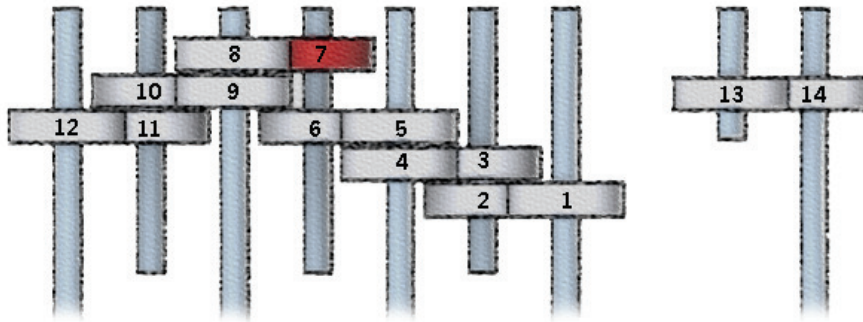
Originalkuggens inner och ytterdiameter mättes upp med skjutmått. Kuggmodulen kunde avläsas ur dokumentation för reservdelar till maskinen. Med de uppmätta värdena samt kuggmodulen kunde kugghjulets geometri räknas ut enligt *ekvation 2.1-2.4 sid.17*. En 3D-modell togs fram i Catia.V5. Ritning kan ses i *A.2*. Denna modell skickades därefter till Addema som IGS-fil¹ för printning. Två dagar senare kom två testkugghjul på posten. De printade hjulen jämfördes med originalhjulen samt testades att monteras in i maskin. Jämförelserna medförde en viss modifikation i 3D-modellen, modifieringen rörde inte själva kuggprofilen utan omfattade tapp/hålgeometrier. Den nya 3D-modellen skickades till Addema för printning av kugghjulen som skulle användas för testkörningarna. Batchen med testkuggar kom ca en vecka senare och trots de geometriska korrigeringarna behövdes axelhålen brotchas² upp för att de lättare skulle glida på axlarna.

¹Initial Graphics Exchange Specification

²Brotsch är ett skärande verktyg som används för att upprymma ett borrarat hål

3.3 Test

Tester kördes i två omgångar. Det första testet kördes för att mäta smutsuppbyggnad hos originalkuggarna och om möjligt kunna se någon trend över tid. Den andra testomgången kördes för att kunna mäta och jämföra slitaget hos både original och 3D-printade kugghjul. Kugghjulen markerades med nummer motsvarande den position de har i maskinen och därmed kunna koppla resultaten till specifika placeringar i maskin. *Figur 3.2* visar kugghjulens positionsnumrering.



Figur 3.2: Kugghjulens positionsnumrering efter position

3.3.1 Smutsuppbyggnad

En stor del smuts och damm byggs upp i maskinen då den körs i produktionen. Syftet är att få värden på hur stor vikt smuts som byggs upp över tid. Det skulle möjliggöra en beräkning av vikten för bortnött material genom att väga smutsiga kugghjul.

I smutsuppbyggnadstestet kördes endast originalkuggar i en maskin. Körningarna utfördes i två intervaller. Första körningen bearbetade 100'000 brev och den andra körningen bearbetade 200'000 brev. Mätningar gjordes genom vägning före körning av rena kuggar samt av smutsiga och rengjorda kuggar efter körning.

3.3.2 Nötning

Likt testerna för smutsuppbyggnad kördes kuggarna för att uppnå mätbara värden för bortnött material. Två maskiner kördes parallellt. Den första maskinen hade enbart nya kuggar (3D-printade) och i den andra kördes originalkuggarna. Efter ca. 100'000 brev (två dagars körning) växlad maskin. Originalkuggarna togs alltså ut och lades i maskinen som körde de nya kuggarna och vice versa. Sedan kördes maskinerna i två dagar till, alltså 100'000 brev. När 500'000 brev behandlats togs kuggarna ut för mätning av nötningen. Varje kugghjul rengjordes genom försiktig borstning och blåsning med tryckluft för att avlägsna damm, smuts och bortnött material. För att minimera kuggarnas kontakt med fett och fukt från händerna användes gummihandskar vid hanteringen av kugghjulen.

3.4 Analysmetoder

I huvudsak tillämpades två metoder, vägning och visuell jämförelse i mikroskop för att analysera och jämföra nötningen hos de två typerna av kugghjul. För att avgöra plasttyp i originalkugghjulen användes förbränning som analysmetod.

3.4.1 Vägning

För vägningen av kugghjulen före och efter testerna köpte PostNord in en precisionsvåg, KERN EMB 200-3. Vågen mäter ner till en tusendels gram med en noggrannhet på $\pm 0.002g$. Alla mätningar gjordes i samma rum för att minimera variationen av luftfuktighet. Värdena från vägningen jämfördes med de ursprungliga värdena för kuggarna innan de sattes in i maskinen för körning.

3.4.2 Mikroskopiering

Efter testkörning och vägning togs alla kugghjulen till Material- och Tillverknings-teknik laboratoriet, på Chalmers Campus Johanneberg, för visuell undersökning av nötningens påverkan i ett stereomikroskop (Zeiss steREO Discovery 2.0). Bilderna togs med programmet Axio Vision Rel 4,8. Under mikroskopieringen analyserades kuggarnas ingreppsytor samt dess kanter. Tecken på nötning lokaliserades och bilder togs av intressanta områden för att analysera och jämföra mot de teoretiska modellerna. Jämförelse på ytstrukturen gjordes mellan okörda originalkugghjul och okörda 3D-kugghjul. Därefter jämfördes även de slitna kugghjulen, position för position. Jämförelsen utfördes under samma förstoring vid tre olika förstoringsgrader. De slitna kugghjulen undersöktes enligt följande. Två hjul på vilka störst nötning mätts/vägts upp mikroskopieras. Fyra kuggar på dessa hjul undersöks, kuggnummer: 1, 4, 9 och 16. På detta sätt erhålls en bild av både jämn och ojämn position på hjulet. Motsvarande 3D-printat kugghjul undersöktes sedan med samma kuggar, alltså kugg nummer 1, 4, 9 och 16. Utöver dessa mikroskopierades även det originalkugghjul och 3D-printat hjul som visade på minst nötning.

3.4.3 Identifiering av originalkuggarnas plast

Eftersom information om vilket plastmaterial originalkuggarna är tillverkade utav inte var tillgängligt tillämpades en identifieringsmetod. Förbränning av plastprov har länge använts för identifiering av olika plasttyper. Eftersom de mer noggranna metoderna är dyra och tidskrävande samt att behovet i det aktuella fallet inte innefattar kunskap av exakt plasttyp var denna metod acceptabel. Vid tillverkning av kugghjul i plast är det främst nylon och POM-plast³ som används på grund av deras materialegenskaper [5]. Vid förbränning kan dessa plaster identifieras av deras olika lukter. Nylonet brinner med en blå synlig låga vars lukt påminner om bränt hår. POM-plasten brinner med en blå nästan osynlig låga och har en stark stickande lukt. En bit av kuggen skars ut och antändes med en vanlig tändare. Plastbiten hölls

³Polyoxymetylen - elastisk termoplast

med en tång och luktades sedan försiktigt på. Resultatet av förbränningen stämde bäst överens med beskrivningen för nylon. [6]

3.5 Statistisk säkerställning av data

3.5.1 Försöksplanering

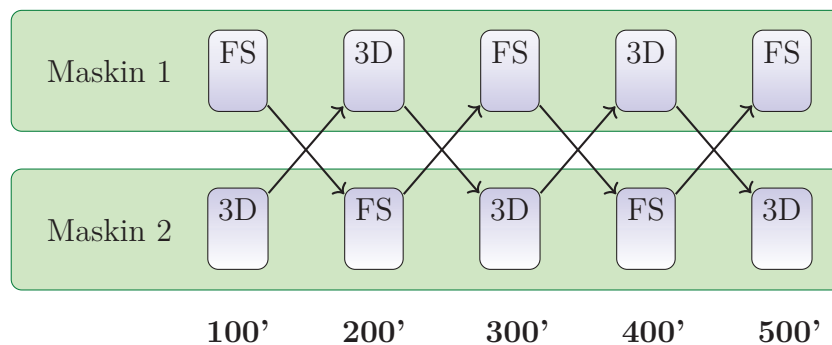
Då testerna inte kördes i testrigg utan i en befintlig maskin, behövde försöken planeras ordentligt för att minimera risken för utfall pga okontrollerbara faktorer. För konsultation togs kontakt med Peter Hammersberg på institutionen för Material och Tillverkningsteknik som kunde hjälpa till att lägga upp en strategi för försöken. Den gick först och främst ut på att dölja utfall av de faktorer som inte kunde kontrolleras med hjälp av randomisering. Exempelvis kunde utfall orsakade av maskinunikas egenskaper, som skulle kunna påverka kuggarna, minimeras om två maskiner utnyttjades växelvis.

3.5.2 Mätning

Varje kugghjul vägdes upp fem gånger och det slutliga resultatet blev ett medelvärde av dessa fem vägningar. Denna metod tillämpades eftersom en homogen miljö för mätningarna inte kunde erhållas. En säkerhetsmarginal mot eventuella variationer som kunde påverka resultatet, exempelvis temperatur och luftfuktighet kunde på så sätt skapas.

3.5.3 Test

För att undvika variationer i drivning och därmed ojäm nötning i växlar kördes båda uppsättningar i bägge maskinerna. Tidsbrist begränsade oss till en maskinväxling efter ca 100'000 brev. Originalkuggarna monterades alltså in i maskinen som körde de nya kuggarna och vice versa. Målet var en mer rättvis fördelning av parametrar som inte kunde mätas eller kontrolleras. Detta syftade primärt på maskinunika parametrar som exempelvis varvtal i motorn och överfört moment mellan varje kugg. Lokala miljöfaktorer som exempelvis, temperatur, damm och luftfuktighets minimerades även på detta sätt.



Figur 3.3: Växlings schema för kugghjulen

4

Resultat & Diskussion

4.1 Smutsuppbyggnad

För att mäta smutsen som ackumulerades på kugghjulen vägdes de upp före körning (rena kugghjul), efter körning (smutsiga, slitna kugghjul) och ytterligare en gång efter att de rengjorts. *Tabell 4.1* visar mätvärdena för de två körningarna i smutsuppbyggnads testet. Det kan ses att skillnaderna i vikt endast är ett fåtal tusendels gram, oftast $< 0.005g$. Det innebär att skillnaderna ligger inom feltoleransen för den använda vågen och kan därför inte användas för att säga något om smutsuppbyggnadsförloppet.

Formsprutade kugghjul

Pos.nr	100'			200'		
	Start	Smutsigt	Rent	Start	Smutsigt	Rent
1	5,310	5,310	5,305	5,310	5,243	5,238
2	4,892	4,891	4,891	4,892	5,295	5,292
3	4,911	4,914	4,908	4,911	5,252	5,252
4	5,260	5,260	5,257	5,260	5,320	5,311
5	5,318	5,317	5,315	5,318	5,264	5,259
6	4,887	4,889	4,886	4,887	5,327	5,320
7- "Oneway"	9,173	9,170	9,169	9,173	9,183	9,174
8	5,316	5,317	5,317	5,316	5,323	5,321
9	5,260	5,260	5,261	5,260	5,330	5,331
10	4,921	4,925	4,922	4,921	5,353	5,350
11	4,899	4,900	4,889	4,899	5,254	5,254
12	5,254	5,250	5,252	5,254	5,327	5,322
13	5,332	5,331	5,330	5,332	5,319	5,318
14	4,914	4,917	4,915	4,914	5,291	5,287

Tabell 4.1: Kugghjulens vikt i *gram*

I *Tabell 4.2* visas beräkningen av smutsuppbyggnaden per position. Första kolumnen för varje körning visar differensen mellan vikten för kört, smutsigt kugghjul och kugghjulets initialvikt. Kolumn två (Bortnött) beräknades som differensen mellan vikten för kört, rengjort kugghjul och initialvikten. Kolumn tre (Smuts) kunde därefter beräknas som kolumn ett (Smuts+Nött) minus kolumn två (Bortnött).

Formsprutade kugghjul

Pos.nr	100'			200'		
	Smuts + Nött	Bortnött	Smuts	Smuts + Nött	Bortnött	Smuts
1	0,005	0,005	0,000	0,005	0,002	0,003
2	0,000	0,001	0,000	0,003	0,002	0,001
3	0,006	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000
4	0,003	0,003	0,000	0,009	0,000	0,009
5	0,002	0,003	-0,001	0,005	0,002	0,003
6	0,003	0,001	0,002	0,007	0,000	0,007
7- "Oneway"						
8	0,000	-0,001	0,000	0,002	-0,002	0,004
9	-0,001	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,000
10	0,003	-0,001	0,004	0,003	-0,002	0,005
11	0,011	0,010	0,001	0,000	-0,004	0,000
12	-0,002	0,002	-0,004	0,005	0,002	0,003
13	0,001	0,002	-0,001	0,001	0,000	0,001
14	0,002	0,001	0,003	0,004	0,001	0,003

Tabell 4.2: Kugghjulens vikt i *gram*

4.2 Nötning av kugghjul

Formsprutade kugghjul

Pos.nr	Start 0	Smutsigt 500'	Rent 500'	Bortnött material
1	5,351	5,347	5,338	0,013
2	5,249	5,246	5,243	0,006
3	5,346	5,341	5,333	0,013
4	5,256	5,253	5,250	0,006
5	5,324	5,330	5,315	0,009
6	5,326	5,331	5,321	0,005
7- "Oneway"				
8	5,315	5,322	5,314	0,001
9	5,257	5,252	5,249	0,008
10	5,258	5,257	5,254	0,004
11	5,315	5,313	5,311	0,004
12	5,323	5,324	5,320	0,003
13	5,336	5,337	5,331	0,005
14	5,328	5,332	5,327	0,001

Tabell 4.3: Kugghjulens vikt i [g]

3D-printade kugghjul

Pos.nr	Start 0	Smutsigt 500'	Rent 500'	Bortnött material
1	4,519	4,526	4,523	-0,004
2	4,416	4,467	4,462	-0,046
3	4,531	4,531	4,530	0,001
4	4,493	4,500	4,498	-0,005
5	4,499	4,499	4,495	0,004
6	4,506	4,513	4,510	-0,004
7-"Oneway"				
8	4,488	4,500	4,497	-0,009
9	4,402	4,411	4,407	-0,005
10	4,542	4,552	4,550	-0,008
11	4,599	4,607	4,603	-0,004
12	4,543	4,551	4,544	-0,001
13	4,467	4,476	4,472	-0,005
14	4,550	4,561	4,559	-0,009

Tabell 4.4: Kugghjulens vikt i [g]

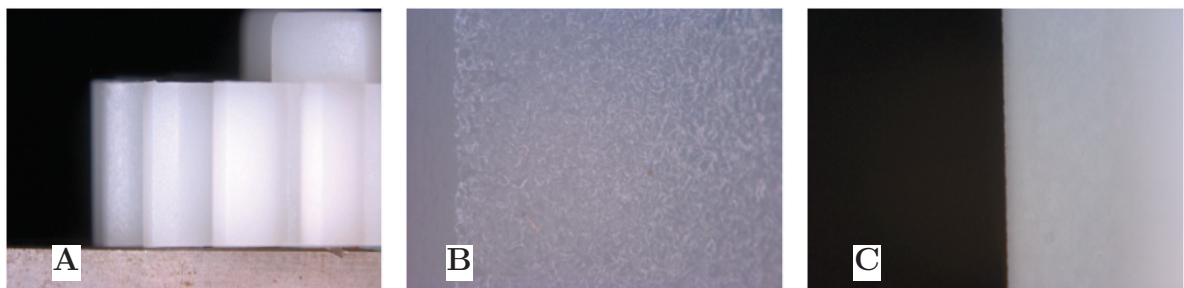
Mätdata från testkörningen visar att mängden smuts som byggts upp inte var så stor som förväntats. I *Tabell 4.1-4.4* kan det ses att det endast rör sig om någon enstaka tusendels gram. Detta indikerar att smutsuppbyggnaden inte endast kan kopplas till hur många brev som körs. Utöver antalet brev påverkar även tiden maskinen står i

produktionsmiljön. Under de utförda testerna stod maskinerna i produktionsmiljö i tio dagar istället för trettio som de gör under normal drift.

4.3 Analys av nötningsmekaniskmer

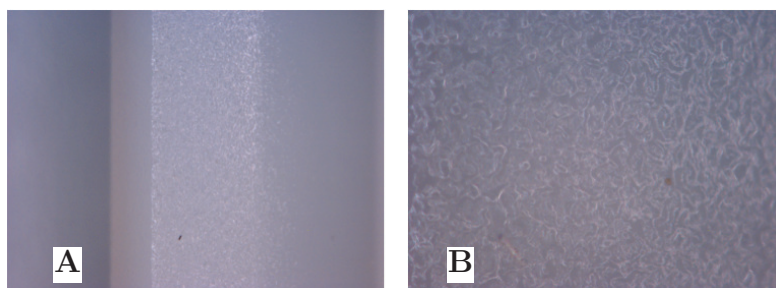
De nötningsmekanismer som har påverkat kugghjulens ingreppsytor identifieras. Bilderna som analyseras är tagna med Material och Tillverkningsteknik laboratoriets stereomikroskop på campus Johanneberg. Med varje bild specificeras vilket kugghjul och vilken kugg som visas, samt förstoring. Alla bilder visar kuggens ingreppssida, alltså den sida som är i kontakt med nästkommande kugghjul. Endast de två kugghjul där mest slitage uppmättes för de formsprutade kugghjulen visas. Eftersom detta resultat, vid vägning, inte kunde verifieras för de 3D-printade hjulen visas motsvarande hjul för dessa. Endast formsprutat kugghjul 1 och 3D-printat kugghjul 5 visas då slitaget ses tydligast på dessa. Till att börja med visas hur ytan såg ut innan testkörning, därefter presenteras sedan den slitna ytan.

4.3.1 Analys av formsprutade kugghjul



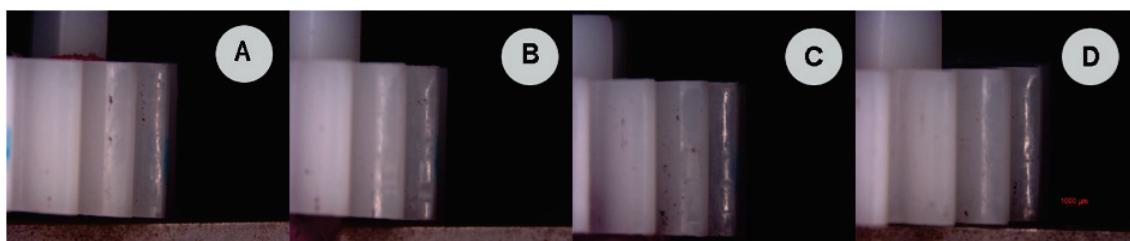
Figur 4.1: Formsprutade kugghjulens ursprungliga ytstruktur i förstoring 7.5x, 90x, 40x

Figur 4.1 visar översiktligt i A) hur kuggarna såg ut innan körning med 7.5 gångers förstoring. Det kan tydligt ses att ytan är jämn och ren. B) visar kuggingreppets yta med 90 gångers förstoring. Ytan är väldigt jämn med låga och mjuka asperiteter. Ytan är relativt jämn och slät. I bild C) ses kuggens övre kant. Bilden togs med 40 gångers förstoring för att visa att dessa asperiteter är orelevanta för analys i detta fall på grund av deras storlek.



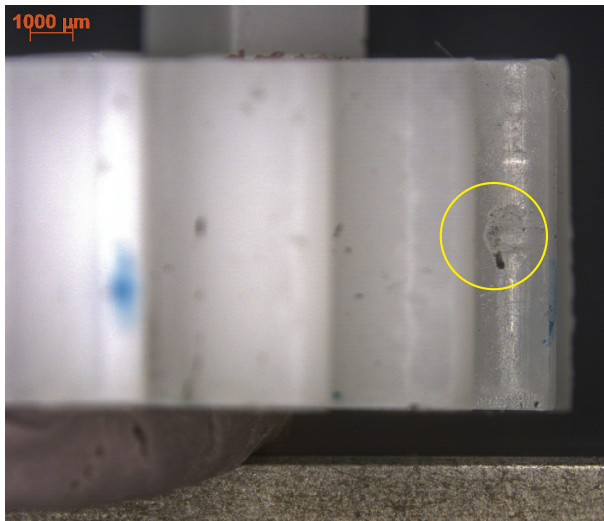
Figur 4.2: Formsprutade kugghjulens ursprungliga ytstruktur i förstoring 30x och 120x

I *Figur 4.2* visas den ovan (*Figur 4.1*) iaktagna kuggkanten samt dess yta mer noggrannt med 30 respektive 120 gångers förstoring. Det som är intressant är att i bild A) syns skarpa linjer i kanten samt på själva ingreppsytan. Bild B) visar återigen att ytan kan betraktas som slät.



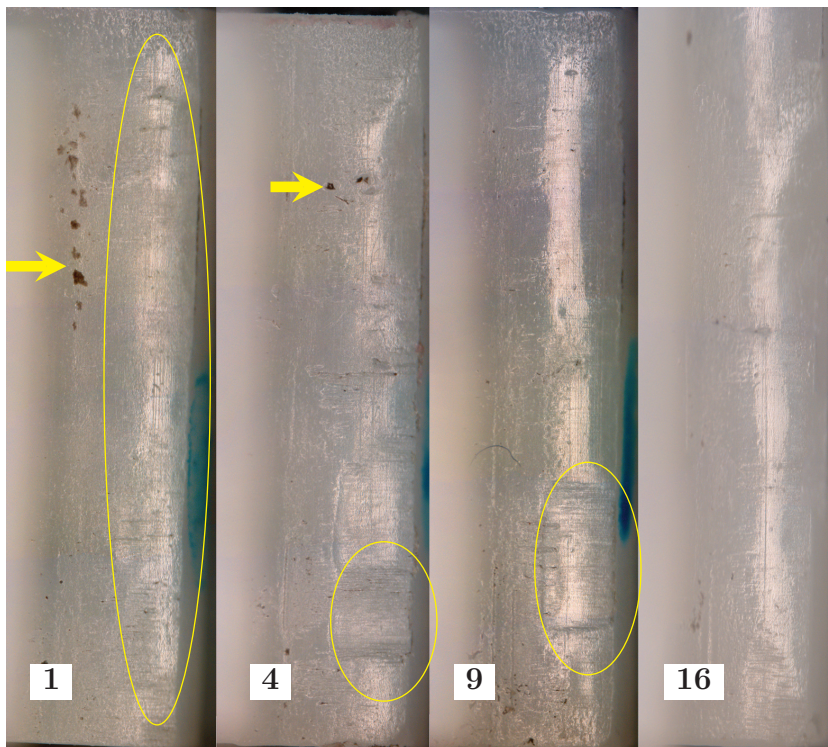
Figur 4.3: Formsprutade kugghjul nummer 5, översikt av slitna kuggsidor 1, 4, 9 och 16. Förstoring 7.5x

Ovan i *Figur 4.3* presenteras kugghjul 5 översiktligt efter att testerna med 500'000 brev är färdiga. Kugg nummer 1, 4, 9 och 16 visas för att försäkra att den nötning som iakttagits samt den slutsats som dras, inte gäller för en kugg utan hela kugghjulet. Redan med 7.5 gångers förstoring kan utmattning identifieras i samtliga bilder. I bild B) ses även mindre tecken på skjuvning i kuggens undre halva.



Figur 4.4: Formsprutade kugghjul nummer 1, sliten yta för 1:a kuggen, förstoring, 7.5x. Visar tydlig utmattning

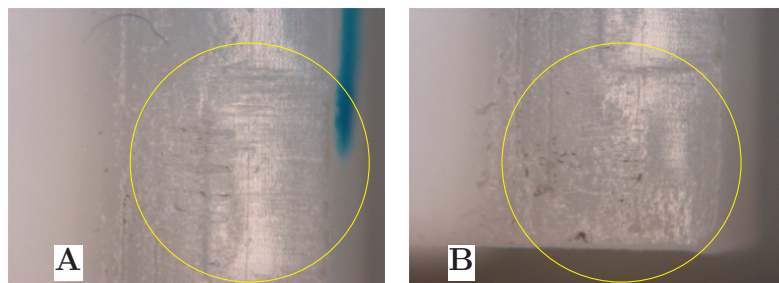
I *Figur 4.4* syns det tydligt att kuggen påverkats av nötning. Med 7.5 gånger förstoring kan utmattning samt tecken på skjuvning identifieras.



Figur 4.5: Formsprutat kugghjul nummer 1, sliten yta, visar kuggsidorna 1, 4, 9 och 16 i förstoring 50x

Figur 4.5 visar en sammanfogad bild av de undersökta kuggarna, i kugghjul nummer 1, för att göra jämförelsen enklare. På kugg 1 ses i övre kant små mörka fläckar. Dessa fläckar är gropar som skapats via utmattning och sedan fylls med smuts

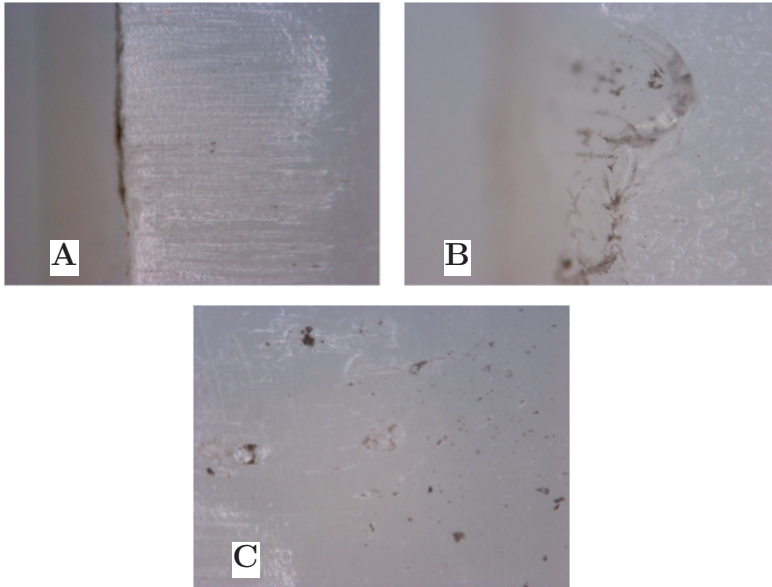
från maskinen. Ett mindre antal fläckar kan även identifieras på kugg 4. och 9. På samtliga kuggar syns tecken på skjuvning, utmed högra kanten (kuggens kant). Tydligast är det i nedre halvan av kugg 4 och 9, *Figur 4.6* och *4.7* förtydligar dessa områden.



Figur 4.6: Formsprutat kugghjul 5, kugg 9. a) visar skjuvning b) visar skjuvning och utmattning, förstoring 50x

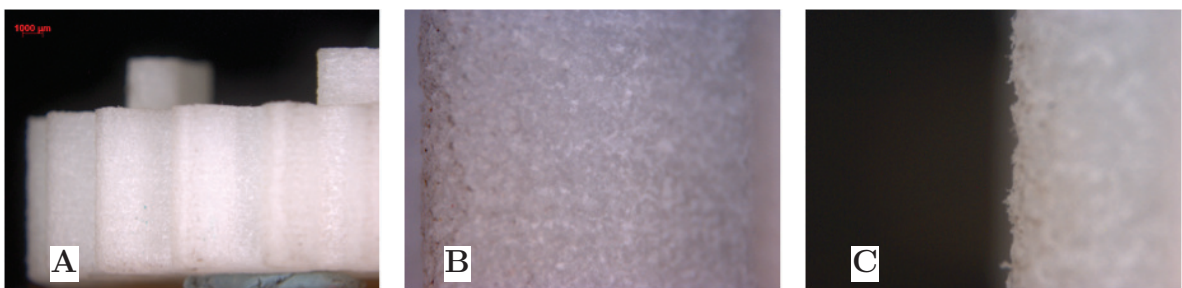
Figur 4.6 visar skjuvningens tydliga raka linjer som skapas likt ett sandpapper som dragits över ytan. I bild B) syns även små utmattningsskador dock är det skjuvningen som dominerar.

I *Figur 4.7* visas det i A) ännu tydligare hur skjuvning påverkar ytan. B) och C) visar två olika typer av utmattning. I B) är skadan mer omfattande, ty hålet är större. Däremot befinner den sig intill kanten vilket bidrar till att material enklare lossnar jämfört med bild C). Här är bilden tagen en bit in på kuggen och visar hur utmattningen resulterar i mindre hål. Spricktillväxten begränsas av det kringliggande materialet.



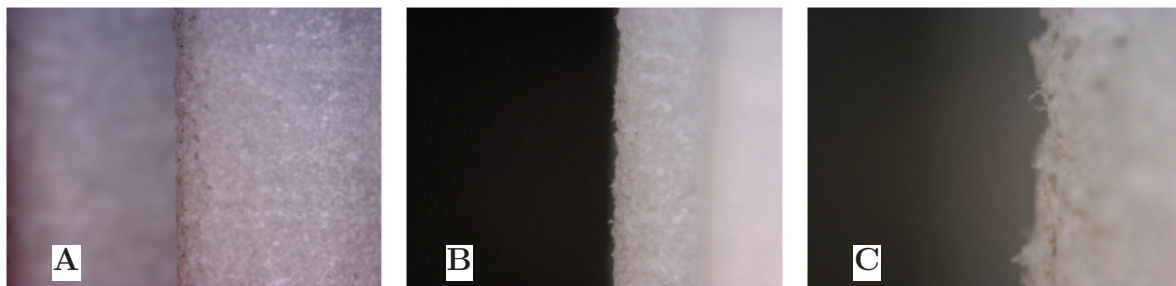
Figur 4.7: Formsprutat kugghjul 5, kugg 9, a) skjuvning, b) och c) visar två olika utmattningar, förstoring 90x

4.3.2 Analys av 3D-printade kugghjul



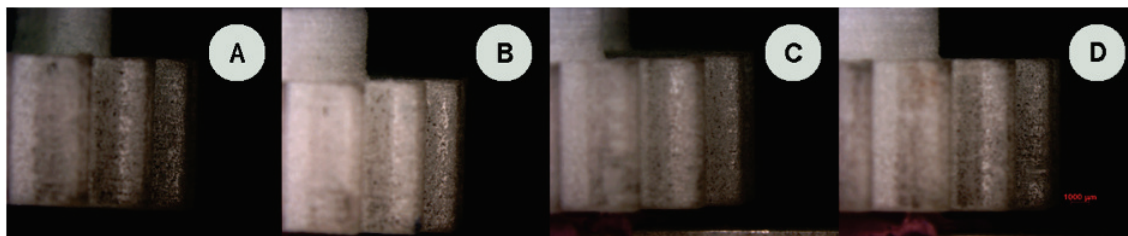
Figur 4.8: 3D-printade kugghjulens ursprungliga ytstruktur i förstoring 7.5x, 90x, 40x

Jämfört med *Figur 4.1* och *Figur 4.2* kan det ses att de 3D printade kugghjulens yta i *Figur 4.8* är betydligt grövre. Tydligast visas detta i C) där asperiteterna är mycket högre än i *Figur 4.1* C). Här kan det alltså inte antas att ytan är jämn. Nedan visas i *Figur 4.9* A) att ytan ser ut att bestå av kristaller. Det är nämligen så att dessa asperiteter består av halvsmlta plastkorn som blir kvar efter printningen av komponenten. Tydligast syns detta i bild C).



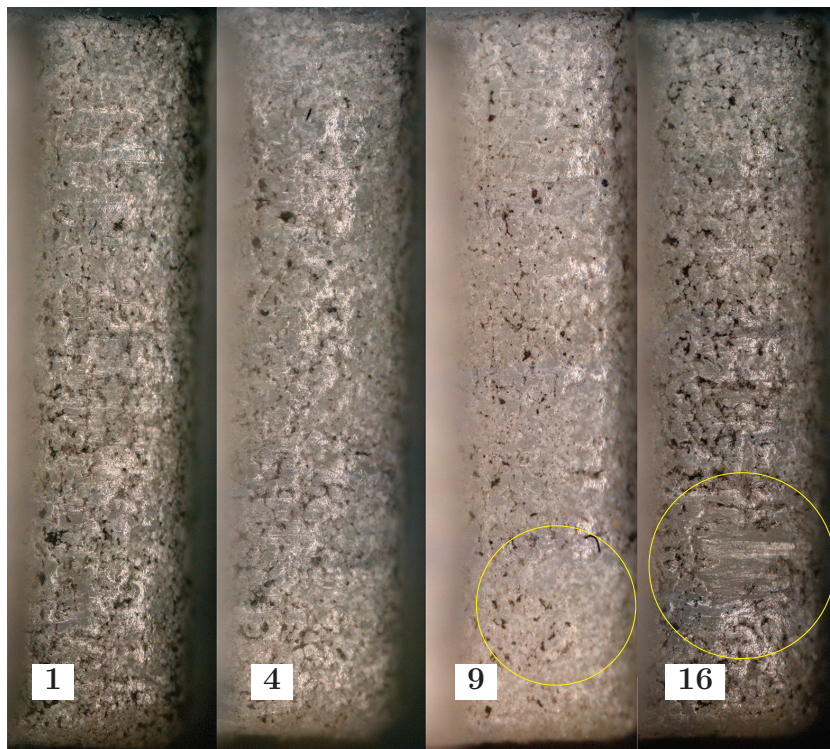
Figur 4.9: 3D-printade kugghjulens ursprungliga ytstruktur i förstoring 22x för de första två och 90x i den sista bilden

I *Figur 4.10* presenteras en översiktsbild på kugghjul 5 efter testkörningen med 500'000 brev. Kugghjulen är 7.5 gånger förstörade. Det syns omedelbart att smutsuppbbyggnaden på de 3D-printade hjulen jämfört med *Figur 4.3* är betydlig. Däremot är inte nötningen eller slitaget lika synligt här som i *Figur 4.3*.



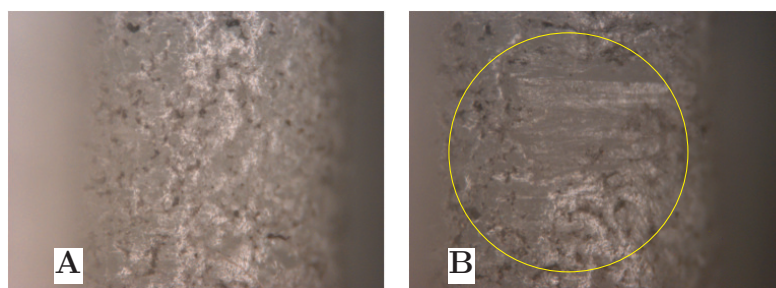
Figur 4.10: 3D-printat kugghjul nummer 5 kugg 1, 4, 9 och 16, översikt av nötning, förstöring 7.5x

Ytstrukturen på kuggarna i *Figur 4.11* liknar mer de formsprutade hjulens ursprungliga ytjämnhet *Figur 4.1*. Här syns dock tydliga spår av skjuvning i kugg 9 och 16. Utöver skjuvningen kan det identifieras ett par större utmattningshål på samtliga kuggar. Observera att alla mörka fläckar ej är utmattningshål. Eftersom ytan är så pass jämn samlas stor del av smutsen i dessa gropar mellan de halvsmälta kornen.



Figur 4.11: 3D-printat kugghjul nummer 5, slitna kuggsidor 1, 4, 9 och 16, förstoring 50x

Figur 4.12 visar utmattning och skjuvning tydligt i rengjorda delar av kugg 4. Första bilden visar ytjämnheten efter testkörning och dess likhet med de formsprutade kuggarnas ursprungliga yta. Det är intressant att de 3D-printade hjulen i en mycket mindre omfattning drabbas av utmattning än de formsprutade. Däremot är de större skjuvningsområdena mer utbredda än hos de formsprutade.



Figur 4.12: 3D-printat kugghjul 5, kugg 4 sliten yta som visar a) ytstrukturen i 16x förstoring och i b) skjuvning med 50x förstoring ytstruktur i förstoring

4.4 Diskussion

4.4.1 Val av printmetod och material

Ovan presenterade resultat visar att de 3D-printade kugghjulen efter testerna har liknande ytstruktur som de formsprutade kugghjulen hade innan testerna.

För att ta reda på hur mycket en slät yta skiljer sig från en grov vore det intressant att undersöka hur lång tid det tar för ett kugghjul att nötas in. Hur systemets prestanda påverkas under denna innötningstid blir då även relevant. Det som kan antas är att friktionskoefficienten varierar med tiden. Frågan är dock hur och på vilket sätt effektöverföringen påverkas i systemet. Den undersökningen medför tekniska och tidsmässiga komplikationer då mätning av temperatur, friktion och nötning måste göras kontinuerligt.

Ett alternativ till SLS metoden som vore intressant att undersöka är SLA, eftersom det med SLA metoden går att få en betydligt slätare yta.

tabell 3.2 visar att Visijet®Toughs mekaniska egenskaper inte skiljer sig avsevärt mycket från Duraform®ProX. I hypotesen som låg till grund för valet av material ingick värmebeständighet som en viktig materialegenskap hos plastkugghjul. Testerna samt resultaten indikerar att värmebeständigheten för de material som diskuteras (över 60°C) inte är en egenskap som påverkar hjulens prestanda. Inga mätningar på temperaturen utfördes men indikationer fanns på att den inte uppnådde höga värden under och efter körning. Trots det kan temperaturen i den tribologiskt belastade ytan bli avsevärt högre på grund av friktion och belastning.

I den uppsjö av plastmaterial samt mängden tillverkare som är tillgänglig idag, finns en mängd material med likvärdiga mekaniska egenskaper. Undersökningens resultat indikerar på att typen av 3D-print teknik är mer avgörande än materialegenskaperna. Förutsatt att jämförd materialdata inte avviker från varandra för mycket. Tillverkningstekniken verkar ha större inverkan på nötningen än de små olikheterna i materialens mekaniska egenskaper då den avgör ytstrukturens sammansättning samt mängden anisotropi.

4.4.2 Tester

Den styrande parametern för undersökningen av smutsuppbbyggnad var tiden. För att spara tid ökades cykelhastigheten. Resultaten kunde relateras till nötningstesterna men de visar dock inte hela sanningen för en verklig körning i produktion. Smutsuppbbyggnaden beror på hur länge systemet står i produktionshallen och antalet cykler som utförs. Tidsaspekten var en faktor som inte beaktades vid den initiala hypotesen för smutsuppbbyggnad.

På grund av tidsramen för projektet analyserades resultaten endast före och efter testerna. Därav kan ingen bild fås av utvecklingen på nötningens inverkan.

Det vore intressant att mellan varje byte undersöka hjulen med både våg och mikroskop för att se tillväxten av nötning samt förändringar under körningen, eftersom det sedan tidigare är känt att alla mekanismer verkar samtidigt. Den metod som använts ger endast två momentantillstånd av hjulen vilket är inom ramarna för avgränsningen.

Alla utförda testers resultat är specifika för det undersökta systemet. Denna typ av undersökning blir beroende av den verkliga processens tid. En medförd risk är då att undersökningarna kan vara väldigt tidskrävande beroende på vad för slags process undersökningen handlar om.

Ett mer allmänt test för materialens nötningsbeständighet (ex. Tribometer) kan också utföras och sedan sättas i relation till dessa resultat. Det hade då erhållits ett värde på nötningsresistansen, hänsyn måste tas till tribologiska fenomenets komplexitet. Med andra ord kan inte ett generellt resultat för alla plast kugghjul tas fram. Däremot kan ungefärliga tumregler sammanfattas om hur undersökning och materialval bör ske för berört system.

4.4.3 Analysmetoder

Vägning av kugghjulen före och efter tester samt rengöring ger en möjlighet att räkna ut vikten av bortnött material. Likt smutsuppbbyggnaden är resultatet för nötning, utöver antalet cykler, även tidsberoende. Mängden smuts bidrar till tredjepartspartiklar vilka ökar med längre vistelse i produktionshallen. Då cykelhastigheten ökades blev exponeringstiden kortare vilket medförde lägre viktresultat än väntat.

Vidare kan de 3D-printade kugghjulen tvättas innan de vägs efter körning och på så sätt eventuellt få ett bättre mått på bortnött material. Det hade dock medfört en lång torktid, på grund av nylonplastens höga kapilärkrafter, för att säkerställa att ingen vätska påverkar hjulets vikt.

Kuggarnas ingreppsytter fotograferades i mikroskop för att kunna analyseras visuellt. Bilderna som togs var olika svåra att tolka beroende vilken typ av kugg de visar. För originalkuggarna är bilderna inte så svårtolkade, på dessa kan de flesta nötningstyperna identifieras tydligt. Bilderna för de 3D-printade kuggarna är däremot svårare att tolka och analysera på grund av den grova ytstrukturen. Det kan tydligt ses att kuggarna är slitna men det är väldigt svårt att identifiera de olika nötningstyperna. Till exempel är det så mycket porer i ytskiktet att det inte går att säga om de fanns där initialt eller om det är nötningseffekter. Det innebär att endast de allra djupaste spåren av nötning med säkerhet kunde identifieras.

För att få en mer generell bild av nötningen utvärderades även ASTM¹ som analysmetod. Den går ut på att lägga ett rutnät över en förstorad bild av en kugg och sedan räkna fram hur stor andel av kuggens yta var påverkad av nötning. Metoden är problematisk då det är svårt, förutom för de allra tydligaste spåren av skjuvning och utmattning, att avgöra vad som är märken efter nötning och vad som är vanlig ytstruktur. Eftersom syftet med ASTM skulle vara att ge en procentuell viktning mellan nöt och opåverkad yta fallerar metoden då det endast med säkerhet kan pekas på de tecken som skapats av de största kornen och sprickorna.

För material med grova ytstrukturer skulle ett anpassat test vara intressant att undersöka. I det fallet kan en tribometer användas och ytan på skivan för testmaterialet färgläggas. Efter ett passande antal cykler kan man sedan med ASTM få en bättre bild av hur nötningen påverkar hela ytan. Istället för att endast se de allra djupaste markeringarna. Genom att räkna på hur stor del av ytan som är färgad. Tanken är att färgen sätter sig i materialets porer. Då de färgade asperiteternas toppar bryts av visas materialets ursprungliga färg i kontrast till den färgade ytan.

¹American Society for Testing and Materials

5

Slutsats

På grund av att resultaten inte kan ge något svar eller indikation om livslängd hos de undersökta kugghjulen, går det ej att uttala sig om eventuella skillnader i nötningen, med avseende på körtid. Utifrån detta kan heller inte någon variation av livslängden bedömmas annat än rent hypotetiskt. Det kan ändå konstateras att de 3D-printade hjulen skulle kunna användas, då de inte uppvisade några större skillnader i nötningseffekter eller mekaniska egenskaper. Vid testets avslut kunde inga skillnader i prestation identifieras mellan de olika hjul typerna.

Då de printade hjulen presterar likvärdigt med de formsprutade kan det konstateras att SLS-tekniken absolut har potential att kunna användas för framställning av kugghjul för denna typ av belastning. Det kan dock inte konfirmeras att detta är något som gäller generellt för kugghjul. För att kunna göra det krävs ytterligare studier och tester av nötningens inverkan hos 3D-printade kugghjul.

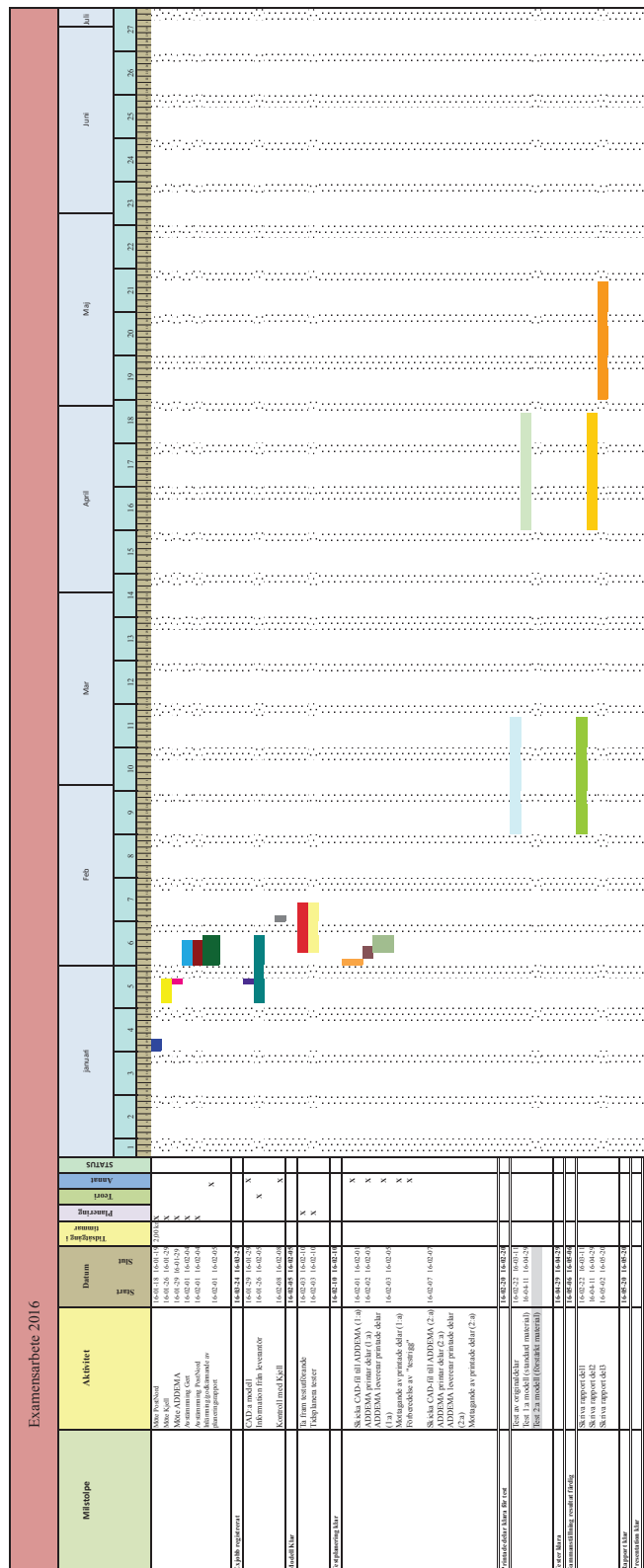
Eftersom den lägre ljudnivån hos de 3D-printade hjulen påverkar arbetsmiljön på ett positivt sätt, rekommenderar vi PostNord att i ett första steg se över möjligheterna att byta kugghjulstyp till 3D-printade hjul. Vidare rekommenderas att man identifierar vilka reservdelar som ytterligare skulle kunna passa för 3D-printning. För att slutligen kunna avgöra om SLS-tekniken passar som alternativ tillverkningsmetod rekommenderas även att en ekonomisk utvärdering utförs.

Litteraturförteckning

- [1] Singamneni.S. Huang.B.(.). Raster angle mechanics in fused deposition modeling, Journal of composite mechanics.
- [2] Ashby, M.F. et al: Materials: engineering, science, processing and design. (2. uppl.) Butterworth-Heinemann, Oxford 2010
- [3] Ingrid Kovarikova et al: Study and Characteristic of Abrasive Wear Mechanisms.
- [4] Mart Mägi och Kjell Melkersson: Lärobok I Maskinelement, Göteborg 2014)
- [5] Carl Klason et al: Plaster Materialval och materialdata, (6. uppl.) Liber, Stockholm 2008
- [6] Identifiering av plastmaterial, Hammervald AB, Haninge, 2016-05-15,
http://hammervald.se/wp-content/uploads/2012/02/PDB10-04_Plastidentifiering.pdf

A

Appendix 1



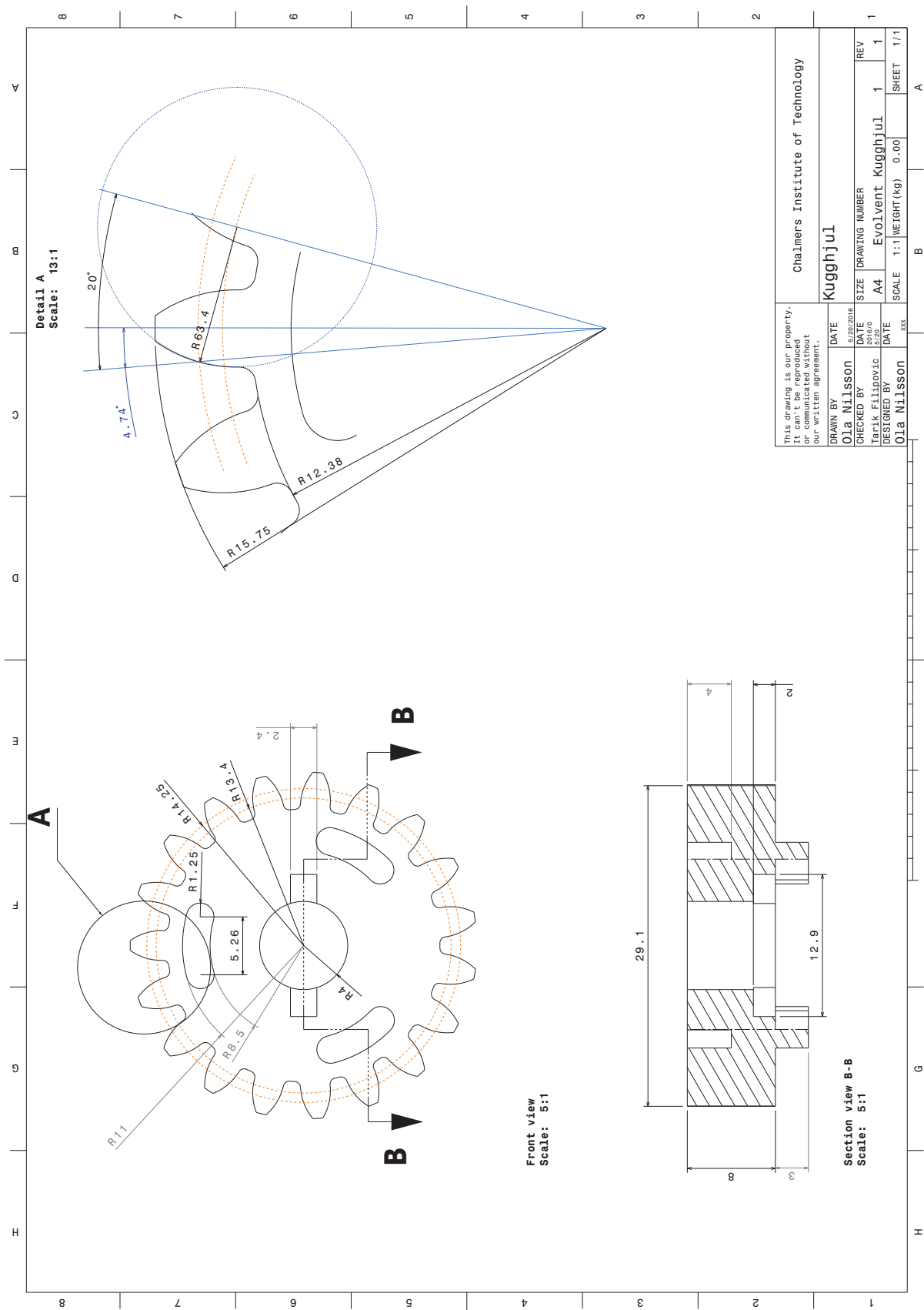


Figure A.2: Ritning av 3d-kugghjul