

Framtagning av beräkningsmall för rullaxlar

Axel Karlsson



EXAMENSARBETE

Framtagning av beräkningsmall för rullaxlar

Sammanfattning

Möjligheter att förbättra Hofpartner ABs beräkningsmall för rullaxlar har undersökts. Undersökningen har fokuserat på användarvänlighet, ekonomi samt hållfasthet. Målet var att göra mallen mer lättanvänd.

Nuvarande mall undersöks med resultat att den är väldigt svår att följa samt att dess värden inte överensstämmer särskilt bra med verkligheten i de flesta avseenden. Arbetet koncentreras därmed på att identifiera de existerande problemen och att åtgärda dem.

Mallens funktioner utvärderas och beslut fattas om att reducera mallen till att endast hantera information som regelbundet används av företaget. Genom att minska mängden data ses möjligheter att göra mallen enklare att följa och mer lättanvänd med mindre krav på förkunskaper.

Nya formler för hållfasthetsberäkningar framställs och implementeras i en nyskapad mall. Formlerna kontrolleras med analyser i FEM. Analyserna visar att de nya beräkningarna ger resultat närmare verkligheten.

Kostnadsberäkningarna har konstruerats som en grund till Hofpartner att bygga vidare på. Formler är implementerade men en undersökning av företagets produktion krävs för att uppnå korrekta resultat. Undersökningen behöver utföras för att kartlägga tidsåtgång för företagets produktion, arbetet har endast lett till uppskattningar. Om undersökningen utförs har Hofpartner möjlighet att åstadkomma mycket rimliga resultat i mallen.

Datum:	2015-06-01
Författare:	Axel Karlsson
Examinator:	Thomas Carlberger, Högskolan Väst
Handledare:	Richard Holmström, Hofpartner AB. Lilia Kristiansson, Högskolan Väst
Program:	Maskiningenjör, produktionsteknik med logistik
Huvudområde:	Maskinteknik
Poäng:	15 högskolepoäng
Nyckelord:	Beräkningsmall, rullaxlar, hållfasthetsberäkning, kostnadsberäkning, nedböjning, vinkeländring, spänning
Utgivare:	Högskolan Väst, Institutionen för ingenjörsvetenskap, 461 86 Trollhättan Tel: 0520-22 30 00 Fax: 0520-22 32 99 Web: www.hv.se

BACHELOR'S THESIS

Calculation model for reel shafts

Summary

In this project the possibilities to improve Hofpartner AB's calculation model for reel shafts has been investigated. The investigation has focused on user friendliness, economy and strength calculations. The goal was to make the model easier to use.

An investigation of the current model shows that it is difficult to follow the calculations and that the results in most cases are not particularly accurate. Thus the work is focused on identifying the existing problems and improving on them.

Several of the functions in the model are removed and the model now only handles information that are used with some regularity. By reducing the amount of data covered by the model possibilities is seen to simplify usage and to reduce the amount of necessary prior knowledge.

New formulas for the strength calculations are presented and implemented in a new model. The formulas are verified by analysis with FEM. The analysis shows that the model is providing results close to the real values.

The economical calculations are constructed as a basis for Hofpartner to continue developing. The necessary formulas are implemented but an investigation of the company's production process is necessary to achieve correct results. The newly constructed model mostly contains estimates of costs related to production time and material. If these estimates are updated with correct values Hofpartner has the possibility to achieve very reasonable results in their model.

Date:	June 1, 2015
Author:	Axel Karlsson
Examiner:	Thomas Carlberger, University West
Advisor:	Richard Holmström, Hofpartner AB. Lilia Kristiansson, University West
Programme:	Mechanical Engineering, Production Technology and Logistics
Main field of study:	Mechanical Engineering
Credits:	15 HE credits
Keywords:	Calculation model, reel shafts, strength calculations, costs calculations, deflection, angle change, tension
Publisher:	University West, Department of Engineering Science, S-461 86 Trollhättan, SWEDEN Phone: + 46 520 22 30 00 Fax: + 46 520 22 32 99 Web: www.hv.se

Förord

Detta examensarbete har utförts på Hofpartner AB i Åmål våren 2015. Arbetet har omfattat 15 högskolepoäng på c-nivå.

Jag vill tacka min handledare Richard Holmström samt Jakob Frid vid Hofpartner AB för visat stöd och assistans under arbetets gång, jag vill även tacka övrig personal vid Hofpartner AB för deras välkomnande mottagande. Slutligen vill jag även tacka min handledare vid Högskolan Väst, Lilia Kristiansson för värdefull handledning inom hållfasthetslära samt vid rapportskrivning.

Trollhättan, Maj 2015

 —

Axel Karlsson

Innehåll

Sammanfattning	i
Summary.....	ii
Förord.....	iii
Nomenklatur.....	v
1 Inledning.....	1
1.1 Företagsbeskrivning.....	1
1.2 Bakgrund/problembeskrivning.....	1
1.3 Syfte och mål	2
1.4 Avgränsningar.....	2
2 Metod/tillvägagångssätt	3
2.1 Förståelse.....	3
2.2 Framtagning av beräkningsformler	3
2.3 Programmering av mall.....	4
3 Expanderande rullaxlar.....	5
3.1 Material.....	5
4 Resultat	7
4.1 Belastningsfall.....	7
4.1.1 Fall 1: Konsol	7
4.1.2 Fall 2: Tvåsidig med skuren rulle.....	8
4.1.3 Fall 3: Tvåsidig med hel rulle.....	9
4.1.4 Tillåten spänning.....	10
4.2 FEM-verifikation.....	10
4.2.1 Fall 1: Konsol	10
4.2.2 Fall 2: Tvåsidig med skuren rulle.....	12
4.2.3 Fall 3: Tvåsidig utan skuren rulle.....	13
4.3 Visual Basic programmering.....	14
4.4 Ekonomi.....	14
5 Slutsatser.....	16
5.1 Framtida arbete.....	16
Referenser	18

Bilagor

- A. VBA-kod
- B. Tabeller för tillåten spänning i axel

Nomenklatur

Elementarfall – Generella belastningsfall inom balkböjning med resulterande böjning given.

FEM – Finita elementmetoden. Numerisk metod att lösa partiella differentialekvationer. Vanligt förekommande i hållfasthetsberäkningar.

VBA – Visual Basic for Applications. Variant på programmeringsspråket Visual Basic implementerat i Excel.

1 Inledning

Kraven som ställs på ett företag ökas konstant genom den ökande konkurrensen som uppkommer genom den alltmer ökande globaliseringen[1]. Av denna anledning är det allt viktigare att ett företag har korrekta metoder för hantering av sina produkter. Felaktiga uppgifter kan leda till att potentiella kunder väljer andra leverantörer, vilket har skett i detta fall. Företagets inkomster påverkas därmed negativt av att deras nuvarande modell inte returnerar korrekta resultat, i detta fall för såväl kostnader samt produktens reaktion vid belastning. De konstaterade felaktigheterna är anledningen till att arbetet har utförts.

I detta kapitel följer en beskrivning av företaget och dess historia samt även en beskrivning av problemet och arbetets mål och avgränsningar.

1.1 Företagsbeskrivning

Hofpartner AB grundades år 2001 av Richard Holmström, under namnet Holmström Engineering. Tillsammans med Jerker Fjellman omvandlades bolaget till ett aktiebolag med nya namnet Hofpartner AB. Fram till år 2006 var företagets fokus att sälja konstruktionstjänster, kontraktstillverkning åt andra företag, d.v.s. legotillverkning samt även specialmaskiner. 2006 förvärvades varumärket AMAL-Shaft och år 2007 intensifierades företagets fokus på rullaxlar. Sedan 2008 erbjuds även en lyftanordning kallad Liongrip [2].

Företagets fokusering på rullaxlar har fortsatt även med utökningen av utbudet i och med Liongrip. Utöver rullaxlar och Liongrip säljs även chuckar att låsa fast axlar i , de används främst vid ensidig lagring. I dagsläget har företaget 10 anställda och omsatte år 2014 8,7 miljoner kronor. Tillverkningen av företagets produkter sker i företagets egen verkstad i Åmål. Företagets produkter säljs till större delen av världen och återförsäljare respektive agenter finns i Sverige, Norge, Tyskland, Danmark, Frankrike, Belgien, Tjeckien, Finland, Italien, Polen, USA, Australien samt Nigeria.

1.2 Bakgrund/problembeskrivning

Hofpartner AB har idag en beräkningsmall i Microsoft Excel för rullaxlar som behandlar spänningar σ samt nedböjning δ av axeln vid belastning. Nuvarande mall är svåränvänd och svåröverblickbar efter att den genom åren har växt till sig. Detta leder till att utbildningstiden för nya anställda är väldigt lång innan beräkningsmallen kan användas på ett korrekt sätt. Mallen är till för att snabbt ge en överblick över hur axeln påverkas vid avsedd belastning med låga förkunskapskrav från användaren. Viktiga data innefattar spänning, nedböjning samt vinkelförändring orsakad av belastningen.

1.3 Syfte och mål

Syftet med detta arbete är att förbättra den nuvarande beräkningsmallen och därmed förenkla arbetsprocessen för Hofpartners anställda. Förenklingen skall åstadkommas genom att en ny mall tas fram som skall vara lättanvänd och lätt att följa. Mallen skall dessutom vara självförklarande, en person som är insatt i området skall kunna använda den utan besvär. Slutligen skall mallen även vara mer exakt i beräkningarna än den gamla mallen.

1.4 Avgränsningar

Projektet avgränsas genom att den nya beräkningsmallen endast omfattar de vanligaste belastningsfallen. Generaliseringen av belastningsfall utförs för att reducera mängden nödvändig indata samt för att minska förkunskapskrav från användaren. Den nya mallen hanterar även endast de mest krävande belastningsfallen för att ytterligare förenkla och reducera mängden data.

Med anledning av begränsad mängd tid kommer separata instruktioner för användning av mallen inte att tas fram. Instruktioner till användaren begränsas till kommentarer i mall, avsedda att vara tillräckligt tydliga för att en insatt person skall kunna använda mallen.

2 Metod/tillvägagångssätt

Arbetet med att framställa en ny beräkningsmall utförs i tre steg. Det första steget består av att samla in nödvändig information. Intervjuer med handledare tillika vd på företaget bidrar till att ge förståelse för en rullaxels funktionalitet. Vidare uppstår frågor som: Hur kan nuvarande mall förenklas? Kan delar av innehållet tas bort? Kan olika val slås ihop? Frågorna behandlas sedan som grund när den nya mallens utseende skall bestämmas.

Med förståelse av rullaxlarna samt belastningsfallen uppnådd kan formler för hållfasthetsberäkningar tas fram. Resultat från framtagna formler kontrolleras sedan med hjälp av FEM-beräkningar. Slutligen tas en ny förenklad beräkningsmall fram.

2.1 Förståelse

Projektet inleds med att utföra en datainsamling. Formen för datainsamlingen är intervjuer med företagets vd. Datainsamlingen utförs för att uppnå kunskap och förståelse för funktionaliteten av företagets rullaxlar. Resultat från intervjuerna möjliggör bestämning av belastningsfallen som mallen skall hantera, förenklat från den gamla mallen. Utöver bestämning av belastningsfall kan även övrig funktionalitet bestämmas. Beslut fattas om vilka delar som fortsatt behövs och därmed skall följa med in i den nyskapade mall och vad som kan elimineras. Slutligen utformas layouten för mallen där tilltänkta användare av mallen förklarar vad de vill se i den nya samt vad som skall undvikas från den gamla. Beslut fattas om att grundutseendet från den gamla mallen skall användas även till den nya men i reducerad form. Beslutet baseras på att användarna inte ska behöva lära sig helt ny funktionalitet för att förenkla övergångsperioden.

2.2 Framtagning av beräkningsformler

Baserat på beslut fattade om utformningen på belastningsfall inleds en litteraturstudie. Målet med litteraturstudien är att ta fram matematiska modeller för resulterande nedböjning, vinkelförändring samt vilken spänning som uppstår i axeln vid belastning. Studerad litteratur innefattar kurslitteratur från kurserna i hållfasthetslära, Hållfasthets- och materialtabeller, Grundläggande hållfasthetslära samt Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära [3][4][5].

Vidare studeras den gamla mallen för framtagning av maximal tillåten spänning i axeln. Den maximalt tillåtna spänningen baseras på utmattning där de avgörande faktorerna är den maximala hastigheten material rullas upp med samt vilket material axeln är tillverkad av.

För framtagning av de ekonomiska beräkningarna studeras en befintlig mall specialanpassad för en av företagets kunder. Den specialiserade mallen är kraftigt förenklad jämfört med företagets generella mall men behandlar endast kostnader. Specialmallen agerar utgångspunkt för de ekonomiska beräkningarna.

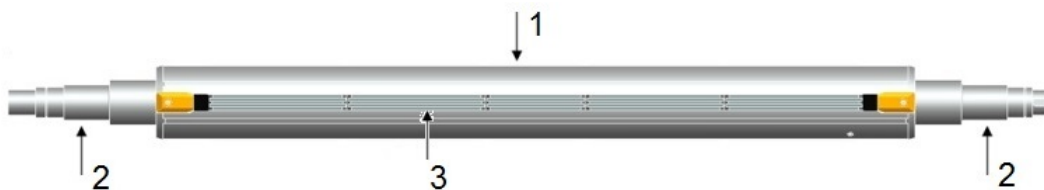
2.3 Programmering av mall

Efter att beslut fattats om vilka val som fortsatt skall finnas kvar i mall implementeras funktionerna i ett nytt Exceldokument. I de fall där användaren tvingas att välja mellan flera olika typer av artiklar, exempelvis typ av ventil, sker val i en lista. En förenkling som leder till att användaren aldrig kan försöka göra felaktiga val genom att markera flera olika val som är i konflikt med varandra. Beräkningsformler för de olika konstaterade belastningsfallen implementeras. Efter implementation kontrollräknas de först för hand som verifikation på korrekt implementation utifrån framtagna formler. Efter kontroll med beräkningar för hand verifieras de även med hjälp av FEM-beräkningar, se avsnitt 4.2. I ett sista steg implementeras element från VBA av förtydligande skäl i mallen.

3 Expanderande rullaxlar

Rullaxlar är en typ av axel som används inom tillverkningsindustrin. De används när en produkt skall placeras på en rulle, exempelvis vid papperstillverkning där det färdiga pappret rullas upp i slutet av tillverkningsprocessen. De används även för att rulla upp vissa typer av plast. Axeln är monterad i ett eller två lager på tapparna som tillåter rotation med låg friktion [6]. Rullaxlarna erbjuder fastlåsning av materialet placerat på axeln vilket tillåter enkel upprullning även i höga hastigheter.

Hofpartners rullaxlar består av en kropp (1) vilken den önskade rullen ligger på. I änden på kroppen sitter det en tapp (2), antingen på båda ändar eller på endast en sida. På kroppen finns expandrar monterade (3), vars funktion är att hålla fast rullen som är monterad på axeln. Under expandrarna finns gummislangar installerade. Dessa gummislangar fylls med luft genom en ventil monterad antingen axiellt i tapp eller radiellt i kroppsändan. När gummislangarna fylls med luft expanderar de och pressar ut expandrarna som därmed låser fast rullen.



Figur 1 Rullaxel

3.1 Material

Hofpartner AB tillverkar rullaxlar i fyra olika material. Dessa material är stål, aluminium, aluminiumlegeringen 7075 samt kromstål. Kropp och tapp kan vara tillverkade i olika material. Materialvalet baseras på hur kraftig belastning rullaxeln skall utsättas för samt även kostnaderna, där 7075 och kromstål är dyrare än vanligt stål eller aluminium. Aluminiumaxlarna med diameter 70 och 76 mm erbjuds även med kolfiberförstärkning för förbättrade hållfasthetsegenskaper till mycket låg viktökning. Kostnaden att lägga till kolfiberförstärkning är dock förhållandevis hög. Det är vanligt att tapparna tillverkas av ett material med högre tillåten spänning än kroppen. Det tåligare materialet krävs ofta på grund av att tapparna är av mindre diameter och därmed har ett lägre värde på böjmotstånd W . Det lägre värdet på böjmotstånd leder till högre spänning i tapparna, material kan därmed väljas för att kompensera för spänningsökningen. Böjmotstånd beräknas med ekvation 1. Tröghetsmomentet påverkas även det av diameter men används endast för beräkning av nedböjning samt vinkeländring, materialval påverkar därmed nedböjningen endast genom elasticitetsmodulen. Tröghetsmoment beräknas med ekvation 2.

$$W = \frac{\pi}{32} * D^3 \quad [\text{ekv.1}]$$

$$I = \frac{\pi}{64} * D^4 \quad [\text{ekv.2}]$$

Ekvation 1 och 2 behandlar cirkulära tvärsnitt, tapparna på en rullaxel kan även vara kvadratiska eller triangulära. Mallen förenklas till att alltid beräkna böjmotstånd och tröghetsmoment för ett cirkulärt tvärsnitt. Förenklingen leder till att de implementerade formlerna blir mycket enklare med färre villkor i mallen. Förenklingen minskar dock exaktheten i beräkningarna eftersom cirkulära, triangulära samt kvadratiska tvärsnitt inte har samma böjmotstånd och tröghetsmoment. Avvikelsen anses dock vara tillräckligt liten för att försummas. I ekvationerna 1 och 2 är D diametern på tappen som beräknas och π är talet $\pi \approx 3,14$.

4 Resultat

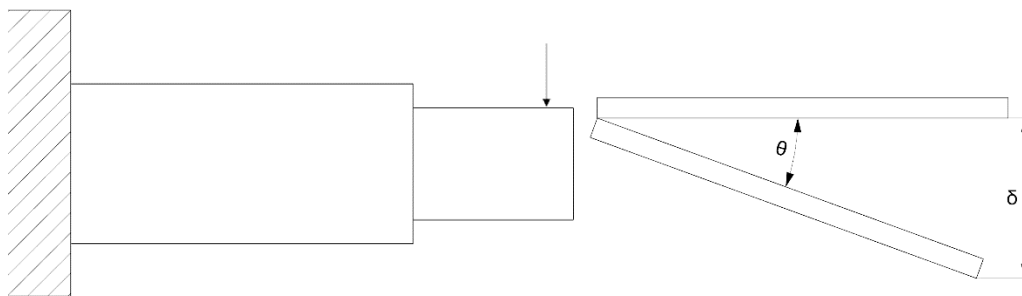
Det första som utförs är att bestämma vilka belastningsfall som skall hanteras samt att ta fram lösningar till de belastningsfallen. Det följs upp med en verifikation av framtagna formler med hjälp av analyser utförda i FEM. Slutligen konstrueras även metoder för att beräkna företagets kostnader.

4.1 Belastningsfall

Beräkningsmallen skall kunna hantera tre olika belastningsfall. De tre olika fallen kräver olika beräkningsformler och modeller för att ge korrekta resultat. De tre fallen samt framtagna beräkningsformler presenteras i följande avsnitt.

4.1.1 Fall 1: Konsol

Konsol är benämningen på en rullaxel som endast är monterad i lager på en sida av kroppen, ensidig lagring. Kapaciteten för en konsol-axel är därmed lägre än för en axel som lagras på båda sidor. Den lägre kapaciteten baseras på att hela belastningen koncentreras till en sida av axeln. Rullen som är monterad på axeln behandlas som fast inspänning p.g.a. rullens mycket höga styvhet vilket omöjliggör böjning förutom precis i änden på rullen, vilket försummas. Se Figur 2 för detaljerat belastningsfall.



Figur 2 Konsol

Nedböjning samt vinkeländring på grund av kraften beräknas med hjälp av elementarfall 1. Beräkningarna utförs flera gånger, en gång för varje olik diameter och längd. Resultatet från varje enskild delberäkning adderas slutligen för att ge den totala nedböjningen samt vinkelförändringen, $\delta_{tot} = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n$ samt motsvarande för θ . Beräkningen förenklas genom att vinkelförändring i föregående beräkning försummas i nästa beräkningssteg. Varje delberäkning behandlar en tidigare helt obelastad del av axeln som därmed antas vara rak, sned böjning undviks.

Elementarfall 1 ger att nedböjningen δ och vinkeländringen θ beräknas enligt ekvation 3 och 4.

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad [\text{ekv. 3}]$$

$$\theta = \frac{F \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I} \quad [\text{ekv. 4}]$$

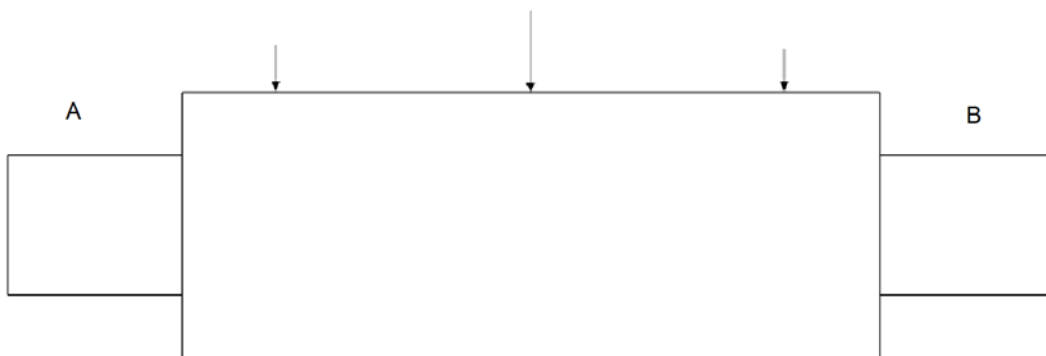
I ekvation 3 och 4 är F kraften som består av rullens samt axelns vikt, L är längden, E är elasticitetsmodulen och I är tröghetsmoment. Spänningen σ beräknas med ekvation 5.

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad [\text{ekv. 5}]$$

där M är böjmoment och W axelns böjmotstånd beräknat enligt ekvation 1[3].

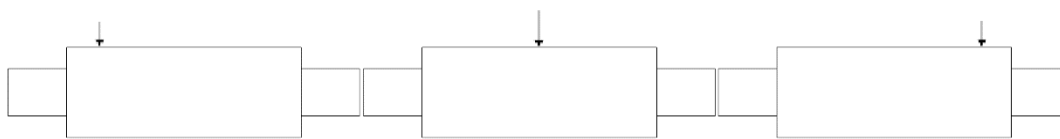
4.1.2 Fall 2: Tvåsidig med skuren rulle

Fall 2 behandlar en axel som har tappar och är lagrad på båda sidor av kroppen, tvåsidig lagring. Rullen som är placerad på axeln är dessutom delad på mitten. Snittet på mitten ger upphov till den mest krävande belastningen som rullaxeln kan utsättas för. Snittet av rullen leder till att rullens styvhet kraftigt förminskas och inte längre hindrar nedböjning. Se Figur 3.



Figur 3 Tvåsidig med skuren rulle

Fallet löses genom användning av superpositionsmetoden. Superposition innebär att belastningsfallet delas upp till ett mer lätthanterligt fall [4]. Uppdelningen som utförs innebär att beräkningen sker med en kraft åt gången och slutligen adderas resultatet, se Figur 4.



Figur 4 Superposition

Kroppen på axeln samt tapparna beräknas var för sig. Tappar beräknas med elementarfall 1, d.v.s. nedböjning med ekvation 3, vinkeländring med ekvation 4 och spänning med ekvation 5 likt belastningsfall 1. Kroppen beräknas med elementarfall 5. Kraften i mitten, vid snittet av rullen har beloppet $\frac{m \cdot g}{2}$, där m är axelns samt rullens vikt och g tyngdaccelerationen $\approx 9,81$. Elementarfall 5 ger följande ekvationer för en kraft lokaliserad mitt på axeln: [3]

$$\theta = \frac{F \cdot L^2}{16 \cdot E \cdot I} \quad [\text{ekv.6}]$$

$$\delta = \frac{F * L^3}{48 * E * I} \quad [\text{ekv.7}]$$

För krafterna lokaliserade på sidorna, vid rullens två ändar, används ekvation 8-10 [5]. Sidokrafterna är halva storleken av kraften i mitten, d.v.s. $\frac{m * g}{4}$.

$$\delta = \frac{F * L^3}{6 * E * I} * \beta * ((1 - \beta^2) * \xi - \xi^3) \quad [\text{ekv.8}]$$

$$\theta_A = \frac{F * L^2}{6 * E * I} * \alpha * \beta * (1 + \beta) \quad [\text{ekv.9}]$$

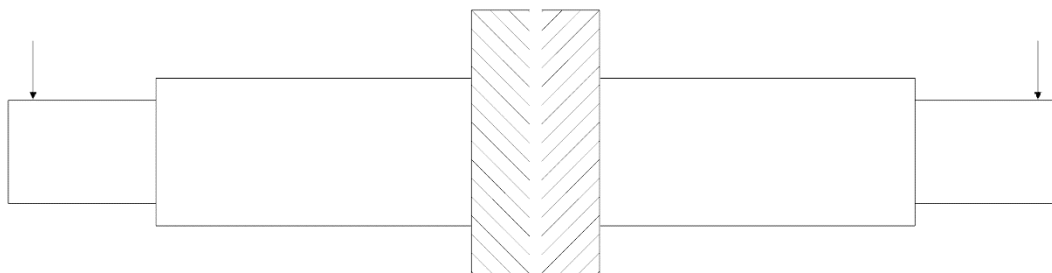
$$\theta_B = \frac{F * L^2}{6 * E * I} * \alpha * \beta * (1 + \alpha) \quad [\text{ekv.10}]$$

A och B är benämning för axelns vänstra respektive högra sida, därmed är θ_A vinkeländring i vänstra delen av axeln och θ_B vinkeländring i högra delen av axeln. α är hur stor andel av axelns längd som är till vänster om kraften, β är hur stor andel av längden som är till höger om kraften. Slutligen är ξ punkten på axeln där nedböjningen beräknas, i detta fall 0,5 eftersom nedböjningen mitt på axeln blir maximal p.g.a. att mittenkraften alltid är den största till beloppet samt symmetri för högra och vänstra krafterna.

Symmetrin leder till att höger- och vänster kraft resulterar i samma nedböjning mitt på axeln. Symmetrin ger även att vinkeländringen i axeln är lika för vänster och höger kraft, men med omvänt resultat, θ_A för den vänstra kraften har samma belopp som θ_B för den högra kraften.

4.1.3 Fall 3: Tvåsidig med hel rulle

Fall 3 behandlar precis som fall 2 en axel lagrad på båda sidor av kroppen. Skillnaden är att rullen inte är avskuren på mitten. Skillnaden resulterar i att belastningsfallet är mycket likt det i fall 1. Rullen behandlas som fast inspänning på grund av dess mycket höga styvhet likt i fall 1. Se Figur 5.



Figur 5 Tvåsidig oskuren

Belastningsfallet löses med samma ekvationer som fall 1 Konsol. Ekvation 3 används för att beräkna nedböjning och ekvation 4 används för att beräkna vinkeländringen. Givna resultat från samtliga beräkningssteg adderas för att ge total nedböjning samt vinkeländring. Slutligen beräknas spänningen återigen med ekvation 5 [3]. Skillnaden jämfört med fall 1 är att belastning finns på båda sidor av rullen, formlerna behöver därmed appliceras två gånger, en gång för vardera sidan. Mallen returnerar slutligen

resultat för den sidan av axeln med störst nedböjning och vinkeländring samt högst spänning.

4.1.4 Tillåten spänning

Tillåten spänning i kropp samt tappar bestäms med befintliga formler från den ursprungliga beräkningsmallen.

$$\sigma_{till} = k * v + m \text{ [ekv.11]}$$

I ekvation 11 är v den maximala upprullningshastigheten i meter per minut, k och m är tabellvärden framtagna av företaget. Värdet på k respektive m är beroende av den maximala upprullningshastigheten samt vilket material axeln är tillverkad av. Exempelvis har aluminium k -värdet $-0,0125$ och m -värde mellan 40 och 55 beroende på upprullningshastighet.

Ekvation 12 beskriver en beräkning utförd för en axel tillverkad i aluminium med upprullningshastigheten 350 meter per minut.

$$\sigma_{till} = -0,0125 * 350 + 50 = 45,63 \text{ MPa} \quad \text{[ekv.12]}$$

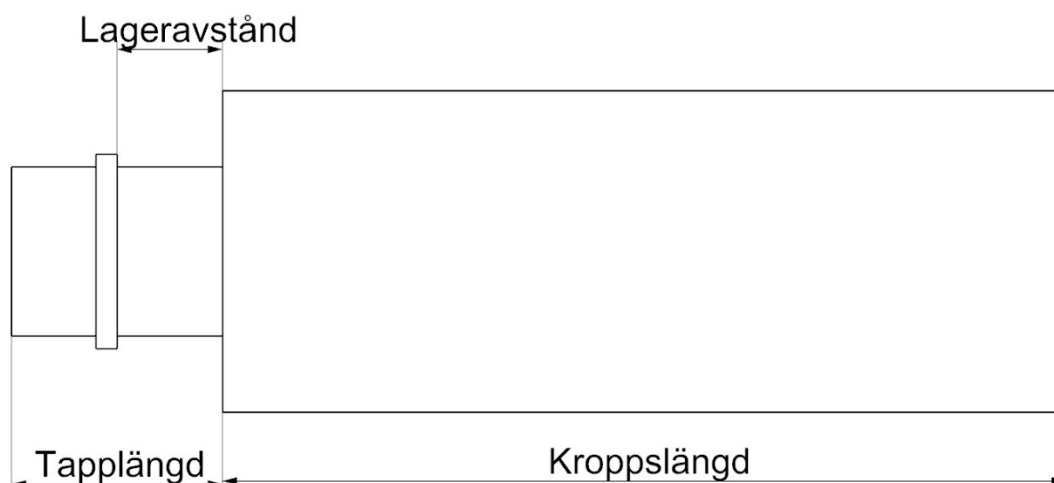
Eftersom exempelberäkningen behandlar en aluminiumaxel är k värdet $-0,0125$. Hastigheten är 350 meter per minut, tabellen visar att vid hastigheten 350 meter per minut är m -värdet 50 för en axel av aluminium. Se bilaga B för använda tabeller.

4.2 FEM-verifikation

Beräkningsmallens formler testas och jämförs med resultat från en likadan beräkning utförd i FEM. FEM kan användas för att med datorhjälp beräkna spänningarna i axeln under belastning [7]. Nackdelen med FEM-beräkningar är att de vid mer komplicerade fall kan ta väldigt lång tid att utföra, testerna utförda i detta arbete har tagit mellan 1 och 5 minuter. Beräkningar som kräver denna tidsåtgång är inte praktiskt genomförbara när säljaren förbereder en offert eller när dimensionering pågår, resultat måste presenteras snabbt. Beräkningarna som genomförs i den nya mallen är av överslagskaraktär. Dessa överslagsberäkningar är enkla och utförs mycket snabbt av en dator men är inte lika exakta som en beräkning i FEM. Målet är därmed att överslagsberäkningarna skall ge ett svar tillräckligt nära verkligheten för att ge användaren en uppfattning om ifall axeln klarar belastningen. FEM kan därmed begränsas till att användas i ett senare skede för mer noggrann information och kontroll. Vid samtliga fall presenteras resultat från FEM enligt von Mises hypotes och framtagen beräkningsmall presenterar normalspänningen.

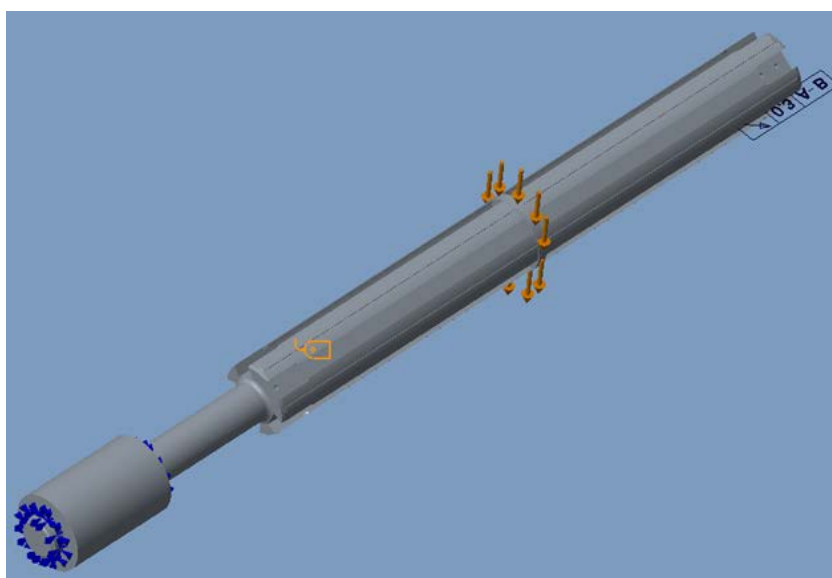
4.2.1 Fall 1: Konsol

För att verifiera resultat vid fall konsol används en axel med kroppslängd 670 mm, rullbredd 664 mm, lageravstånd $141,5$ mm, tapplängd $146,5$ mm och totallängd 800 mm. Axelns diameter är 76 mm och tappens diameter är 40 mm. Belastningen utgörs av en rulle vägas 100 kg. Se Figur 6 för beskrivning av beteckningar.



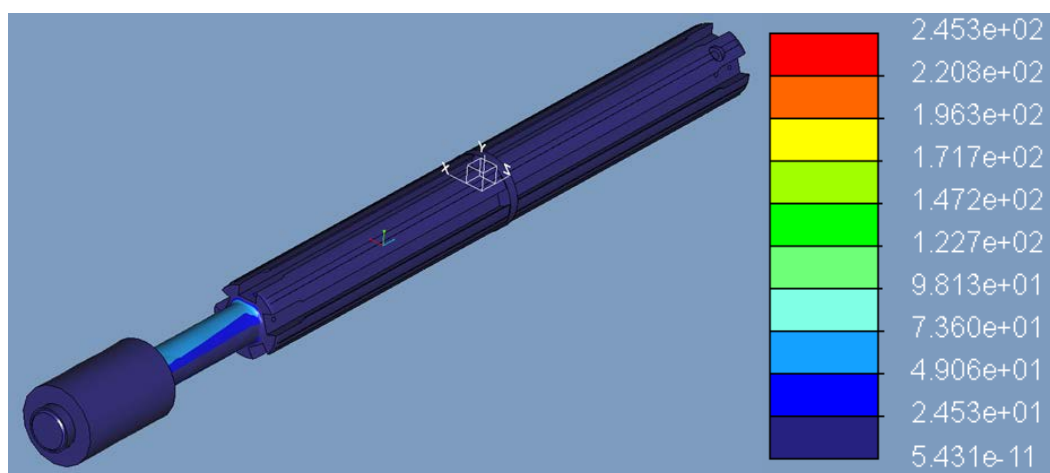
Figur 6 Beskrivning Konsol

FEM-beräkningen visar att spänningen i tappen uppgår till ca 74 MPa, kroppsspänningen till ca 14 MPa och den maximala nedböjningen till 5,8 mm. Beräkningsmallen ger i detta fall tappspänning 74,40 MPa, kroppsspänning 13,59 MPa och maximal nedböjning 4,3 mm. Värdena för spänning stämmer därmed väl överens och avvikelserna är små mellan resultat från mall och FEM. Resultat för nedböjning visar betydligt större avvikelser som delvis kan bero på avläsningen av det uppvisade resultatet i FEM samt på grund av någon form av felaktighet i framtagna formler och implementation av dem. Se Figur 7 för uppställning av fallet. I jämförande syfte utförs även samma beräkning i den gamla mallen. Resultat som uppnås vid användning av gamla mallen är vid detta belastningsfall tappspänning 71,97 MPa, kroppsspänning 18,48 MPa samt nedböjning 0,67 mm. Den gamla mallen ger därmed ett bra värde för tappspänning, en överskattning för kroppsspänning och en kraftig underskattning av nedböjningen vilket tydligt visar behovet av en uppdatering.



Figur 7 FEM-uppställning konsol

Figur 8 visar resultat från FEM-analysen. För att reducera påverkan av spänningskoncentrationer införs en förlängning av tappen med större diameter. Den förlängda delen av tappen är fastlåst i samtliga riktningar medan tappen endast är låst i x- och z-led. Efter införande av förlängningen har spänningskoncentrationerna i FEM förflyttats från tappen till övergången mellan tapp och förlängning. Denna förflyttning möjliggör avläsning av relevanta resultat för spänning där tappspänningen är maximal i slutet av tappen, vid övergången mellan gult och orange i Figur 8.



Figur 8 FEM-resultat konsol, spänning

4.2.2 Fall 2: Tvåsidig med skuren rulle

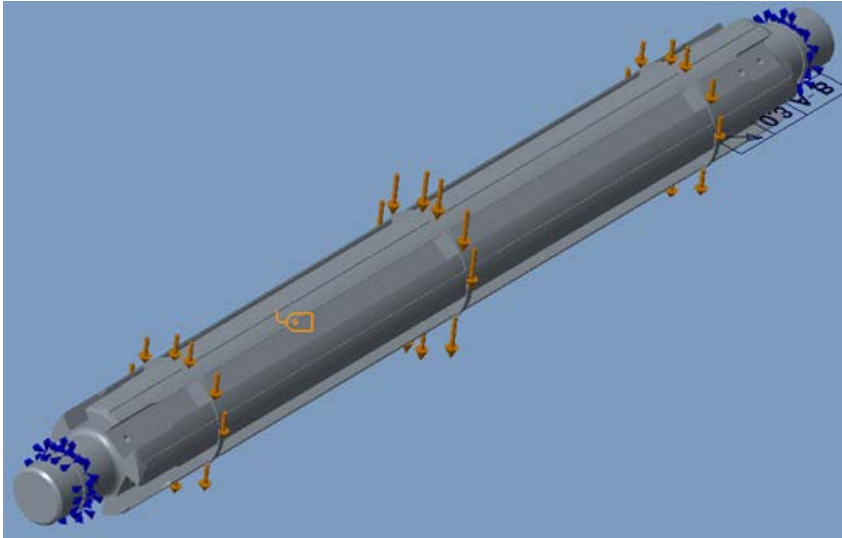
För att verifiera resultat vid fall tvåsidig med skuren rulle används en axel med kroppslängd 670 mm, tapplängder 60 mm, avstånd mellan lager 733 mm, rullbredd 505 mm, tappdiameter 40 mm, kroppsdiameter 76 mm. Belastning är en 100 kg tung rulle. Se Figur 9 för beskrivning av beteckningar.



Figur 9 Beskrivning tvåsidig

FEM-beräkningen visar att spänningen i tapparna uppgår till 2,4 MPa, kroppsspänning 5 MPa, samt maximal nedböjning 0,06 mm. Samma belastning i framtagen mall resulterar i tappspänning 2,46 MPa, kroppsspänning 4,87 MPa samt 0,067 mm maximal nedböjning. Resultat från mall och FEM är därmed mycket nära varandra och mallens

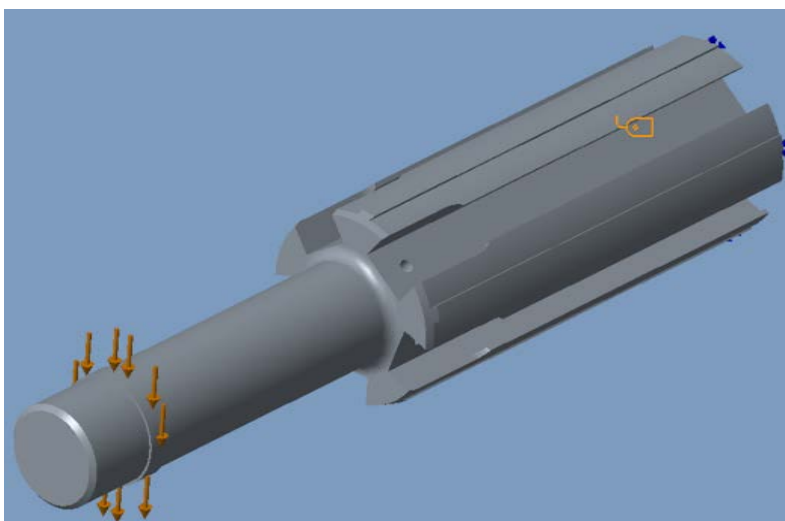
beräkning bedöms därmed vara godkänd. Se Figur 10 för uppställning av belastningsfall i FEM-analysen. Ursprunglig mall ger vid denna belastning 4,57 MPa kroppsspänning, 2,45 MPa tappspänning och 0,10 mm nedböjning. Därmed stämmer ursprungligt resultat för tappspänning, medan resultat för kroppsspänning visar en liten avvikelse och nedböjning en stor avvikelse.



Figur 10 FEM uppställning tvåsidig axel med avskuren rulle

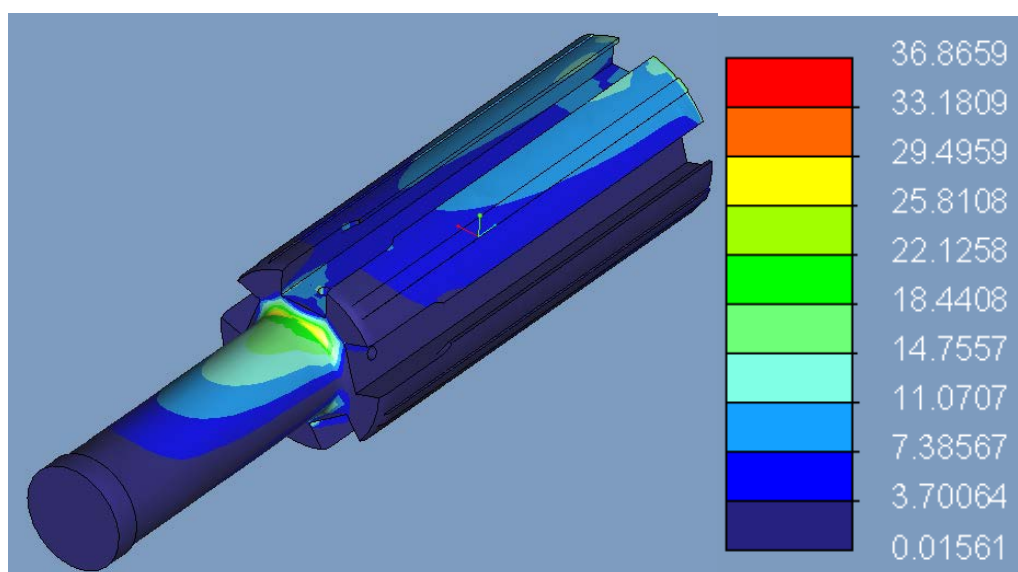
4.2.3 Fall 3: Tvåsidig utan skuren rulle

För att verifiera resultat vid fallet tvåsidig utan skuren rulle används en axel med kroppslängd 880 mm, tapplängder 130 mm, rullbredd 500 mm och lageravstånd 1130 mm. Tapparnas diameter är 40 mm och kroppens diameter är 76 mm. Som belastning används en rulle som väger 200 kg, motsvarande 100 kg per sida av axeln. Se Figur 9 för beskrivning av beteckningar och Figur 11 för uppställning av belastningsfallet i FEM-analysen.



Figur 11 FEM-uppställning tvåsidig utan skuren rulle

FEM-analysen visar att kroppsspänningen uppgår till ca 13 MPa, tappspänningen ca 20 MPa samt nedböjning ca 0,25 mm. Samma fall i beräkningsmallen resulterar i 12,78 MPa kroppsspänning, 19,52 MPa tappspänning och 0,236 mm nedböjning. Avvikelserna mellan resultaten från FEM-analysen och beräkningsmallen är därmed små och formlerna anses vara verifierade som tillräckligt korrekta. Se Figur 12 för resultat från FEM-analysen. Användning av den gamla mallen resulterar i 8,48 MPa kroppsspänning, 19,43 MPa tappspänning samt 0,57 mm nedböjning vid samma belastningsfall. Tappspänningen stämmer därmed återigen bra överens i ursprunglig mall medan kroppsspänning och nedböjning visar stor avvikelse.



Figur 12 FEM-resultat tvåsidig utan skuren rulle

4.3 Visual Basic programmering

Element från VBA implementeras i den nya beräkningsmallen. Funktionaliteten som önskas från VBA är att automatiskt dölja och ta fram rader beroende på värdet i specifika celler. Om användaren exempelvis fyller i att tapparna på axeln är svetsade plockar mallen automatiskt fram en rad där användaren fyller i kostnadsökningen p.g.a. svetsning. Se bilaga A för kod. Alla de olika val som döljs med hjälp av VBA kod är av sådan natur att de inte kan generaliseras tillräckligt väl för att automatiskt ta fram kostnad för dem. Fördelen med att hantera dessa val med VBA är att det ger en möjlighet att göra funktioner tillgängliga endast när de faktiskt behövs och skall användas, användaren behöver inte se onödiga rader.

4.4 Ekonomi

Beräkningsmallen skall utöver hållfasthetsdata även beräkna kostnader för rullaxlarna samt hur olika tillval påverkar priset. Användaren av mallen specificerar axelns samtliga mått, och även vilken typ av axel. Material i tappar anges manuellt av användaren till skillnad från kroppen där materialval sker automatiskt genom tabeller där material finns

specificerat för varje typ av axel. Olika typer av axlar innebär olika kostnader baserade på diameter samt material där 7075 och kromstål är dyrare än aluminium respektive stål. Exakta kostnader för material finns endast tillgängligt för de vanligaste profilerna vilka är tillverkade av aluminium och har diameter 70, 76 eller 150 mm. Övriga material och mått generaliseras till en uppskattad kostnad per meter sammanställt i tabeller för att ge möjligheter till enkel uppdatering.

Ställtid baseras på antalet operationer som krävs under tillverkningen. Fler olika diametrar på tappar ökar tidsåtgång samt även om de är av komplex form, d.v.s. triangulära eller kvadratiska. Ställtidskostnaden fördelas över samtliga axlar som skall tillverkas. Den nya mallen är byggd att kunna hantera valfritt antal axlar, en förbättring jämfört med den gamla mallen som endast kan beräkna kostnad för 1, 2, 3, 4, 6 eller 10 axlar. Utöver ställtid tillkommer tillverkningstid för samtliga krävda operationer där komplexa former och stora axlar ökar tidsåtgången jämfört med enklare axlar och därmed även kostnaden.

Slutligen tillkommer olika möjliga tillval. De vanligaste möjligheterna, exempelvis material i kropp och utformning av expandrar hanteras automatiskt av mallen med hjälp av fördefinierade värden. Ett annat exempel på tillval är vilken typ av ventil som skall användas, om det sitter ventil i båda ändar av axeln samt även om ventil ska placeras axiellt eller radiellt. Ovanliga tillval samt tillval som är svåra att generalisera till en specifik kostnad kräver att användaren istället manuellt specificerar kostnaden. Mallen bär slutligen in tillvalskostnaden i det totala priset som visas upp för användaren.

5 Slutsatser

Målet med detta arbete var att ta fram en ny förenklad och mer korrekt beräkningsmall till Hofpartner AB. Förenklingen har genomförts genom att funktionalitet med begränsad användning skalats bort i största möjliga mån, funktioner som väldigt sällan används eliminerades. I de fall där användaren väljer mellan olika alternativ finns nu de möjliga alternativen lättillgängliga i en lista, i den gamla mallen låg alla alternativ framme och behövde kryssas i, utan hinder för att användaren markerar flera alternativ som är i konflikt med varandra. Den nya mallen hindrar därmed användaren från att göra felaktiga val i största möjliga mån. Data för de olika profiltyperna finns nu tillgängliga direkt i beräkningsmallen, tidigare krävdes det att användaren öppnade ett separat dokument för åtkomst till exakta beteckningar.

Mallen reducerades till att endast hantera de vanligaste samt det mest krävande belastningsfallet: en rulle som är avskuren på mitten. Det första som skalades bort var belastning av rulle med flera snitt. Flera snitt ger upphov till lägre belastning än ett ensamt snitt, därför hanteras endast ett eller inget snitt. Förenklingen har även gett ett tydligt avtryck på mallens storlek, kalkylarket med nödvändig indata har reducerats från 195 till 114 möjliga rader, där flertalet av de 114 raderna i den nya mallen är dolda när de inte behövs. Även filstorleken har minskats från ca 1200 kB till 120 kB, en reduktion som förenklar vid de tillfällen när möjligheterna till kommunikation med företagets server är begränsad.

Analyserna utförda vid samtliga belastningsfall påvisade den stora avvikelsen mellan verkligheten och resultat från ursprunglig mall. Avvikelsen tydliggjorde även behovet av förnyelse i företagets metoder. En stor förbättringspotential fanns och samtliga resultat har förbättrats till mer realistiska värden.

5.1 Framtida arbete

Möjligheter finns till fortsatt arbete med den framtagna beräkningsmallen, främst relaterade till kostnadsberäkningar. En studie kan utföras för att noggrant kartlägga företagets kostnader för att ge mer realistiska kostnadssiffror. Materialkostnader stämmer väldigt bra för de fem vanligaste profilerna men för övriga profiler bör en undersökning om materialkostnader utföras. En kartläggning över tidsåtgång för de olika operationerna i tillverkningen bör även utföras. De värden som har använts i den nya mallen är endast uppskattningar över tidsåtgången för tillverkningssteg. Korrekta siffror är viktiga för att ge möjlighet till en korrekt prissättning. En underskattning leder till att pris sätts för lågt medan en överskattning minskar företagets konkurrenskraft p.g.a. höga priser.

Hofpartner förvärvade nyligen schweiziska konkurrenten Schlumpfs tillverkning av rullaxlar. Mallen bör därmed kompletteras med dessa nya produkter. Schlumpfs axlar har en annan konstruktion än Hofpartners axlar. Skillnaden påverkar endast den ekonomiska delen, hållfasthetsberäkningarna påverkas inte då belastningsfallen är likadana.

Största skillnaden finns i utformningen på expandrar, i Hofpartners axlar är expandrarna monterade i spår längs med hela axeln, Schlumpfs expandrar är monterade i kilar längs med kroppen.

Slutligen bör även resultatet vid fall konsol undersökas vidare. Avvikelsen mellan FEM och mall gällande nedböjning är på en större nivå än önskat. Formler samt implementation har analyserats utan att fel upptäckts. Det rekommenderas därmed att utföra ytterligare analyser för att jämföra resultat och utesluta felorsaker.

Referenser

1. B. Bergman och B. Klefsjö, *Quality from Customer Needs to Customer Satisfaction*. Lund: Studentlitteratur, 2010.
2. Hofpartner AB. *Historik*, 2015. [Online] Tillgänglig: <http://www.hofpartner.com/home/om-hofpartner/historik/>
3. B. Bodelind och A. Persson, *Hållfasthets- och materialtabeller*. Malmö: Studentlitteratur, 1970.
4. H. Lundh, *Grundläggande hållfasthetslära*, Stockholm: KTH, 2000.
5. B. Sundström, et al., *Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära*. Stockholm: KTH, 2010.
6. University of Cambridge. *Steel for bearings*, 2012. [Online] Tillgänglig: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2011/Bearings/index.html>
7. Nationalencyklopedin. *Finita elementmetoden*, 2015. [Online] Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/finita-elementmetoden>

Figur 1: Hofpartner AB

A. VBA-kod

Option Compare Text 'remove case sensitivity

Dim SelectCase As Integer 'variable used in Case

Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)

If Intersect(Target, Range("c25,c53:d65,c78,c83,c95:d96,c100:d103")) Is Nothing Then
Exit Sub 'only run code if specified cells changed value

If Target.Address = Range("\$c\$25").Address Then SelectCase = 1
'specify which cell changed value and thus decide which case to run

If Target.Address = Range("\$c\$95").Address Or Target.Address = Range("\$d\$95").Address Then SelectCase = 2

If Target.Address = Range("\$c\$96").Address Then SelectCase = 3

If Target.Address = Range("\$c\$100").Address Or Target.Address = Range("\$d\$100").Address Then SelectCase = 4

If Target.Address = Range("\$c\$101").Address Or Target.Address = Range("\$d\$101").Address Then SelectCase = 5

If Target.Address = Range("\$c\$102").Address Or Target.Address = Range("\$d\$102").Address Then SelectCase = 6

If Target.Address = Range("\$c\$103").Address Or Target.Address = Range("\$d\$103").Address Then SelectCase = 7

If Target.Address = Range("\$c\$53").Address Or Target.Address = Range("\$d\$53").Address Then SelectCase = 8

If Target.Address = Range("\$c\$55").Address Or Target.Address = Range("\$d\$55").Address Then SelectCase = 9

If Target.Address = Range("\$c\$57").Address Or Target.Address = Range("\$d\$57").Address Then SelectCase = 10

If Target.Address = Range("\$c\$59").Address Or Target.Address = Range("\$d\$59").Address Then SelectCase = 11

If Target.Address = Range("\$c\$61").Address Or Target.Address = Range("\$d\$61").Address Then SelectCase = 12

If Target.Address = Range("\$c\$63").Address Or Target.Address = Range("\$d\$63").Address Then SelectCase = 13

```
If Target.Address = Range("$c$65").Address Or Target.Address = Range("$d$65").Address Then SelectCase = 14
```

```
If Target.Address = Range("$c$78").Address Then SelectCase = 15
```

```
If Target.Address = Range("$c$83").Address Then SelectCase = 16
```

```
Select Case SelectCase
```

```
Case 1
```

```
If Range("c25").Value = "x" Then
```

```
Rows("106:106").EntireRow.Hidden = False 'shows row to add coreless winding if present
```

```
Else
```

```
Rows("106:106").EntireRow.Hidden = True 'hides row if no coreless winding
```

```
Range("c106").Value = "" 'delete cell contents
```

```
End If
```

```
Case 2
```

```
If Range("c95").Value = "x" Or Range("d95").Value = "x" Then 'shows row if one or both journals are welded
```

```
Rows("107:107").EntireRow.Hidden = False
```

```
Else
```

```
Rows("107:107").EntireRow.Hidden = True 'hides row if none of the journals are welded
```

```
Range("c107:d107").Value = "" 'delete cell contents
```

```
End If
```

```
Case 3
```

```
If Range("c96").Value > 0 Then
```

Rows("108:108").EntireRow.Hidden = False 'shows row if return springs are present

Else

Rows("108:108").EntireRow.Hidden = True 'hides row if return springs are not present

Range("c108").Value = 0 'delete cell contents

End If

Case 4

If Range("c100").Value > 0 Or Range("d100").Value > 0 Then 'rows for extra details, shows another row if data entered

Rows("102:102").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c102").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'stop if row already hidden, avoid recursion

Rows("102:105").EntireRow.Hidden = True 'hide rows if row 1 is empty

Range("c101:d105").Value = "" 'delete contents from hidden cells

End If

Case 5

If Range("c101").Value > 0 Or Range("d101").Value > 0 Then 'rows for extra details, shows another row if data entered

Rows("103:103").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c103").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid infinite recursion

Rows("103:105").EntireRow.Hidden = True 'hide if row 2 is empty

Range("c102:d105").Value = "" 'clear hidden cells

End If

Case 6

If Range("c102").Value > 0 Or Range("d102").Value > 0 Then 'rows for extra details,
shows another row if data entered

Rows("104:104").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c104").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion

Rows("104:105").EntireRow.Hidden = True 'hide if row 3 is empty

Range("c103:d105").Value = "" 'clear hidden cells

End If

Case 7

If Range("c103").Value > 0 Or Range("d103").Value > 0 Then 'rows for extra details,
shows another row if data entered

Rows("105:105").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c105").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion

Rows("105:105").EntireRow.Hidden = True 'hide if row 4 is empty

Range("c104:d105").Value = "" 'clear hidden cells

End If

Case 8

If Range("c53").Value > 0 Or Range("d53").Value > 0 Then 'rows for journal dimensions,
new row when data entered

Rows("55:56").EntireRow.Hidden = False

Else

```
If Range("c55").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion
    Rows("55:68").EntireRow.Hidden = True 'hide rows for journal dimension if first
row is empty
    Range("c55:d68").Value = "" 'clear hidden cells
```

End If

Case 9

```
If Range("c55").Value > 0 Or Range("d55").Value > 0 Then 'rows for journal dimensions,
new row when data entered
    Rows("57:58").EntireRow.Hidden = False
```

Else

```
If Range("c57").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion
    Rows("57:68").EntireRow.Hidden = True 'hide if second row is empty
    Range("c57:d68").Value = "" 'clear hidden cells
```

End If

Case 10

```
If Range("c57").Value > 0 Or Range("d57").Value > 0 Then 'rows for journal dimensions,
new row when data entered
    Rows("59:60").EntireRow.Hidden = False
```

Else

```
If Range("c59").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion
    Rows("59:68").EntireRow.Hidden = True 'hide if third row is empty
    Range("c59:d68").Value = "" 'clear hidden cells
```

End If

Case 11

If Range("c59").Value > 0 Or Range("d59").Value > 0 Then 'rows for journal dimensions,
new row when data entered

Rows("61:62").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c61").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion

Rows("61:68").EntireRow.Hidden = True 'hide if fourth row is empty

Range("c61:d68").Value = "" 'clear hidden rows

End If

Case 12

If Range("c61").Value > 0 Or Range("d61").Value > 0 Then 'rows for journal dimensions,
new row when data entered

Rows("63:64").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c63").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion

Rows("63:68").EntireRow.Hidden = True 'hide if fifth row is empty

Range("c63:d68").Value = "" 'clear hidden rows

End If

Case 13

If Range("c63").Value > 0 Or Range("d63").Value > 0 Then 'rows for journal dimensions,
new row when data entered

Rows("65:66").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c65").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion

Rows("65:68").EntireRow.Hidden = True 'hide if sixth row is empty

Range("c65:d68").Value = "" 'clear hidden rows

End If

Case 14

If Range("c65").Value > 0 Or Range("d65").Value > 0 Then 'rows for journal dimensions,
new row when data entered

Rows("67:68").EntireRow.Hidden = False

Else

If Range("c67").EntireRow.Hidden = True Then Exit Sub 'avoid recursion

Rows("67:68").EntireRow.Hidden = True 'hide if seventh row is empty

Range("c67:d68").Value = "" 'clear hidden rows

End If

Case 15

If Range("c78").Value <> 0 Then 'hide and clear row "other valve" if standard valve type
is selected

Rows("79:79").EntireRow.Hidden = True

Range("c79").Value = ""

Else

Rows("79:79").EntireRow.Hidden = False 'show row "other valve" if standard valve
type is not selected

End If

Case 16

If Range("c83").Value <> 0 Then 'hide and clear row "other slat" if standard slat type is selected

Rows("84:84").EntireRow.Hidden = True

Range("c84").Value = ""

Else

Rows("84:84").EntireRow.Hidden = False 'show row "other slat" if standard slat type is not selected

End If

Case Else

Exit Sub

End Select 'end of case

End Sub 'end of program

B. Tabeller för tillåten spänning i axel

	Aluminium	7075	Kolfiber
m/min	6005 T6/6082 T6	7075 T6	HS-fiber
v < 100	55	95	65
100 < v < 200	53	90	60
200 < v < 500	50	85	55
500 < v < 800	45	80	50
v > 800	40	75	45
k - value	-0,0125	-0,01875	-0,01875

	Kolfiber	Stål	Kromstål
m/min	Pitch-fiber	280 / S355JR	34CrNiMo6 (M)
v < 100	70	135	230
100 < v < 200	68	115	210
200 < v < 500	65	95	190
500 < v < 800	60	85	180
v > 800	55	80	170
k - value	-0,0125	-0,0625	-0,0625