

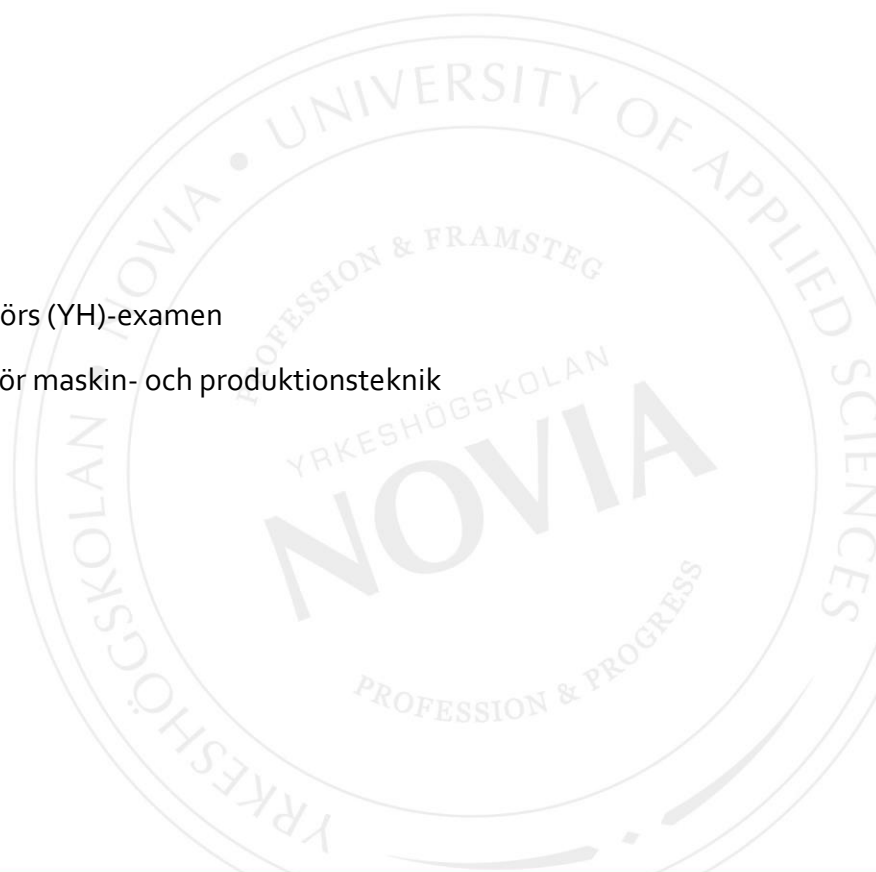
Konstruktion av formverktyg för metallformsprutning

Andreas Rosas

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för maskin- och produktionsteknik

Vasa 2020



EXAMENSARBETE

Författare: Andreas Rosas
Utbildning och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa
Inriktningalternativ: Maskinkonstruktion
Handledare: Kenneth Ehrström, Novia UAS
Mats Baarman, Plastoco Oy Ab

Titel: Konstruktion av formverktyg för metallformsprutning

Datum 3.4.2020

Sidantal 54

Bilagor 2

Abstrakt

Detta examensarbete har gjorts på uppdrag av Plastoco Oy Ab. Examensarbetets syfte var att planera och konstruera ett formverktyg för metallformsprutning. Detaljen som skall formsprutas är ett filter i porös metall med en innergånga i ena ändan. Målet var att utforma ett koncept av formverktyget i form av en 3D-modell.

Som bakgrund för planeringen presenteras i arbetet väsentlig teori angående formsprutning, metallformsprutning och framför allt formverktyg. Också teori om kuggväxlar, rullningslager samt produktutveckling presenteras.

Planeringen utgick ifrån krav och önskemål som fastställts av företaget. Under planeringen togs ett antal lösningskoncept fram på några av komponenterna i formverktyget. Siemens NX användes för att skapa 3D-modeller av komponenterna och sammanställa dessa.

Arbetet resulterade i en 3D-modell av formverktyget. I formverktyget finns en hydraulmotor och en kuggväxel som driver den roterande gängkärnan. Formverktyget är konstruerat med utbytbara komponenter för att möjliggöra tillverkning av filter i olika modeller och storlekar.

Språk: svenska

Nyckelord: formsprutning, formverktyg, metallformsprutning

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Andreas Rosas
Koulutus ja paikkakunta: Kone- ja tuotantotekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto: Konesuunnittelu
Ohjaajat: Kenneth Ehrström, Novia UAS
Mats Baarman, Plastoco Oy Ab

Nimike: Metalliruiskuvalumuotin suunnittelu

Päivämäärä 3.4.2020

Sivumäärä 54

Liitteet 2

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö tehtiin Plastoco Oy Ab:lle. Opinnäytetyön tarkoitus oli suunnitella ja mallintaa ruiskuvalumuottia metalliruiskuvalua varten. Ruiskuvalettava osa on huokoinen metallisuodatin, jonka toisessa päässä on sisäkierre. Tavoitteena oli luoda luonnos ruiskuvalumuotista 3D-mallina.

Opinnäytetyössä esitellään olennaista teoriaa, jota käytettiin taustana suunnittelussa. Teoriaa ruiskuvalusta, metallin ruiskuvalusta ja ennen kaikkea muottityökaluista esitellään. Työssä esitellään myös teoriaa hammasvaihteista, vierintälaakereista sekä tuotekehittelystä.

Muotti suunniteltiin yrityksen asettamien vaatimuksien ja toiveiden perusteella. Suunnitteluvaiheessa osasta muotin osista tehtiin muutamia erilaisia luonnoksia, joista valittiin parhaiten sopivat ratkaisut. Siemens NX-ohjelmistoa käytettiin komponenttien 3D-mallinuksessa sekä kokoamisessa valmiiseen 3D-malliin.

Työn tuloksena syntyi 3D-malli ruiskuvalumuotista. Muottiin kuuluu hydraulimoottori sekä hammasvaihte, joka pyörittää sisäkierteen keernaa. Muottityökalussa on vaihdettavia osia, joita vaihtamalla voidaan valmistaa erilaisia suodatinmalleja ja -kokoja.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: ruiskuvalu, ruiskuvalumuotti, metalliruiskuvalu

BACHELOR'S THESIS

Author: Andreas Rosas
Degree Programme: Mechanical and Production Engineering, Vaasa
Specialization: Mechanical Engineering
Supervisors: Kenneth Ehrström, Novia UAS
Mats Baarman, Plastoco Oy Ab

Title: Design of Tooling for Metal Injection Molding

Date 3.4.2020

Number of pages 54

Appendices 2

Abstract

This thesis was commissioned by Plastoco Oy Ab. The purpose of this work was to design and construct a molding tool for metal injection molding. The final part to be injection molded is a filter made in porous metal that has an internal thread at one end. The aim was to design a concept of the tooling in form of a 3D-model.

Essential theory is presented as a background for the design work. Theory about injection molding, metal injection molding and, above all, tooling for injection molding is presented. Theory about gearing, rolling bearings and product development is also presented in this thesis.

Requirements and wishes set by the company were used as a base for the design. During the designing phase several solution concepts were developed of some of the components in the molding tool. Siemens NX was used to create and assemble 3D-models of the components in the tool.

The project resulted in a 3D-model of the molding tool. The molding tool includes a hydraulic motor and a gear train to rotate the core for the thread. The molding tool is constructed with interchangeable components to enable the production of filters in different models and sizes.

Language: Swedish

Key words: injection molding, tooling for injection molding,
metal injection molding

Innehållsförteckning

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Inledning..... | 1 |
| 1.1 | Bakgrund..... | 1 |
| 1.2 | Syfte..... | 2 |
| 1.3 | Avgränsning..... | 2 |
| 1.4 | Plastoco Oy Ab..... | 2 |
| 1.5 | Disposition..... | 3 |
| 2 | Teori..... | 4 |
| 2.1 | Formsprutning..... | 4 |
| 2.1.1 | Formsprutningsmaskinen..... | 4 |
| 2.1.2 | Formsprutningscykeln..... | 5 |
| 2.2 | Metallformsprutning..... | 6 |
| 2.2.1 | Borttagning av bindemedel (Debinding)..... | 7 |
| 2.2.2 | Sintring..... | 8 |
| 2.2.3 | Råmaterial för metallformsprutning..... | 9 |
| 2.3 | Formverktyg för formsprutning..... | 9 |
| 2.3.1 | Ingötssystem..... | 10 |
| 2.3.2 | Intag..... | 12 |
| 2.3.3 | Formrum..... | 16 |
| 2.3.4 | Temperering..... | 17 |
| 2.3.5 | Avluftning..... | 17 |
| 2.3.6 | Utstötning..... | 18 |
| 2.3.7 | Formsprutning av gängor..... | 19 |
| 2.4 | Formverktyg för metallformsprutning..... | 20 |
| 2.5 | Material i formverktyg..... | 22 |
| 2.6 | Kuggväxlar..... | 24 |
| 2.6.1 | Ingreppstal..... | 27 |
| 2.6.2 | Hållfasthetsberäkning av kuggväxlar..... | 27 |
| 2.7 | Lager..... | 28 |
| 2.7.1 | Rullningslager..... | 28 |
| 2.8 | Datorbaserad modellering och produktutveckling..... | 30 |
| 3 | Metod..... | 31 |
| 3.1 | Arbetsprocess..... | 31 |
| 3.2 | Krav och önskemål på formverktyget..... | 31 |
| 3.3 | CAD-modellering..... | 33 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4 | Resultat | 34 |
| 4.1 | Konceptgenerering | 34 |
| 4.1.1 | Avluftning | 34 |
| 4.1.2 | Typ av insats för formrummet | 36 |
| 4.1.3 | Kugghjulens placering | 39 |
| 4.2 | Beräkningar | 40 |
| 4.2.1 | Hållfasthetsberäkningar över kuggväxel | 40 |
| 4.2.2 | Beräkning av kuggkrafter och val av rullningslager | 41 |
| 4.3 | Slutlig version av formverktyget | 42 |
| 4.3.1 | Material i formverktyget | 44 |
| 4.3.2 | Rörliga formhalvan | 45 |
| 4.3.3 | Fasta formhalvan | 48 |
| 4.3.4 | Tillverkning av olika filtermodeller | 50 |
| 5 | Sammanfattning av resultaten | 51 |
| 5.1 | Förslag till vidareutveckling | 52 |
| 6 | Diskussion | 53 |
| 6.1 | Slutord | 53 |
| 7 | Referenser | 54 |

Figurförteckning

| | | |
|-----------|--|----|
| Figur 1. | Två modeller av filterdelar som skall tillverkas med formverktyget | 1 |
| Figur 2. | Metallformsprutningsprocessen | 7 |
| Figur 3. | Normalt formverktyg. | 10 |
| Figur 4. | Exempel på ett ingötssystem för ett formverktyg med fyra formrum. | 10 |
| Figur 5. | Skärningar av typiska fördelningskanaler i formverktyg. | 11 |
| Figur 6. | Direktintag. | 12 |
| Figur 7. | Kantintag | 13 |
| Figur 8. | Filmintag | 13 |
| Figur 9. | Ringintag eller cirkulärt filmintag. | 14 |
| Figur 10. | Tunnelintag. | 14 |
| Figur 11. | Formrummets fyllnad. | 15 |
| Figur 12. | Exempel på en avluftningskanal eller så kallad ventil | 18 |
| Figur 13. | Utvändig gänga med en plan yta längs delningsplanet. | 19 |

| | |
|--|----|
| Figur 14. Exempel på formplattor och distanslinjaler som kan köpas i standardmått..... | 23 |
| Figur 15. Evolventkurvan..... | 24 |
| Figur 16. Evolventprofilens storheter..... | 25 |
| Figur 17. Komponenter i ett enradigt spårkullager..... | 28 |
| Figur 18. Kontaktvinkel i rullningslager..... | 29 |
| Figur 19. Avluftning, koncept 1..... | 34 |
| Figur 20. Avluftning, koncept 1. Sammansatt insats och avluftningstapp..... | 35 |
| Figur 21. Avluftning, koncept 2..... | 35 |
| Figur 22. Avluftning, koncept 3. Avluftning mellan två plattor..... | 36 |
| Figur 23. Formplattor med färdiga fickor för insatser..... | 37 |
| Figur 24. Insats med runda hörn infälld i formplattan..... | 38 |
| Figur 25. Insats med skarpa hörn infälld i formplattan..... | 38 |
| Figur 26. Placering av kugghjul, koncept 1..... | 39 |
| Figur 27. Placering av kugghjul, koncept 2..... | 40 |
| Figur 28. Krafter som uppstår vid rakt skurna kuggar..... | 41 |
| Figur 29. Formverktyget ihopsatt, från sprutsidan..... | 43 |
| Figur 30. Formverktyget ihopsatt, från utstötarsidan..... | 43 |
| Figur 31. Formverktygets utstötarsida..... | 45 |
| Figur 32. Formverktyget vid utstötning..... | 46 |
| Figur 33. Formverktygets kuggväxel, utan plattan som skruvas fast och stöder lagren..... | 47 |
| Figur 34. Funktionsprincip över stopparen för kärnans rotation..... | 48 |
| Figur 35. Formverktygets sprutsida..... | 49 |
| Figur 36. Formverktygets fasta formplatta..... | 49 |
| Figur 37. Delar som behövs bytas ut för att tillverka de två olika filtermodellerna..... | 50 |

Bilagor

Bilaga 1. Beräkning av kuggkrafter och val av lager

Bilaga 2. Hållfasthetsberäkning av kuggväxel

1 Inledning

Detta kapitel ger en inblick i examensarbetets bakgrund och syfte samt presenterar företaget examensarbetet gjordes för.

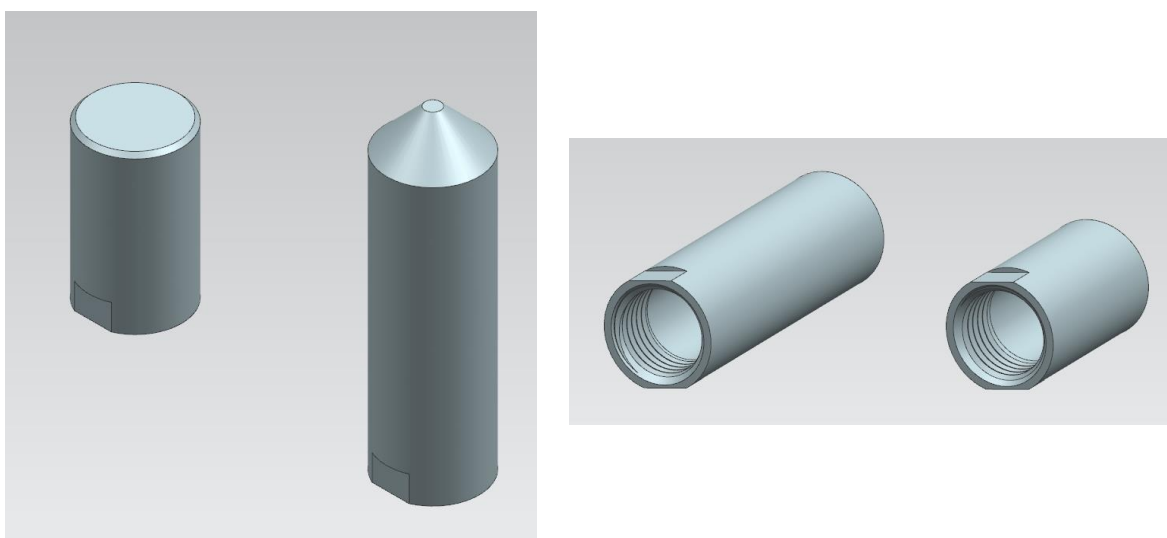
1.1 Bakgrund

Plastoco Ab är ett företag som tillverkar plast- och metall detaljer genom formsprutning. Plastoco har också en verktygsavdelning som tillverkar och planerar formverktyg för formsprutning.

Plastoco har utvecklat en egen produkt som kommer att tillverkas genom metallformsprutning. Produkten är ett luftfilter gjort i porös metall med en inngång i ena ändan. För att serietillverka detaljen krävs ett nytt formverktyg.

Ett formverktyg för tillverkningen av en prototyp för luftfiltret hade utvecklats för att utreda krympningen i tillverkningsprocessen.

Formverktyget som planeras i arbetet kommer att tillverkas och användas i produktionen vid Plastoco Ab.



Figur 1. Två modeller av filterdelar som skall tillverkas med formverktyget. Detaljerna kan först tillverkas utan nyckelvidd, men den kan tillsättas vid behov.

1.2 Syfte

Arbetets syfte var att planera ett formverktyg för metallformsprutning. Produkten som tillverkas med verktyget är ett luftfilter i porös metall.

Formverktyget skall tillverka en detalj vid varje formsprutningscykel, inklusive en innergånga i ena ändan på detaljen. Formverktyget skall alltså ha en roterande kärna som skruvas ut efter att materialet har sprutats in i formen.

Formverktyget skall ha utbytbara komponenter för tillverkning av filter i olika modeller och storlekar. Gängan skall också gå att tillverka i olika storlekar genom att byta ut komponenter i verktyget.

1.3 Avgränsning

Målet med examensarbetet var att skapa ett koncept i form av en 3D-modell över formverktyget där alla komponenter finns med. En lista med komponenterna som används i formverktyget sammanställs för företagets bruk.

I arbetet fokuserar man på formverktyget och dess modell samt funktionsprincip. Inga tillverkningsritningar för formverktyget framställs och man tar heller inte fram några noggranna mått eller toleranser för formverktygets komponenter. Formsprutnings- eller efterbehandlingsprocessens parametrar eller dylikt tas inte med i arbetet.

Krympningen från formsprutad till färdig detalj är känd, så inga beräkningar över detta behövs göras vid planeringen av formverktyget.

I teoridelen av arbetet presenteras formsprutningsprocessen samt metallformsprutningsprocessen, utan att gå in på djupet. Formverktygets uppbyggnad och funktion presenteras i detalj.

1.4 Plastoco Oy Ab

Plastoco Oy Ab är ett företag i Borgå som tillverkar tekniska plast- och metalldelar genom formsprutning. Företaget har också en verktygsavdelning där formverktyg underhålls samt nya formverktyg planeras och tillverkas. Företaget är grundat år 1980. Plastoco är certifierat enligt ISO 9001:2015 och 14001:2015.

Plastoco har specialiserat sig på metallformsprutning (Metal Injection Molding, MIM), där metalldelar kan tillverkas genom formsprutning. Efter att detaljen är formsprutad behandlas den så att bindemedel avlägsnas och detaljen sintras till slutlig materialstruktur. Plastoco tillverkar metalldelar i rostfritt stål, låglegerat och mjukmagnetiskt stål. (Plastoco Oy Ab, 2020)

1.5 Disposition

Här beskrivs examensarbetets olika delar.

Kapitel 1. Inledning

I inledningen presenteras bakgrund till examensarbetet. Arbetets syfte och avgränsningar beskrivs också. Uppdragsgivaren Plastoco Oy Ab presenteras.

Kapitel 2. Teori

I teoridelen av arbetet presenteras väsentlig teori som används som grund för planeringen av formverktyget. Teoridelen omfattar formsprutning, metallformsprutning, och teori om formverktyg. Också teori angående maskinelement som används i formverktyget presenteras. Produktutvecklingsprocessen beskrivs också i korthet.

Kapitel 3. Metod

Metodkapitlet beskriver vilka metoder och tillvägagångssätt som har använts i examensarbetet.

Kapitel 4. Resultat

I resultatdelen presenteras examensarbetets slutresultat i form av en 3D-modell av formverktyget. Lösningsskoncept från planeringsskedet presenteras också.

Kapitel 5. Sammanfattning av resultaten

I detta kapitel sammanfattas resultaten och förslag för vidareutveckling presenteras.

Kapitel 6. Diskussion

Här reflekteras tillbaka över hela projektet.

2 Teori

I detta kapitel behandlas teori om formsprutning, formverktyg samt metall-formsprutningsprocessen. Också maskinelement som används i formverktyget samt teori om produktutvecklingsprocessen presenteras.

2.1 Formsprutning

Formsprutning är den klart dominerande metoden för att tillverka tekniska plastdetaljer. Formsprutningsprocessen är en automatiserad tillverkningsmetod med hög produktionsstakt där plastdelar med mycket komplex form kan tillverkas utan krav på efterbearbetning. Processen kan användas för att producera såväl väldigt små som väldigt stora plastdetaljer. (Bruder, 2017)

2.1.1 Formsprutningsmaskinen

Formsprutningsmaskinen består av två delar; en sprutenhet och en låsenhet. I sprutenheten fylls plastmaterialet, smälts och sprutas in i formen. I låsenheten spänns formen fast och med hjälp av denna öppnas och stängs formen. På formsprutningsmaskinen finns också en styrenhet för att kontrollera processen. (Bruder, 2017, s. 78)

Sprutenheten består av en cylinder där plastmaterial i form av granulat smälts till flytande form. Cylindern värms upp med elektriska värmeelement. Inuti cylindern finns en skruv som både roteras för att fyllas med nytt material och fungerar som en kolv för att spruta in material i formen.

Låsenheten består av två formbord mellan vilka formverktyget spänns fast. Formbordet närmare sprutenheten kallas för det fasta formbordet. Genom ett hål i bordet kommer insprutningsenhetens munstycke i kontakt med formverktyget. Hålet i det fasta formbordet fungerar också som styrning till formverktyget. På formen finns en centreringsring som passar i hålet och lokaliserar formen.

Det andra formbordet kallas för det rörliga formbordet och flyttar på formverktygets andra halva för att öppna formen. Utstötningmekanismen finns på den rörliga sidan och verkar på formverktyget genom ett hål i det rörliga formbordet. Bakom bordet finns låsmekanismen som flyttar det rörliga formbordet och låser formen. Låsmekanismen fungerar i regel med hjälp av hydraulcylindrar som kan fungera direkt på det rörliga formbordet eller via en sorts knäleder. (Strömvall, 2002, ss. 91-94)

En hydraulikenhet finns i maskinen för att skapa det tryck som behövs för att uppnå kraften i låsmekanismen. Den övriga utrustningen på maskinen kan vara hydrauliskt eller elektriskt styrd. På marknaden finns dock också helelektriska maskintyper. Låskraften är huvudegenskapen enligt vilken effekten och storleken på formsprutningsmaskinen definieras. (Heaney, 2012, p. 94)

2.1.2 Formsprutningscykeln

Formsprutningscykeln börjar med insprutningsfasen där formen stängs och smält material sprutas in genom munstycket i formrummet. Smältan i cylindern pressas framåt med hjälp av skruven som i detta fall inte roterar, utan fungerar som en kolv genom en linjär rörelse. Längst fram på skruven finns en backströmsventil som förhindrar att smältan trycks tillbaka längs skruven i cylindern. (Bruder, 2017, s. 79)

När formrummet är fyllt med smälta börjar eftertrycksfasen. Då hålls ett tryck på skruven för att pressa in mera material i formrummet i takt med att smältan kallnar och således krymper. Skillnaden mellan plastsmältans volym och det stelnade materialets specifika volym kan vara stor, upp till 20 %. Under eftertrycksfasen rör sig skruven sakta framåt, utan att roteras. (Strömvall, 2002, s. 100)

När eftertrycksfasen är slut är plastdelen vanligtvis ännu för varm för att tas ut från formen och behöver kylas ytterligare någon tid. Denna tid, mellan eftertrycksfasen och öppningen av formen, brukar kallas för kyltid. Under kyltiden sker doseringen av plastmaterial i formsprutningsmaskinens cylinder. Skruven roteras då för att mata fram mera plastsmälta framför skruvspetsen. Efter kyltiden öppnas formen för utstötning av den färdiga plastdelen, varefter en ny cykel påbörjas. (Bruder, 2017, s. 79)

2.2 Metallformsprutning

Metallformsprutning är en metod för att tillverka delar i metall. Metallformsprutning är en del av den större tillverkningsmetoden som kallas för pulverformsprutning och omfattar formsprutning av både metall och keramik. Metallformsprutning brukar ofta i talspråk kallas för MIM, enligt det engelska namnet Metal Injection Molding. (Heaney, 2012, p. 1)

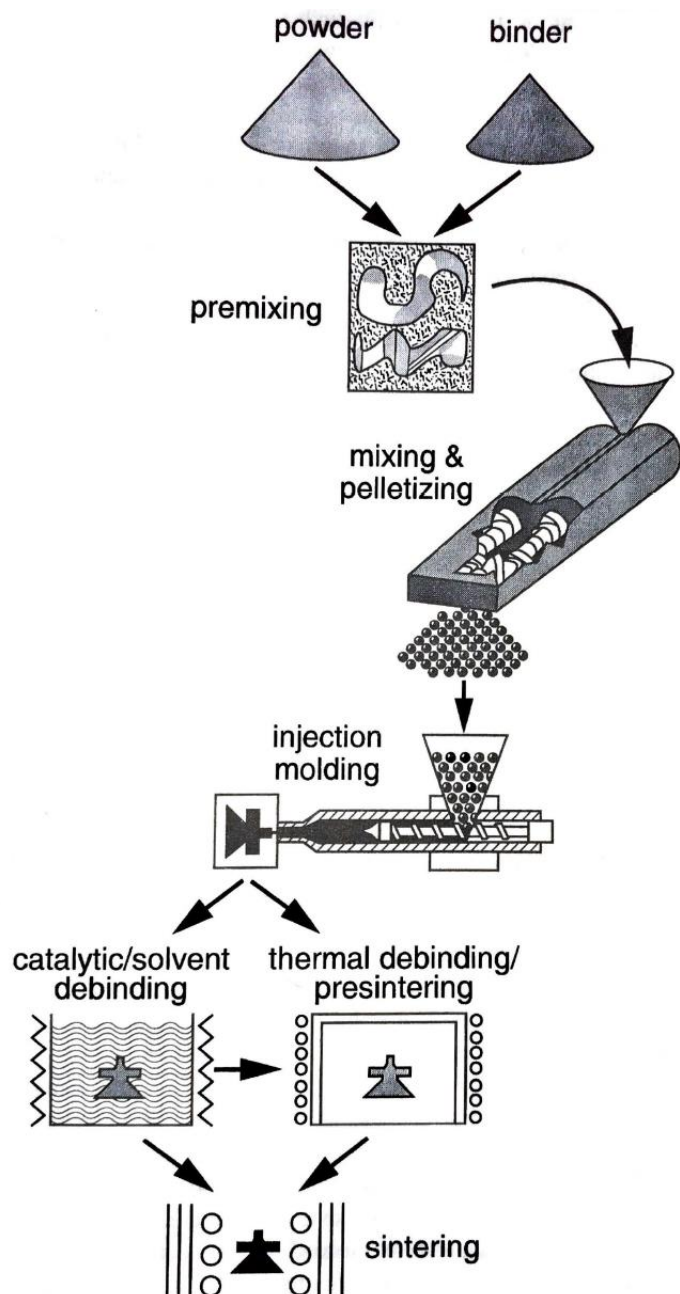
Metallformsprutningsprocessen utnyttjar formsprutningens möjligheter att tillverka komplexa geometrier, samtidigt som metallens mekaniska egenskaper kan utnyttjas i detaljerna. Första delen av metallformsprutningsprocessen liknar formsprutningsprocessen för plaster väldigt mycket och därför kan också samma typ av maskiner användas.

Till skillnad från plastformsprutning, där oftast färdiga delar tillverkas, behövs efterbehandling i metallformsprutningsprocessen. Efter formsprutningen behöver delarna behandlas för att avlägsna bindemedel, varefter de sintras för att uppnå slutlig kemisk struktur. En schematisk bild över metallformsprutningsprocessen presenteras i figur 2.

Under efterbehandlingsskedet krymper delarna avsevärt. Detta måste tas i beaktande vid formsprutningen genom att man skalar upp formrummet och tillverkar en överdimensionerad del, som sedan krymper till önskad storlek. Slutresultatet av processen är en krympt version av den formsprutade delen med en densitet på 95–100% (German & Bose, 1997, p. 221).

Råmaterialet som används vid metallformsprutning består av metallpulver och bindemedel. Bindemedlet består av polymerer och dess uppgift är att hålla ihop metallpulvret för att kunna formsprutas. Vid formsprutning är endast bindemedlet av metallråmaterialet i flytande form. Råmaterialet är vid formsprutningen ganska trögflytande och kan uppträda närmast som en glas-, talk-, eller mineralfylld teknisk polymer (Personlig kommunikation med vd Mats Baarman vid Plastoco Oy Ab, 31.3.2020). (Heaney, 2012)

Överlag kan sägas att metallformsprutning är mera krävande än formsprutning av plaster. Sintringsprocessen förstärker ofta fel som uppkommit i tidigare skeden. Det betyder att hela processen ända från formsprutning till sintring måste vara stabil för att garantera en jämn kvalitet på slutprodukten. (German & Bose, 1997, pp. 233-234)



Figur 2. Metallformsprutningsprocessen. (German & Bose, 1997)

2.2.1 Borttagning av bindemedel (Debinding)

En formsprutad detalj som kommer direkt ur formsprutan innehållande bindemedel brukar kallas för en grön del, eng. green part.

Första steget efter formsprutningen brukar kallas för debinding, enligt den engelska termen. I debinding-skedet drivs bindemedlet ut ur detaljen. Man vill så snabbt som möjligt få bort bindemedlet utan att ändra strukturen på metallpulvret. Det finns många olika sätt att få bort bindemedlet ur detaljen. Vanligtvis drivs bindemedlet ut med hjälp av värme och lösningsmedel.

Flera steg krävs för att få bort bindemedlet ur detaljen. Det första steget av debindingen, så kallad primär debinding, löser upp de primära bindemedlen med lösningsmedel i flytande eller förångad form. Under primära debindingen löses bindemedlet upp utifrån inåt, samtidigt som sammanhängande porer uppstår i detaljen. (Heaney, 2012, pp. 133-136) (German & Bose, 1997, pp. 176-178)

Under den sekundära debindingen, som sker termiskt, är temperaturen högre än vid den primära debindingen. Man höjer temperaturen sakta tills de sekundära bindemedlen förångas genom porerna som uppstått under den primära debindingen. (Heaney, 2012, p. 144)

Samtidigt som man vill få bort allt bindemedel ur detaljen vill man lämna en liten del specifikt bindemedel kvar i detaljen för att hålla ihop delen tills sintringsfasen. Den slutliga delen av bindemedel försvinner ur detaljen i början av sintringsfasen. (German & Bose, 1997, p. 175)

Efter debindig-skedet har en porös struktur erhållits som består av löst sammansatta metallpulverpartiklar. Efter debindingen brukar detaljen kallas för en brun del, eng. brown part (Heaney, 2012). De bruna delarna är väldigt sköra före sintringen. (Strömvall, 2002, s. 120)

2.2.2 Sintring

För att uppnå den slutliga, hållbara strukturen på de tillverkade metalldelarna används sintringsprocessen. Under sintringen utsätts delarna för en hög temperatur för att åstadkomma den förenande, fasta strukturen mellan metallpulverpartiklarna. Under sintringen försvinner porer ur detaljen och därför ökar densiteten, samtidigt som detaljen krymper. Detaljer kan krympa upp till 25 % under sintringen, beroende på råmaterialet och andel bindemedel i materialet (German & Bose, 1997, p. 222).

För att materialen skall sintras krävs en hög temperatur, som vanligtvis är nära, men går inte över, materialets smältpunkt. Olika material kräver alltså olika temperaturer; stål sintras vid ca. 1250 °C, aluminium vid ca. 600 °C och koppar vid ca. 1045 °C (German & Bose, 1997, p. 219).

Trots den höga krympningen kan snäva toleranser åstadkommas om processen är noggrant inställd och övervakad. Krympfaktorn kan beräknas matematiskt, men vanligtvis kan den verkliga krympfaktorn behöva testas fram (Heaney, 2012, p. 99).

2.2.3 Råmaterial för metallformsprutning

Råmaterialet som används vid metallformsprutning består volymmässigt av ca. 40 % bindemedel, och resten metallpulver. Viktmässigt är det ca. 6 % bindemedel i jämförelse med metallpulver. (German & Bose, 1997, p. 16)

Bindemedel utgör en viktig del i metallsprutningsprocessen. Bindemedlet består av flera olika polymerer, vanligtvis ett primärmaterial och tillsatsämnen för att uppnå egenskaper man fordrar. Bindemedlens egenskaper påverkar hur metallpulverpartiklarna distribueras, hur formningsprocessen fungerar samt på krympningen och på så sätt egenskaperna på den färdigt sintrade delen. (Heaney, 2012, pp. 64-65)

Många olika material kan tillverkas genom metallformsprutning, t.ex. rostfria stål, verktygsstål, koppar, hårdmetall samt nickel- och koboltlegeringar (German & Bose, 1997, p. 20).

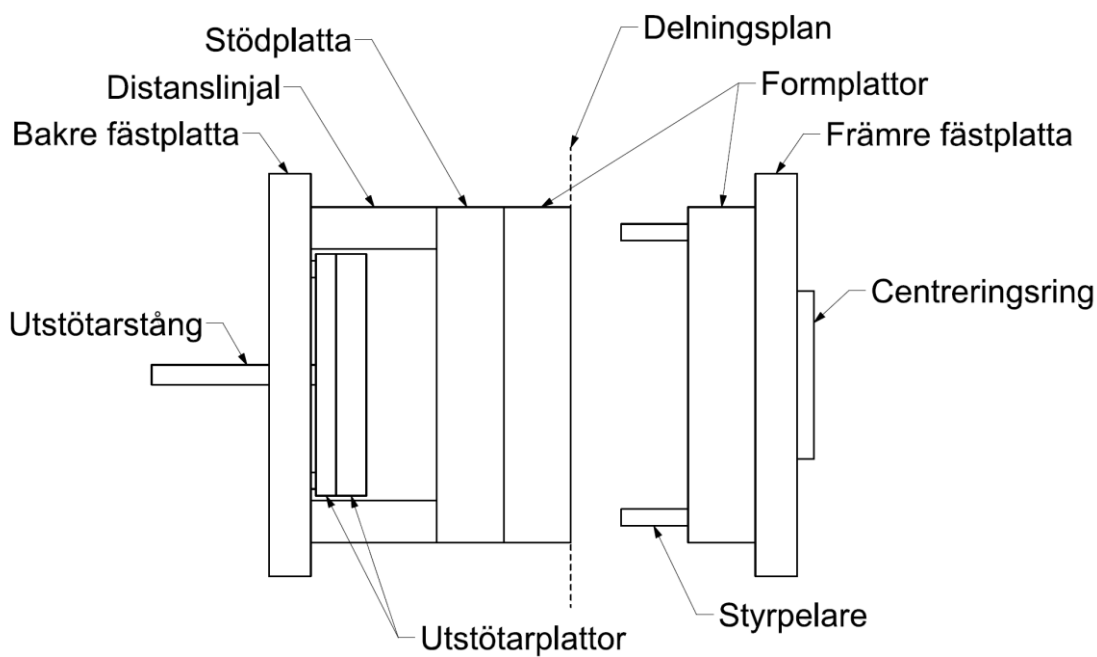
Det är också möjligt att tillverka porösa detaljer genom metallformsprutning. Vid tillverkningen används speciella råmaterial vilka innehåller komponenter som i samband med debinding-processen skapar ihåligheter i materialet. Slutresultatet är en porös metallstruktur som sökes t.ex. vid tillverkning av olika typs filter. (Personlig kommunikation med vd Mats Baarman vid Plastoco Oy Ab, 11.10.2020)

2.3 Formverktyg för formsprutning

Formverktygets kvalitet har en stor betydelse på slutresultatet vid formsprutning av plast- och metallråmaterial. Formverktyget har flera viktiga uppgifter i formsprutningsprocessen. Förutom att innehålla formrummet, som utgör delens geometri, fungerar formen som en värmeväxlare och för bort värme från det insprutade materialet. (Heaney, 2012, p. 98)

Formsprutningsverktyg är uppbyggda av stålplattor. Verktygen kan se lika ut till det yttre för att de är standardiserade bl.a. för att underlätta byten i formsprutningsmaskinen. I båda ändorna av formen finns fästplattor som skruvas fast mot formsprutningsmaskinens formbord. Sprutsidan på formverktyget, där insprutningsenhetens munstycke kopplas, är fäst i formsprutningsmaskinens fasta formbord och brukar kallas för fast halva. På sprutsidan finns en centreringsring för att centrera formsprutans sprutmunstycke med formens inlopp där den smälta plastmassan pressas in.

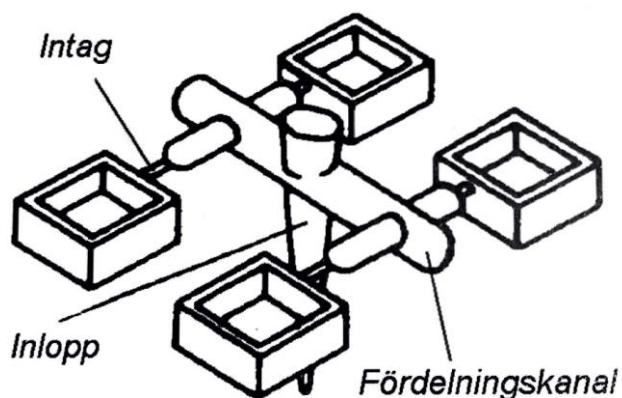
Andra halvan av formen, formens utstötarsida, fästs i formsprutningsmaskinen rörliga formbord och brukar därför kallas rörlig halva. Formens utstötarsång kopplas till formsprutningsmaskinen och påverkar formens utstötarpaket. (Strömvall, 2002) (Heaney, 2012)



Figur 3. Normalt formverktyg.

2.3.1 Ingötssystem

Ingötssystemet i formverktyget har som uppgift att leda den smälta plastmassan från formsprutningsmaskinens sprutenhet till formrummen i formen. Ingötssystemet kan delas upp i tre delar: inlopp, fördelningskanal samt intag. Ett typs ingötssystem kan ses i figur 4.



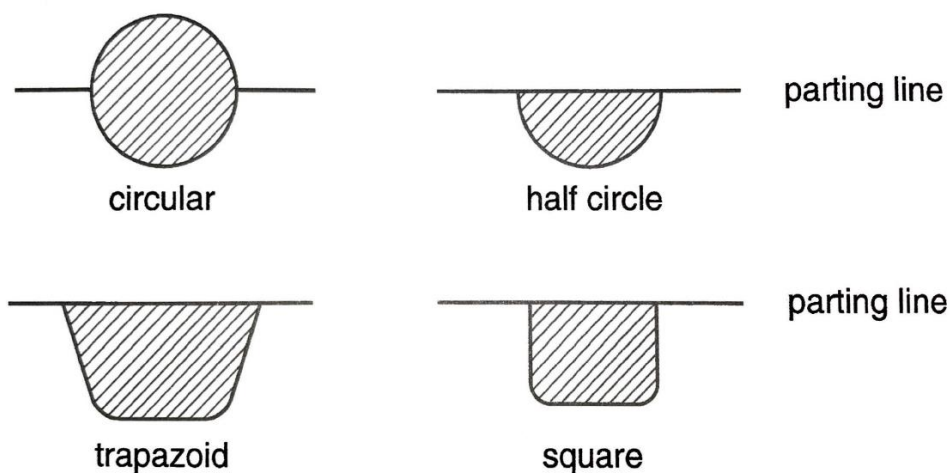
Figur 4. Exempel på ett ingötssystem för ett formverktyg med fyra formrum. (Strömvall, 2002)

- **Inlopp**

Munstycket från formsprutningsmaskinen kommer fast mot formens inlopp. Utformningen på inloppet kan variera, men vanligtvis brukar ett koniskt inlopp användas. När formen öppnas skall ingötstappen lätt kunna dras ut ur den fasta halvan i slutet av formsprutningscykeln. Inloppet kan tillverkas som en skild del i formverktyget, en så kallad inloppsbusning. (Bruder, 2017) (Strömvall, 2002)

- **Fördelningskanal**

Inloppet förgrenas eller blir sedan till fördelningskanaler som för den smälta massan vidare mot formrummen i verktyget. Grovleken på fördelningskanalerna kan variera; trånga kanaler sänker fyllnadshastigheten men grova kanaler använder upp onödigt mycket av formsprutningsmaskinens doseringsmängd. Olika tvärsnitt kan användas i fördelningskanalen. Helst vill man utforma kanalen så att förhållandet mellan yta och volym blir så litet som möjligt för att få en så liten värmeförlust. Vanligtvis brukar fördelningskanalen placeras i delningsplanet av formen. I figur 5 presenteras olika varianter av fördelningskanaler som brukar användas. (Strömvall, 2002) (German & Bose, 1997)



Figur 5. Skärningar av typiska fördelningskanaler i formverktyg. (German & Bose, 1997)

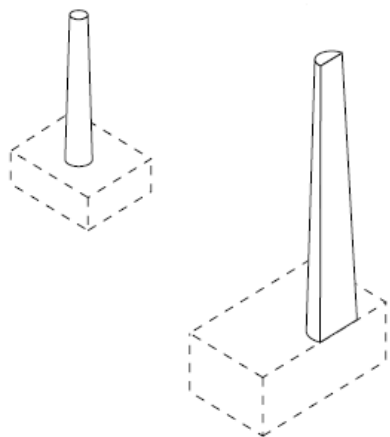
2.3.2 Intag

Sista delen av fördelningskanalen som leder till formrummet kallas för intag. Intaget är en liten öppning vilken genom den smälta plastmassan pressas in i formrummet. Detta är stället med den minsta tvärsnittsarean i hela formverktyget och därför har plastmassan här den högsta flödes hastigheten och det högsta trycket. Det kan finnas ett eller flera intag till varje formrum, beroende på delens utformning.

För att fördelningskanalen ofta är placerad vid delningsplanet är det också vanligt och enklast att placera intaget vid delningsplanet. Till följande presenteras olika typs intag till formrummet.

Direktintag

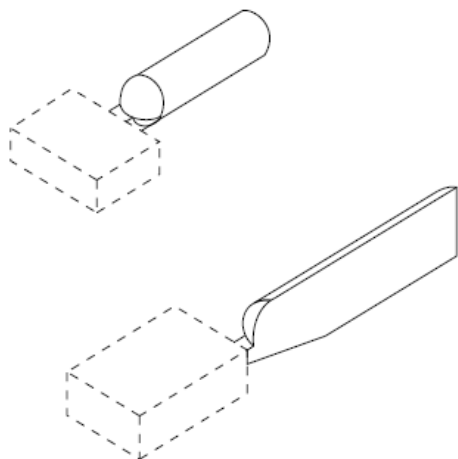
Direktintag saknar fördelningskanal, alltså är inloppet i direkt kontakt med formrummet. Direktinloppet måste klippas eller brytas loss från den färdiga detaljen och lämnar därför ett märke på delen. Direktintag ger dock minsta flytmotståndet vid formfyllning. (Strömvall, 2002)



Figur 6. Direktintag. (DuPont, 2006)

Kantintag

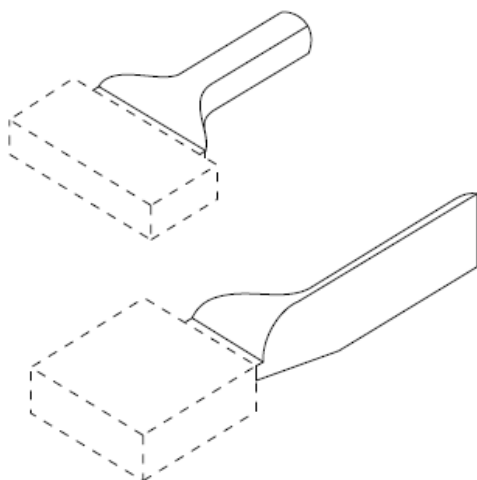
Då fördelningskanalen är placerad i delningsplanet av formverktyget är det också enkelt att använda ett kantintag till formrummet. Kantintaget kan behöva klippas eller brytas loss. (Strömvall, 2002)



Figur 7. Kantintag. (DuPont, 2006)

Filmintag

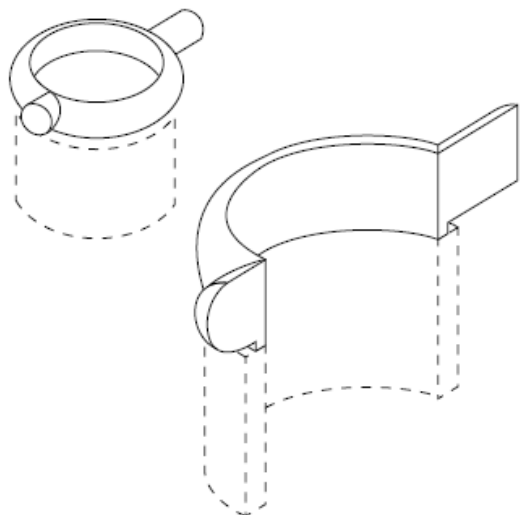
Filmintag används ofta vid formsprutning av tunnväggiga detaljer med stora ytor för att åstadkomma planhet, hög kvalitet och mått noggrannhet. Materialet flyter parallellt ut i formrummet och på detta vis fås en jämn krympning i flyt- och tvärriktning. (Strömvall, 2002)



Figur 8. Filmintag. (DuPont, 2006)

Ringintag

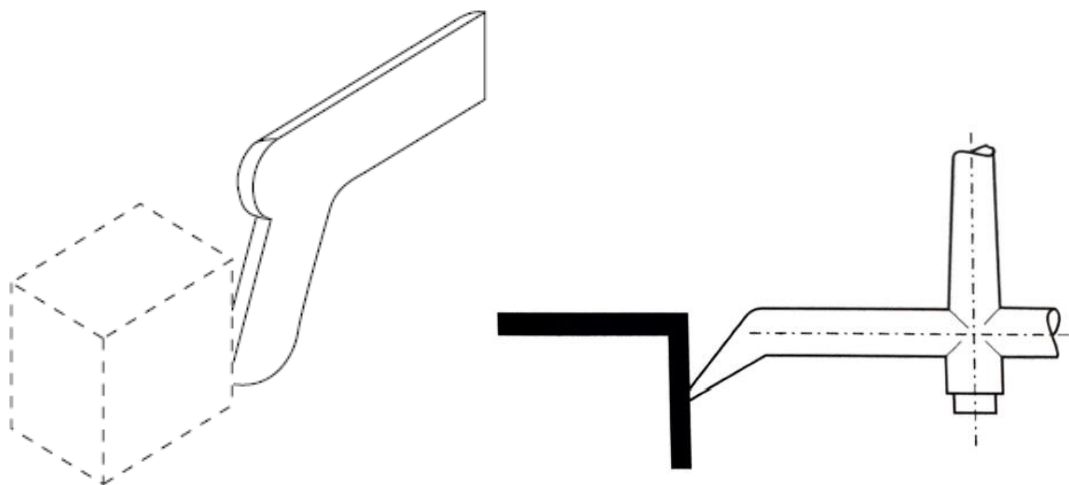
Ringintag används vid formsprutning av runda detaljer för att få en jämn fyllning utan större sammanflytningslinjer. Ringintaget fungerar egentligen som ett cirkulärt filmintag. (Strömvall, 2002)



Figur 9. Ringintag eller cirkulärt filmintag. (DuPont, 2006)

Tunnelintag

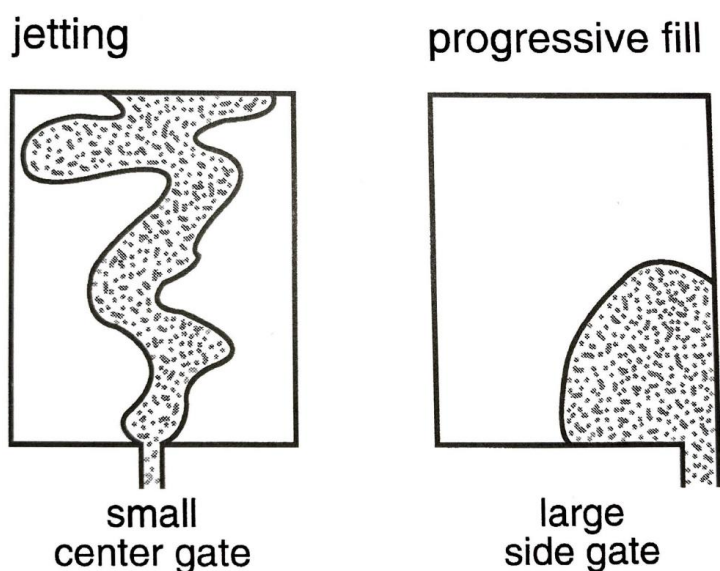
Tunnelintaget är det enda av intagen presenterade som inte kräver efterbearbetning för ingötsavskiljning. Materialet sprutas in genom en tunnel ca. 3-5mm från delningsplanet. På detta vis skärs ingötet av vid utstötning ur verktyget. Tunnelintag brukar användas vid formsprutning av mindre detaljer för att strömningen genom hålet är liten. (Strömvall, 2002)



Figur 10. Tunnelintag. (DuPont, 2006) (Strömvall, 2002)

När placeringen av intaget till formrummet bestäms måste många faktorer beaktas. Platsen på intaget har den största betydelsen på plastmassans flöde inuti formrummet.

Inloppet borde placeras så att strömmen bryts och formrummet fylls jämnt utan att en fristråle uppstår. En fristråle uppstår då en vätska pressas genom en liten öppning med hög hastighet och högt tryck till ett öppet utrymme. Detta kan leda till synliga defekter och kvalitetsproblem på den färdiga delen. Inloppet kan placeras så att strålen bryts mot motsatta väggen eller en kärna i formrummet. I vissa fall kan det också räcka att inloppet placeras bredvid en vägg som kan ses i figur 11. För att förhindra att en fristråle uppstår kan också inloppets storlek ökas och flödes hastigheten vid inloppet sänkas. (Bruder, 2017, s. 219) (German & Bose, 1997, pp. 115-118)



Figur 11. Formrummets fyllnad. Till vänster; fristråle från ett litet inlopp mitt i formrummet. Till höger; jämn fyllnad genom ett större inlopp i kanten av formrummet. (German & Bose, 1997)

Inloppet borde också placeras i den tjockaste delen av delen för att plastmassans flöde förblir konstant eller minskar längs formrummet. Också flödesmotståndet blir högre om all plastmassa skall passera ett tunt område i formrummet samt plastmaterialet hinner svalna. Dessa faktorer kan hindra formrummet från att enkelt fyllas fullständigt.

Då flera intag används till samma formrum pressas plastmassan in genom alla intag samtidigt. Det gör att formrummet fylls snabbare men kan också orsaka kvalitetsproblem på den färdiga delen. Då två intag används kommer de två flöden av plastmassa att mötas någonstans i formrummet, vilket kan skapa en synlig sammanflyttningslinje på den färdiga detaljen.

Det optimala sättet att fylla formrummet är att råmaterialet följer väggarna och på så sätt pressar ut luften i ändan av formrummet samtidigt som formrummet fylls. (Heaney, 2012, p. 100) (German & Bose, 1997, p. 115)

2.3.3 Formrum

På båda sidorna om delningsplanet på formverktyget finns formplattor där ett eller flera formrum är urgröpta. Formrummen är formens viktigaste del som ger detaljen den slutliga formen. Inuti formrummet kan finnas kärnor för att tillverka håligheter i plastdelar. Antalet formrum som används är oftast jämna, 1,2,4,8 osv. för att få ett balanserat tryckfall så att alla formrum fylls jämnt. (Bruder, 2017)

Formrummen kan ha mycket komplicerad utformning och det kan krävas att dessa tillverkas i härdat material. Formrummen brukar gröpas ur i så kallade insatser, som sedan sänks in och fästs i en större formplatta. Fördelar med lösa insatser är att den stora formplattan inte behövs härdas och kan tillverkas i billigare material. Tillverkningsmässigt är det också enklare att hantera mindre insatser. Insatser kan också enkelt bytas ut för att t.ex. tillverka andra modeller av delen. (Strömvall, 2002)

Antalet formrum i formen beror på de planerade produktionsmängderna för verktyget. Ett formverktyg med ett formrum används för låga produktionsmängder, men när högre produktivitet krävs är det lönsamt att ha flera formrum i verktyget. På detta vis kan produktionsmängden ökas, utan att införskaffa flera formsprutningsmaskiner. Tillverkningskostnaderna för formverktyget ökar med antal formrum, men produktionskostnaden per plastdetalj sjunker. Den optimala mängden formrum kan dock inte bestämmas enbart av dessa kostnader, utan också bl.a. slutkraft och doseringsmängd i formsprutningsmaskinen måste tas i beaktande. (German & Bose, 1997, pp. 104-106)

Formplattorna är pressade ihop under insprutningen men öppnas då delen skall stötas ut ur formen, alltså ligger delningslinjen mellan formplattorna. För att formhalvorna och formrummen skall passa exakt ihop mot varandra finns vanligtvis fyra styrelare och bussningar i varje hörn av formplattorna som styr halvorna noggrant mot varandra. Förutom dessa kan också ytterligare styrelement användas vid behov.

Formen skall konstrueras så att den färdiga delen fastnar på utstötarsidan av formverktyget, för att delen sedan skall kunna stötas ut. På grund av att den formsprutade delen krymper medan den svalnar i formrummet brukar den ofta lossna lätt från de yttre ytorna men kan fastna på de inre ytorna, dvs. kärnorna. För att delen skall lossna ur formen används släppningsvinklar på ytor som är parallella med riktningen i vilken formen öppnas. En släppningsvinkel mellan $0,5^\circ$ och 3° brukar vanligtvis användas. Vinkeln som behövs för att delen enkelt skall lossna beror på det formsprutade materialets egenskaper samt på ytfinheten i formrummet.

Ibland behövs ytterligare utdragare eller friktion som drar med sig delen på utstötarsidan då formen öppnas. Också utstötarpinnar med fjäderbelastning på sprutsidan av formen som pressar ut detaljen, kan förekomma. (Heaney, 2012, pp. 96-98)

2.3.4 Temperering

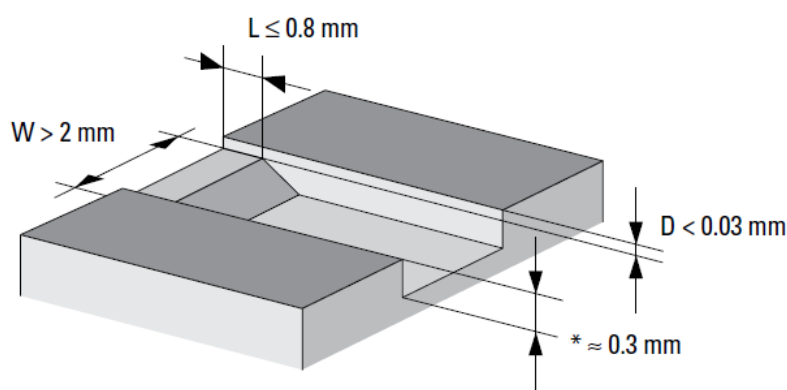
För att kontrollera temperaturen på formen brukar det finnas kylkanaler i formplattorna där vatten eller olja cirkulerar. Den formsprutade detaljen bör ha en så jämn temperatur som möjligt då den stöts ut ur formen. Det är därför viktigt att placera kylkanaler så att värmeöverföringen från formrummet blir jämnt. Behovet av temperering beror till stor del på råmaterialet som sprutas in i formen. Formverktygets temperatur skall vara tillräckligt låg för att den smälta plastmassan skall stelna, med tillräckligt hög för att materialet inte skall börja stelna före formrummen är fyllda med material. (Heaney, 2012)

Kylkanaler kan i enklaste fall vara hål borrade i formplattorna genom vilka kylmediet cirkulerar. Formplattorna har dock ofta många andra hål för t.ex. utstötarpinnar och därför kan kylkanalerna inte alltid placeras optimalt. Kanalerna får inte placeras för nära formrummet för då kan en ojämn temperering förekomma.

2.3.5 Avluftning

Då formen stängs och material börjar pressas in är formrummet fyllt med luft. När råmaterialet fyller formrummet måste luften pressas ut genom ett avluftningssystem, oftast i motsatta sidan till inloppet. Avluftningskanaler, eller så kallade ventiler, är väldigt små spalter i formverktyget som tillåter luften att flöda ut ur formrummet men är samtidigt tillräckligt små för att plastmassan inte skall pressas in i spalterna. Spåren löper ända ut till formens yttre yta där luften blåses ut i omgivningen.

En typisk avluftningskanal kan vara ett spår som är 0,015 – 0.03 mm djupt och kan vara allt mellan 2 – 12 mm breda. Vid höga tryck i formen kan spår som är tunnare än detta ändå krävas, för filmning kan förekomma om öppningen är för stor i förhållandet till trycket. Filmning innebär att plastmassan pressas ut i spalter från formrummet vilket syns på den färdiga detaljen. Ventiler i formen skall finnas på de högsta ställen av formrummet eller ställen av formrummet som fylls till sist med plastmassa. Om ventilen täcks igen med plastmassa medan luft ännu finns inne i formrummet finns en risk för luftfickor inuti den färdiga plastdelen. För att undvika defekter i form av luftfickor måste alltså först formrummets fyllnadssätt undersökas varefter ventiler placeras på riktiga platser. (German & Bose, 1997, p. 118) (Bruder, 2017, s. 95)



Figur 12. Exempel på en avluftningskanal eller så kallad ventil. (DuPont, 2006)

2.3.6 Utstötning

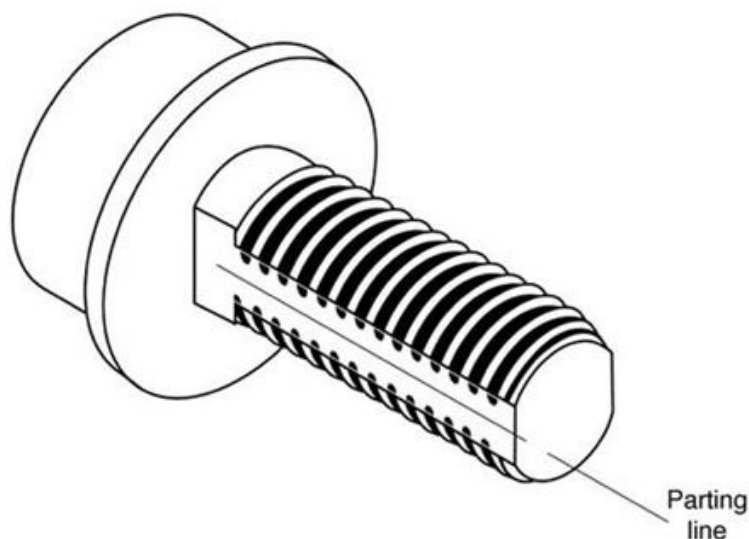
I formverktygets rörliga del finns utstötarmekanismen för att stöta ut den färdiga delen ur formen. På baksidan av formplattan finns en stödplatta för att styra utstötarelementen till formplattan. Mellan stödplattan och den bakre fästplattan finns distanslinjaler som fäster ihop plattorna. Utrymmet mellan plattorna ger möjlighet för utstötarp Plattorna att röras vid utstötning. Se figur 3.

Vanligtvis brukar cirkulära utstötarpinnar som kommer i kontakt med den färdiga delen användas för att skuffa ut den ur formen. Beroende på detaljens storlek och form måste ofta flera utstötarpinnar användas. Också andra former och typer av utstötarelement kan användas om detaljens geometri kräver det. Om detaljen är rund kan utstötarpinnar ersättas med en utstötarring eller en rörtstötare. Också en utstötarpplatta kan användas om geometrin kräver det. Andra elementtyper än utstötarpinnar stöter ut delen genom att trycka på en större yta, t.ex. på kanten kring en rund detalj. (Heaney, 2012, p. 97) (Bruder, 2017)

2.3.7 Formsprutning av gängor

Att tillverka utvändiga gängor på en formsprutad detalj går relativt enkelt och är ekonomiskt. Det enklaste och mest ekonomiska sättet är att göra ett delningsplan genom centrum på gängan, vilket kräver hög noggrannhet på formverktyget. Det finns dock en risk att grader uppstår på gängan varefter verktyget slits, som stör gängans funktion.

Ett mer ekonomiskt sätt att formspruta externa gängor är att planera plastdelen med en plan yta längs gängan, enligt figur 13. Då blir gängan ofullständig vid delningsplanet, vilket tillåter en del grader utan att störa gängans funktion. På grund av den ofullständiga gängan blir hållfastheten dock lägre.



Figur 13. Utvändig gänga med en plan yta längs delningsplanet. (Heaney, 2012, p. 45)

För att tillverka exakta gängor utan att placera delningsplanet längs gängan kan gängverktyget roteras bort från detaljen under formsprutningsprocessen. På detta sätt kan den bästa noggrannhet på gängan åstadkommas.

Innergångor tillverkas vanligtvis med en kärna i formverktyget som har gängans form. Kärnan måste alltså roteras ut ur den formsprutade detaljen. Den roterande kärnan drivs vanligtvis hydrauliskt eller pneumatiskt genom en växellåda i formverktyget. Också mekaniska lösningar förekommer, där öppningen av formverktyget driver roterande kärnor genom en växel (Bruder, 2017, s. 87). Formverktyg för innergångor blir dyra att tillverka och kräver därför stora produktionsmängder för att vara lönsamma. (Heaney, 2012, pp. 44-45)

Vid tillverkning av innergångor kan rörliga kärnor skruvas ut på olika sätt:

- **Då formen är stängd**

Kärnan roteras ut ur detaljen medan formen är stängd och detaljen hålls fast på utsidan för att inte rotera. Kärnan skruvas ut samtidigt som den rör sig ur gången, mot den rörliga formhalvan. För att detaljen inte skall börja rotera med kärnan måste detaljen vara utformad så den kan hållas fast på utsidan utan att skadas. På utsidan av detaljen kan det till exempel finnas ribbor eller en nyckelvidd.

- **Efter formöppning, före utstötning**

Även i detta fall måste något mothåll finnas för att inte detaljen skall börja rotera då gängkärnan skruvas ut. Oftast används taggar på undre sidan av detaljen. Då detaljen svalnar och krymper kan det behövas ett stort moment för att vrida runt gängspindeln och därför måste mothållen vara sådana som inte ger efter.

- **Lösa delar som skruvas ut efter utstötning**

Denna metod används vid låga produktionsmängder på grund av mycket lägre verktygskostnader. Denna metod innebär att gängkärnan skruvas ut ur detaljen för hand av operatören, efter att detaljen och gängkärnan är utstöta ur formverktyget.

(Strömvall, 2002, ss. 180-181)

2.4 Formverktyg för metallformsprutning

Formsprutning av råmaterial med metallpulver påminner mycket om formsprutning av plaster, vilket innebär att formverktygen som används också är rätt lik varandra. Den största skillnaden är att metallformsprutningsverktygens formrum är större på grund av krympningen som sker under sintringen.

Flödesegenskaperna samt de termiska egenskaperna för MIM-råmaterial skiljer sig från termoplasterna. Det krävs alltså en ytterligare insats för att åstadkomma en homogen fyllnad av formrummet vid metallformsprutning.

Formens temperering är viktig vid metallformsprutning, för att få en konstant krympning på delarna. Krympningen har en direkt inverkan på dimensionerna av den slutliga produkten och på så sätt också på mängden produktionsspill. Verktøget bör därför utrustas med temperaturkontroll som håller en konstant och noggrann temperatur i verktøget. Många MIM-råmaterial kräver en uppvärmd form för att materialet inte skall stelna för snabbt. Genom att detaljen inte stelnar lika snabbt minskas de inre spänningarna i delen, och på det sättet kan också krympningen vid sintringen fås jämnare. (Heaney, 2012, p. 114) (Heaney, 2012, p. 99)

MIM-råmaterial är skört och kan ofta fastna vid delningsplanet. Formverktøg för metallformsprutning måste därför oftast göras "tätare", alltså med snävare toleranser, än för plastformsprutning. Detta för att undvika filmning vid t.ex delningsplanet på den färdiga detaljen. (Heaney, 2012, p. 98)

Råmaterialen som används vid metallformsprutning är inte komprimerbara och sliter därför mera på formverktøget jämfört med vanliga termoplaster. Speciellt vid formverktøgets delningsplan kan slitage förekomma vid upprepad öppning och stängning av formen. Också formrummet och formsprutningsmaskinens cylinder kan slitas. För att undvika slitage kan ytbehandling eller extra hårda material användas på ytor som kommer i direkt kontakt med materialet. (Heaney, 2012, p. 98)

Jämfört med plaster är de gröna MIM-delarna skörare, vilket måste tas i beaktande vid planering av utstötningen. Formverktøget måste alltså vara uppbyggt så att utstötningen sker utan större kraft på detaljen, så detaljen inte skadas.

Formverktøg för plastformsprutning har trånga ingötssystem jämfört med metallformsprutningsverktøg.

Ingötssystemen i formverktøg för plastformsprutning är trånga i jämförelse med de i metallformsprutningsverktøg (German & Bose, 1997, p. 114). Om det finns skarpa kanter och kurvor i fördelningskanalerna kan de förorsaka separation mellan metallpulver och bindemedel. Detta kan undvikas genom att planera fördelningskanalerna mindre tvära. (German & Bose, 1997, p. 111)

2.5 Material i formverktyg

Formverktyg tillverkas av högkvalitetsstål. Delar av formen som kommer i direkt kontakt med materialet som formsprutas brukar ofta tillverkas av genomhärdat stål. Det finns en hel del olika material som kan användas i formverktyg beroende på vilka egenskaper och krav man ställer på materialet. Dessa kan vara:

- hårdhet på ytan
- polerbarhet
- slitagebeständighet
- korrosionsbeständighet.

De mest använda materialtyperna i formverktyg är:

- seghärdat formstål
- hårdhärdat formstål
- korrosionsbeständigt formstål
- verktygsaluminium
- ohärdat verktygsstål.

Seghärdat formstål används där det är svårt eller inte ekonomiskt lönsamt att använda hårdhärdat formstål. Användningsområden kan vara t.ex. stora formar, formar med låga krav på slitbeständighet och kortare tillverkningsserier. Också stödplattor som kräver hög hållfasthet kan tillverkas av seghärdat formstål. Former med liten produktionsvolym kan nästan helt och hållet tillverkas av seghärdat stål som inte kräver härdning, och sparar därför på produktionskostnader.

Hårdhärdat formstål används när formverktyget planeras för långa tillverkningsserier och nötningen på formens komponenter är hög. Speciellt vid höga spruttryck och låskrafter används hårdhärdat material i formplattorna. Materialet måste ha en god härdbarhet för att uppnå en så jämn hårdhet som möjligt.

Korrosion kan orsakas av t.ex. plastmaterial som avger korrosiva ämnen eller då kondens kan uppstå i formen. I dessa fall måste **korrosionsbeständiga formstål** användas för att formen skall hålla i längden. Kylkanalerna inuti formplattorna kan också korrodera med tiden, vilket sänker kyleffekten. Korrosionsbeständigare material förhindrar också detta i en viss grad.

Formaluminium används i regel endast till prototypformer eller i formverktyg för väldigt små tillverkningsserier. Aluminium är lättare att bearbeta än annat formstål, vilket sparar på tillverkningskostnader, men slits däremot mycket snabbare vid formsprutningen.

Övriga delar av formen så som distanslinjaler och fästplattor kan tillverkas av ohärdat verktygsstål. Dessa delar behöver inte ha några speciella egenskaper utan behöver bara klara av de krafter, bland annat slutkraften, som formen utsätts för under formsprutningscykeln. (Strömvall, 2002, ss. 160-162) (German & Bose, 1997, pp. 124-125)

Nästan alla komponenter till formverktyg finns att köpa i standardmått. Verktygstillverkare köper ofta formplattor i standardmått som halvfabrikat, varefter de bearbetas till slutliga geometrier. Alla typs glidelement, hylsor, utstötare, ingötsbussningar med mera kan köpas färdiga eller som halvfabrikat, vilket sparar tid vid tillverkningen. Dessutom finns CAD-modeller över standardkomponenter hos de flesta stora leverantörerna av standardkomponenter, som underlättar planeringen av formverktyg avsevärt.

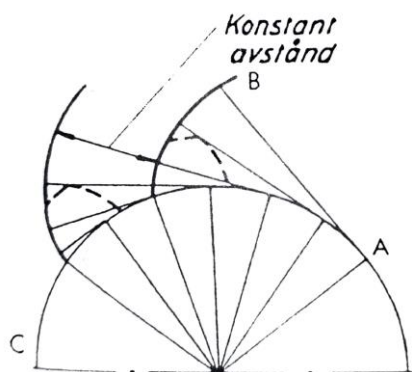


Figur 14. Exempel på formplattor och distanslinjaler som kan köpas i standardmått. (Hasco, 2020)

2.6 Kuggväxlar

Kuggväxlar överför en rörelse från en axel till en annan samtidigt som moment och varvtal kan förändras. En kuggväxel är en helhet som består av ett eller flera kugghjulspår monterade i en fast konstruktion. Vid parallella axlar används cylindriska kugghjul. Dessa kugghjul kan ha raka kuggar, som är parallella med axeln, eller sneda kuggar som har en vinkel i förhållande till axeln. Sneda kuggar ger upphov till axiella krafter på infästningen medan rakt skurna kuggar endast ger radialkrafter.

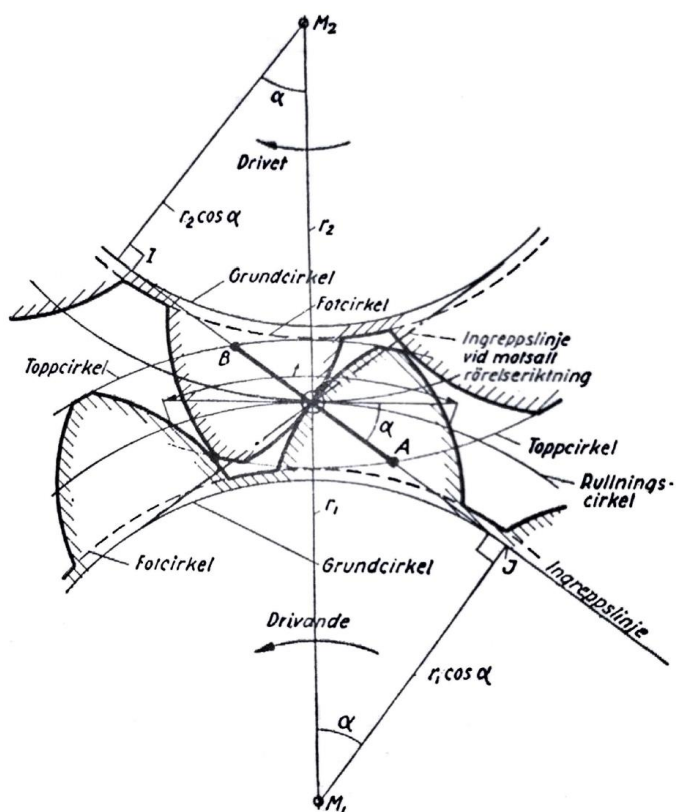
Formen på kuggarna bygger ofta på evolventprofilen. Evolvent är den linje som uppstår av ändan på ett band som rullas av kugghulets grundcirkel, enligt figur 15.



Figur 15. Evolventkurvan. (Lindström & Bonde-Wiiburg, 2000, s. 272)

Evolventkugghjul har en konstant ingreppsvinkel. Ingreppslinjen blir en rät linje, vilket kan ses i figur 16. Villkoren för kuggsamarbete kan alltså uppfyllas oberoende av delningsdiametrar. Det betyder att evolventkugghjul med samma kuggdelning kan användas ihop, oberoende av kuggantalen. Ingreppsvinkeln, också kallad pressvinkel, som används i de flesta fall är $\alpha = 20^\circ$.

Punkten där kontakten mellan kugghjulen sker är på ett konstant avstånd från kugghulets centrumaxel. Den utgör delningscirkeln, eller rullningscirkeln, som kan ses i figur 16. Också ingreppslinjen skär denna punkt.



Figur 16. Evolventprofilens storheter. (Lindström & Bonde-Wiiburg, 2000)

För att underlätta kugghjulstillverkningen används hjälpstorheten modul, m , som är en standardiserad referensprofil. Modulen beskriver referensprofilens delning längs delningslinjen i millimeter. Modulen är standardiserad enligt standarden SFS-ISO 54, som ger rekommenderade moduler att använda.

Med hjälp av kugghjulets modul kan olika geometriska värden för kugghjulet beräknas. För cylindriska kugghjul beräknas modulen som $m = d/z$, alltså delningsdiametern genom kuggantal.

Ibland kan en profilmörskjutning på kuggarna göras, vilket betyder att delningsdiametern förskjuts utåt eller inåt från den normala delningsdiametern. Detta gör man för att få bättre prestanda på kuggarna, så som t.ex. bättre böjhållfasthet på kuggen. En annan orsak att förskjuta kuggprofilen kan vara att ett lågt kuggantal används, som inte skulle fungera utan en förskjutning av profilen. I så kallade normalfall görs ingen profilmörskjutning.

Utväxlingen, i , mellan ett kugghjulpar kan beräknas med följande formel:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (1)$$

Där:

i = utväxlingen

ω = vinkelhastigheten, 1/s

n = varvtal, 1/min

z = kuggantal

Index 1 avser det drivande kugghjulet och index 2 det drivna hjulet.

Till följande beräknas storheter för okorrigerade kugghjul, alltså kugghjul utan profilmörskjutning, med hjälp av modulen.

Delningsdiametern, d , för ett kugghjul beräknas enligt:

$$d = mz \quad (2)$$

Axelavståndet mellan ett kugghjulpar kan beräknas med formeln:

$$a = \frac{m \cdot (z_1 + z_2)}{2} \quad (3)$$

Där:

a = axelavståndet

m = kugghjulens modul

Kugghöjd, h , kan beräknas enligt:

$$h = 2,25m \quad (4)$$

Ett spel mellan kuggarnas toppar och botten behövs vid ett kugghjulpar. Normalt används ett kuggspel på $0.25m$. Måttet från delningscirkeln till kuggbotten, h_f ,

blir då:

$$h_f = 1,25m \quad (5)$$

Fotcirkel eller bottendiameter, d_f , beräknas enligt:

$$d_f = d - 2h_f \quad (6)$$

På motsvarande sätt beräknas **toppcirkel eller toppdiameter**:

$$d_a = d + 2m \quad (7)$$

(Blom, 2001) (Lindström & Bonde-Wiiburg, 2000)

2.6.1 Ingreppstal

Ingreppstalet beskriver hur många kuggar som är i kontakt och överför krafter mellan två kuggjul. Ingreppstalet, ε , kan beräknas enligt följande ekvation:

$$\varepsilon = \frac{1}{m \cdot \pi} \left[\sqrt{\left(\frac{r_1 + m}{\cos \alpha}\right)^2 - r_1^2} + \sqrt{\left(\frac{r_2 + m}{\cos \alpha}\right)^2 - r_2^2} - (r_1 + r_2) \tan \alpha \right] \quad (8)$$

Det minsta användbara värdet på ingreppstalet är 1,1, vid långsamtgående växlar. Värdet över 2 förekommer sällan. Då ingreppstalet är t.ex. $\varepsilon = 1,6$ betyder det att två kuggar är i ingrepp 60 % av tiden och endast en kugg är i ingrepp 40 % av tiden. (Lindström & Bonde-Wiiburg, 2000, ss. 276-277)

2.6.2 Hållfasthetsberäkning av kuggväxlar

Det finns olika standarder på hur hållfasthetsberäkningen för kuggväxlar bör göras. Metoderna tar i beaktande driftförhållandena och kuggarnas hållfasthet beräknas med tanke på kontakttryck mellan kuggarna, samt böjspänningar som uppstår i kuggarnas rot.

Den finska standarden SFS 4790 beskriver hur hållfastheten för kuggväxlar kan beräknas. Standarden har år 2016 blivit förnyad med en mera noggrann ISO-SFS 6336-standard, men för enkla kuggväxlar med relativt låga belastningar kan en riktgivande bild av hållfastheten fås med räknesättet i SFS 4790. (Miettinen, ym., 2010, s. 514)

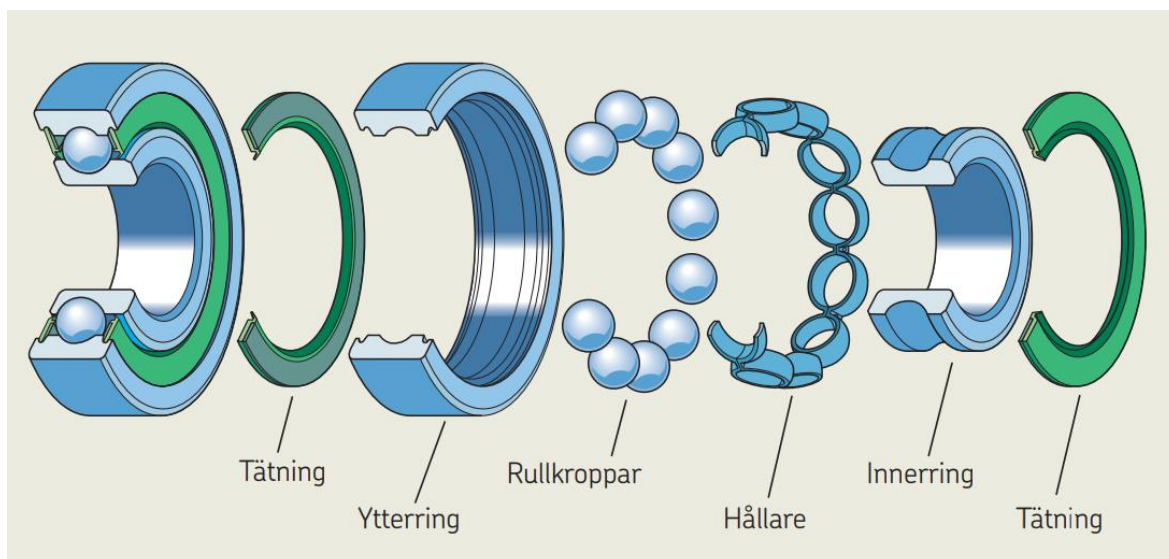
2.7 Lager

Lager är element som styr och stöder roterande eller oscillerande maskinelement samtidigt som laster kan överföras mellan elementen. Lager används för att ta upp stora laster samt kunna medge snabb rotation utan stora effektförluster och slitage. Lasten på ett lager kan vara parallell med eller vinkelrät mot den roterande axelns centrumlinje.

Den simplaste form av lager är glidlager. Glidlager består i enklaste form av en axel som roterar i en bussning. Då blir funktionen huvudsakligen beroende av materialegenskaperna, samt möjliga smörjsystem. Olika sintrade metaller, plaster eller keramer används ofta i glidlager. För att bl.a. få ner friktion i lager brukar man övergå till rullningslager vid mer avancerat bruk. (Lindström & Bonde-Wiiburg, 2000, ss. 265-266)

2.7.1 Rullningslager

Rullningslager används för att stöda axlar och hjul med minimal friktion. Ett typiskt rullningslager består av en innerring, en yttering, rullkroppar samt en hållare. Beroende på användningsändamål kan rullningslager levereras förslutna med tätning eller skyddsplåt på en eller båda sidorna. Komponenter i vanliga rullningslager kan ses i figur 17. De två grundläggande typerna av rullningslager är kullager och rullager.

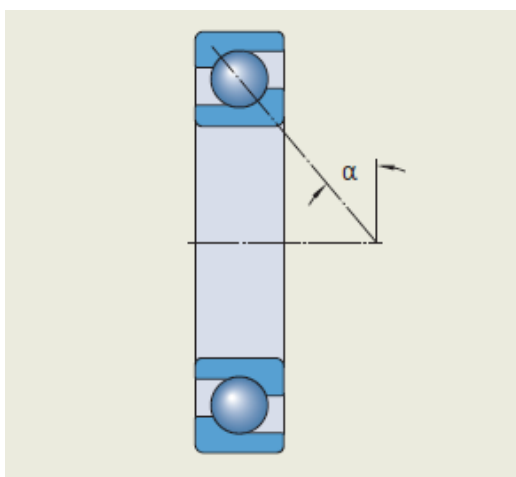


Figur 17. Komponenter i ett enradigt spårkullager. (SKF, 2019, s. 24)

I rullager används avlånga rullar som rullkroppar. Kontaktytan mellan rullarna och löpbanorna på ringarna bildar en linjekontakt. Rullager klarar av högre belastningar, på grund av den större kontaktytan, än kullager i samma storlek, men har en högre friktion.

Kullager har kulor som rullkroppar mellan ringarna. Det uppstår en punktkontakt mellan löpbanorna och kulorna i lagret. Kontaktytan är därför lägre än vid ett rullager, vilket ger en lägre friktion. Kullager klarar av högre varvtal men samtidigt är bärförmågan lägre än för ett rullager i samma storlek. (SKF, 2019, s. 20)

Olika typer av rullningslager kan ta upp olika stora radial- och axialkrafter. Rullningslager delas upp utgående ifrån i vilken riktning kraften kan tas upp; radiallager och axiallager. Radiallager är gjorda för att främst ta upp krafter som verkar vinkelrätt mot axelns centrumlinje. Axiallager däremot är gjorda för att ta upp belastning i samma riktning som axelns centrumlinje. Kontaktvinkeln mellan rullkropparna och ringarna i lagret bestämmer till vilken grupp lagret hör. Lager med kontaktvinkel mindre än $\alpha = 45^\circ$ är radiallager och resten är axiallager enligt figur 18.



Figur 18. Kontaktvinkel i rullningslager. (SKF, 2019)

En av de vanligaste kullagertyperna är det enradiga spårkullagret. Lagret har en rad med kulor mellan inner- och ytterringen. I ringarna finns spår som håller kulorna på plats samt gör att lagret är självsammanhållande. Ett enradigt spårkullager har god bärförmåga både i radiell och axiell riktning. Ett kullager av denna typ kan ses i figur 17. (Lindström & Bonde-Wiiburg, 2000, s. 267)

2.8 Datorbaserad modellering och produktutveckling

Med begreppet produktutveckling menas processen med vilken en ny produkt tas fram. Under produktutvecklingen används flera metoder och verktyg för att åstadkomma ställda krav och önskemål på produkten, som fastställts i början av processen. I produktutvecklingsprocessen ingår följande faser:

- utarbeta detaljerade lösningskoncept
- utveckla lösningskoncept
- analysera, verifiera och välja lösningskoncept
- utarbeta slutliga detaljlösningar
- analysera, verifiera och validera slutlig lösning.

Datorbaserade produktmodeller är idag helt dominerande under produktutvecklingsprocessen och ett viktigt verktyg som används för att skapa dessa är CAD-system (Computer Aided Design).

Med CAD-system kan geometrimodellering, animering och ritningsframställning göras, speciellt i produktutvecklingsprocessens layout- och detaljkonstruktionsskeden.

Man brukar tala om virtuell utveckling där man försöker göra så mycket som möjligt av utvecklingsarbetet på dator med virtuella modeller. Genom dessa framtagna modeller kan bestämmas huruvida resultaten uppfyller kraven som ställts på produkten.

(Johannesson;Persson;& Pettersson, 2013, ss. 24-25, 60-61, 501-503)

3 Metod

I detta kapitel presenteras tillvägagångssätt som har använts i examensarbetet och vilka metoder som använts för att komma fram till resultatet.

3.1 Arbetsprocess

Information kring formsprutning och metallformsprutning söktes i litteratur. Litteratur om formverktyg har använts för att konstruera formverktyget till att fungera så bra som möjligt.

Kontakt med företaget har upprätthållits under arbetets gång. Åsikter och önskemål har framförts på möten och per epost. Goda råd angående formverktygets konstruktion och materialanvändning har framförts av företaget under utvecklingsprocessen.

Under planeringsskedet framkom ett antal olika lösningar för att åstadkomma formverktygets funktion. Från dessa lösningar skapades lösningskoncept på olika komponenter i formverktyget. Lösningskoncept valdes därefter enligt vad som ansågs passa bäst och användes för att skapa den slutliga 3D-modellen av formverktyget.

3.2 Krav och önskemål på formverktyget

Arbetet inleddes med att fastställa vissa krav och önskemål på formverktyget. Krav och önskemål gällande formverktygets funktion och modell kom från företagets sida. Planen var att designa verktyget i samma stil som andra formverktyg inom företaget så att användningen och byten i formsprutningsmaskinen skulle gå smidigt.

Det främsta kravet på formverktyget var att en filterdetalj enligt ritning skulle kunna tillverkas. För att tillverka inngången i detaljen behövs en roterande kärna. Kärnan skall skruvas ut medan formen ännu är stängd, för att filterdetaljen inte skall börja rotera med kärnan. Ett kantintag till formrummet skulle användas, vilket till en viss gräns kan fungera som ett mothåll då kärnan roteras ut.

Om intaget inte fungerar som ett tillräckligt mothåll, och filtret börjar rotera med kärnan, skall en nyckelvidd gå att tillägga på detaljen för att förhindra oönskad rörelse i formrummet. Formen skulle planeras med detta i tanke.

Ett önskemål från företags sida var att gängspindeln skulle drivas med en hydraulmotor som kopplas och drivs med tryck från formsprutningsmaskinen. Vridmomentet då kärnan roteras loss från filterdetaljen uppskattades till 40 Nm, enligt erfarenhet från liknande formverktyg i företaget. Drivningen av gängspindeln skall klara av den kraft som uppstår av vridmomentet.

Kärnans båda ändlägen skulle begränsas med ett mekaniskt stopp. På det sättet kan hydraulmotorn köras med endast en tidsstyrning från formsprutningsmaskinen.

Verktyget skulle planeras på ett sådant sätt att olika modeller på filtret kan tillverkas genom att byta ut endast några komponenter i verktyget. På det sättet sparas material och tillverkningskostnader för själva ramen av formverktyget, då den kan användas för tillverkning av olika modells filter.

Formverktyget skulle planeras med tillräcklig styrning vid alla löstagbara komponenter, så att formverktyget enkelt skulle gå att skruva ihop efter service, utan att behöva passa in några komponenter på nytt.

Den tänkta produktionsmängden uppskattades till högst 10 000 tillverkade filterdetaljer per år. Under produktionen görs underhåll, bl.a. putsning och kontroll, av verktyget med jämna intervall.

Ett önskemål från företaget var att formverktyget skulle byggas med så många standardkomponenter som möjligt, vilket sparar på tillverkningstid samt underlättar reparationer. Formens yttre storlek önskades också vara kompakt för att den enkelt skall gå att hantera vid inställning.

Mått på formsprutningsmaskinen skulle tas i beaktande vid planeringen av formverktyget. Dimensionerna på formbordens hål var kända för att formverktygets utstötarmekanism och styrning till sprutsidan kunde planeras därefter.

Krav och önskemål presenteras i tabell 1.

Tabell 1. Lista över krav och önskemål

| Egenskap | Krav/Önskemål |
|--|-----------------|
| Möjlighet att tillverka olika filtermodeller genom att byta ut delar i verktyget | Krav |
| Hydraulmotor för att rotera kärna | Krav |
| Möjlighet att tillägga en nyckelvidd på detaljen | Krav |
| Kompakt formverktyg till det yttre | Önskemål |
| Användning av så många standardkomponenter som möjligt | Önskemål |
| Sammanpassande med formsprutningsmaskin | Krav |
| Rotera kärnan med ett vridmoment på 40 Nm | Krav |
| Simpel konstruktion | Önskemål |
| Enkelt att underhålla | Önskemål |

3.3 CAD-modellering

Som verktyg vid planering av formverktyget användes CAD-programmet Siemens NX 12.0. Med programmet skapades och sammanställdes komponenter till det slutliga formverktyget. Ett antal koncept och detaljlösningar skapades varefter den slutliga versionen av formverktyget sammanställdes.

Under konstruktionen användes färdiga 3D-modeller över komponenter från leverantören, där det var möjligt. På detta sätt säkerställdes att CAD-modellerna stämmer överens med de verkliga komponenterna som kommer att användas vid tillverkningen av formverktyget.

Som leverantör för standardkomponenter till formverktyget valdes det ursprungligen tyska företaget HASCO Hasenclever GmbH + Co. KG. Inom Plastoco Ab har tidigare använts mycket av företagets produkter och man har varit väldigt nöjd med kvalitet och leverans på dessa. Ett av kraven från företaget var att så många som möjligt av Hascos standardkomponenter skulle användas till verktyget i examensarbetet.

På Hascos hemsida (www.hasco.com) hittas CAD-filer för nedladdning för de flesta av företagets produkter. Alla glidelement, plattor och bussningar laddades ner från Hasco under planeringsskedet i arbetet.

4 Resultat

I detta kapitel presenteras olika lösningskoncept på komponenter i formverktyget. Beräkningarna för kugg- och lagerhållfasthet samt den slutliga versionen av formverktyget presenteras också.

4.1 Konceptgenerering

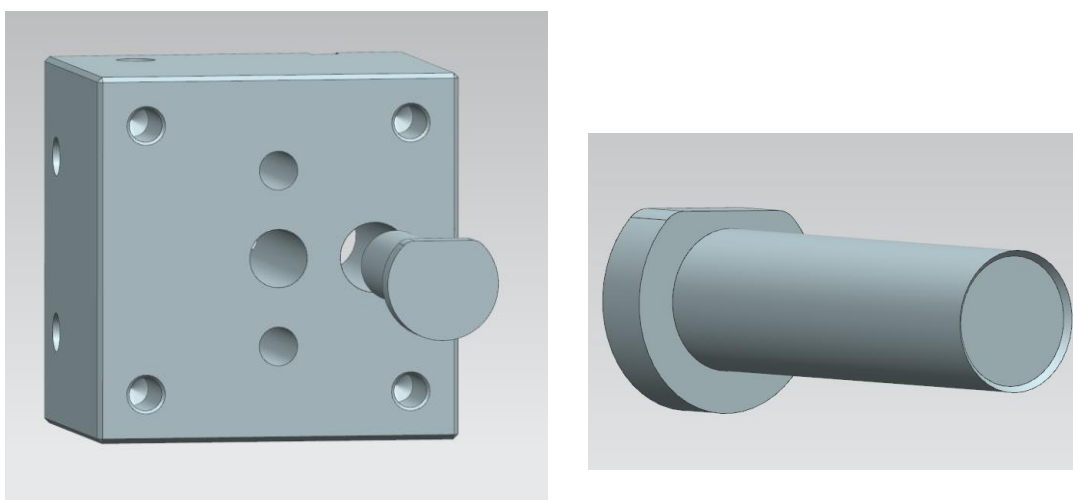
I början av planeringsskedet var formverktygets grundfunktion och konstruktion känd men olika lösningar på vissa funktioner och komponenter fanns att välja mellan. Som följande presenteras några av de koncept på konstruktioner som beaktades under planeringen.

4.1.1 Avluftning

En ventil för avluftning måste finnas i formrummets botten för att föra bort luften som finns i formrummet då råmaterial sprutas in. Till följande presenteras tre koncept för att skapa en avluftningsspalt i botten av formrummet.

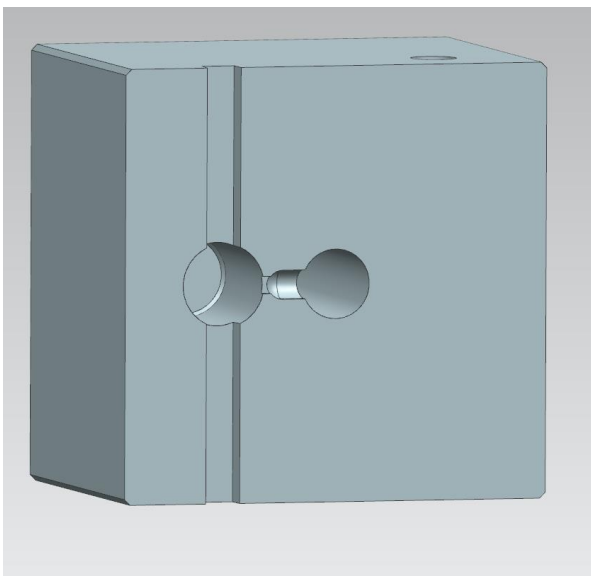
Koncept 1

Det första konceptet har en tapp som botten i formrummet. Genom springan mellan inlägget och tappen kan luften från formrummet avlägsnas. Tappen skulle ha samma diameter som filterdetaljen.



Figur 19. Avluftning, koncept 1.

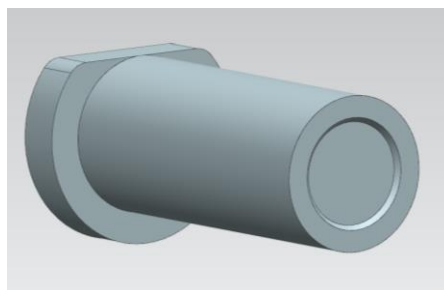
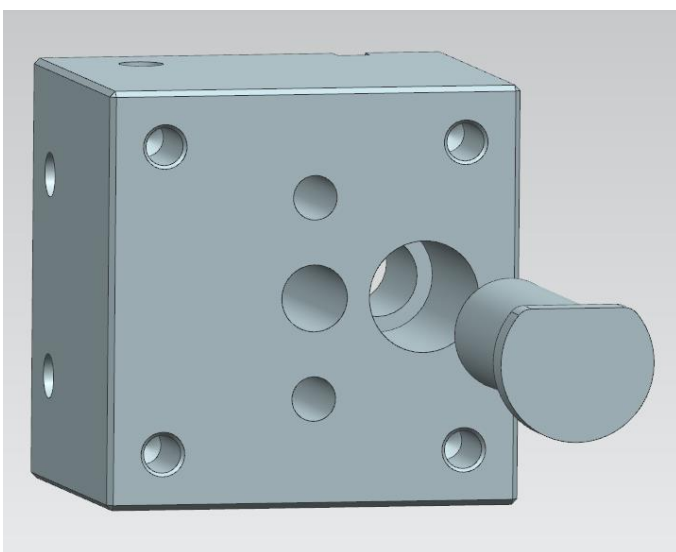
Med detta koncept kunde filterdetaljer med samma diameter, men olika längd, tillverkas genom att bara byta ut tappen till en med annan längd. För att tillverka filter av olika längd skulle alltså inte själva insatsen behöva bytas ut. Nackdelen med konceptet är att tappen har en vass kant som kan slitas vid formsprutningen.



Figur 20. Avluftning, koncept 1. Sammansatt insats och avluftningstapp.

Koncept 2

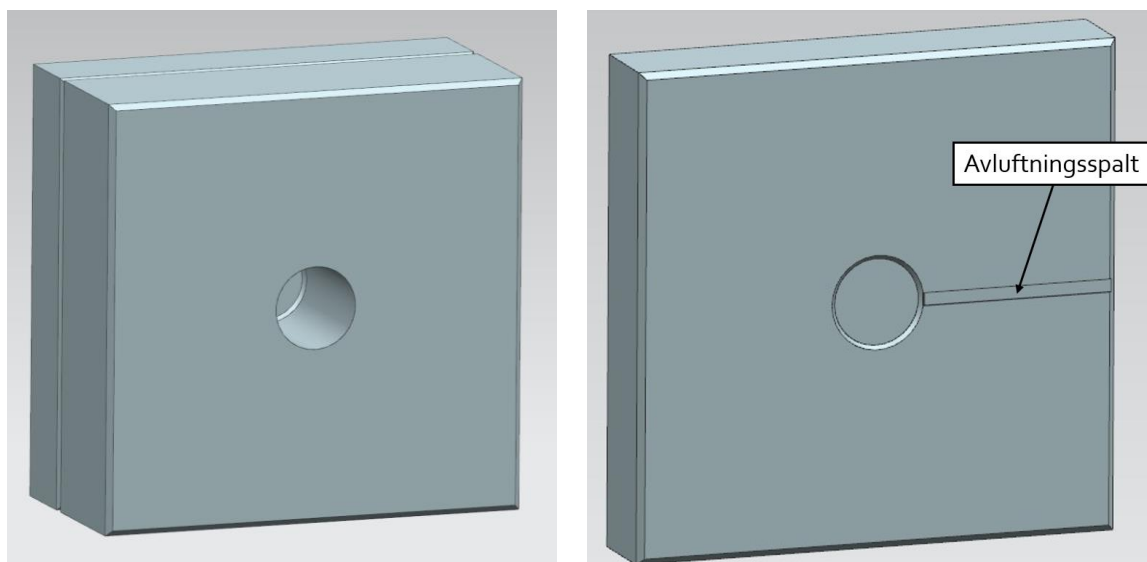
Koncept två har samma funktionsprincip som koncept 1 men skulle ha en grövre dimension på tappen för att inte skapa en vass kant, för att bättre hålla slitage vid formsprutningen. Med denna lösning måste både tappen och insatsen bytas ut för att tillverka olika modells filter.



Figur 21. Avluftning, koncept 2.

Koncept 3

I koncept 3 skulle avluftningsspalten skapas mellan två plattor, enligt figur 22. Nackdelen med detta koncept är att insatsen i två delar skulle vara svår att fästa i formplattan. Alternativt kunde verktyget byggas med två formplattor, och mellan dem skapas en avluftningsspalt, men då skulle inte en skild insats kunna användas i verktyget.



Figur 22. Avluftning, koncept 3. Avluftning mellan två plattor.

4.1.2 Typ av insats för formrummet

Formrummet för detaljen bör göras i en insats för att kunna tillverkas i hårdhärdat material samt för att formrummet kan bytas ut för att tillverka en annan modell av filterdetaljen. Till följande presenteras tre koncept på formplatta och insats.

Koncept 1

En lösning på fomplatta och insats var att använda formplattor med färdigt urgröpta fickor för insatser med standardstorlek som också finns att köpas som halvfabrikat, som kan ses i figur 23. Dessa lösningar är enkla vid verktygstillverkningen, för komponenterna kan köpas och bara gröpa ur formrum, kylkanaler med mera ur formplatta och insats.

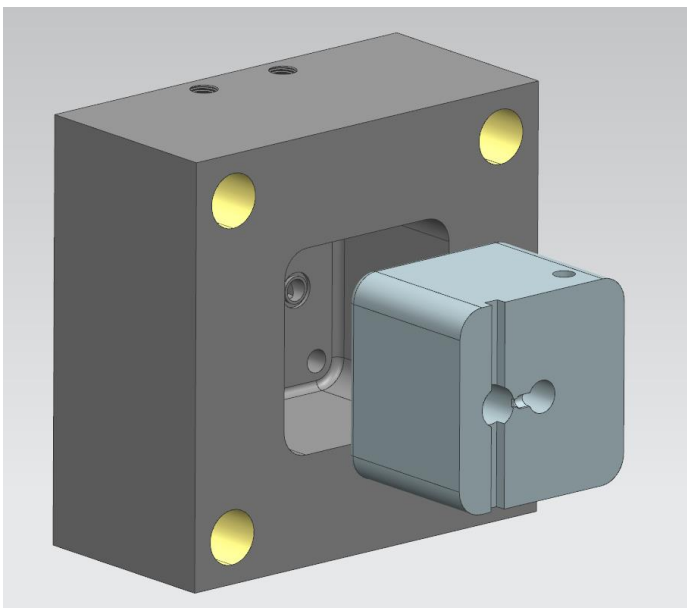


Figur 23. Formplattor med färdiga fickor för insatser. Uppe en formplatta med färdigt urgröpt ficka för insats och nere formplatta med urgröpning för insats med löstagbara gavlar. (Hasco, 2020)

Nackdelen med formplattor med färdiga fickor är i detta fall att det inte finns tillräckligt tjocka plattor på marknaden. Formrummet för den längre filtermodellen (från figur 1) skulle inte kunna tillverkas i en insats av denna modell, på grund av att fickorna inte är tillräckligt djupa.

Koncept 2

En annan lösning för att skapa insatsen för formrummet var att gröpa ut en ficka ur en formplatta, och att tillverka en insats som passar i denna. Insatsen skulle fästas med skruvar från baksidan av formplattan. För att enkelt kunna tillverka fickan skulle hörnen vara rundade. Konceptet presenteras i figur 24.

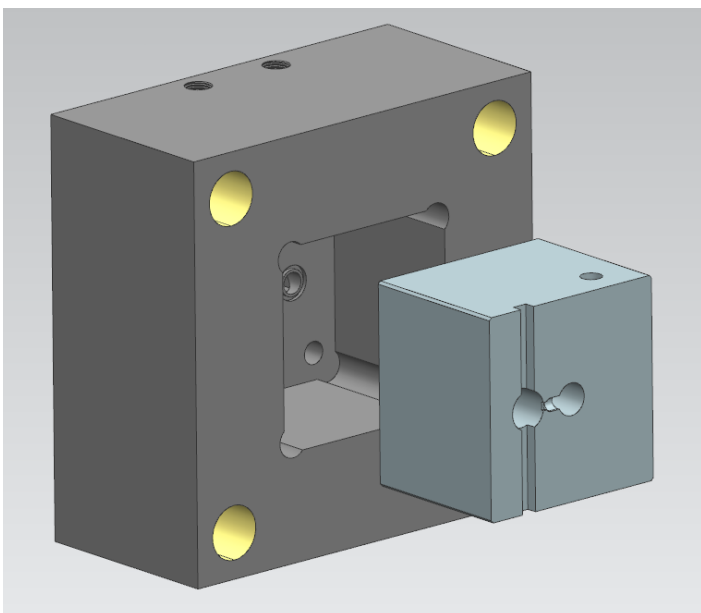


Figur 24. Insats med runda hörn infälld i formplattan.

Nackdelen med konceptet är att insatsen inte kan köpas färdig och att formplattan måste bearbetas från en platta utan färdig ficka. Insatser för båda filtermodellerna, från figur 1, kunde dock tillverkas enligt detta koncept.

Koncept 3

Den tredje lösningen skulle fungera på samma sätt som koncept 2 men insatsen skulle tillverkas med skarpa hörn. Istället skulle större radier göras i hörnen av fickan i formplattan, för att underlätta tillverkningen. Konceptet presenteras i figur 25.



Figur 25. Insats med skarpa hörn infälld i formplattan.

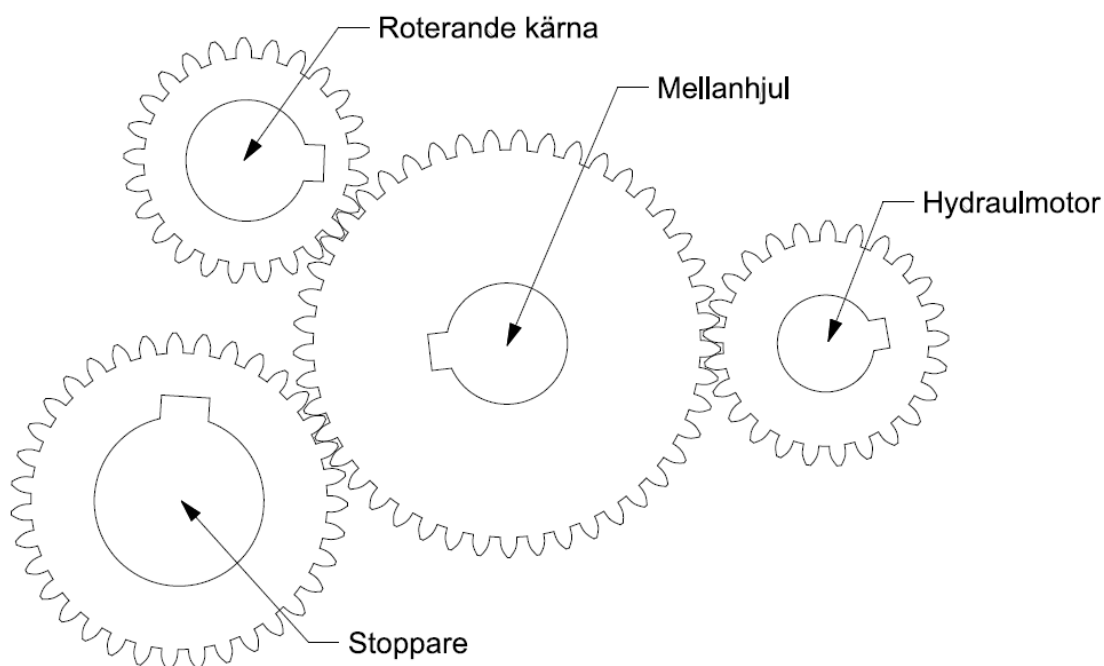
Fördel med detta koncept, jämfört med koncept 2, är att insatsen är enklare att tillverka, utan de rundade hörnen. För att endast en formplatta behövs tillverkas, men flera insatser, kan detta koncept vara att föredra.

4.1.3 Kugghjulens placering

För att rotera kärnan behövdes en kuggväxel mellan hydraulmotorn och kärnans axel. Stopparen som begränsar kärnans rotation skulle också kopplas in i kuggväxeln för att bromsa rörelsen i rätt läge. Efter att en passlig utväxling hade valts prövades olika placeringar på kugghjulen för att hitta den optimala layouten. Till följande presenteras två koncept över kuggarnas layout.

Koncept 1

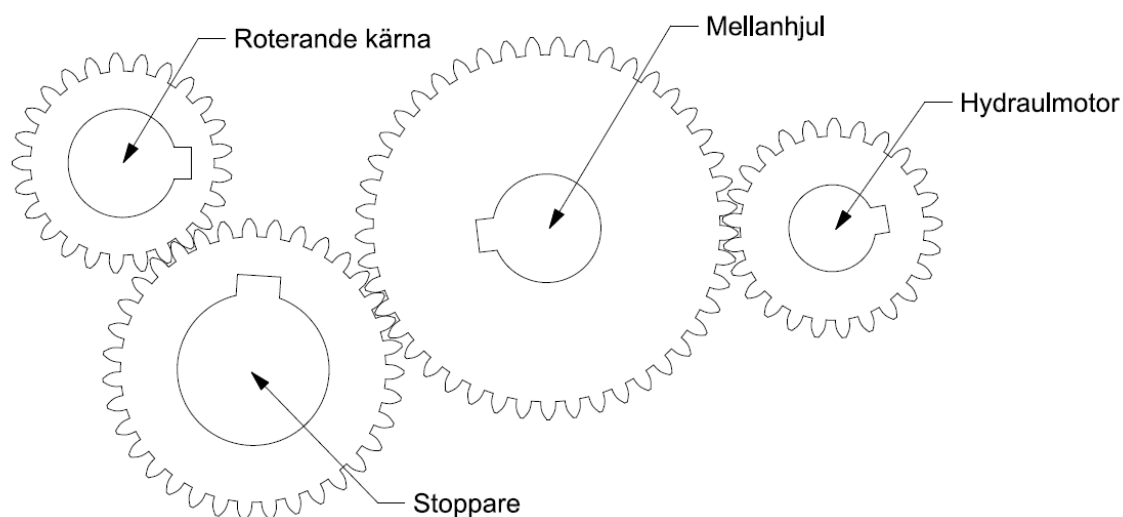
I det första konceptet får både stopparen och den roterande kärnan rotationen från mellanhjulet. Konceptet presenteras i figur 26.



Figur 26. Placering av kugghjul, koncept 1.

Koncept 2

I det andra konceptet kopplas stopparens kugghjul till mellanhjulet och roterande kärnan till stopparen (figur 27).



Figur 27. Placering av kugghjul, koncept 2.

Dessa två koncept har inga direkta för- och nackdelar jämfört med varandra utan det koncept som passar bättre till övrig konstruktion kan väljas.

4.2 Beräkningar

I detta kapitel presenteras beräkningarna som gjordes för lagringen och kuggväxeln i formverktyget. Beräkningarna gjordes med det tekniska beräkningsprogrammet MathCad.

4.2.1 Hållfasthetsberäkningar över kuggväxel

Hållfasthetsberäkningar för kuggväxlarna gjordes enligt standarden SFS 4790. Kuggväxeln är i detta fall inte under hög belastning och slitaget på kugghjulen kan kontrolleras med jämna mellanrum. Om kuggväxeln trots allt fallerar är sannolikheten liten att någon större skada i formverktyget sker och dessutom finns ingen risk för personskador. Det ansågs därför att en väldigt noggrann analys av kuggväxeln inte behövdes, utan den snabbare men aningen minde detaljerade beräkningsmetoden enligt SFS 4790 kunde användas.

Beräkningen enligt SFS 4790 hittas i bilaga 2.

Resultat

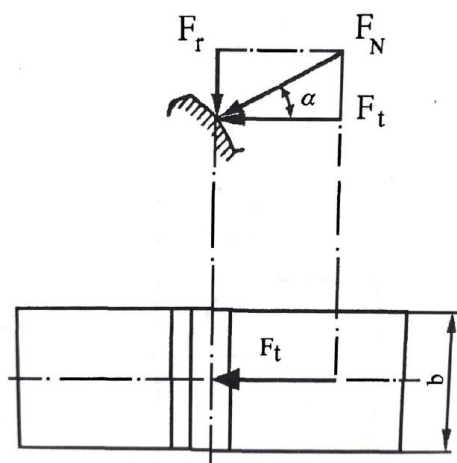
En säkerhetsfaktor på 2,6 erhöles för böjspänningarna som uppstår i kuggarnas rot. Säkerhetsfaktorn för kontaktspänningen blev lite lägre, ett slutligt resultat på 1,1 erhöles. Noggrannare beräkningar och mellanresultat hittas i bilaga 2.

Dessa resultat ansågs vara acceptabla med tanke på driftförhållanden och serviceintervall. Dessutom belastas kuggväxeln med det maximala vridmomentet bara en kort tid vid varje formsprutningscykel; bara i det skedet då filterdetaljen vrids loss från kärnan.

Formverktyget tas in på service med jämna intervall och då kan slitage på kuggarna upptäckas. Om kuggarna får skador på flankerna i följd av högt kontaktryck kan detta märkas vid normalt underhåll av formen, och då kan kugghjulen bytas ut. Man ansåg alltså att ingen större skada, t.ex. att en kugg går helt av, hinner ske under vanlig drift.

4.2.2 Beräkning av kuggkrafter och val av rullningslager

Kraften som uppstår från kuggväxeln beräknades för att kunna dimensionera lagren. Krafterna beräknades med hjälp av geometriska samband enligt figur 28.



Figur 28. Krafter som uppstår vid rakt skurna kuggar. (Miettinen, ym., 2010)

Ett lager installeras på varje sida av kugghjulen. Eftersom lagren installeras symmetriskt i förhållande till kugghjulets centrum, delas kraften som uppstår jämt på de två lagren. Lagren ansågs vara statiskt belastade vid den maximala kraften, i det ögonblicket kärnan vrids loss från filterdetaljen. Krafterna beräknades och jämfördes med de olika lagrens gränsvärden för statisk belastning ur SKF:s katalog.

Beräkningen över lagerkrafterna hittas i bilaga 1.

För att minska på antalet olika lagermodeller i formverktyget valdes lagermodeller som passade på flera ställen i formverktyget.

Resultat

Som leverantör av lagren valdes SKF. På företagets hemsida hittas kataloger med olika lager samt gränsvärden för vilken kraft lagret kan ta upp.

Följande krafter uppstår på lagren vid respektive kugghjul:

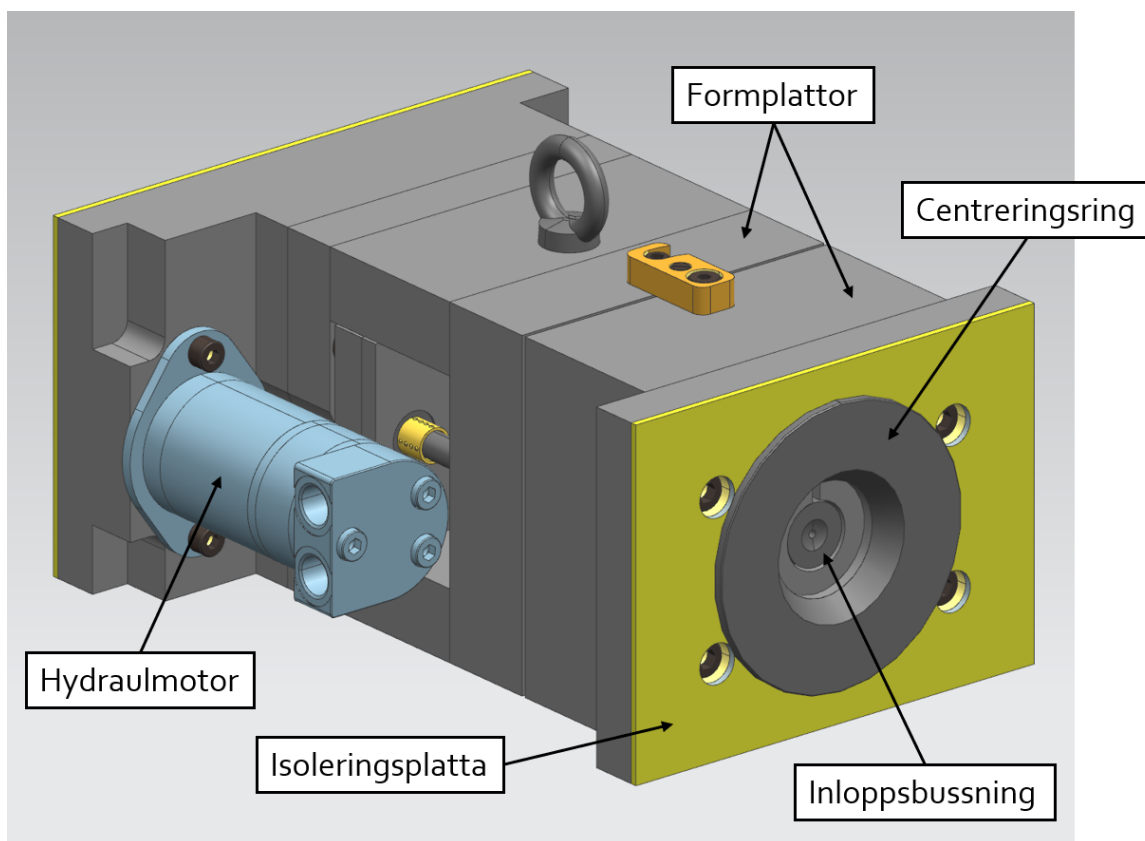
- **Kugghjul 4 (vid roterande kärna): 1,14 kN per lager**
- **Kugghjul 3 (vid stoppare): 2,11 kN per lager**
- **Kugghjul 2 (mellanhjul): 2,25 kN per lager**

Som lager valdes enradiga spårkullager beskrivna i kapitel 2.7.1. Dessa kan ta upp kraften som uppstår från kuggväxeln i radiell riktning. Då kärnan och stopparen roteras glider dessa samtidigt i navet, vilket ger upphov till en liten axialkraft. Dessa enradiga spårkullager kan också belastas till en del i axiell riktning.

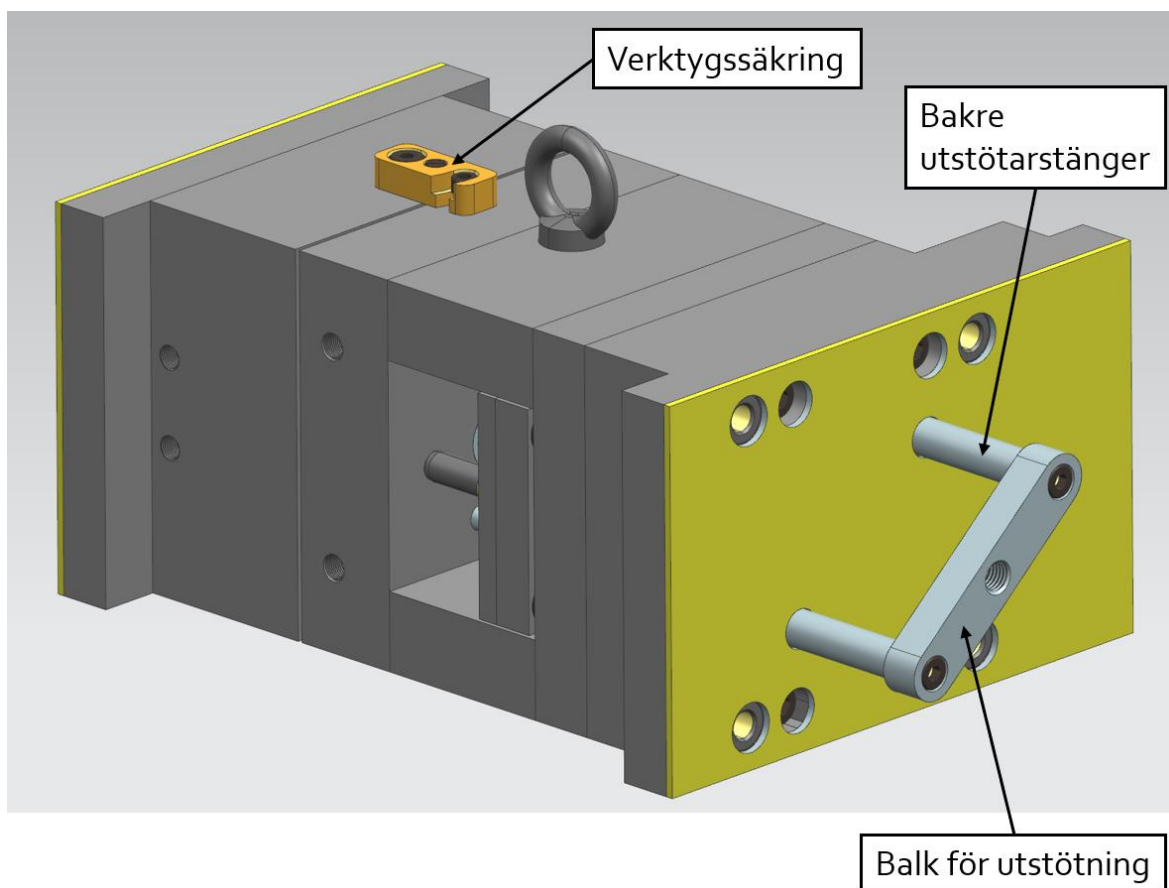
Som lager valdes SKF:s enradiga spårkullager av typerna **61905-2RS1** och **16003-2Z** enligt statisk hållbarhet och lämplig storlek för formverktyget. En säkerhetsfaktor på minst 1,4 mot statisk belastning erhöles för alla lager. Närmare delresultat hittas i bilaga 1.

4.3 Slutlig version av formverktyget

Till följande presenteras den slutliga konstruktionen av formverktyget. Formverktygets båda halvkor ihopsatt presenteras i figurer 29. Formens olika komponenter presenteras närmare i figurer 30 till 36.



Figur 29. Formverktyget ihopsatt, från sprutsidan.



Figur 30. Formverktyget ihopsatt, från utstötarsidan.

4.3.1 Material i formverktyget

Alla plattor kan köpas in från Hasco med färdigt bearbetade hål för styrelement, förutom utstötarsidans fästplatta som är större där hydraulmotorn fästs. Utstötarsidans fästplatta kan dock också köpas från Hasco, men utan färdiga hål.

Alla plattor förutom utstötarsidans formplatta kan tillverkas i ohärdat material, som t.ex. 1.1730. Plattor i material 1.1730 lämpar sig för formverktygets ram och andra tilläggsdelar som inte direkt utsätts högt slitage (Hasco Material Data, 2020).

För att utstötarpattan skall styras av utstötarsidans formplatta rekommenderas att den tillverkas i seghärdat material t.ex. 1.2311. Plattor i 1.2311 används där en högre hårdhet och hållfasthet krävs, utan att behöva härda materialet i efterhand (Hasco Material Data, 2020).

Insatsen på sprutsidan samt utstötarpattan som kommer i kontakt med det formsprutade råmaterialet bör tillverkas i hårdhärdat material som t.ex. 1.2767. Material 1.2767 används där hög hållfasthet för både komprimerbarhet och stöt krävs. Materialet 1.2767 är jämnt härdande i temperaturer mellan 840°C och 870°C.

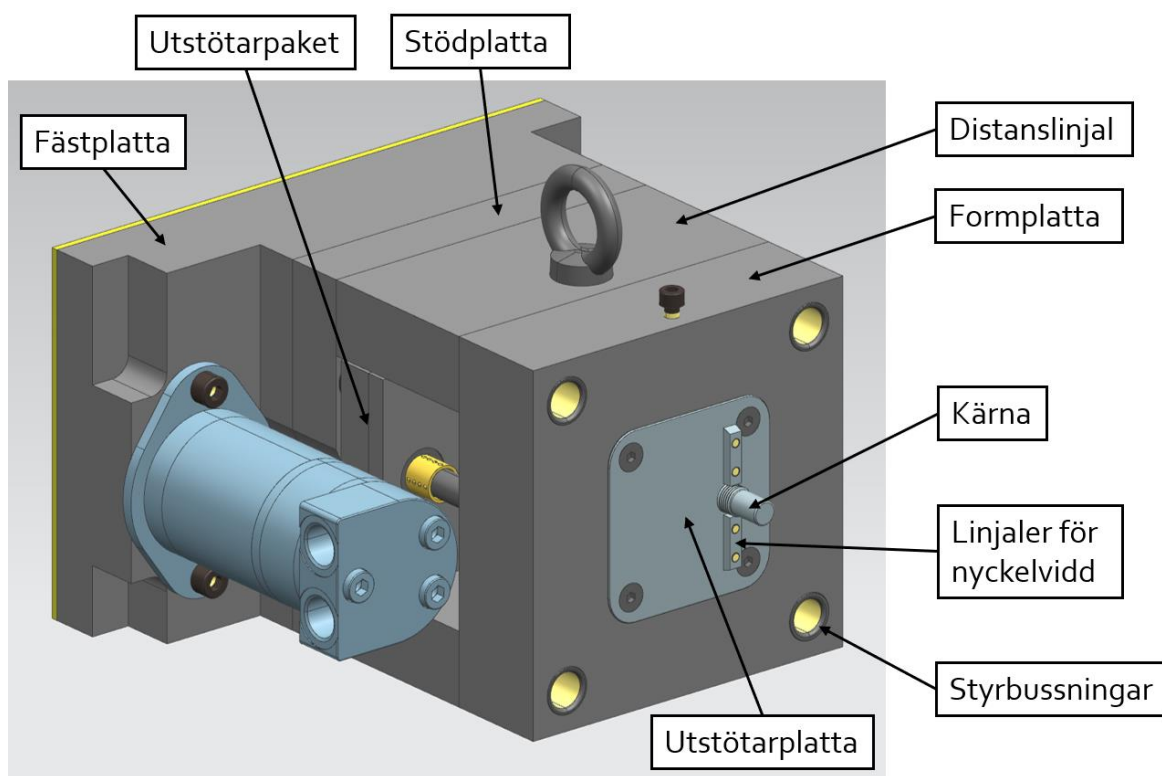
Ett annat hårdhärdat material som kan användas där det formsprutade råmaterialet kommer i kontakt med formplattor är material 1.2083. Materialet har förutom hög hållfasthet en god korrosionsbeständighet och polerbarhet. Materialet har också goda egenskaper för maskinell bearbetning. (Hasco Material Data, 2020)

Ytterst i båda ändorna av formverktyget finns isoleringsplattor för att undvika att värmen från verktyget överförs till formsprutningsmaskinens formbord. Isoleringsplattorna är gjorda i glasfiber och kan köpas i färdiga yttre mått från Hasco. Isoleringsplattorna kan ses i figur 29 och 30 med en gul färg.

Alla styrelement, så som styrpelaren och bussningarna på båda formhalvorna, verktygssäkring samt styrningen för utstötarpattorna, kan också köpas färdiga från Hasco. Även sprutsidans centreringsring kan köpas som halvfabrikat från Hasco, men kräver en liten modifiering.

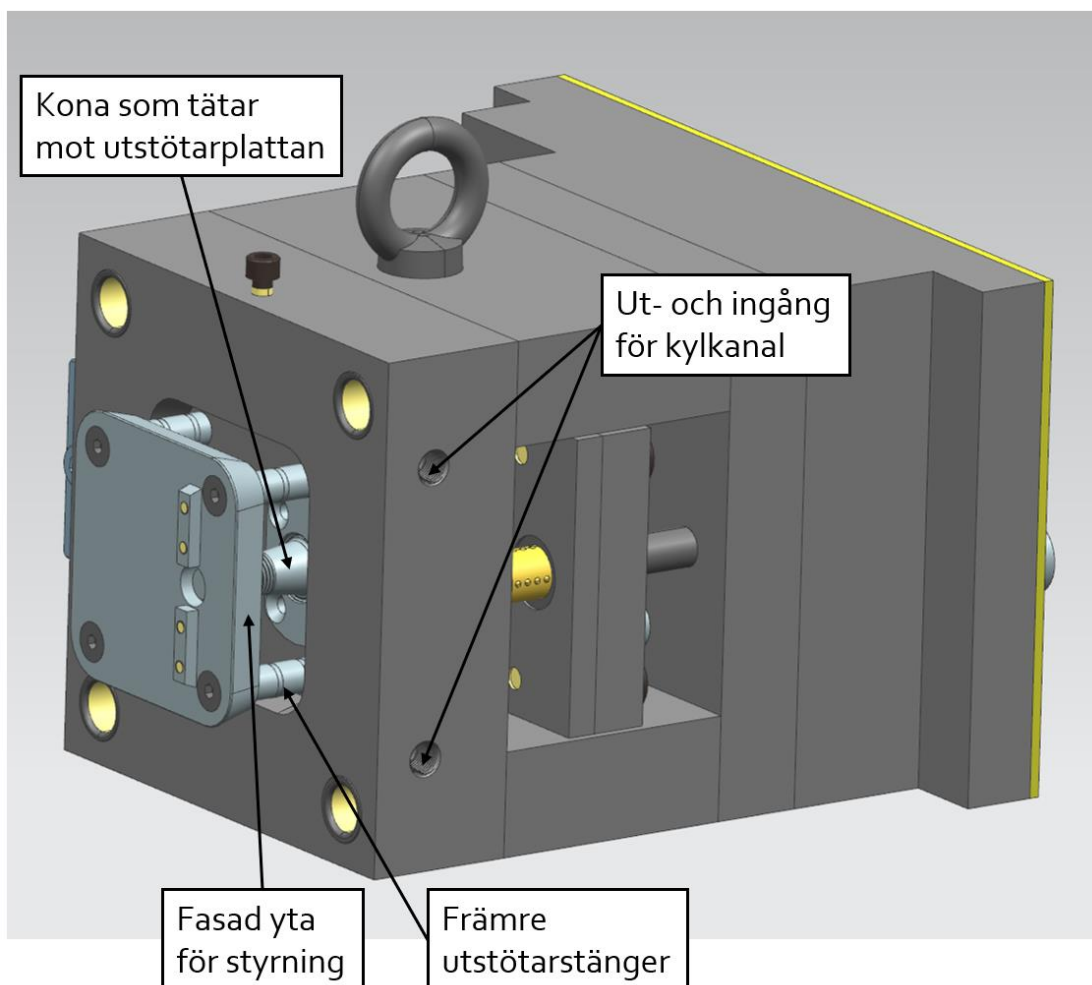
4.3.2 Rörliga formhalvan

Utstötningen sker med en utstötarpatta som skuffar bort filterdetaljen från kärnan. På utstötarpattan finns fastskruvade linjaler för att tillverka nyckelvidden. Om företaget så vill kunde formverktyget först tillverkas utan nyckelvidden och provköras. Om det då visar sig att det krävs en nyckelvidd kan de färdiga delarna bara modifieras för att lägga till nyckelvidden; inga nya delar behöver alltså tillverkas. Ett spår som linjalerna tätar mot då formen är stängd finns på sprutsidan. Spåret på sprutsidan kan också tillverkas i efterhand genom att modifiera de färdiga delarna.



Figur 31. Formverktygets utstötarsida.

Den roterande kärnan tätar mot utstötarpattan med en kona. Också utstötarpattan styrs av formplattan genom en fasad yta, som säkerställer att utstötarpattan alltid är helt centrerad då den ligger i bakre läge. Den fasade ytan syns i figur 32, då utstötarpattan är i främre läge. I utstötarsidans formplatta går också en kylkanal i U-form, vars in- och utgångar kan ses i figur 32.



Figur 32. Formverktyget vid utstötning. I formplattan syns in- och utgång för kylkanalen. På bilden syns också kärnans koniska del som tätar med utstötarpattan då formen är stängd.

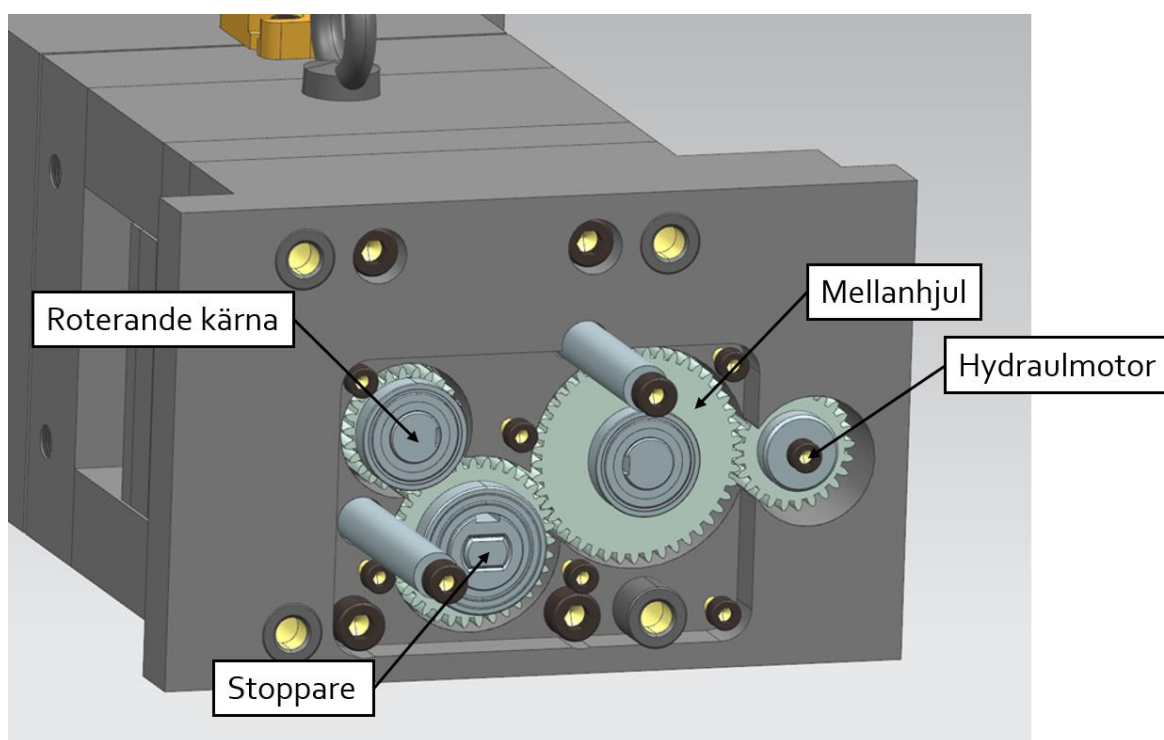
Formverktygets rörliga halva innehåller också kuggväxeln som roterar på kärnan för att tillverka innergången i detaljen. Kugghjulets layout valdes enligt koncept 2 i kapitel 4.1.3, för denna layout passade bäst ihop med formverktygets andra komponenter och mått. Utstötärstängerna passade också bra ihop med denna layout.

Kugghjulen som används är av standardprofil med en modul på 1,5 mm och kan köpas in av leverantörer. Materialet på kugghjulen bör vara ythärdat C45 med en hårdhet på ca. 55 HRC.

Utsötärstången kommer fast i formsprutningsmaskinen genom hålet i formbordet, i samma centrum som formverktygets styr-ring på sprutsidan. Kuggväxeln ligger i vägen för att en enda rak utstötärstång skall kunna användas. Istället används två stänger som kopplas ihop med en balk (figur 30). Det yttre måttet på dessa stänger och balken behövde tas i beaktande för att rymmas in i hålet på formsprutningsmaskinens formbord.

Enradiga kullager kan användas för att lagra kuggväxeln som består av rakt skurna kuggar. Kuggarna ger inte upphov till någon axialkraft, utan endast radialkrafter som kullagren kan ta upp. Kullagren kan också ta upp en liten axialkraft som kan uppstå från att kärnan och stopparen glider fram och tillbaka i naven. Formverktyget planerades med en löstagbar mindre platta som skruvas fast i utstötarsidans fästplatta för att stöda lagren på bakre sidan av kugghjulen.

En hydraulmotor från leverantören Lösi passar för att rotera kärnan. Formverktyget planerades att passa med motorn av typen EPMM 50 från Lösi. Denna motor kan ge ett kontinuerligt vridmoment på 45 Nm, vilket passar ihop med det uppskattade vridmomentet som krävs för att rotera kärnan.

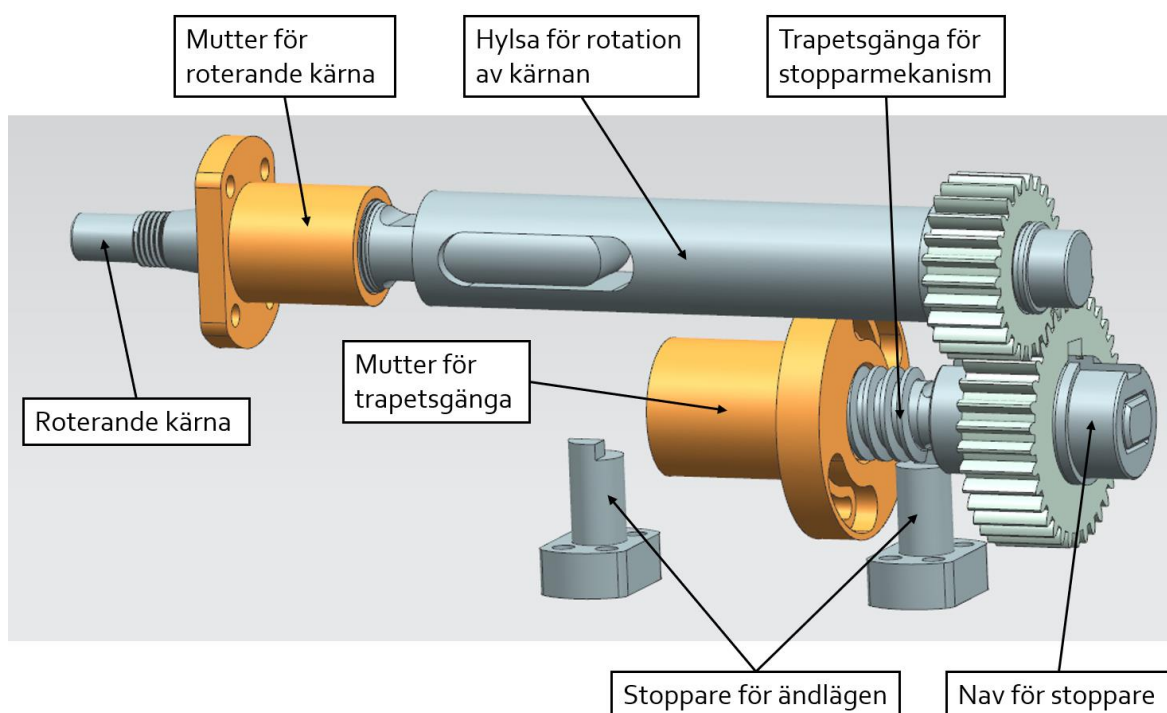


Figur 33. Formverktygets kuggväxel, utan plattan som skruvas fast och stöder lagren.

För att begränsa kärnans rotation planerades en trapetsgänga med mothåll i båda ändorna som roteras samtidigt med kärnan. En metrisk ISO-trapetsgänga av dimensionen 20x4 användes. Mothållen placerades så att trapetsgängan skall roteras 5 varv från ena ändläget till andra. Kugghjulens utväxling gör att kärnan samtidigt roterar 7 varv från ena ändläget till det andra.

För att båda gängorna måste slippa att röras linjärt samtidigt som de skruvas planerades en typs teleskop in för båda axlarna. Glidningen sker för trapetsgången i kugghjulets nav och för kärnan i hylsan som roteras av kugghjulet. Muttrarna där kärnan och stopparens trapetsskruv roterar bör tillverkas av lagerbrons för att enkelt rotera utan att skära fast. Konstruktionen presenteras i figur 34.

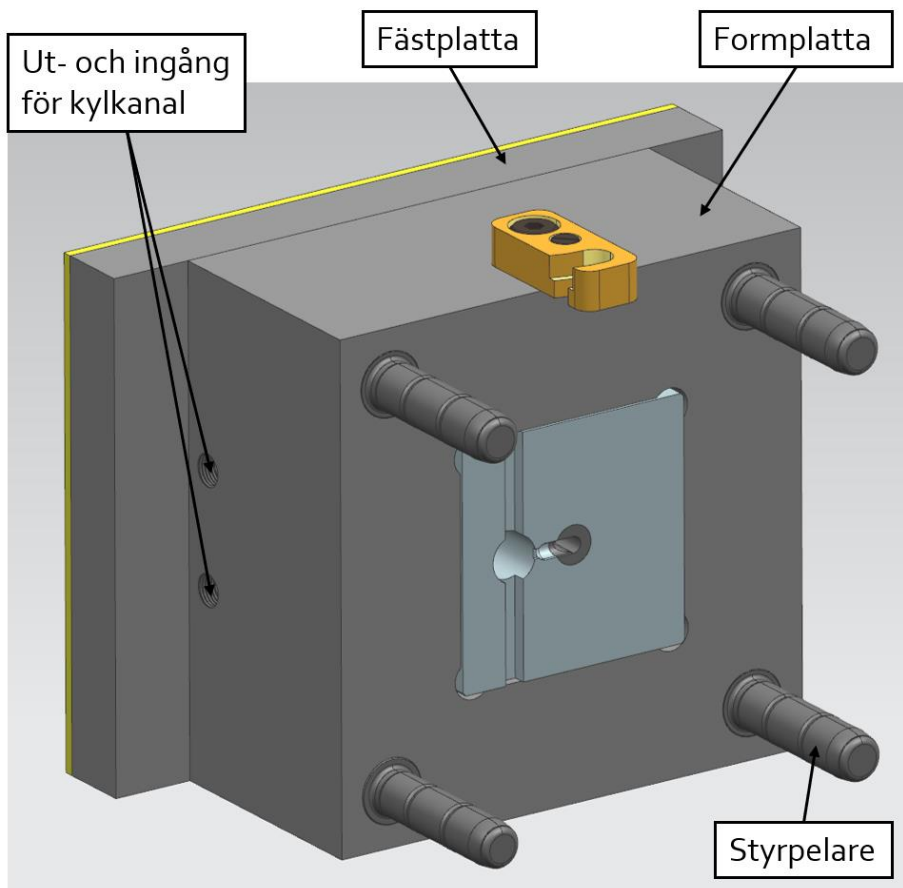
Kugghjulen fästs till axlarna med kilförband enligt SFS 2636 för att förhindra rotation. Spår för låsringar enligt DIN 471 finns på axlarna för att förhindra en axiell rörelse av kugghjulen.



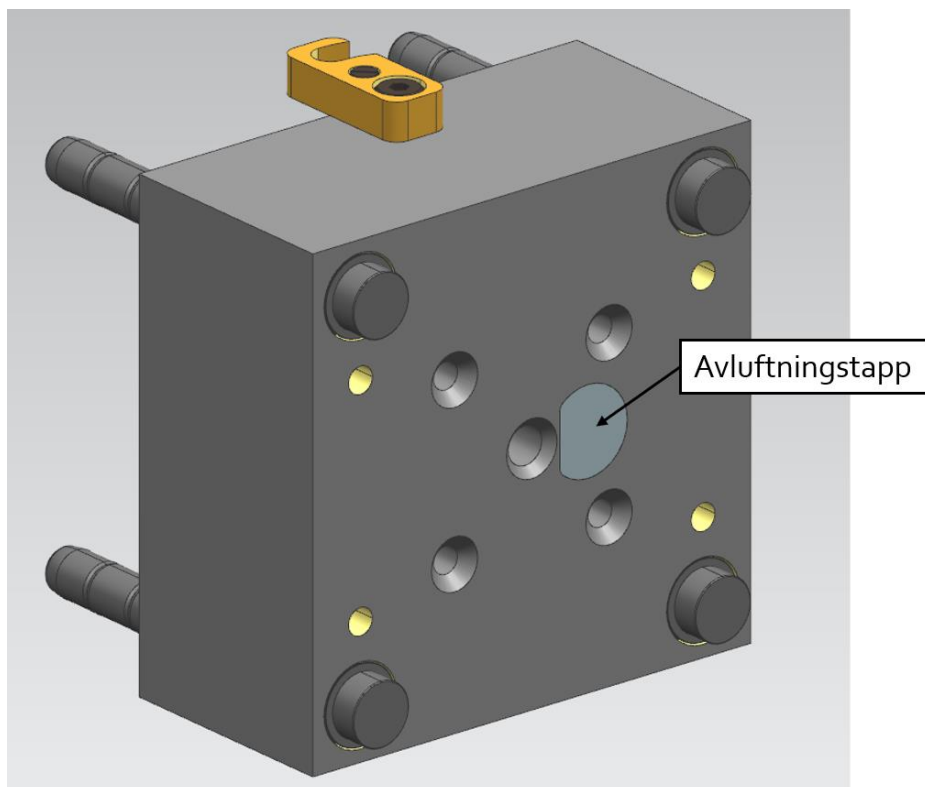
Figur 34. Funktionsprincip över stopparen för kärnans rotation.

4.3.3 Fasta formhalvan

För att fästa insatsen i sprutsidans formplatta valdes koncept 3 från kapitel 4.1.3. Sprutsidans formplatta kan köpas med färdiga hål men fickan för inlägget bör bearbetas. I insatsen finns en kylkanal vars in- och utgång finns i botten. Kylkanalen fortsätter i formplattan och tätas med tätningar mellan insatsen och formplattan. På bilden syns in- och utgången till kylkanalen i formplattan. Avluftningen sker mellan formplattan och sprutsidans fästplatta; lufttappen i formplattan kan ses i figur 36.



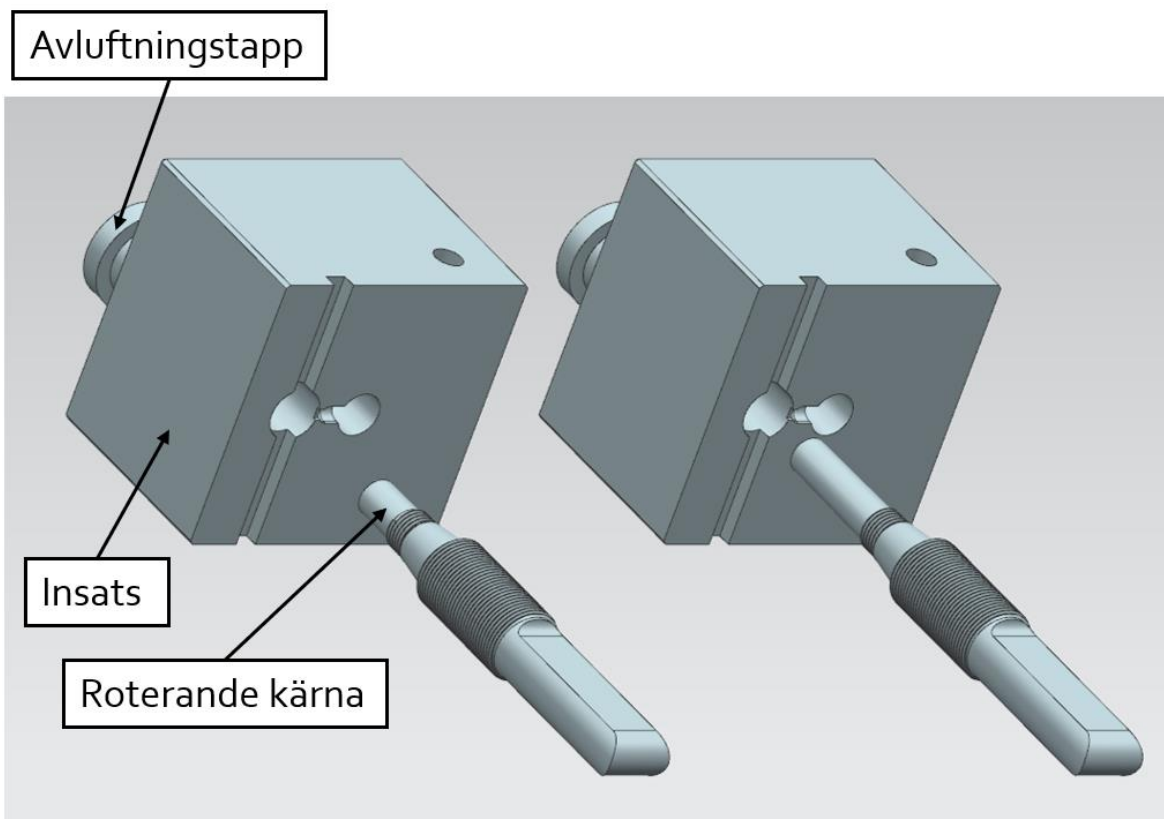
Figur 35. Formverktygets sprutsida.



Figur 36. Formverktygets fasta formplatta. På bilden är fästplattan gömd och avluftningstappens baksida syns.

4.3.4 Tillverkning av olika filtermodeller

För att tillverka de två olika filtermodellerna som presenterades i figur 1 behövs endast 3 delar i formverktyget bytas ut. Dessa båda filter har samma dimension på gängan, därför kan också gängspindelns ”mutter” användas i båda fallen. Om gängans stigning ändras måste också den roterande spindeln och dess gänga bytas ut till en med samma stigning som på detaljen. Delarna som behövs bytas presenteras i figur 37.



Figur 37. Delar som behövs bytas ut för att tillverka de två olika filtermodellerna från figur 1.

5 Sammanfattning av resultaten

Resultatet från arbetet är ett koncept på hur formverktyget kunde se ut och vara uppbyggt, därför kan konstateras att arbetets syfte har uppnåtts. Arbetet kunde fortsättas genom att göra en slutlig version av formverktyget med korrekta mått och toleranser, varefter tillverkningsritningar över komponenterna i verktyget kunde göras.

Under planeringsskedet har man följt konstruktionsprinciper som presenteras i teoridelen av arbetet. Under planeringen har också tillverkningen av komponenterna beaktats så att alla delar i verktyget skall kunna tillverkas hos en vanlig verktygsmakare.

En stor del av komponenterna kan köpas in färdiga eller som halvfabrikat. Antalet helt specialgjorda komponenter har försökts minimeras på grund av tillverkningskostnaden, men det finns också ett antal sådana i verktyget. Exempel på delar som måste specialtillverkas är insatsen i sprutsidans formplatta, kärnan och naven för kugghjulen. Detta var väntat eftersom man inte helt kan undkomma specialgjorda komponenter i formverktyg.

Verktygets konstruktion anses vara rätt simpel, vilket gör underhållet av formverktyget enklare. Verktyget kan plockas isär för underhåll och monteras ihop utan att man behöver passa in några delar på nytt. Konstruktionen med hydraulmotor och kuggväxel för att rotera kärnan är också rätt simpel att plocka isär för underhåll, men markeringar behövs på kugghjulen för att enkelt kunna monteras ihop i samma läge.

Konstruktionen med en hydraulmotor är också simpel att fästas i formsprutningsmaskinen. Hydrauliken från formsprutningsmaskinen behövs bara kopplas till hydraulmotorn. Formverktygets yttre anses vara i den storlek som behövs för ett formverktyg med denna komplexitet.

Formverktygets funktionsprincip anses vara fungerande. Vissa delar av formverktyget kräver dock en riktig inpassning och tolerans för att fungera korrekt, vilket bör beaktas vid tillverkningen.

Till följande diskuteras några förbättringsförslag som eventuellt bör göras efter att formen provkörts.

5.1 Förslag till vidareutveckling

Beräkningen av kuggväxeln visade att kontakttrycket mellan kugghjulen vid maximalt vridmoment kan komma nära de tillåtna kontaktspänningarna mellan kuggarna. Detta kan tillåtas eftersom formen har kontinuerligt underhåll. Om de då kommer fram att kugghjulen slits mycket kan de bytas ut till nya. Om detta inte hjälper utan kuggarna fortsätter slitas för snabbt, rekommenderas att kugghjulen byts ut till hårdhärdade kugghjul som tål högre ytspänningar och böjspänningar.

Avluftningen från formrummet sker genom en spalt mellan avluftningstappen och insatsen i sprutsidan av formverktyget. Om man märker att av avluftningen inte fungerar på önskat sätt genom lufttappens spalt till insatsen, kan liknande spår som i figur 12 tilläggas längs tappen eller i insatsen.

En nyckelvidd kan behöva läggas in på detaljen för att förhindra rotation då kärnan skruvas ut ur detaljen. Prototypen för filterdetaljen med vilken man bestämmer krympfaktorer saknar nyckelvidd, så en noggrann dimensionering för nyckelvidden kan inte göras. Dimensioner på formrummet för nyckelvidden kan behöva korrigerings efter praktisk provkörning.

6 Diskussion

Planeringen av formverktyget utgick ifrån krav och önskemål som fastställdes av företaget. Personligen tycker jag att arbetet lyckades bra och det förväntade slutresultatet uppnåddes. De flesta krav och önskemål uppfylldes i den slutliga modellen av formverktyget. 3D-modellen av formverktyget är färdig att vidareutvecklas till tillverkningsritningar varefter formverktyget kunde tillverkas och användas för serietillverkning av filterdetaljerna.

Planeringen av formverktyget gjordes del för del och olika koncept uppkom under planeringen. Under planeringsskedet skickades 3D-modeller till företaget som kommenterade konstruktionen och gav förbättringsförslag. Möten med mina handledare har hållits med jämna mellanrum där olika problem har diskuterats. Jag upplevde att tillvägagångssättet fungerade bra.

Dimensioneringen av kuggväxeln var bland det svåraste under projektet. Dimensioneringen var först meningen att göras enligt ISO-SFS 6336-standarden, men efter att ha satt sig in i beräkningssättet märktes att detta räknesätt är onödigt noggrant för denna typ av kuggväxel. Beräkningen enligt den mindre noggranna SFS 4790 gjordes och resultatet ansågs vara pålitligt.

6.1 Slutord

Detta examensarbete har varit ett intressant projekt och ämnet intresserar mig personligen mycket. Jag sökte ett examensarbete där någonting kunde konstrueras och det här projektet uppfyllde mina förväntningar. Jag har tidigare själv jobbat med verktygstillverkning vid Plastoco Oy Ab, och kunskapen jag fått därifrån hjälpte mycket vid verktygskonstruktionen i detta arbete.

Under projektet har jag lärt mig mycket angående konstruktion av formverktyg. Jag har fördjupat mig i formverktygens uppbyggnad och konstruktionsprinciper. Jag har också fördjupat mig i formsprutningen och speciellt metallformsprutningsprocessen.

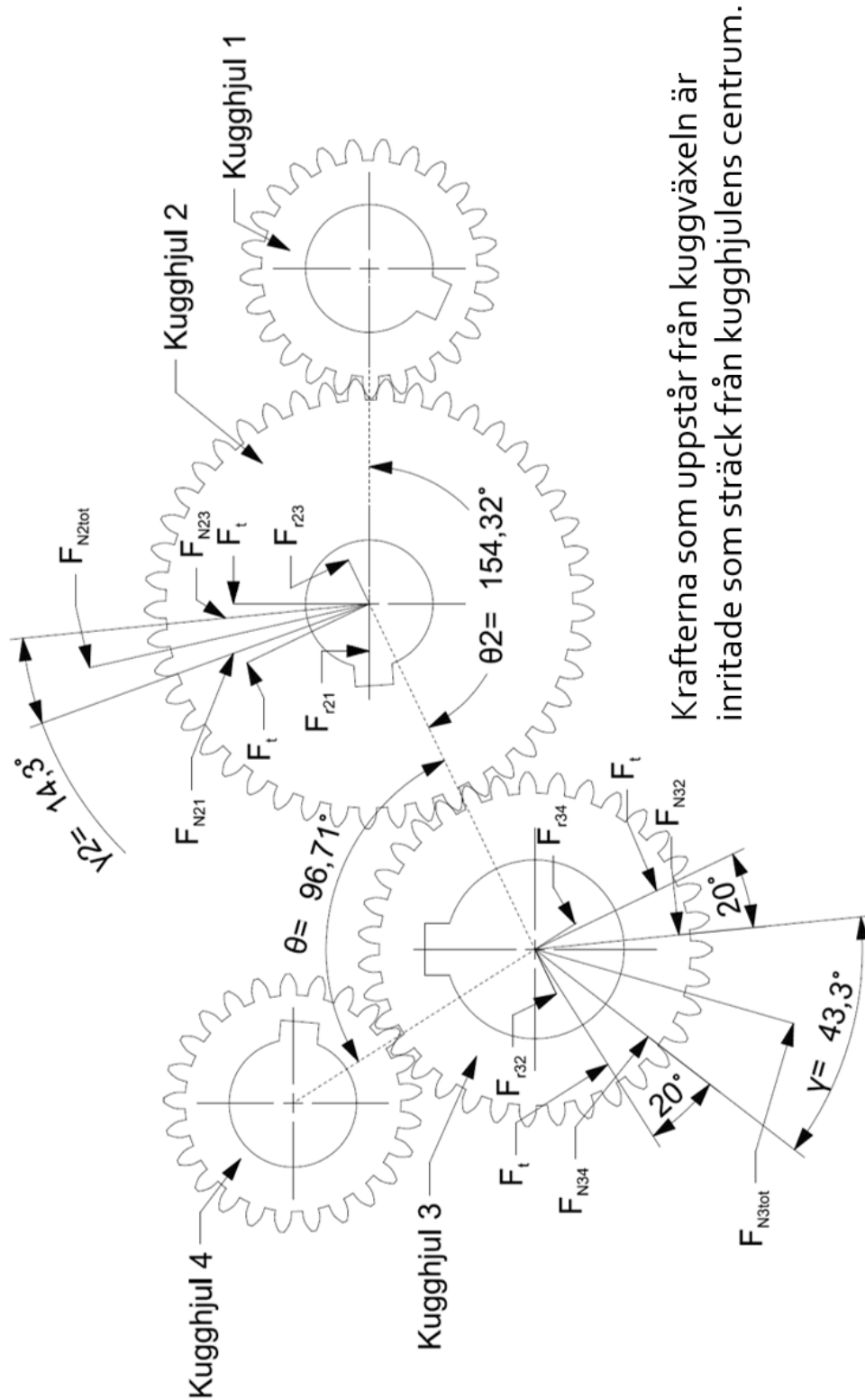
Jag vill tacka Mats Baarman och Plastoco Oy Ab för att jag fått delta i projektet och för alla goda råd jag fått under arbetets gång. Jag vill också tacka min handledare från Novia, Kenneth Ehrström för ett gott samarbete och all hjälp jag fått under projektet.

7 Referenser

- Blom, S. (2001). *Koneelimet ja mekanismit*. Helsinki: Edita.
- Bruder, U. (2017). *Värt att veta om plast*. Karlskrona: Bruder Consulting AB.
- DuPont. (2006). *Technical Information*. Retrieved from DuPont™ Derlin acetal resin Molding Guide: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/plastics-polymers-and-resins/thermoplastics/documents/Delrin/Delrin%20Molding%20Guide.pdf>
- German, R. M., & Bose, A. (1997). *Injection Molding of Metals and Ceramics*. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
- Hasco. (den 12 3 2020). *Hasco*. Hämtat från <https://www.hasco.com/>
- Hasco Material Data. (den 31 3 2020). *Hasco Material Data*. Hämtat från Hasco.com: <https://www.hasco.com/sv/werkstoffdatenblaetter>
- Heaney, D. F. (2012). *Handbook of metal injection molding*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Johannesson, H., Persson, J.-G., & Pettersson, D. (2013). *Produktutveckling : effektiva metoder för konstruktion och design*. Stockholm: Liber.
- Lindström, B., & Bonde-Wiiburg, E. (2000). *KARLEBO HANDBOK* (15 uppl.). Stockholm: Liber.
- Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., . . . Välimaa, V. (2010). *Koneenosien suunnittelu*. Helsinki: WSOY.
- Plastoco Oy Ab. (den 12 3 2020). *Plastoco Oy Ab*. Hämtat från <http://www.plastoco.fi/>
- SKF. (2019). *Rullningslager*. Hämtat från SKF Knowledge Centre: <https://www.skf.com/se/knowledge-centre/media-library/index.html#tcm:19-121486>
- Strömvall, H.-E. (2002). *Producera i plast.....* Stockholm: VI Sveriges verkstadsindustrier : Industrilitteratur.

Bilaga 1. Beräkning av kuggkrafter och val av lager

Krafterna i beräkningarna betecknas enligt figur 1 med index enligt kugghjulnummer.



Figur 1. Kugghjulens layout och krafter som uppstår.

Vridmoment: $M_4 := 40 \text{ N} \cdot \text{m}$

Kuggantal: $z_2 := 45$

Modul: $m := 1.5 \text{ mm}$

$z_3 := 35$

Ingreppsvinkel: $\alpha := 20 \cdot \text{deg}$

$z_4 := 25$

Delningsdiameter:

Delningsradie:

$$d_2 := m \cdot z_2 = 67.5 \text{ mm}$$

$$r_2 := \frac{d_2}{2} = 33.75 \text{ mm}$$

$$d_3 := m \cdot z_3 = 52.5 \text{ mm}$$

$$r_3 := \frac{d_3}{2} = 26.25 \text{ mm}$$

$$d_4 := m \cdot z_4 = 37.5 \text{ mm}$$

$$r_4 := \frac{d_4}{2} = 18.75 \text{ mm}$$

Tangentiella krafter vid delningscirkeln:

$$M_4 = 40 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$F_{t4} := \frac{M_4}{r_4} = 2133.333 \text{ N}$$

$$M_3 := F_{t4} \cdot r_3 = 56 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$F_{t3} := \frac{M_3}{r_3} = 2133.333 \text{ N}$$

$$M_2 := F_{t3} \cdot r_2 = 72 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$F_{t2} := \frac{M_2}{r_2} = 2133.333 \text{ N}$$

Den tangentiella kraften är den samma mellan alla kugghjul:

$$F_t := \frac{M_4}{r_4} = 2133.333 \text{ N}$$

Beräkning av krafter från kuggväxeln:

Kugghjul 4:

$$F_t = 2133.333 \text{ N}$$

Radialkraften som uppstår:

$$F_{r4} := F_t \cdot \tan(\alpha) = 776.47 \text{ N}$$

Normalkraften:

$$F_{N4} := \frac{F_t}{\cos(\alpha)} = 2270.246 \text{ N}$$

Per lager:

$$F_4 := \frac{F_{N4}}{2} = 1.14 \text{ kN}$$

Kugghjul 3: Kraft från kugghjul 2

$$F_t = 2133.333 \text{ N}$$

Radialkraften som uppstår:

$$F_{r32} := F_t \cdot \tan(\alpha) = 776.47 \text{ N}$$

Normalkraften:

$$F_{N32} := \frac{F_t}{\cos(\alpha)} = 2270.246 \text{ N}$$

Kugghjul 3: Kraft från kugghjul 4

$$F_t = 2133.333 \text{ N}$$

Radialkraften som uppstår:

$$F_{r34} := F_t \cdot \tan(\alpha) = 776.47 \text{ N}$$

Normalkraften:

$$F_{N34} := \frac{F_t}{\cos(\alpha)} = 2270.246 \text{ N}$$

Vinkel mellan centrumlinjer: $\theta := 96.708 \cdot \text{deg}$ Enligt figur 1 i bilaga 1.

Vinkel mellan normalkrafter: $\gamma := (180 \cdot \text{deg} - \theta) - 2 \cdot \alpha = 43.292 \text{ deg}$

$$F_{N3tot} := F_{N32} \cdot \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + F_{N34} \cdot \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 4220.299 \text{ N}$$

Per lager:

$$F_3 := \frac{F_{N3tot}}{2} = 2.11 \text{ kN}$$

Kugghjul 2: Kraft från kugghjul 1

$$F_t = 2133.333 \text{ N}$$

$$F_{r21} := F_t \cdot \tan(\alpha) = 776.47 \text{ N}$$

$$F_{N21} := \frac{F_t}{\cos(\alpha)} = 2270.246 \text{ N}$$

Kugghjul 2: Kraft från kugghjul 3

$$F_t = 2133.333 \text{ N}$$

$$F_{r23} := F_t \cdot \tan(\alpha) = 776.47 \text{ N}$$

$$F_{N23} := \frac{F_t}{\cos(\alpha)} = 2270.246 \text{ N}$$

Vinkel mellan centrumlinjer: $\theta_2 := 154.32 \cdot \text{deg}$ Enligt figur 1 i bilaga 1.

Vinkel mellan normalkrafter: $\gamma_2 := (180 \cdot \text{deg} - \theta_2) - 2 \cdot \alpha = -14.32 \text{ deg}$

$$F_{N2tot} := F_{N21} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{2}\right) + F_{N23} \cdot \cos\left(\frac{\gamma_2}{2}\right) = 4505.085 \text{ N}$$

Per lager:

$$F_2 := \frac{F_{N2tot}}{2} = 2.25 \text{ kN}$$

Val av lager enligt statisk belastning:

Kugghjul 2:

Lager: 16003-2Z
Static load rating 3,25 kN

$$C_{01} := 3.25 \text{ kN}$$

Säkerhetsfaktor:

$$S_{01} := \frac{C_{01}}{F_2} = 1.443$$

Kugghjul 4:

Främre lager:
Lager 16003-2Z
Static load rating 3,25 kN

$$C_{01} := 3.25 \text{ kN}$$

Säkerhetsfaktor:

$$S_{041} := \frac{C_{01}}{F_4} = 2.863$$

Kugghjul 3:

Lager: 61905-2RS1
Static load rating 4,3 kN

$$C_{02} := 4.3 \text{ kN}$$

Säkerhetsfaktor:

$$S_{03} := \frac{C_{02}}{F_3} = 2.038$$

Bakre lager:

Lager 61905-2RS1
Static load rating 4,3 kN

$$C_{02} := 4.3 \text{ kN}$$

Säkerhetsfaktor:

$$S_{042} := \frac{C_{02}}{F_4} = 3.788$$

Bilaga 2. Hållfasthetsberäkning av kuggväxel

I beräkningarna görs beteckningar och numreringar enligt SFS 4790. Storheternas index följer kugghjulets numrering enligt figur 1 i bilaga 1.

Modul: $m := 1.5 \text{ mm}$
 $m_n := m$

Kuggantal: $z_4 := 25$
 $z_3 := 35$

Moment: $M_4 := 40 \text{ N} \cdot \text{m}$

Utväxling: $i := \frac{z_3}{z_4} = 1.4$ $u := i$

Kuggarnas storheter: $h_f := 1.25 \cdot m$

$b := 17 \text{ mm}$

$h_a := m$

$\alpha_n := 20 \cdot \text{deg}$

$h := m \cdot 2.25 = 3.375 \text{ mm}$

$\beta := 0 \cdot \text{deg}$

Delningsdiameter: $d_4 := m \cdot z_4 = 37.5 \text{ mm}$

Delningsradie: $r_4 := \frac{d_4}{2}$

$d_3 := m \cdot z_3 = 52.5 \text{ mm}$

$r_3 := \frac{d_3}{2}$

Bottendiameter: $d_{b4} := m \cdot z_4 - 2 \cdot h_f = 33.75 \text{ mm}$

$d_{b3} := m \cdot z_3 - 2 \cdot h_f = 48.75 \text{ mm}$

Toppdiameter: $d_{a4} := m \cdot z_4 + 2 \cdot h_a = 40.5 \text{ mm}$

$d_{a3} := m \cdot z_3 + 2 \cdot h_a = 55.5 \text{ mm}$

Ingreppstal:

$$\varepsilon_\alpha := \frac{1}{m \cdot \pi} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{r_4 + m}{\cos(\alpha_n)} \right)^2 - r_4^2} + \sqrt{\left(\frac{r_3 + m}{\cos(\alpha_n)} \right)^2 - r_3^2} - (r_4 + r_3) \cdot \tan(\alpha_n) \right) = 1.649$$

Tangentiell kraft på kugghjul 4: $F_t := \frac{M_4}{r_4} = 2133.333 \text{ N}$

Beräkning av säkerhet mot yttryck i kuggarna:

Faktor ur tabell 1 i SFS 4790: $K_A := 1.25$

Faktorer ur tabell 2 i SFS 4790: $K_1 := 37$ $K_2 := 0.0193$

Det största momentet uppstår när kugghjulen inte är i rörelse, därför: $v := 0 \frac{m}{s}$

$$K_V := \left(\frac{K_1}{K_A \cdot \frac{2133}{17}} + K_2 \right) \cdot \frac{z_4 \cdot 0}{100} \cdot \sqrt{\frac{u^2}{(1+u^2)}} + 1 = 1 \quad (1)$$

Axeln till kuggjul 4: $d_{sh4} := 25 \text{ mm}$

Enligt figur 1 i SFS 4790: $l := 32 \text{ mm}$ $s := 0 \text{ mm}$ $K' := 0.8$

$$f_{sh} := \frac{2133 \cdot K_A \cdot K_V}{17} \cdot 0.023 \cdot \left(\left| 1 + K' \cdot \frac{l \cdot s}{d_4^2} \cdot \left(\frac{d_4}{d_{sh4}} \right)^4 - 0.3 \right| + 0.3 \right) \cdot \left(\frac{b}{d_4} \right)^2 = 0.741 \quad (8)$$

Ur tabell 8 i SFS 3995: $T_\beta := 18$

$$f_{ma} := T_\beta \quad (10)$$

$$F_{\beta x} := |1.33 \cdot f_{sh} + f_{ma}| = 18.986 \quad (7)$$

Ur figur 7:

Pintakarkaistu C45E: HRC 55 $\sigma_{Hlim} := 1220$

$$y_{\beta} := \frac{320}{\sigma_{Hlim}} \cdot F_{\beta x} = 4.98 \quad (11)$$

$$F_{\beta y} := F_{\beta x} - y_{\beta} = 14.006 \quad (6)$$

$$c_{\gamma} := 20 \quad (15)$$

$$K_{H\beta} := 1 + \frac{c_{\gamma} \cdot F_{\beta y} \cdot 17}{2 \cdot 2133 \cdot K_A \cdot K_V} = 1.893 \quad (4)$$

Kontroll av vilkor för tabell 3: $\frac{F_t \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta}}{b} = 296.945 \frac{N}{mm}$

Ur tabell 3: $K_{H\alpha} := 1.1$ $K_{F\alpha} := 1.1$

Ur figur 3: $Z_H := 2.5$

$$Z_B := \frac{\tan(\alpha_n)}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{d_{a4}^2}{d_{b4}^2} - 1} - \frac{2 \cdot \pi}{z_4}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{d_{a3}^2}{d_{b3}^2} - 1} - (\varepsilon_{\alpha} - 1) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{z_3}\right)}} = 0.867 \quad (24)$$

Ur tabell 4: $Z_E := 189.8 \cdot \sqrt{\frac{N}{mm^2}}$

$$Z_\varepsilon := \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_\alpha}{3}} = 0.885 \quad (25)$$

$$Z_\beta := \sqrt{\cos(\beta)} = 1 \quad (28)$$

$$\sigma_{H0} := Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_4 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u}} = 1006.05 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$\sigma_H := \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} = 1623.11 \text{ MPa} \quad (17)$$

$$Z_X := 1 \quad (32)$$

$$Z_W := 1 \quad (35)$$

$$Z_N := 1.6 \quad (36)$$

$$S_{Hmin} := 1$$

$$\sigma_{HB} := Z_B \cdot \sigma_H = 1407.482 \text{ MPa} \quad (19)$$

Tillåtet yttryck enligt Hertz:

$$\sigma_{HP} := \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_N}{S_{Hmin}} \cdot 0.90 \cdot Z_W \cdot Z_X = 1756.8 \quad (20)$$

Säkerhetsfaktor mot yttryck:

$$S_H := \frac{\sigma_{HP} \cdot S_{Hmin}}{1623.11} = 1.1 \quad (21)$$

Beräkning av säkerhet mot böjspänning i kuggroten:

$$h_K := 0 \cdot \text{deg} \quad \rho_{a0} := 0.375 \cdot m_n \quad h_{a0} := 1.25 \cdot m_n$$

Ur figur 11: $Y_{Fa}xY_{Sa} := 4.21$

$$Y_\varepsilon := 0.25 + \frac{0.75}{\varepsilon_\alpha} \cdot \cos(\beta)^2 = 0.705 \quad (60)$$

Ur figur 13: $Y_\beta := 1$

$$\sigma_{F0} := \frac{F_t}{b \cdot m_n} \cdot Y_{Fa}xY_{Sa} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta = 248.231 \text{ MPa} \quad (50)$$

$$K_{F\beta} := K_{H\beta} \frac{1}{1 + \frac{h}{b} + \left(\frac{h}{b}\right)^2} = 1.674 \quad (16)$$

Böjspänning i kuggroten:

$$\sigma_F := \sigma_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha} = 571.535 \text{ MPa} \quad (49)$$

Ur figur 17: $\sigma_{Flim} := 370 \text{ MPa}$

$$Y_{ST} := 2.0 \quad (62)$$

$$Y_{\delta relT} := 1 \quad (63)$$

$$Y_{RrelT} := 0.9 \quad (66)$$

$$Y_X := 1 \quad (67)$$

$$Y_{NT} := \left(\frac{3 \cdot 10^6}{20000} \right)^{0.16} = 2.229 \quad (78)$$

$$S_{Fmin} := 1$$

Tillåten böjspänning i kuggens rot:

$$\sigma_{FP} := \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{NT}}{S_{Fmin}} \cdot Y_{\delta relIT} \cdot Y_{RrelIT} \cdot Y_X = 1484.735 \text{ MPa} \quad (51)$$

Säkerhetsfaktor mot böjspänning i kuggroten:

$$S_F := \frac{\sigma_{FP} \cdot S_{Fmin}}{\sigma_F} = 2.6 \quad (52)$$