

JÖNKÖPING UNIVERSITY
School of Engineering

Effektivisering av offertarbete genom parametriska modeller i Autodesk Inventor.

En fallstudie av Francis-turbinkomponenter.

HUVUDOMRÅDE: Maskinteknik
FÖRFATTARE: Sami Alnajjar
HANDLEDARE: Filip Karlsson (TURAB)
JÖNKÖPING 202505

Detta examensarbete är utfört vid Tekniska Högskolan i Jönköping inom Parametrisk modellering. Författarna svarar själva för framförda åsikter, slutsatser och resultat.

Examinator: Magnus Andersson

Handledare: Djordje Popovic

Omfattning: 15 hp (grundnivå)

Datum: 20250514

Postadress:
Box 1026
551 11 Jönköping

Besöksadress:
Gjuterigatan 5

Telefon:
036-10 10 00 (vx)

Abstract

This thesis explores how parametric modeling can improve efficiency in the quotation process for turbine components. The aim is to investigate which tasks in quotation work can be parameterized, how a model can be structured in Autodesk Inventor using iLogic, and how much time such automation can save.

The study is based on a case involving a Francis turbine, where two components – a runner and a spiral casing – were modeled parametrically. The development process included rule-based geometry control, integration of input variables such as rotational speed (RPM), and testing through design iterations. Input was gathered from interviews with experienced designers, internal checklists, and technical specifications.

Results show that the parametric model reduces manual modeling time by approximately 8–10 hours per quotation, primarily by automating recurring design steps. A simplified payback period analysis indicates that the model becomes cost-effective after around 21 uses. Although the current model only covers part of the workflow, the results suggest that partial automation can still generate measurable and repeatable gains.

The report concludes that structured parametric modeling offers significant potential to reduce time and increase consistency in quotation work. Further development and broader implementation may enhance these effects across additional components.

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker hur parametrisk modellering kan användas för att effektivisera offertarbete vid nytillverkning av turbiner. Arbetet genomfördes i samarbete med ett industriföretag, där manuell konstruktion och återanvändning av tidigare modeller är en tidskrävande del av offertprocessen.

Målet har varit att utveckla en parametrisk CAD-modell i Autodesk Inventor som automatiserar återkommande moment, särskilt kopplade till löphjul och c-spiral. Arbetet baseras på intervjuer, analys av interna dokument och praktisk modellering med kodstyrning via iLogic.

Resultatet visar att den färdiga modellen sparar i genomsnitt 8–10 arbetstimmar per offert. En payoff-analys visar att utvecklingsarbetet (192 timmar) återbetalas efter cirka 21 användningar. Modellen är återanvändbar och kan anpassas för nya projekt genom inmatning av styrparametrar. Begränsningen ligger i att endast två komponenter omfattas, men resultatet visar att även en partiell automatisering kan ge betydande tidsvinst.

Arbetet visar att parametrisk modellering är ett tillämpligt verktyg i tekniskt försäljningsarbete och att vidareutveckling kan ge ytterligare effektivisering.

Ordlista – tekniska nyckelbegrepp

Begrepp	Kort förklaring
KBE	Regelstyrd teknikmodellering för automatisering i CAD
if–then–else	Kodlogik: om detta händer, gör A, annars gör B
RPM	Varvtal per minut – styr turbinstorlek
Dropdown-meny	Valmeny med fasta alternativ i modellen
ÖVY/NVY	Övre och nedre vattenyta – avgör fallhöjd
Brutto/Nettofallhöjd	Total höjdskillnad / faktisk nyttbar höjd
Servomotor	Motor som exakt styr t.ex. bladvinkel
Ra / glapp	Ytjämnhet (Ra) och tillåtet spel i mm
iLogic	Kod i Inventor som styr geometri automatiskt
Draft tube	Sugrör – återvinner energi efter löphjul

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	PROBLEMBESKRIVNING	1
1.3	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	2
1.4	AVGRÄNSNINGAR	2
1.5	DISPOSITION	2
2	Teoretiskt ramverk	4
2.1	PARAMETRISK MODELLERING: PRINCIPER OCH BEGREPP	4
2.2	MODELLUPPBYGGNAD I AUTODESK INVENTOR MED ILOGIC	6
2.2.1	<i>Parametrar, constraints och relationer</i>	7
2.2.2	<i>Strukturering av modeller</i>	7
2.2.3	<i>Regler och logik i iLogic</i>	7
2.2.4	<i>Formulär och användargränssnitt</i>	8
2.3	OFFERTFLÖDE OCH PARAMETRISERINGSMÖJLIGHETER	8
2.3.1	<i>Arbetsflöde i offertarbetet</i>	8
2.3.2	<i>Identifiering av parametriserbara moment</i>	9
2.3.3	<i>Teknisk validering i CAD-miljö</i>	10
2.4	EFFEKTIVITETSVINSTER VID PARAMETRISK MODELLERING	11
2.4.1	<i>Minskad manuell arbetsbelastning</i>	11
2.4.2	<i>Automatiserad förändringshantering</i>	11
2.4.3	<i>Ökad repeterbarhet och kvalitet</i>	11
3	Metod	12
3.1	KOPPLING MELLAN FRÅGESTÄLLNINGAR OCH METOD	12
3.2	TYP AV STUDIE OCH LITTERATURSTUDIE	12
3.3	EMPIRISK DATAINSAMLING OCH TILLÄMPNING	13
3.3.1	<i>Sammanställning av samtal med nyckelpersoner</i>	13
3.3.2	<i>Checklista</i>	14
3.3.3	<i>Teknisk kravspecifikation</i>	14

Innehållsförteckning

3.3.4	<i>Modellering i Inventor</i>	15
3.3.5	<i>Testning via styrvärden (RPM)</i>	16
3.3.6	<i>Payoff-analys</i>	17
3.4	VALIDITET OCH RELIABILITET	18
3.5	ANALYSMETOD	19
4	Nulägesbeskrivning	20
4.1	ARBETSFLÖDE I OFFERTARBETE	20
4.2	PRODUKTBESKRIVNING – FRANCIS- OCH KAPLAN-TURBINER	21
4.3	TYPISK KRAVSPECIFIKATION	24
5	Analys	26
5.1	VAD I OFFERTARBETET KAN PARAMETRISERAS?	26
5.2	HUR SKA EN PARAMETRISK MODELL BYGGAS UPP I INVENTOR?	27
5.2.1	<i>Modellens uppbyggnad och parameterstyrning</i>	27
5.2.2	<i>Teoretisk tolkning av modellstruktur</i>	31
5.2.3	<i>Testning och analys av modellens variantrespons</i>	32
5.3	HUR MYCKET TID KAN SPARAS MED EN PARAMETRISK MODELL?	35
5.3.1	<i>Traditionell tidsåtgång och aktuell automatiseringsgrad</i>	35
5.3.2	<i>Återbetalningstid</i>	35
6	Diskussion och reflektion	36
6.1	ÅTGÄRDSMETODREFLEKTION	36
6.2	TROVÄRDIGHET OCH VALIDITET	36
6.3	EFFEKT OCH TILLÄMPBARHET	36
6.4	BEGRÄNSNINGAR I KOD OCH STRUKTUR	37
6.5	MÖJLIG VIDAREUTVECKLING	37
7	Slutsatser	38
7.1	SAMMANFATTADE SLUTSATSER	38
7.2	REKOMMENDATIONER FÖR PRAKTISK TILLÄMPNING	38
7.3	REKOMMENDATIONER FÖR VIDARE STUDIER	38
8	Referenser	40
9	Bilagor	41

FIGURFÖRTECKNING:

FIGUR 1, ÖVERSIKT AV TYPISKT ARBETSFLÖDE VID OFFERTARBETE FÖR NYTILLVERKNING. FIGUREN VISAR SEX HUVUDSAKLIGA STEG FRÅN KUNDFÖRFRÅGAN TILL LEVERANS AV TEKNISKT UNDERLAG.	21
FIGUR 2,KAPLAN-TURBIN MONTERAD I SIN VERTIKALA POSITION, MED SYNLIKA RÖRLIGA LEDSKENOR OCH LODRÄT AXEL.	22
FIGUR 3,FRANCIS-TURBIN I GENOMSKÄRNING. BILDEN VISAR TURBINENS INRE UPPBYGGNAD MED LÖPHJUL, SPIRALHUS OCH STYRSYSTEM.	23
FIGUR 4,SUGRÖR TILLHÖRANDE FRANCIS-TURBIN. BILDEN VISAR ÖVERGÅNGEN FRÅN CIRKULÄR TILL REKTANGULÄR TVÄRSEKTION, UTFORMAD FÖR ATT SÄKERSTÄLLA TRYCKÅTERVINNING OCH MINSKA RISK FÖR KAVITATION.	24
FIGUR 5,TVÄRSNITT AV SPIRALHUS DÄR MÅTTSTYRNING SKER GENOM PARAMETRAR SOM KOPPLATS TILL RPM.	27
FIGUR 6,UTDRAG UR ILOGIC-REGEL MED ARRAYER SOM KOPPLAR RPM OCH FULL HEAD TILL MOTSVARANDE GEOMETRI.	28
FIGUR 7,REGELSTYRNING I ILOGIC DÄR PARAMETER FÖR DRIFTLÄGE (FULL HEAD) AKTIVERAR RÄTT KODBLOCK.	29
FIGUR 8,INTERN TABELLSTRUKTUR MED MÅTTVÄRDEN FÖR OLIKA RPM-NIVÅER, BASERAD PÅ TIDIGARE PROJEKTDATA.	30
FIGUR 9,KODAVSNITT DÄR PARAMETRAR SOM D12 KOPPLAS TILL MÅTTMATRISER BASERADE PÅ TIDIGARE PROJEKTDATA.	31
FIGUR 10,SPIRALHUS VID 44 RPM – GENERERAD GEOMETRI VID LÄGSTA TESTADE VARVTAL.	32
FIGUR 11,SPIRALHUS VID 102 RPM – GEOMETRI VID HÖGSTA TESTADE VARVTAL.	33
FIGUR 12,LÖPHJUL VID 44 RPM – MÅTTSTYRD UTFORMNING VID LÅG DRIFT.	34
FIGUR 13,LÖPHJUL VID 102 RPM – AUTOMATGENERERAD GEOMETRI FÖR HÖGT VARVTAL.	34

TABELLFÖRTECKNING

TABELL 1,KOPPLING MELLAN FRÅGESTÄLLNINGAR OCH TEORETISKT RAMVERK.	4
TABELL 2, KOPPLING MELLAN FRÅGESTÄLLNINGAR OCH METOD.	12
TABELL 3,TIDSUPPSKATTNING FÖR OFFERTARBETE VID NYTILLVERKNING AV TURBIN.	18
TABELL 4,JÄMFÖRELSE MELLAN KAPLAN- OCH FRANCIS-TURBINER.	23

Innehållsförteckning

BILAGEFÖRTECKNING

BILAGA 1, INTERVJUSVAR FRÅN KONSTRUKTÖR (TURAB)	41
BILAGA 2,INTERVJUSVAR FRÅN TIDIGARE DELÄGARE PÅ (TURAB)	43
BILAGA 3,INTERVJUSVAR FRÅN TIDIGARE DELÄGARE PÅ (TURAB)	45
BILAGA 4, UTDRAK UR CHECKLISTA FÖR OFFERTARBETE VID NYTILLVERKNING AV TURBINER.	46
BILAGA 5,RELEVANTA UTDRAK UR TEKNISK KRAVSPECIFIKATION FRÅN KUNDPROJEKT	47

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

TURAB Turbin- & Regulatorservice AB är ett svenskt teknikföretag med verksamhet inom vattenkraft sedan 1965. Företaget är specialiserat på konstruktion, tillverkning och service av vattenturbiner, främst inom småskalig vattenkraft. TURAB:s verksamhet omfattar såväl nyproduktion som uppgradering av befintliga anläggningar, där varje projekt utgår från platsunika förutsättningar.

Då vattenflöde, fallhöjd och anläggningarnas fysiska begränsningar varierar kraftigt mellan olika kraftverk, krävs i regel att varje turbinlösning skraddarsys. Detta innebär att varje kundförfrågan leder till en ny teknisk lösning, där stor del av arbetet sker redan innan något avtal är tecknat. Bland annat behöver preliminära ritningar, tekniska underlag och konstruktionsdata tas fram för att kunden ska kunna bedöma förslaget.

För att hantera dessa tekniska krav används idag CAD-baserade lösningar, där varje turbinmodell anpassas utifrån kundens installationsförutsättningar. Inom detta sammanhang har parametrisk modellering blivit ett intressant verktyg, eftersom det möjliggör styrning av geometrier genom variabler och regler. Tekniken har fått stort genomslag i andra branscher där produktvariation är vanligt förekommande, och tillämpas även inom komplex teknisk försäljning.

1.2 Problembeskrivning

Offertarbetet för nyttillverkning av turbiner på TURAB är både omfattande och resursintensivt. För att svara på varje kundförfrågan behöver tekniska ritningar, modeller och underlag tas fram innan något avtal tecknats. En konstruktör lägger cirka 40 timmar per offert, och en offertansvarig ytterligare 40 timmar. Detta innebär att totalt 80 timmar investeras i arbete som i många fall inte leder till affär. Konsekvensen är att värdefull arbetstid går åt till osäkra uppdrag, vilket belastar verksamheten och minskar tillgängliga resurser för pågående projekt.

Utformningen av varje turbinkomponent sker manuellt, trots att liknande tekniska förutsättningar ofta återkommer mellan projekt. Det saknas idag ett strukturerat arbetssätt för att automatisera modellframtagningen eller återanvända tidigare lösningar. Resultatet är att samma uppgifter ofta görs om från grunden – vilket medför dubbelarbete, variation och ineffektivitet.

TURAB använder CAD-programmet Autodesk Inventor i sitt konstruktionsarbete. Programmet innehåller funktionalitet för att bygga parametriska modeller med hjälp av iLogic, vilket möjliggör regelstyrd geometri och automatisering. Dessa funktioner utnyttjas dock inte idag. Istället skapas varje offertlösning manuellt, vilket innebär att den tekniska potentialen i verktyget inte tas till vara.

Problemet ligger i att det saknas ett strukturerat, teknikorienterat arbetssätt som gör det möjligt att återanvända, variera och automatisera konstruktionsdata vid offertarbete – trots att tekniska förutsättningar för detta redan finns.

Utifrån detta formuleras arbetets syfte och undersökningsfrågor.

1.3 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är att undersöka hur delar av offertarbetet vid nytillverkning av turbiner på TURAB kan effektiviseras genom användning av parametriska modeller i Autodesk Inventor. Arbetet syftar till att identifiera vilka moment i processen som lämpar sig för parametrisering, beskriva hur en sådan modell kan byggas upp i praktiken, samt analysera vilka effekter detta kan få på tidsåtgång och arbetsflöde. Frågeställningar

1. Vad i offertarbetet kan parametriseras?
2. Hur ska en parametrisk modell byggas upp i Inventor?
3. Hur mycket tid kan sparas med en parametrisk modell?

1.4 Avgränsningar

Denna studie avgränsas till att undersöka hur parametriska modeller kan användas för att effektivisera offertarbetet vid nytillverkning av turbiner på TURAB. Arbetet fokuserar enbart på den interna tekniska tillämpningen, och omfattar identifiering av parametriserbara moment, uppbyggnad av modeller i Autodesk Inventor med iLogic, samt analys av hur detta påverkar tidsåtgång och arbetsflöde.

Studien omfattar uppbyggnaden och tillämpningen av kodstrukturer, inklusive modelluppbyggnad, regler och struktur för automatisk geometri Anpassning. Det praktiska resultatet består av färdiga modellprototyper kopplade till specifika komponenter, baserat på företagets befintliga offertunderlag.

Ekonomiska kalkyler, affärsstrategiska beslut, kundkommunikation, projektledning och externa leverantörskedjor ingår inte i studien. Arbetet behandlar inte heller den fullständiga implementationen i produktionsmiljö, utan fokuserar på analys, strukturering och teknisk uppbyggnad i CAD-miljön.

1.5 Disposition

Rapporten är uppbyggd för att på ett systematiskt sätt leda läsaren genom examensarbetets olika delar – från probleminentifiering till resultat och slutsatser. Efter denna inledande introduktion, där bakgrund, problemformulering, syfte, frågeställningar och avgränsningar redovisas, följer det teoretiska ramverket. I detta kapitel beskrivs tidigare forskning och teorier som är relevanta för studiens syfte och används senare i analysen.

Kapitel tre behandlar metodval och genomförande. Här redovisas och motiveras de metoder som använts för datainsamling och modellutveckling. Detaljer ges även om hur analysen genomförts och hur validitet och reliabilitet säkerställts.

Kapitel fyra innehåller en nulägesbeskrivning baserad på empiriska data, ritningar, checklistor och intervjuer. Informationen struktureras enligt MPRI-logiken: arbetsflöde, produktbeskrivning och kravspecifikation

I kapitel fem analyseras de insamlade resultaten i relation till frågeställningarna och det teoretiska ramverket. Här ges också en jämförelse mellan traditionellt offertarbete och parametergenererat arbete, inklusive en payoff-analys.

Introduktion

Kapitel sex presenterar konkreta åtgärdsförslag och diskuterar studiens resultat. Vidare förs en kritisk diskussion kring studiens tillförlitlighet och metodval.

Slutligen sammanfattas i kapitel sju studiens viktigaste slutsatser, implikationer och rekommendationer. Rapporten avslutas med förslag på fortsatt arbete och forskning inom området. Referenser och bilagor redovisas i separata kapitel i slutet av rapporten.

2 Teoretiskt ramverk

För att förankra studiens frågeställningar i det teoretiska ramverket presenteras nedan en översikt av vilka avsnitt i kapitel 2 som kopplar till respektive fråga.

Frågeställning	Kapitel	Beskrivning av teoriinnehåll
1. Vad i offertarbetet kan parametreras?	2.1, 2.3, 4.2	1. Begreppet parametrisk modellering och dess funktioner (2.1) 2. Struktur och moment i offertarbetets arbetsflöde (2.3.1) 3. Teknisk förståelse för komponenter som ska modelleras (4.2)
2. Hur ska en parametrisk modell byggas upp i Inventor?	2.2	1. Hantering av parametrar, begränsningar och beroenden (2.2.1) 2. Strukturering av modeller i Inventor (2.2.2) 3. Skapande av regler med iLogic (2.2.3) 4. Användargränssnitt via formulär (2.2.4)
3. Hur mycket tid kan sparas med en parametrisk modell?	2.4	1. Effektivitetsvinster vid automatisering (2.4.1) 2. Minskad arbetsbelastning genom digitalisering (2.4.2) 3. Förbättrad noggrannhet och minskad felrisk (2.4.3)

Tabell 1, Koppling mellan frågeställningar och teoretiskt ramverk.

2.1 Parametrisk modellering: principer och begrepp

Parametrisk modellering är en metod inom datorstödd konstruktion (CAD) där geometri och dimensioner styrs av definierade parametrar. En parameter kan exempelvis vara en längd, vinkel eller radie som automatiskt uppdaterar modellens utformning vid ändring. Metoden används för att effektivisera arbetet i konstruktioner där variationer ofta förekommer men grundstrukturen är återkommande.

Parametrars roll i CAD-miljö

I Autodesk Inventor byggs 3D-modeller upp genom en kedja av skisser, funktioner (features) och geometriska begränsningar som tillsammans definierar modellens form och struktur. Varje mått – såsom längd, radie eller vinkel – kan kopplas till en parameter, vilket gör det möjligt att automatiskt uppdatera modellen vid förändringar. Begränsningar används för att upprätthålla stabila relationer mellan geometrier, exempelvis parallellitet, rät vinkel eller centrerings. När en parameter justeras, påverkas alla relaterade objekt, vilket gör tekniken särskilt lämplig för konstruktioner där formen upprepas men måtten varierar.

Tillämpningsområden

Parametrisk modellering är vanligt förekommande inom tekniska miljöer där samma konstruktioner återkommer med varierande mått. Det inkluderar tillämpningar såsom offertarbete, där tekniska underlag behöver tas fram snabbt utifrån kundspecifika krav. Genom att koppla mått till styrande parametrar kan ritningar, geometrier och beräkningar anpassas automatiskt, vilket minskar den manuella arbetsinsatsen och ökar repeterbarheten.

Fördelar

Parametrisk modellering erbjuder flera tekniska och organisatoriska fördelar:

1. Effektiv ändringshantering: Anpassningar sker genom justering av parametrar, utan att modellen behöver byggas om från grunden.
2. Hög repeterbarhet: Samma modellstruktur kan användas i flera projekt med varierande krav.
3. Minskad felrisk: Inbyggda regler och beroenden minimerar risken för manuella misstag.
4. Bevarad designintention: En tydlig struktur gör att modellen bibehåller sin funktion och tolkning även vid vidareutveckling eller personalväxling.

Utmaningar och begränsningar

Trots sina fördelar ställer parametrisk modellering höga krav på planering och struktur. Munford[1]varnar för att alltför komplexa beroendekedjor kan göra modellen instabil vid ändringar. Aamodt[2]lyfter att modeller utan tydlig dokumentation lätt blir personberoende och svåra att underhålla över tid.

Vanliga utmaningar:

1. Planeringskrav: En väldefinierad struktur behövs från början för att modellen ska fungera långsiktigt.
2. Känslighet för komplexitet: Djupt kopplade features kan skapa fel vid ändringar.
3. Hög startinsats: Initialt arbete är omfattande innan återanvändning ger tidsbesparing.
4. Inläring: Kräver kunskap i både CAD och regelstyrning, t.ex. iLogic.

Tillämpning i andra branscher

Parametrisk modellering är inte begränsad till en viss sektor. Aamodt [2]visar hur byggbranschen använder parametrar och regler för att effektivisera projektering. Gast och Gembarski [3]beskriver flexibel konfigurering inom stålkonstruktion, och Munford [1]visar hur metoden förbättrar struktur och kvalitet i mekanisk komponentdesign.

Dessa tillämpningar visar att parametrisk modellering är en etablerad metod i flera teknikintensiva branscher, särskilt där konstruktioner behöver anpassas och upprepas med hög precision.

Vetenskapligt teoretiskt stöd

Flera forskare har lyft fram vikten av struktur, återanvändning och regelstyrning inom parametrisk modellering – aspekter som är centrala i detta examensarbete.

Munford [1]ger praktiska riktlinjer för hur robusta modeller bör byggas i Autodesk Inventor. Han betonar vikten av platt beroendestruktur, tydlig namngivning av parametrar och undvikande av överdriven komplexitet. Dessa

rekommendationer ligger till grund för den uppbyggnad som används i detta arbete, där alla beroenden organiseras i matrisform och regler kopplas till fasta nyckelvärden.

Aamodt [2] visar hur parametrisk modellering effektiviserar projekteringsflöden i byggbranschen, särskilt vid revisioner och anpassning av komponenter med likartad geometri. Hon lyfter behovet av mallar och systematik för att minska dubbelarbete, något som också är relevant i offertarbetet för tekniska produkter.

Gast och Gembarski [3] kopplar parametrisk modellering till ett bredare systemtänkande. De beskriver hur parametrar, regler och användarstyrda val tillsammans bildar kunskapsbaserade konfigurationssystem, där logik och geometri samverkar. Genom att använda if-then-else-regler och formulär i iLogic följer detta examensarbete exakt den typ av struktur som Gembarski förespråkar, där modellen bygger både geometri, regler, villkor och interaktiv styrning i ett sammanhängande system.

Tillsammans utgör dessa forskningsbidrag en vetenskaplig grund för det arbetssätt som utvecklas i denna studie.

Koppling till kunskapsbaserad modellering

Parametrisk modellering kan i vissa tillämpningar ses som en del av ett bredare koncept: Knowledge-Based Engineering (KBE). Inom KBE integreras tekniska regler, villkor och domänkunskap direkt i CAD-modellen, vilket gör att modellens beteende inte bara styrs av geometri utan även av logik och beslut.

I Autodesk Inventor möjliggör verktyget iLogic en sådan struktur genom att använda kodlogik baserad på if-then-else-regler, variabler, parameterträd och formulär. Detta gör det möjligt att bygga modeller som reagerar på användarens indata och automatiskt anpassar geometri, aktiverar komponenter eller justerar mått efter definierade villkor.

Gast och Gembarski [3] beskriver hur denna typ av modellering kan struktureras med hjälp av metodiken CommonKADS, som används för att bygga upp kunskapsbaserade system. Modellen delas in i lager för användarinput, geometrisk kontroll och komponentstruktur, där varje nivå styrs av definierade beroenden och regler. Det arbetssätt som tillämpas i detta examensarbete följer samma principer: modeller byggs med styrande parametrar, interaktiva formulär och automatiserade regler – vilket tillsammans skapar ett konfigurerbart och kunskapsbärande system.

I nästa kapitel analyseras offertprocessens struktur och vilka arbetsmoment som lämpar sig för parametrisering i den typ av teknisk miljö som beskrivs här.

2.2 Modelluppbyggnad i Autodesk Inventor med iLogic

Detta kapitel förklarar hur parametriska CAD-modeller byggs upp och används i Autodesk Inventor med hjälp av iLogic. Kapitlet bygger vidare på den teoretiska grunden i föregående avsnitt och beskriver hur principerna omsatts i praktiken. Modellen i detta examensarbete styrs av regler och parametrar kopplade till tekniska nyckelvärden, vilket möjliggör en automatiserad och

repetierbar konstruktion. Metodiken är särskilt anpassad för offertarbete där många liknande konfigurationer krävs.

2.2.1 Parametrar, constraints och relationer

Parametrisk modellering innebär att en 3D-modell styrs av definierade variabler såsom längd, bredd, höjd, radier och andra dimensioner. När en parameter ändras, uppdateras hela modellen automatiskt, vilket gör tekniken idealisk för konstruktioner med återkommande variationer.

I Autodesk Inventor definieras en modell genom parametrar som styr mått, vinklar, radier eller positioner. Dessa parametrar används för att automatiskt uppdatera modellen när ett värde ändras. Constraints (begränsningar) används för att hålla geometrier på plats och för att bevara form och funktion vid justeringar.

Exempel på beroendetyper i modellen:

1. Parametrar styr skissernas geometri
2. Skisser ligger till grund för features som extruderingar, hål, eller fillets
3. Features relateras till varandra inom och mellan komponenter

Munford [1] framhåller att en välstrukturerad modell från början minimerar risken för fel, särskilt vid ändringar i komplexa modeller

2.2.2 Strukturering av modeller

Modellen är uppbyggd med tydlig uppdelning mellan:

1. Indata (t.ex. RPM och specialfallstyp)
2. Härledda beräkningar (t.ex. tvärsnittsarea)
3. Utdata (mått som används i 3D-geometri)

Inventors Parameter Table används för att hantera och strukturera dessa parametrar. Parametrarna är organiserade i matrisform där varje kombination av RPM (12 fasta värden) och Typ (1–4) styr valda mått.

En sådan struktur gör det möjligt att:

1. Upprepa processen för nya kunder
2. Minimera fel
3. Förenkla underhåll och översikt

Strukturering i form av tydliga grupper och hierarkier rekommenderas också i Munford [1] och Aamodt [2] som båda betonar vikten av kontroll över beroenden för att undvika instabilitet

2.2.3 Regler och logik i iLogic

iLogic är ett regelbaserat programmeringsverktyg integrerat i Autodesk Inventor, som möjliggör att logik kopplas direkt till modellens parametrar. Verktöget använder ett Visual Basic-liknande skriptspråk där konstruktören kan definiera hur modellen ska reagera på olika indata. Det görs med hjälp av villkorsstyrda strukturer, exempelvis if-then-else-regler.

I detta arbete valdes rpm (kundens önskade varvtal) som styrparameter. Denna variabel återkommer i samtliga offertprojekt, påverkar flera centrala mått i turbindesignen och kan enkelt uttryckas som en diskret, styrande variabel i logikstrukturen. I praktiken innebär detta att olika rpm-värden aktiverar specifika måttuppsättningar i modellen. Turabs interna variantparameter (Typ) används för att hantera särskilda konfigurationer inom samma rpm-grupp.

Syftet med denna avgränsning har varit att bygga upp en robust och skalbar modellstruktur, där rpm fungerar som ett första testfall "pilotparameter" för regelstyrd geometri Anpassning. Fler variabler kan implementeras successivt vid framtida vidareutveckling.

Gast och Gembarski [3] betonar att regelstyrning av detta slag – särskilt med koppling till användarinmatning – är en viktig del av kunskapsbaserad modellering. Det möjliggör flexibel konfigurering, minskar behovet av manuell omritning och förbättrar modellens stabilitet vid upprepade variationer.

2.2.4 Formulär och användargränssnitt

I den aktuella modellen har inga iLogic Forms använts. Istället sker inmatning av parametrar, såsom RPM och fallhöjd, direkt i Inventors parameterfönster. Värdena matas in manuellt, vilket aktiverar de iLogic-regler som styr modellens uppbyggnad. Denna metod valdes för att möjliggöra direkt kontroll och tydlig spårbarhet vid modelljustering.

Formulären kan innehålla:

1. Värdefält
2. Dropdown-menyer med fördefinierade val
3. Begränsningar och varningar för ogiltiga kombinationer

Användarstyrning via formulär är ett centralt verktyg i detta sammanhang. Genom att koppla formulärval till definierade regler kan modellen reagera direkt på användarens inmatning. Gast och Gembarski [3] visar hur detta tillvägagångssätt kan göra komplexa modeller mer tillgängliga och minska risken för fel vid manuell hantering.

2.3 Offertflöde och parametreringsmöjligheter

2.3.1 Arbetsflöde i offertarbetet

Offertprocessen för nytillverkning av turbiner består av flera tekniska delmoment. Trots att ingen beställning ännu är lagd krävs omfattande tekniskt arbete, där konstruktörer och tekniskt ansvariga tar fram modeller, ritningar och dimensioneringsunderlag. Arbetet utförs manuellt och utgår ofta från tidigare konstruktioner, men kräver ändå omfattande justeringar och anpassningar för varje nytt projekt. Detta medför hög arbetsinsats och betydande tidsåtgång – även i de fall där offerten senare inte leder till affär.

Processen inleds med att kunden skickar in en teknisk specifikation som innehåller grundläggande förutsättningar för installationen, såsom nettofallhöjd, vattenflöde, önskat varvtal (rpm), anslutningsmått, utrymmesbegränsningar och krav på verkningsgrad. Detta bekräftas både i intervjuerna och i den

tekniska specifikationen som analyserats, där kunden specificerar att leverantören ska ta fram förslag på löphjulsdiameter, sugrörsform, axelplacering och andra nyckelparametrar.

När underlaget är mottaget, analyseras installationsförutsättningarna och en preliminär turbinlösning föreslås. Valet mellan t.ex. Francis eller Kaplan-turbin styrs i detta skede av fallhöjd, flöde och kavitationsrisk. Därefter initieras den interna tekniska projekteringen där ritningar, modeller och beräkningar tas fram. Enligt intervjuaren fördelas cirka 80 timmar mellan konstruktör och offertansvarig i detta arbete, där konstruktören ofta börjar med att dimensionera löphjul, spiralhus och sugrör manuellt utifrån tidigare erfarenheter.

Checklistan för nytillverkningsofferter, som används av företaget, innehåller ett antal återkommande moment. Dessa inkluderar bland annat analys av vattennivåer (ÖVY/NVY), bestämning av turbinplacering, val av generator, ritningsframtagning för bygganpassning, samt justering av offerttext efter teknisk lösning. Flera av dessa uppgifter upprepas från offert till offert, även om grunddata skiljer sig åt. I praktiken utförs varje offert som ett unikt projekt, trots att stora delar av innehållet följer liknande mönster.

Konstruktören nämner att många mått återkommer men matas in manuellt för varje projekt. Exempelvis hanteras löphjuls mått genom att jämföra med gamla cad-modeller och justera värden – istället för att använda fördefinierade modeller. Detta medför risk för inkonsekvenser och slöseri med tid, särskilt i de fall där kunden senare tackar nej till offerten.

Avslutningsvis granskas hela offertförslaget internt, där både tekniska och ekonomiska aspekter vägs in. Färdiga CAD-underlag exporteras i form av ritningar, vilka bifogas offerten till kund.

Sammantaget visar både intervjuerna Bilaga 1, checklistan Bilaga 4 och den externa specifikationen att offertarbetet präglas av återkommande strukturer, manuella moment och stora krav på snabb, tillförlitlig anpassning. Detta utgör en tydlig grund för att identifiera vilka delar som skulle kunna struktureras och automatiseras genom parametrisk modellering.

2.3.2 Identifiering av parametriserbara moment

Utifrån analysen av offertflödet har ett antal återkommande arbetsmoment identifierats som särskilt lämpade för parametrisering. Urvalet baseras på tre kriterier:

1. momentet förekommer i princip i varje offert.
2. det bygger på indata som kan uttryckas som numeriska värden eller logiska val.
3. det påverkar direkt utformningen av turbinkomponenter i CAD-miljön.

Flera av dessa moment framträder tydligt i både checklistan för nytillverkningsofferter, intervjuerna och tekniska specifikationer. Ett exempel är varvtalet, som anges i alla kundförfrågningar och används som grund för att dimensionera komponenter såsom löphjul, axel och spiralhus. Enligt konstruktören utgår TURAB:s konstruktion från tolv standardiserade

enhetsvarvtal, vilket gör parametern särskilt lämplig som styrvariabel i en regelbaserad modell.

Andra moment som ofta kräver teknisk anpassning i offertarbetet är sugrörslängder, löphjulsdiameter, axelhöjd och turbinplacering i förhållande till byggnadens höjd. Dessa påverkas av fallhöjd, vattenflöde och byggnadens utrymme. I checklistan listas dessa moment som återkommande uppgifter som måste justeras vid varje offert.

För att hantera specialfall används även interna typer eller varianter i vissa modeller, där geometrier justeras efter särskilda tekniska behov. Ett exempel är en parameter kallad "Typ", som styr alternativa utföranden eller förstärkta geometrier beroende på krav i projektet.

Sammanfattningsvis har följande moment identifierats som parametriserbara:

1. RPM (varvtal)
2. Intern typvariant
3. Löphjulsdiameter och form
4. Sugrörshöjd och vinkel
5. Axelhöjd och byggnadsmått

Dessa moment är direkt kopplade till tekniska krav i förfrågningsunderlag, påverkar CAD-modellens utformning och kan med fördel styras via parametrar och regler. Hur dessa används praktiskt i modelleringen behandlas i nästa avsnitt.

2.3.3 Teknisk validering i CAD-miljö

Bland de moment som identifierats som lämpliga för parametrisering valdes rpm (varvtal) som styrparameter för det praktiska modellbygget i detta examensarbete. Urvalet baserades på att rpm förekommer i samtliga kundspecifikationer, påverkar flera nyckelmått i turbindesignen och lämpar sig väl för reglerad styrning i CAD-miljö. Dessutom kan rpm definieras som en diskret variabel, vilket förenklar modellens struktur och minimerar risken för oönskade beroenden.

För att validera den tekniska genomförbarheten utvecklades en testmodell i Autodesk Inventor, där parametrar kopplades till geometri via iLogic-regler. Modellen byggdes upp med en intern matrisstruktur som innehåller fasta värden kopplade till tolv specifika rpm-nivåer. Varje rpm-värde aktiverar ett särskilt regelblock som justerar definierade mått, till exempel löphjulsdiameter, axelplacering eller spiralhusets bredd.

Regelstyrningen implementerades med hjälp av if-then-else-struktur, där rpm används som indata via formulär. Modellens parametrar kopplades direkt till dessa regler, vilket gör det möjligt att anpassa geometrin utan manuell justering i skisser eller features. På detta sätt etablerades ett systematiskt samband mellan en teknisk specifikation (kundens önskade rpm) och modellens dimensioner.

I samband med modelleringen verifierades att modellen reagerar korrekt på valda rpm-värden och uppdaterar mått i enlighet med de definierade reglerna. Även om modellen ännu är begränsad till en komponentgrupp (t.ex. löphjul), visar testet att det är tekniskt möjligt att styra centrala delar av geometrin via parametrar i Inventor med iLogic.

Parametrar som sugrörshöjd, typvarianter och axelhöjd har också analyserats i avsnitt 2.3.2, men har inte implementerats i den praktiska modellen. Detta beror på att arbetet fokuserar på att bygga upp en strukturell grund med rpm som pilotparameter. Det utesluter inte att modellen kan utökas med fler parametrar i framtida utvecklingsarbete.

2.4 Effektivitetsvinster vid parametrisk modellering

Effektivitet är en avgörande faktor i offertarbete för tekniskt avancerade produkter, särskilt i fall där konstruktion måste utföras innan något affärsavtal är tecknat. I dessa sammanhang kan parametrisk modellering bidra till minskad arbetsbelastning, förbättrad återanvändning av tekniska lösningar och snabbare omställning vid förändrade förutsättningar. Nedan följer en genomgång av de vinster som lyfts fram i litteraturen.

2.4.1 Minskad manuell arbetsbelastning

Parametrisk modellering gör det möjligt att ersätta många manuella moment med regelstyrd logik. Enligt Aamodt [2] innebär detta att konstruktörer inte längre behöver göra omritningar från grunden för varje nytt projekt, utan istället kan återanvända en grundmodell där mått och egenskaper styrs av indata. Detta minskar tiden som krävs för upprepade arbetsuppgifter och frigör resurser till värdeskapande aktiviteter.

2.4.2 Automatiserad förändringshantering

I offertarbete förekommer ofta sena förändringar i specifikationer, exempelvis justeringar i varvtal, byggnadens dimensioner eller prestandakrav. Munford [1] framhåller att robusta parametriska modeller möjliggör omedelbara uppdateringar genom att användaren bara ändrar en parameter – varpå hela modellen justeras automatiskt. Denna förmåga minskar inte bara tidsåtgången för ändringar, utan minskar också risken för fel som kan uppstå vid manuell justering.

2.4.3 Ökad repeterbarhet och kvalitet

Ett av de främsta argumenten för parametrisk modellering är dess repeterbarhet. Gast och Gembarski [3] betonar att regelstyrda modeller skapar förutsättningar för konsekvent design i återkommande uppdrag. Det minimerar risken för individuella tolkningar, förbättrar dokumentationens struktur och gör det lättare att genomföra granskningar och förbättringar över tid. För offertarbete innebär detta att tekniska förslag kan tas fram med jämn kvalitet och tydlig spårbarhet.

Sammanfattningsvis visar dessa exempel att parametrisk modellering erbjuder konkreta möjligheter till tidsbesparing, förbättrad precision och minskad arbetsbelastning i offertarbetets tidiga faser. I detta examensarbete används dessa teoretiska fördelar som grund för att senare analysera faktisk effekt i jämförelse med traditionellt arbetssätt.

3 Metod

3.1 Koppling mellan frågeställningar och metod

För att förankra studiens frågeställningar i valda metoder presenteras nedan en översikt av hur varje fråga kopplas till specifika metodinslag

Frågeställning	Metoder	Syfte med metoden
1. Vad i offertarbetet kan parametreras?	3.3.1 Semistrukturerade intervjuer. 3.3.2 Analys av offertchecklista. 3.3.3 Genomgång av teknisk specifikation.	Att identifiera återkommande arbetsmoment och tekniska val som lämpar sig för parametrering.
2. Hur ska en parametrisk modell byggas upp i Inventor?	3.3.4 Modellering i Autodesk Inventor. 3.3.5 Testning via indata (rpm).	Att praktiskt undersöka hur parametrar och regler kan kopplas till geometri i ett fungerande CAD-flöde.
3. Hur mycket tid kan sparas med en parametrisk modell?	3.3.6 Enkel payoff-beräkning. Underlag från 3.3.1, 3.3.5.	Att utvärdera hur mycket arbete som automatisering sparar jämfört med traditionell metod, både kvantitativt och kvalitativt.

Tabell 2, Koppling mellan frågeställningar och metod.

För att besvara studiens första frågeställning har intervjuer, checklistor och en teknisk specifikation analyserats. Dessa källor identifierar återkommande moment i offertarbetet och ger grund för att avgöra vilka delar som kan parametreras i CAD-miljö.

För att besvara den andra frågeställningen har en parametrisk modell byggts upp i Autodesk Inventor, med regler skapade i iLogic. Modellen testades med tolv fasta rpm-värden som styrde geometriska mått i modellen. Detta praktiska arbete ger insikt i hur modellen kan konstrueras tekniskt.

För att besvara den tredje frågeställningen har en jämförelse genomförts mellan manuellt och automatiserat arbetssätt. Tidsuppskattningar baserade på intervjuer ställs mot exekveringstid i modellen. Med hjälp av payoff-analys utvärderas när automatiseringen blir lönsam.

3.2 Typ av studie och litteraturstudie

Detta examensarbete är en tillämpad fallstudie med designbaserat upplägg och inslag av experiment. Studien har genomförts i nära samarbete med företaget TURAB och syftar till att utveckla och undersöka en teknisk lösning på ett identifierat problem i deras offertprocess. Arbetet bygger på flera metoddelar: dels insamling av praktiska data från riktiga offertarbeten, dels konstruktion och test av en parametrisk prototyp i CAD-miljö. Modellen testas med definierade indata för att kontrollera att den fungerar korrekt.

Som grund för modellens uppbyggnad har även tekniska kundspecifikationer, interna checklistor och äldre CAD-underlag från TURAB analyserats. Dessa har visat vilka parametrar som är viktiga att styra, och hur geometri varierar mellan olika projekt.

Datainsamlingen har bestått av en semistrukturerad intervju med en erfaren konstruktör, en intern offertchecklista samt en teknisk kravspecifikation från ett genomfört projekt. Dessa källor har hjälpt till att hitta återkommande viktiga beslutspunkter för parametrering. Under modellens uppbyggnad diskuterades dessutom tekniska lösningar vid flera tillfällen med handledare från TURAB. Dessa samtal dokumenterades som reflektiva anteckningar och återges i Bilaga 3.

Litteraturstudien genomfördes tidigt i arbetet och löpte parallellt med det praktiska. Sökningar gjordes främst via Google Scholar och Autodesk Developer Network med nyckelord som *parametric modeling*, *iLogic Inventor*, *design automation*, *KBE systems* och *offertprocess CAD*.

Urvalet omfattar både vetenskapliga artiklar och tillämpningsnära material. Munford [1] bygger på praktisk erfarenhet och har fungerat som stöd för modellstruktur i Inventor. Aamodt [2] och Gast och Gembarski [3] bidrar med ett mer forskningsbaserat perspektiv på parametrisk modellering.

Litteraturen har använts för att skapa det teoretiska ramverket i kapitel 2. Den har också varit grund för praktiska beslut, till exempel hur parametrar organiseras, hur regler struktureras i iLogic och hur modellen testas med styrvärden.

Genom att kombinera etablerad teori med praktiskt arbete i en verklig industrimiljö får studien en tydlig koppling mellan forskning och nytta. Det gör att resultaten blir trovärdiga och användbara för liknande framtida projekt.

3.3 Empirisk datainsamling och tillämpning

3.3.1 Sammanställning av samtal med nyckelpersoner

För att förstå återkommande tekniska moment i offertarbetet har samtal förts med två nyckelpersoner inom företaget. Fokus låg på att få insikt i både konstruktionens praktiska genomförande och hur offertens olika delar hanteras från teknisk synpunkt. Samtalen fördes på plats i företagets lokaler och varade mellan 30 och 45 minuter. Anteckningar fördes under respektive tillfälle, och innehållet har därefter sammanställts i en tematiskt ordnad form.

Det första samtalet behandlade konstruktionstekniska uppgifter såsom återkommande CAD-moment, nyckeldimensioner och modellval. Det andra fokuserade på arbetsgången vid offertframtagning, dokumentflöde och kundens specifikationer. Innehållet från båda samtalen låg till grund för att identifiera moment som återkommer i olika projekt och som lämpar sig för parametrering i CAD-miljö.

Denna information användes direkt vid uppbyggnaden av den parametriska modellen i Autodesk Inventor, och utgjorde ett av huvudunderlagen för vilka regler och styrparametrar som implementerades.

3.3.2 Checklista

Som ett stöd för att kartlägga återkommande moment i offertarbetet analyserades en intern checklista avsedd för nytillverkning av turbiner. Checklistan används inom företaget som en vägledning vid upprättande av offerter och innehåller både tekniska och administrativa kontrollpunkter.

Analysen genomfördes i syfte att identifiera de arbetsmoment som är systematiskt återkommande och därmed möjliga att parametrisera i CAD-miljö. Checklistan gav inblick i vilka tekniska data som normalt efterfrågas (såsom brutto- och nettofallhöjd, kundritningar, turbindimensionering och komponentval) samt hur offertarbetet struktureras i praktiken – från ritningsgranskning till prisberäkning.

Moment i checklistan som beaktades särskilt i metodarbetet inkluderar:

1. Fastställande av tekniska nyckelvärden som ÖVY, NVY och nettofallhöjd
2. Granskning av kundritningar och bedömning av anpassning till befintlig byggnad
3. Dimensionering av turbintyp och beräkning av kavitationsrisker
4. Inhämtning och hantering av teknisk input från interna och externa aktörer
5. Tydliggörande av återkommande arbetsmoment kring offertens struktur, beräkning och presentation

Denna strukturerade genomgång bidrog till att urskilja vilka dimensioner, dataflöden och konstruktionselement som lämpar sig för parametrisk styrning. Informationen från checklistan låg till grund för modellens utformning och styrprinciper i Autodesk Inventor.

Ett urval av checklistans tekniska kontrollpunkter som använts i detta arbete presenteras i Bilaga 4.

3.3.3 Teknisk kravspecifikation

Som en del av metodarbetet analyserades en fullständig teknisk kravspecifikation från ett anonymiserat kundprojekt inom småskalig vattenkraft. Syftet med genomgången var att identifiera vilka konstruktions- och prestandakrav den parametriska modellen behöver kunna förhålla sig till för att vara tillämpbar i verkligt offertarbete. Informationen användes för att definiera rimliga parametriska gränsvärden och säkerställa att modellen konstrueras inom ramar som är tekniskt relevanta för branschen.

Följande krav från specifikationen har inte legat till grund för aktiv dimensionering i modellen, men har beaktats som riktlinjer för att säkerställa att konstruktionen följer företagets etablerade arbetssätt:

1. Nettofallhöjd och flöde: Specifikationen anger till exempel 5,6 m nettofallhöjd och 14,5 m³/s nominellt flöde. Även om dessa exakta

- värden inte används direkt, har motsvarande värdeintervall legat till grund för val av styrparametrar och dimensioneringslogik i modellen.
2. Servomotor och styrsystem: Krav på svarstider för servon – 200 ms för ledskenor och 400 ms för löphjul – har inte testats i modellen, men konstruktionen är byggd utifrån beprövade lösningar som normalt uppfyller dessa krav.
 3. Toleranser och ytkvalitet: Krav som $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$ och glapp $< 0,3 \text{ mm}$ finns inte som regler i modellen, men parametrarna som används ligger inom standardintervall som TURAB vanligtvis tillämpar i motsvarande konstruktioner.
 4. Kritisk frekvens: Kravet att den första kritiska frekvensen ska överstiga runaway speed med minst 25 % har inte beräknats eller simulerats, men modellen är baserad på geometrier och varvtal där detta krav normalt klaras.
 5. Materialstandard och livslängd: Specifikationen hänvisar till standarder som EN 10083 och ISO 683-1, samt krav på 100 000 timmars livslängd. Dessa har inte specificerats i modellen, men beaktats indirekt genom att konstruktionen följer etablerade dimensioneringsprinciper.
 6. Geometriska mått och monteringsdata: Mått som löphjulsdiameter, antal skovlar och monteringspunkter har parametriserats i modellen för att möjliggöra flexibla designvarianter. Dessa är direkt kopplade till återkommande kundspecifikationer i offertarbetet.

Ett urval av specifikationens tekniska krav som beaktats i detta arbete återges i Bilaga 5.

3.3.4 Modellering i Inventor

Den parametriska modellen byggdes från grunden i Autodesk Inventor, med syftet att effektivisera offertarbetet genom att skapa ett automatiserat sätt att generera geometrier baserat på styrdata. Arbetet omfattade både konstruktion av turbindelar och utveckling av kodstruktur i iLogic.

Modellens uppbyggnad

Två komponenter modellerades: löphjul och c-spiral, båda kopplade till en Francis-turbin. Geometrin delades upp i fasta och styrbara sektioner. Exempelvis styrs spiralens kurvform och inre sektioner av regler som påverkar dimensioner och placering. En snittvy visar hur det inre vattenflödet är omslutet av spiralformen.

Varje mått i modellen kopplades till en bokstavsidentifierad parameter. Dessa parametrar organiserades i tabeller som bygger på TURABs standarddesign. Modellen strukturerades för att hantera två driftslägen – ett standardläge och ett så kallat Full Head-läge – där varje läge innehåller 20 sektioner per komponent.

Styrning via parametrar

Modellen styrs främst av två användarparametrar: Varvtal (RPM) och Full Head (aktiv/inaktiv). Dessa matas in i parameterfönstret i Inventor. I bakgrunden

aktiverar indata en kodstruktur som automatiskt hämtar rätt dimensioner från en uppsättning regler.

Alla centrala mått (till exempel axelhöjd, tjocklek) är kopplade till indata via arrayer och villkorsstyrning i iLogic. Beroende på vald kombination av RPM och driftläge anpassas modellen automatiskt. Exempelvis styrs löphjulets diameter och antalet skovlar direkt av dessa indata.

Kodstruktur

Kodstrukturen i modellen bygger på if–then–else-satser och arrayer där varje kombination av varvtal (RPM) och typ (Typ) kopplas till ett specifikt måttpaket. Detta möjliggör automatisk geometrianpassning utan manuell redigering och ger hög återanvändbarhet i offertarbetet.

Exempelvis styrs tre mått – N, O och P – av indata i form av RPM och Typ, enligt följande kodblock i iLogic:

```
If RPM = 78 Then
  If Typ = 1 Then
    N(11) = 147
    O(11) = 55.82
    P(11) = 29.6
  ElseIf Typ = 2 Then
    N(11) = 160
    O(11) = 55.43
    P(11) = 27.2
  ElseIf Typ = 3 Then
    N(11) = 143
    O(11) = 54.96
    P(11) = 24.3
  ElseIf Typ = 4 Then
    N(11) = 117
    O(11) = 54.22
    P(11) = 19.9
  End If
End If
```

Varje RPM-värde motsvarar en rad i en intern matris, och typval styr vilket värde som hämtas till respektive mått. Koden exekveras i iLogic och är direkt kopplad till geometrins parametrar.

Regler för material, ytbehandling och exportfunktioner har inte inkluderats, då fokus i detta arbete ligger på de geometriska egenskaper som påverkar offertens tekniska innehåll.

3.3.5 Testning via styrvärden (RPM)

Efter att modellen byggts upp testades dess funktionalitet i Autodesk Inventor med olika kombinationer av varvtal (RPM) och driftläge (Full Head). Syftet var att verifiera att inmatade värden genererade korrekt geometri och att modellen reagerade stabilt på variationer.

Testerna omfattade realistiska fall, bland annat RPM = 44, 86 och 102 i både standardläge (Full Head = 0) och högbelastningsläge (Full Head = 1). Vid varje test kontrollerades att rätt mått aktiverades, att modellen uppdaterades utan felmeddelanden och att iLogic-reglerna fungerade som avsett.

Modellen uppvisade förväntat beteende i de flesta fall, men vissa inmatningar orsakade instabilitet – särskilt vid gränsvärden där flera mått påverkas samtidigt. Dessa instabiliteter visade sig som olösta mått i CAD-modellen, markerade i rosa. Det indikerar att vissa beroendestrukturer är känsliga och kan behöva förstärkas eller förenklas.

Sammanfattningsvis visar testningen att modellen är tekniskt genomförbar och fungerar som koncept för regelstyrd variantgenerering. Dock krävs ytterligare stabilitetsoptimering för att säkerställa robust funktion i samtliga konfigurationer.

3.3.6 Payoff-analys

För att illustrera omfattningen av offertarbetet i sin traditionella form presenteras nedan en översikt av arbetsflödet från första kundkontakt till färdig leverans av tekniskt underlag. Tidsuppskattningarna bygger på faktiska projekt, samtal med erfaren konstruktör och observationer av ordinarie arbetssätt.

Steg	Huvudmoment	Delmoment	Uppskattad tid
1. Förfrågan	Mottagning och analys av underlag	– Text och kravspecifikation – Fallhöjd, flöde, vattennivåer	3 h
2. Diagram & val	Tekniska val och dimensionering	– Välj löphjul – Välj varvtal – Beräkna effekt och verkningsgrad – Sug-/tryckhöjd	3 h
3. Beräkningar	Mekanisk och funktionell analys	– Krafter vid drift och rusning – Axel och turbin – Egenfrekvens – Spänningar	3 h
4. Referenssökning	Sökning av liknande projekt	– Leta upp lämplig referensmodell – CAD-granskning	3 h
5. CAD-arbete	Modellering i Inventor	– Rita huset – Lyft in referensmodell – Anpassa modell – Anpassa hus – Skapa ritning	25 h

6. Leverans	Framtagning av underlag till offertansvarig	– Exportera ritningar – Generera diagram och bilder – Dokumentera kraftdata till generator	3 h
Totalt			40 h

Tabell 3, Tidsuppskattning för offertarbete vid nytillverkning av turbin.

För att undersöka hur mycket av detta arbete som kan automatiseras har en parametrisk CAD-modell byggts upp i Autodesk Inventor med regler programmerade i iLogic. Utvecklingsarbetet omfattade både teknisk struktur och kodlogik och uppgick till totalt cirka 192 timmar. Två komponenter har modellerats: ett löphjul och en c-spiral, vilka tillsammans utgör centrala delar av en Francis-turbin. Modellen är konfigurerbar via indata såsom varvtal (RPM) och driftläge (Full Head), och styr geometri via arrayer och logiska regler.

I nuläget omfattar modellen endast en delmängd av offertflödets komponenter. De moment som automatiseras motsvarar delar av steg 4 (referenssökning) och steg 5 (CAD-modellering) i Tabell 3. Den faktiska besparingen per offert är därför begränsad till de komponenter som täcks av modellen. Enligt bedömning i samråd med konstruktör motsvarar detta cirka 8–10 timmar per offert.

För att analysera investeringens nytta tillämpas Payback Period – en väletablerad metod inom kapitalbudgetering som anger hur lång tid det tar för en investering att återbetala sig genom löpande besparingar. Garrison et al. [7] definierar modellen som ett enkelt beslutsstöd, särskilt lämpligt i projekt med kort återbetalningstid eller begränsad framtidsprognos. Cotter [8] påpekar att metoden ofta används i mindre och medelstora företag som ett praktiskt verktyg för att snabbt avgöra investeringens lönsamhet.

Metoden som används i denna analys beräknar återbetalningstid enligt:

$$\text{Payback Period} = \text{Utvecklingstid (h)} \setminus \text{Tidsbesparing per offert (h)}$$

Eftersom den parametriska modellen är framtagen som ett återanvändbart verktyg för framtida offertarbeten, är det motiverat att utvärdera när tidsbesparingen överstiger den initiala investeringstiden. En fullständig analys av återbetalningstid och ackumulerad effekt redovisas i kapitel 5.3.

Trots metodens begränsningar – såsom att den ignorerar kassaflöden efter återbetalning och inte tar hänsyn till tidens värde – används den ofta som ett snabbt första steg innan mer avancerade kalkyler som Net Present Value (NPV) tillämpas [8].

3.4 Validitet och reliabilitet

För att säkerställa metodens trovärdighet har både datainsamling och testmoment utformats med hänsyn till validitet och reliabilitet. Den information som använts som grund för modellen har samlats in från olika praktiska källor med direkt koppling till företagets arbetsprocesser, vilket stärker resultatens relevans.

Datainsamlingen omfattade en semistrukturerad intervju med en erfaren konstruktör, en intern checklista för offertarbete samt en teknisk kravspecifikation från ett genomfört projekt. Dessa källor bedöms vara representativa för återkommande moment i offertarbetet och har valts för att stödja parametreringsarbetet med konkret underlag.

Modellen byggdes manuellt i Autodesk Inventor och testades genom att justera styrparametrar som varvtal (RPM) och driftläge (Full Head). Vid varje test uppdaterades geometrin automatiskt i CAD-miljön, vilket gjorde det möjligt att visuellt bekräfta att modellen reagerade korrekt på indata. Testningen visade att kodlogiken fungerade enligt plan utan att bryta geometriska relationer eller parametrar.

En begränsning i arbetet är att modellen omfattar två specifika turbindelar och inte en komplett turbin. Dessutom har ingen exakt tidsmätning genomförts under payoff-analysen; uppskattningarna baseras på tidigare projekt, samtal med konstruktör och egen erfarenhet. Trots dessa avgränsningar anses metoden ge ett tillförlitligt underlag för att besvara studiens syfte och frågeställningar.

3.5 Analysmetod

För att analysera det insamlade materialet användes en kvalitativ och jämförande metod. Syftet var att identifiera vilka arbetsmoment i det traditionella offertarbetet som kunde ersättas eller effektiviseras genom parametrisk modellering.

De återkommande arbetsmomenten kartlades utifrån intervjuer, offertchecklistan och tekniska kravdokument. Dessa jämfördes sedan med den struktur och funktion som byggdes upp i CAD-modellen, för att bedöma modellens täckning och tillämpningsbarhet.

Vid testning i Autodesk Inventor analyserades modellens beteende genom visuell uppföljning. Styrparametrar som RPM och driftläge justerades manuellt, och vid varje förändring kontrollerades att rätt mått aktiverades och att modellen förblev stabil. Det faktum att modellen reagerade konsekvent tolkades som ett tecken på att kodlogiken fungerade enligt avsikt.

För att bedöma effektiviseringspotentialen användes en enkel tidsjämförelse där manuell arbetsinsats ställdes mot uppskattad tidsbesparing vid användning av den parametriska modellen. Resultatet av denna jämförelse presenteras i kapitel 5.

4 Nulägesbeskrivning

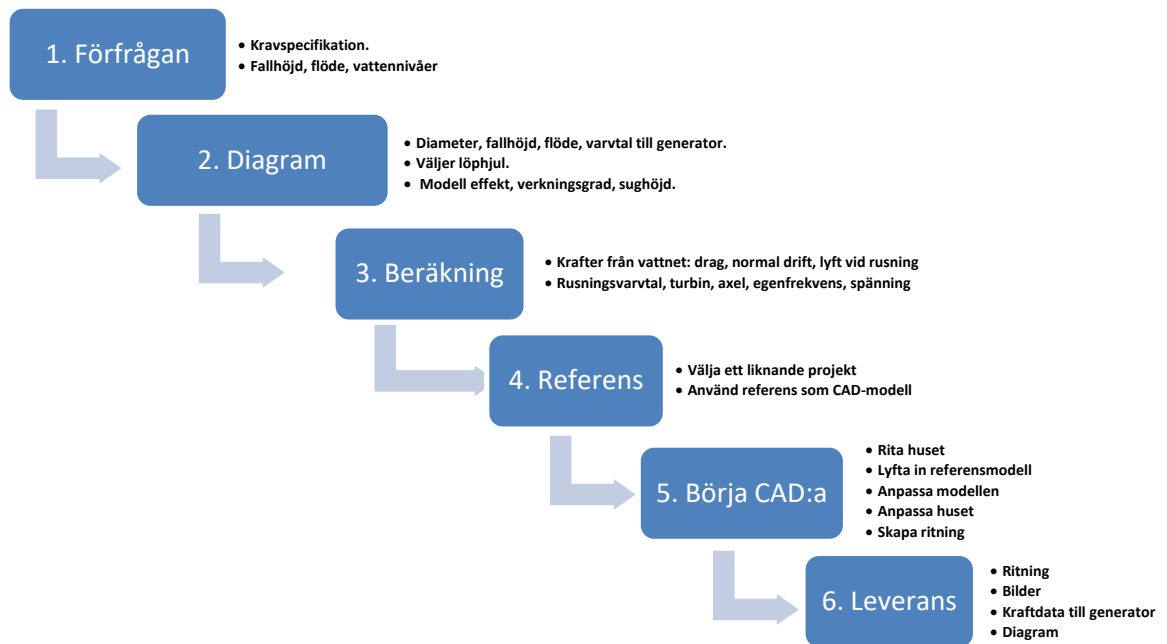
4.1 Arbetsflöde i offertarbete

Offertarbete för nytillverkning av turbiner omfattar ett flertal tekniska moment som genomförs innan någon beställning lagts. Dessa steg utförs manuellt och bygger på ett återkommande arbetssätt som bekräftats genom intervju, intern checklista och analys av tekniska dokument. Nuläget präglas av att varje offert hanteras som ett unikt projekt, trots att många moment liknar tidigare arbeten.

Arbetsgången kan delas in i sex huvudsakliga steg:

1. Förfrågan: Arbetet inleds med att ett underlag tas emot från kunden. Detta innehåller specifikationer som fallhöjd, vattenflöde, tillgängligt utrymme och önskat varvtal. Informationen används för att bedöma om en offert kan lämnas och vilken typ av turbin som kan vara aktuell.
2. Tekniska val och diagram: Nästa steg är att göra initiala tekniska val. Här avgörs exempelvis turbintyp, lämpligt varvtal och löphjulsconfiguration. Verkningsgradsdiagram eller prestandapunkter tas fram med hjälp av interna verktyg.
3. Beräkningar: Därefter genomförs hållfasthetsberäkningar för att kontrollera krafter, spänningar och kritiska frekvenser. Detta sker innan något modelleras i CAD, för att säkerställa att den föreslagna lösningen är tekniskt genomförbar.
4. Referenssökning: I detta steg letas ett tidigare liknande projekt fram ur interna mappar. Syftet är att återanvända så mycket som möjligt från befintliga CAD-filer och dokumentation.
5. CAD-arbete: En konstruktör anpassar modellen i Autodesk Inventor utifrån underlaget. Huset, sugröret och löphjulet ritas upp, justeras och placeras enligt kundens specifika förutsättningar. Ritningar skapas och exporteras.
6. Leverans: Slutligen sammanställs en offertfil som innehåller tekniska ritningar, kraftdata, diagram och beskrivning. Denna skickas till kunden som beslutsunderlag.

Arbetsflödet sammanfattas i Figur 1 nedan, där varje steg visar de moment som normalt ingår i ett offertarbete för nytillverkning.



Figur 1, Översikt av typiskt arbetsflöde vid offertarbete för nytillverkning. Figuren visar sex huvudsakliga steg från kundförfrågan till leverans av tekniskt underlag.

4.2 Produktbeskrivning – Francis- och Kaplan-turbiner

En turbin är den komponent i ett vattenkraftverk som omvandlar vattnets energi till mekanisk rotation, som sedan driver en generator för att producera el. Turbinen består vanligen av delar som spiralhus, ledskenor, löphjul och sugrör (draft tube). Genom dessa komponenter regleras vattenflödet och riktas optimalt för att omvandla energi så effektivt som möjligt, vilket förklaras av Lindblom [4]

Både Francis- och Kaplan-turbiner är så kallade reaktionsturbiner. Det innebär att vattenflödet både påverkar turbinen med tryck- och rörelseenergi, till skillnad från t.ex. Pelton-turbiner där bara rörelseenergin används. Johansson [5] beskriver tydligt hur denna energiprincip fungerar i reaktionsturbiner.

Kaplan-turbinen

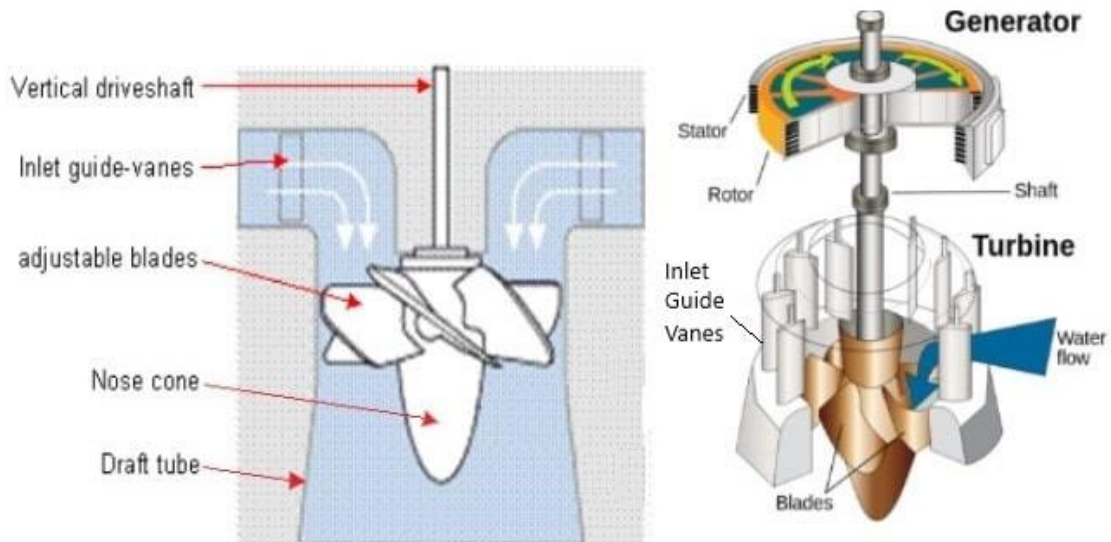
Kaplan-turbinen är en axialflödesturbin och är i sin utformning lik en propeller. Den är konstruerad för att hantera låga fallhöjder upp till cirka 50 meter, med varierande vattenflöden. Den har 4 till 8 löphjulsskovlar som är rörliga, vilket innebär att deras vinkel kan justeras beroende på vattenflödet. Även ledskenorna är rörliga, och denna dubbla reglerbarhet gör Kaplan-turbinen mycket effektiv inom ett brett driftområde (25–100 % av dimensionerat flöde). Franzén [6] framhåller att denna flexibilitet gör Kaplan-turbinen särskilt lämplig i mindre vattenkraftverk med säsongvariationer.

Komponenter inkluderar:

1. Löphjul med justerbara blad
2. Spiralhus

3. Rörliga ledskenor
4. Sugrör
5. Regleringsmekanism i navet

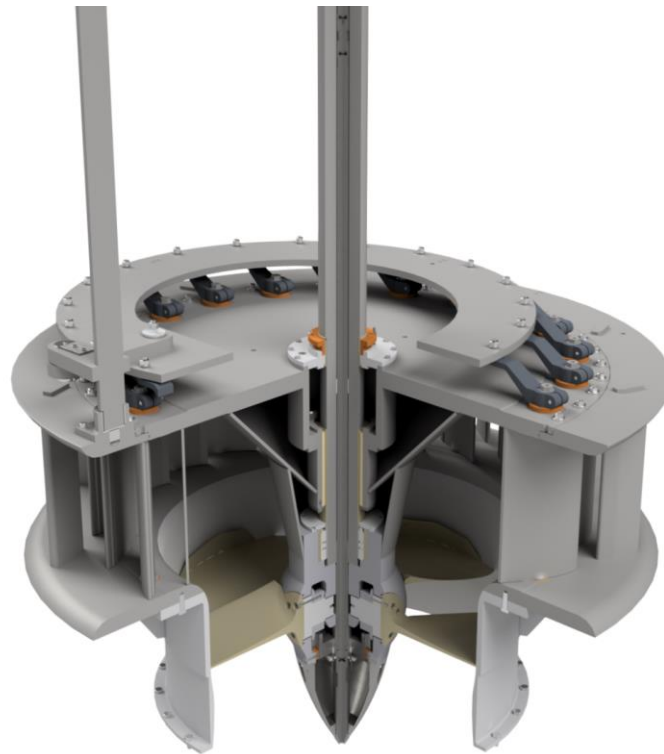
Den stora fördelen med Kaplan ligger i dess anpassningsförmåga – idealisk där vattennivå och flöde varierar under året.



Figur 2, Kaplan-turbin monterad i sin vertikala position, med synliga rörliga ledskenor och lodrät axel.

Francis-turbinen

Francis-turbinen är en blandflödesturbin, vilket betyder att vattnet först rör sig radiellt inåt och sedan axiellt utåt. Den används för medelhöga fallhöjder (40–700 meter) och är den mest använda turbin typen globalt. Den har 10–20 fasta löphjulsskovlar som är skålförmade. Turbinen regleras genom rörliga ledskenor, men har inte rörliga blad som Kaplan. Enligt Lindblom [4] kännetecknas Francis-turbinen av hög verkningsgrad i stabila driftförhållanden.



Figur 3, Francis-turbin i genomskärning. Bilden visar turbinens inre uppbyggnad med löphjul, spiralhus och styrsystem.

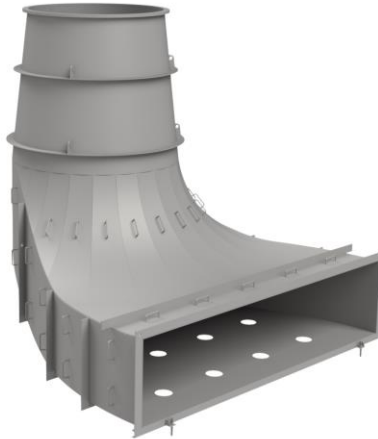
För att ge en översiktlig bild av skillnader mellan de två vanligaste turbintyperna i småskalig vattenkraft presenteras nedan en jämförelse mellan Kaplan- och Francis-turbiner.

Faktor	Kaplan	Francis
Flödestyp	Axial	Blandflöde (radial + axial)
Fallhöjd	Upp till ca 50 meter	40–700 meter
Löphjulsskovlar	4–8, rörliga	10–20, fasta
Reglerbarhet	Hög (blad + ledskenor)	Medel (bara ledskenor)
Effektivitet	Bred driftzon (25–100 % flöde)	Hög verkningsgrad vid 50–100 % av maxflöde
När används	Varierande flöde, låg fallhöjd	Stabil drift, medelhög till hög fallhöjd

Tabell 4, Jämförelse mellan Kaplan- och Francis-turbiner.

Sugrör och komponentanslutning

Sugröret som visas i modellen är en integrerad del av Francis-turbinens flödesväg och har en utformning som kombinerar funktion och tillverkningsbarhet. Konstruktionen består av flera sektioner där det cirkulära utloppet från löphjulet gradvis övergår till en rektangulär flänsanslutning. Denna övergång möjliggör effektiv tryckåtervinning efter att vattnet passerat genom turbinen. Geometrin är samtidigt anpassad för att minimera kavitation och turbulens i den nedre delen av flödesbanan.



Figur 4, Sugrör tillhörande Francis-turbin. Bilden visar övergången från cirkulär till rektangulär tvärsnitt, utformad för att säkerställa tryckåtervinning och minska risk för kavitation.

4.3 Typisk kravspecifikation

Trots att varje offertförfrågan har sina unika förutsättningar, visar intervjuer och dokumentation att det finns ett antal tekniska krav som återkommer i nästan varje projekt. Dessa krav styr hur modeller och dimensioner utformas, och utgör därför en naturlig grund för att definiera vilka parametrar som bör kunna hanteras i ett automatiserat system.

Listan nedan är framtagen som en sammanställning av specifikationspunkter som ofta förekommer i olika offertprojekt. Den bygger på analys av tidigare arbeten och syftar till att visa vilka typer av tekniska krav som en parametrisk modell behöver kunna hantera för att vara användbar i brett offertarbete.

Återkommande tekniska krav i offertarbetet:

1. **Nettofallhöjd:** Vanligtvis mellan 5 och 10 meter för Kaplan-turbiner, och upp till 700 meter för Francis.
2. **Flöde:** Anges nästan alltid som nominellt och maximalt, och påverkar sugrörets form och löphjulets dimension.
3. **Effektbehov:** Ofta specificerat som mål vid viss verkningsgrad – styr val av komponentdimensioner.
4. **RPM (varvtal):** Bestäms i relation till generatorns poltal och nätfrekvens (t.ex. 750, 1000, 1500 rpm).

5. **Ytjämnhet:** Specificerad som krav på t.ex. ledskenor (ex: $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$).
6. **Toleranser:** Inre passningar, exempelvis glapp $\leq 0,3 \text{ mm}$ mellan rörliga delar.
7. **Livslängd:** Ofta ett mål om $\geq 100\,000$ timmar för utbytbara komponenter.
8. **Materialstandarder:** Hänvisning till relevanta normer (t.ex. EN 10083, ISO 683-1).
9. **Kritisk frekvens:** Ska överstiga det s.k. rusningsvarvtalet med viss marginal.
10. **Monteringsmått:** Skallklara geometrier och anslutningspunkter som kan variera beroende på platsens förutsättningar.

Eftersom dessa krav återkommer i nästan varje offert, har de fungerat som riktlinje för vilka parametrar och regler som integrerats i den CAD-modell som byggts i detta arbete. Kraven påverkar både indata (t.ex. RPM), dimensioner som styr geometri, och utdata som används i dokumentation och offertmaterial. Den modell som tagits fram har därför konstruerats för att möta just denna typ av teknisk variation på ett strukturerat och återanvändbart sätt.

5 Analys

I detta kapitel analyseras resultatet i förhållande till syftet och de tre forskningsfrågorna. Underlaget utgörs av intervjuer, intern checklista, teknisk kravspecifikation samt praktisk testning av modellen i Autodesk Inventor. Analysen kopplar dessa resultat till teorier om parametrisk modellering och modellstruktur. Avsnitten följer frågeställningarna och fokuserar på mönster mellan nuläge och lösning, samt vilka moment som är tekniskt och metodiskt lämpliga att effektivisera. Värderingar och åtgärdsförslag behandlas separat i nästa kapitel.

5.1 Vad i offertarbetet kan parametreras?

Analysen bygger på data från intervjuer, offertchecklista och teknisk kravspecifikation. Syftet är att identifiera arbetsmoment i offertprocessen som återkommer i varje projekt och samtidigt lämpar sig för parametrisk styrning i CAD-miljö. De moment som framträder tydligast är val av varvtal (RPM), löphjulsdimensioner, axelplacering och sugrörets geometri. Dessa återkommer i samtliga datakällor och har direkt påverkan på modellens utformning.

Checklistan visar en tydlig sekvens av arbetsmoment som upprepas vid varje offert: teknisk genomgång av fallhöjd, val av turbinprincip, anpassning till befintlig inbyggnad, och dimensionering av huvudkomponenter. I intervjun med konstruktören framgår att varvtal och typval används som utgångspunkt för att avgöra mått i både löphjul och spiral. Den tekniska kravspecifikationen bekräftar detta: varvtal ska anges, passytor ska dimensioneras, och toleranser måste uppfyllas enligt gällande standarder. Dessa parametrar förekommer alltså inte enbart av praktisk vana, utan är formellt nödvändiga i offertens tekniska underlag.

Teorin lyfter fram att parametrar bör vara väldefinierade, påverka andra geometrier och gå att koppla till regler eller tabeller Munford [1]; Aamodt [2]. Parametern RPM uppfyller samtliga dessa villkor. Den används för att styra modellens form via arrayer och logik i Inventor. I flera fall påverkar den både löphjul, kanalform och sugrör. Denna typ av central styrparameter lyfts även fram i teorin som en förutsättning för stabila modeller, särskilt vid automatisering av varianthantering.

Utöver RPM har även typval, komponentmått och positioner analyserats. De återkommer i checklistan, kravställs i specifikationen och påverkar geometrin i modellen. Dessa har strukturerats i modellen som värdelistor och logiska alternativ. Flera av dessa moment aktiverar regler i iLogic och påverkar andra mått, vilket gör dem lämpliga för styrning. Samtidigt är de kända för konstruktören i ett tidigt skede av offertarbetet – vilket är en viktig förutsättning för att modellen ska kunna användas utan ombyggnad.

Resultatet visar ett tydligt samband mellan empirin och kriterierna i teorin. De moment som orsakar återkommande arbetsinsats är samma som teorin rekommenderar att parametrera. Metodvalet – med kombination av intervju, specifikationsanalys och checklistgranskning – har fungerat väl för att identifiera dessa. Om dessa moment fortsätter hanteras manuellt kvarstår flera begränsningar, såsom personberoende och högre risk för fel vid varje ny offert.

5.2 Hur ska en parametrisk modell byggas upp i Inventor?

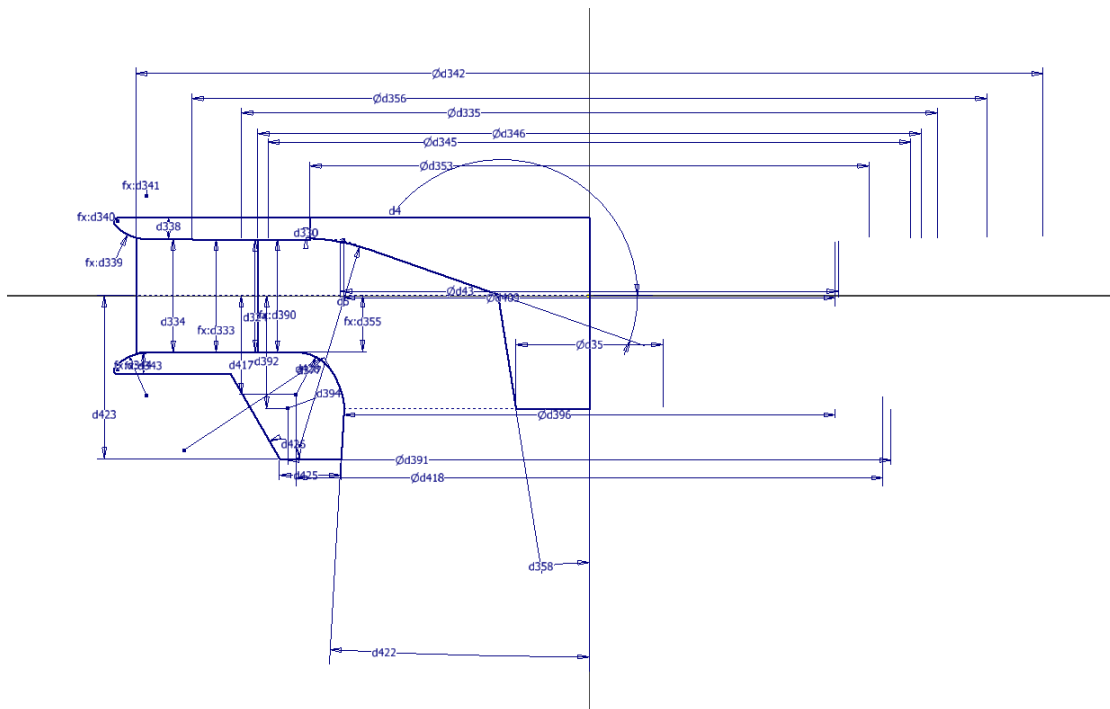
Detta avsnitt analyserar hur den uppbyggda modellen i Autodesk Inventor har strukturerats tekniskt. Analysen bygger på kodlogik, parameteruppbyggnad, formulär, testresultat och dokumentation av modellens beteende vid olika indata. Syftet är att visa hur parametrarna styr geometrin, hur variation hanteras, samt hur teorier om parametrisk modellering och designautomation återfinns i modellen.

Analysen fokuserar på tre aspekter:

1. hur geometrier kopplats till styrdata,
2. hur regler hanterar variation,
3. hur modellen speglar teorier om konstruktion och återanvändning.

5.2.1 Modellens uppbyggnad och parameterstyrning

Modellen är uppbyggd kring två huvudkomponenter: ett löphjul och en c-spiral kopplade till en Francis-turbin. Dessa har modellerats i Autodesk Inventor med stöd av parametrisk teknik. För att möjliggöra variantgenerering har varje komponent delats in i fasta och styrbara sektioner. De styrbara delarna inkluderar bland annat kanalbredder, löphjulsdiameter, sugrörshöjd och navets geometri – vilka samtliga styrs via ett parameterträd kopplat till indata. Spiralens tvärsnittsform, som visas i Figur 5, är ett exempel på en sådan sektion som påverkas av flera parametrar.

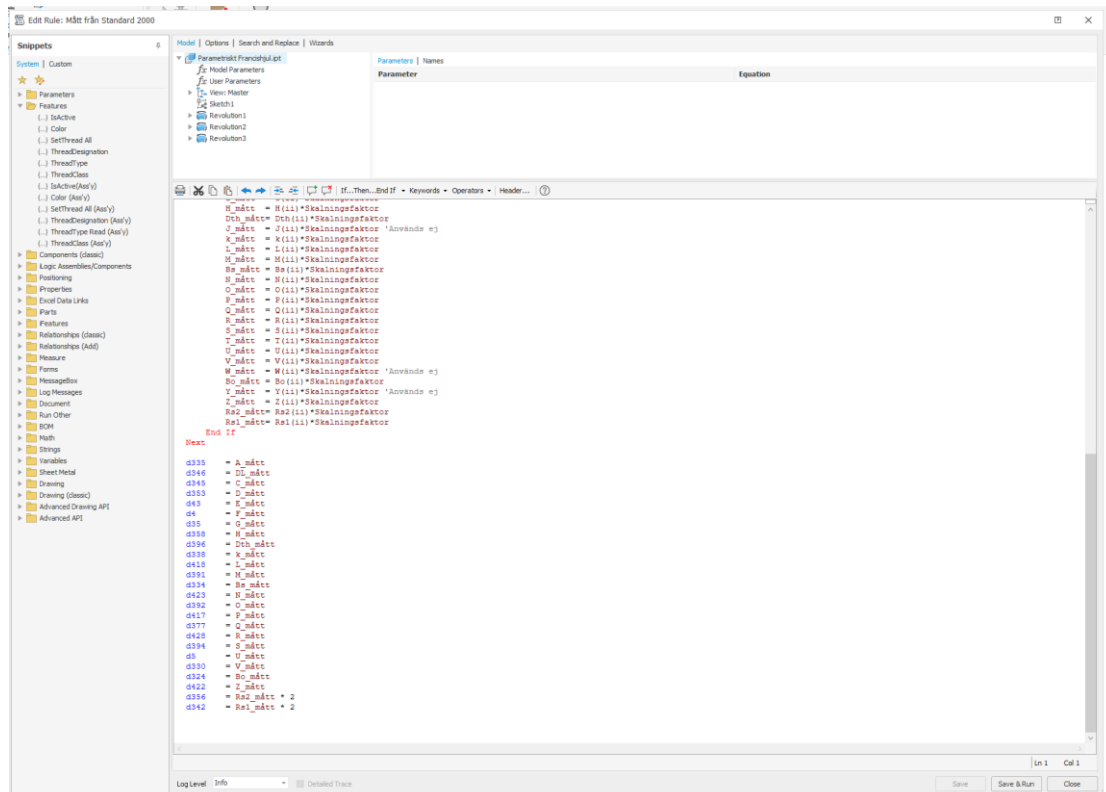


Figur 5, Tvärsnitt av spiralhus där måttstyrning sker genom parametrar som kopplats till RPM.

Indata matas in via ett formulär i Inventor där två nyckelparametrar, varvtal (RPM) och driftläge (Full Head), fungerar som styrsignaler. Dessa är kopplade till ett regelverk i iLogic där arrayer hanterar motsvarande mått för varje indata-

Analys

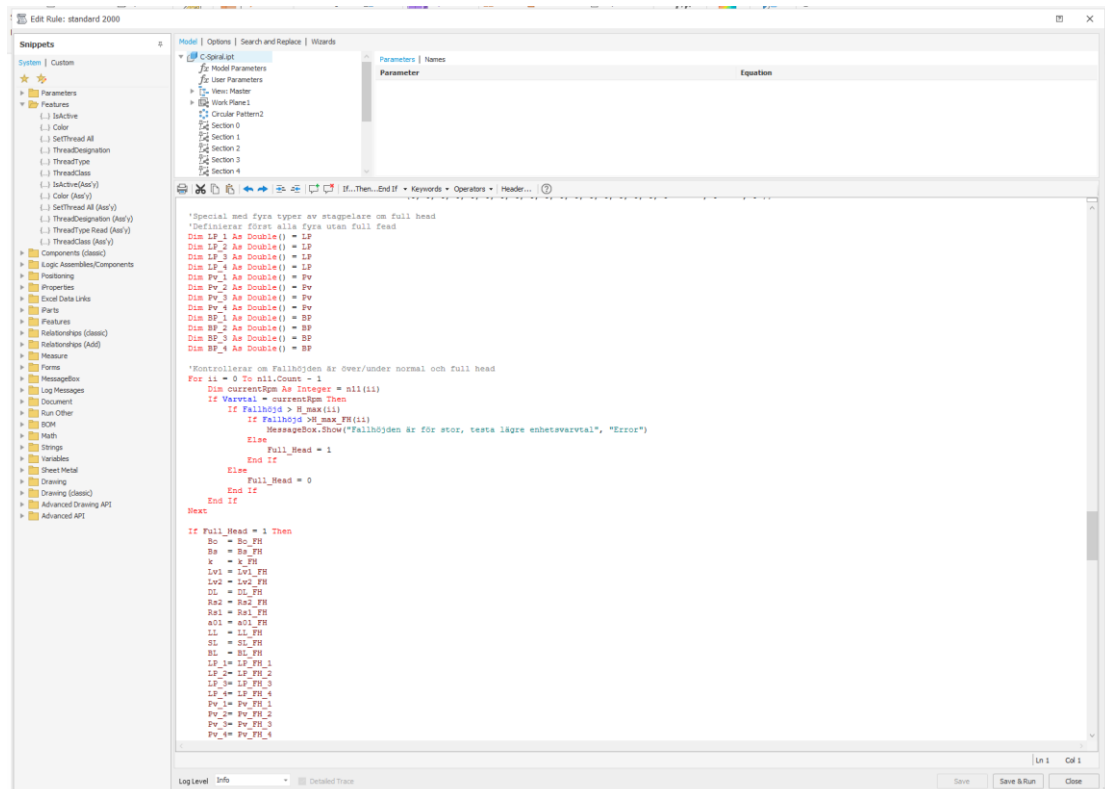
kombination. Figur 6 visar ett utdrag ur kodstrukturen, där dessa parametrar kopplas till måttvärden som styr geometrin automatiskt.



Figur 6,Utdrag ur iLogic-regel med arrayer som kopplar RPM och Full Head till motsvarande geometri.

För att hantera de två driftlägena används en villkorsstyrd kodlogik där Full Head fungerar som en binär indata (0 eller 1). Denna logik, som illustreras i Figur 7, aktiverar olika kodblock beroende på driftläge och varvtal.

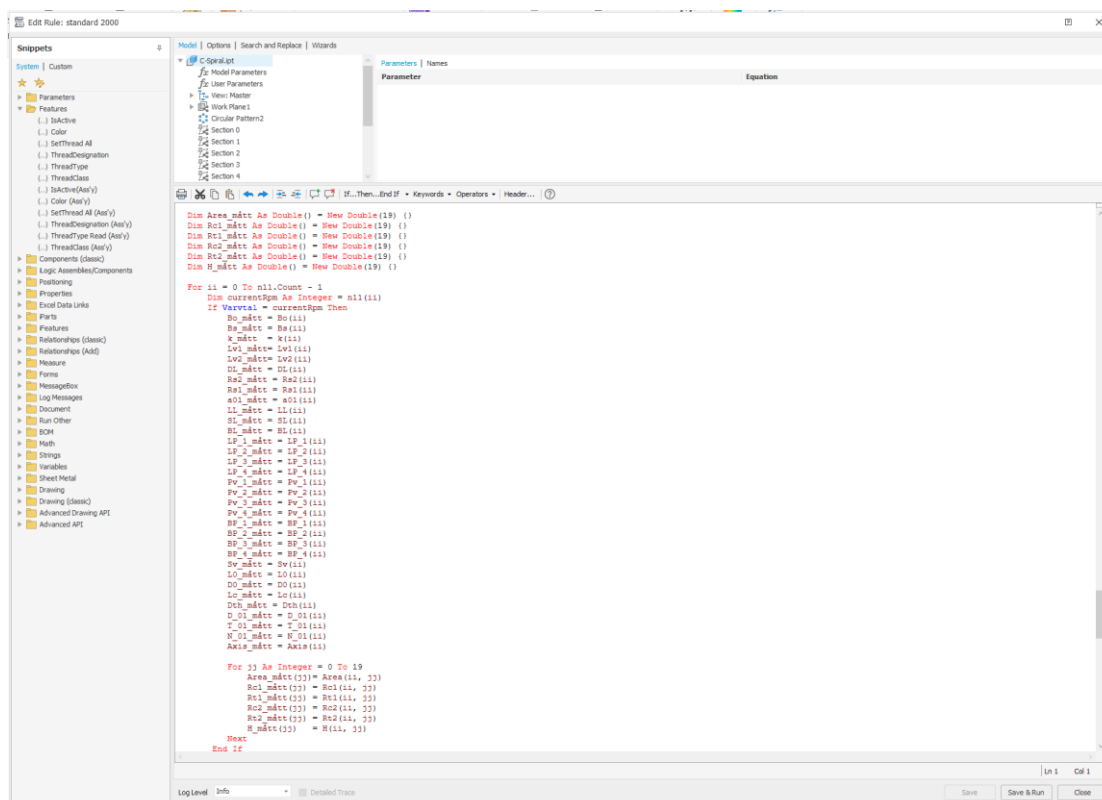
Analysis



Figur 7, Regelstyrning i iLogic där parameter för driftläge (Full Head) aktiverar rätt kodblock.

Parametervärdena är baserade på tekniska specifikationer från tidigare projekt och organiserade i tabeller. Som visas i Figur 8, är dessa tabeller uppbyggda för att koppla varje RPM-nivå till ett definierat paket av mått, vilket möjliggör effektiv styrning utan manuell justering.

Analys

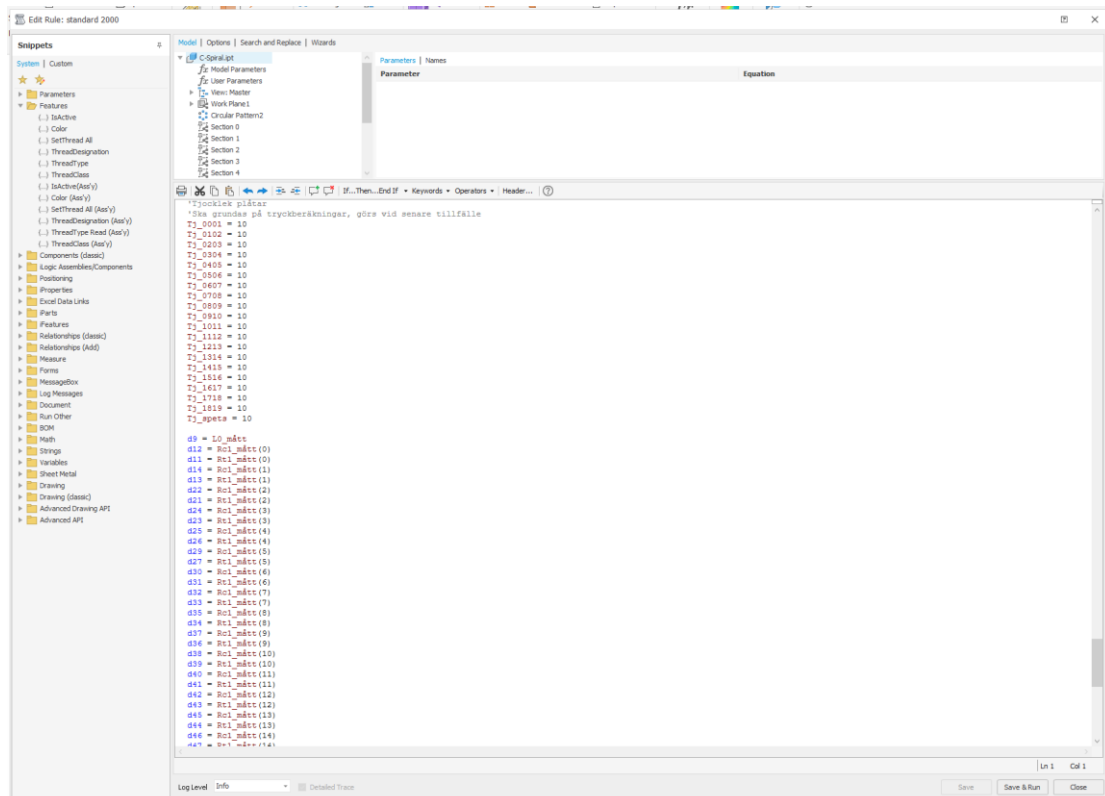


Figur 8, Intern tabellstruktur med måttvärden för olika RPM-nivåer, baserad på tidigare projektdata.

För varje mått har ett unikt namn tilldelats i Inventors parameterfönster. Dessa namn återkommer i både kod och tabeller, vilket säkerställer spårbarhet. En styrparameter, exempelvis RPM, påverkar flera geometrier samtidigt. Det gör att modellen uppdateras selektivt, utan att bryta relationer. Parametrarna är grupperade i logiska sektioner för att hantera påverkan på både spiralform, löphjul.

För att säkerställa stabil funktion har modellen testats med olika indata. Vid varje inmatning kontrollerades att kritiska mått uppdaterades korrekt utan att relationer bröts. Den regelstyrda logiken möjliggör säker växling mellan varianter, utan behov av manuell justering i modellerna.

Kodbasen innehåller även strukturer som kopplar samman Inventor-parametrar med tidigare projektspecifikationer. Som visas i Figur 9, används exempelvis (d12) som ett mått i modellen och hämtar sitt värde från en matris med äldre ritningsdata (RC1). Detta gör det möjligt att återanvända tekniska specifikationer och säkerställer konsekvent måttsättning vid ny variantgenerering.



Figur 9, Kodavsnitt där parametrar som d12 kopplas till måttmatriser baserade på tidigare projektdata.

5.2.2 Teoretisk tolkning av modellstruktur

Flera delar av modellen speglar etablerade principer inom parametrisk konstruktion. Enligt Munford [1] bygger en tillförlitlig CAD-modell på logisk struktur, tydliga beroenden och en kodmiljö där styrningen sker via definierade parametrar. I detta arbete är det modellen i Inventor som styrs av två centrala indata – varvtal och driftläge – vilka kopplas till mått genom arrayer och villkorsstyrd logik. Geometrin styrs alltså inte direkt mellan features, utan via parametrar som är avsedda att bära variation. Denna struktur stämmer överens med Munfords syn på stabil och återanvändbar modelluppbyggnad.

Gast och Gembarski [3] beskriver hur konstruktionsvariation bör hanteras med hjälp av logik snarare än duplicerade modeller. I detta fall har lösningen byggts med regler som väljer rätt mått beroende på indata, utan att någon ny modell behöver skapas. Konstruktionskomponenterna uppdateras utifrån givna villkor, vilket ger flexibilitet samtidigt som modellen förblir kontrollerbar. Denna metod beskrivs i litteraturen som central för konfigurerbar konstruktion, särskilt inom automatiserad variantgenerering.

Aamodt [2] lyfter vikten av att koppla parametrar till tidiga beslut i processen. I modellen används RPM och driftläge som initiala val, vilket styr resten av geometrin. Detta gör att modellen följer ett naturligt arbetsflöde: användaren börjar med att ange förutsättningar, och modellen anpassar sig automatiskt. Denna logik har stöd i teorin om beslutsbaserad modellering, där parametrar bör följa samma sekvens som konstruktören normalt arbetar efter.

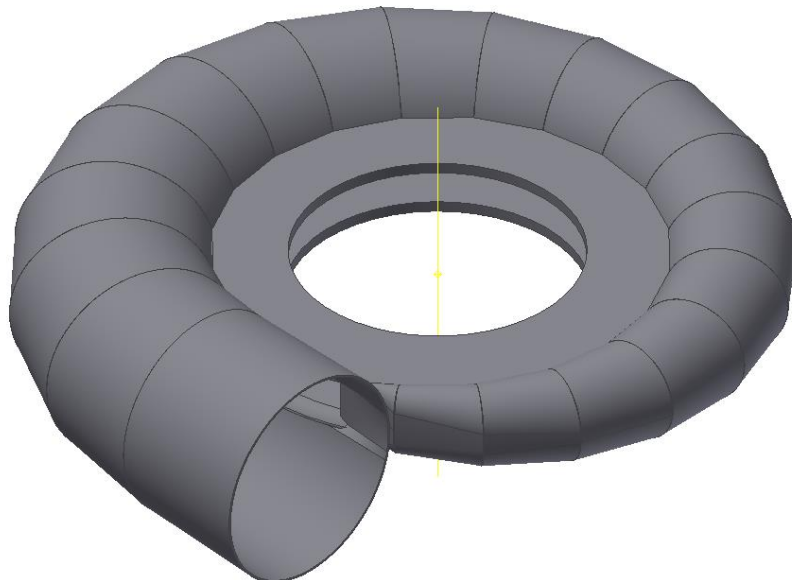
Kodstrukturen i iLogic har byggts med tydliga if-satser som aktiverar olika värdepaket beroende på inmatning. Det gör att variation hanteras internt, samtidigt som reglerna minimerar risken för fel. Denna typ av regelstyrning motsvarar det som i litteraturen beskrivs som en konfigurationskärna – en metod för att säkerställa att parametrisk variation sker kontrollerat.

5.2.3 Testning och analys av modellens variantrespons

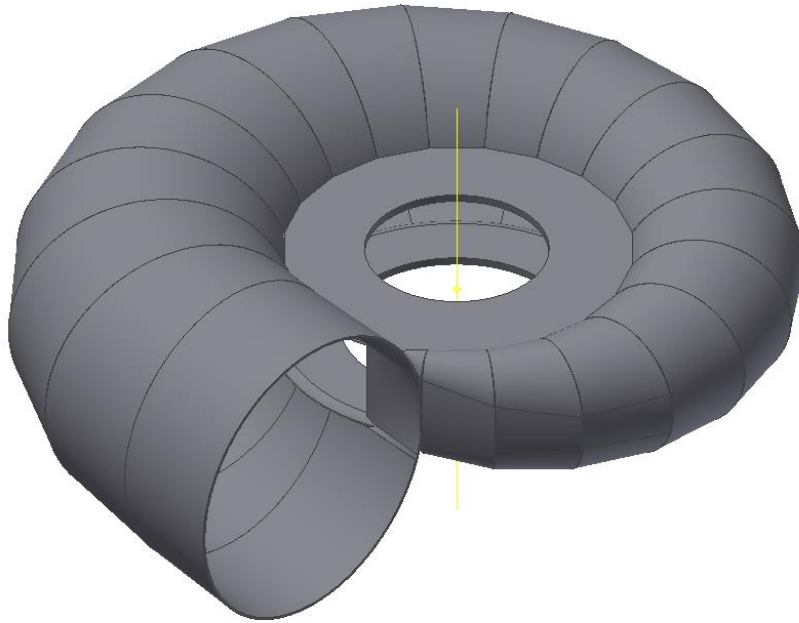
För att analysera modellens respons på variation testades dess funktion med olika indata för varvtal (RPM) och driftläge (Full Head). Dessa parametrar styr geometri via ett regelverk i iLogic, där varje kombination aktiverar en specifik uppsättning måttvärden från kodbaserade arrayer. Driftläget representeras som en binär parameter (0 eller 1), vilket avgör vilket kodblock som tillämpas.

Testningen utfördes genom visuell uppföljning i Autodesk Inventor, där styrparametrarna justerades manuellt via formulär. Vid varje inmatning kontrollerades att modellen uppdaterades utan fel och att måttrelationer förblev intakta. Detta tillvägagångssätt, som beskrivs i avsnitt 3.3.5, innebär att resultaten bygger på observerad respons snarare än formell validering. Den visuella stabiliteten tolkas dock som en indikation på att kodlogiken fungerar enligt avsikt.

Funktionaliteten verifierades vid både lägsta och högsta varvtalsnivå – 44 rpm och 102 rpm. Spiralhusets utformning vid respektive RPM visas i Figur 10 och Figur 11, och bekräftar att modellen anpassar geometrin efter indata.

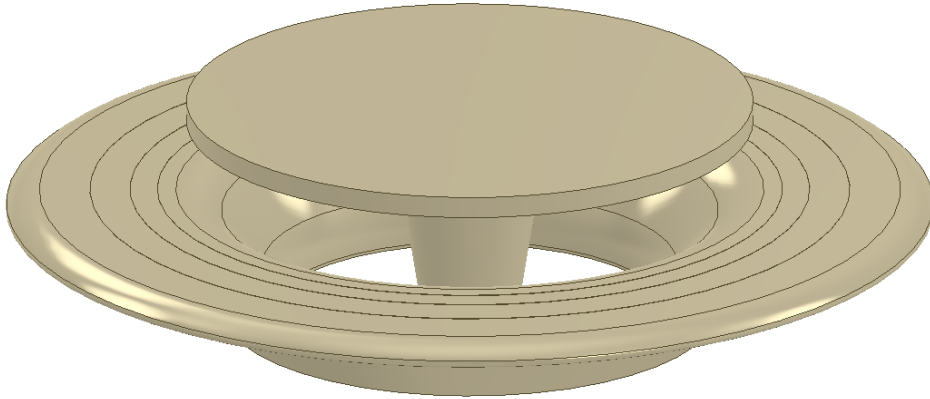


Figur 10, Spiralhus vid 44 rpm – genererad geometri vid lägsta testade varvtal.

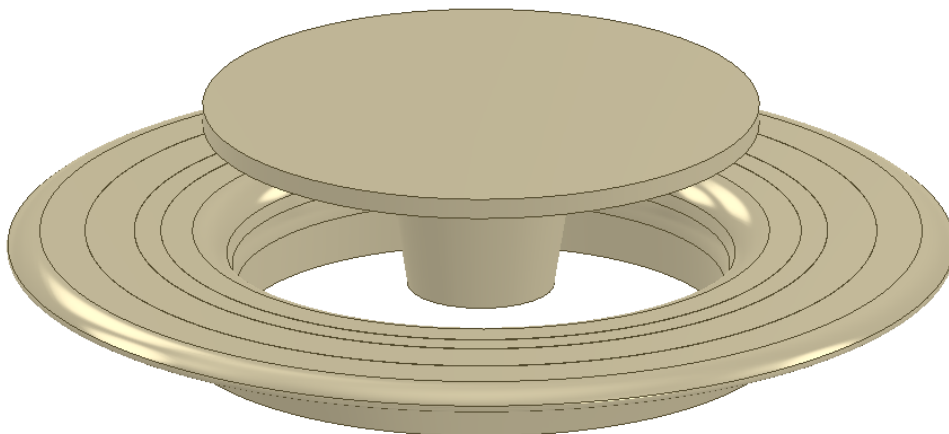


Figur 11, Spiralhus vid 102 rpm – geometri vid högsta testade varvtal.

Samma test genomfördes för löphjulet. I Figur 12 och Figur 13 visas hur proportioner och mått förändras mellan varvtalen. Formen justeras automatiskt baserat på parameterstyrning via kod, vilket tyder på att modellen reagerar konsekvent på förändrade driftvärden.



Figur 12,Löphjul vid 44 rpm – måttstyrd utformning vid låg drift.



Figur 13,Löphjul vid 102 rpm – automatgenererad geometri för högt varvtal.

Sammanfattningsvis indikerar testningen att modellen är stabil vid varierande indata och klarar att generera korrekt geometri. Den strukturerade kopplingen mellan indata, kod och geometri möjliggör effektiv hantering av variation, vilket är en förutsättning för användning i automatiserat offertarbete.

5.3 Hur mycket tid kan sparas med en parametrisk modell?

Detta avsnitt analyserar den tidsbesparing som uppstår när återkommande moment i offertprocessen ersätts med parametrisk modellering. Syftet är att utvärdera vid vilken punkt investeringen i modellen blir lönsam, baserat på faktisk utvecklingstid och estimerad besparing per iteration.

5.3.1 Traditionell tidsåtgång och aktuell automatiseringsgrad

Enligt den arbetsgång som redovisas i tabell 3 omfattar ett offertarbete för nytillverkning av turbin i genomsnitt cirka 40 arbetstimmar. Av dessa utgör 25 timmar manuell CAD-modellering och 3 timmar referenssökning. Dessa moment är delvis automatiserade i det aktuella projektet.

I den utvecklade modellen har två komponenter – ett löphjul och en c-spiral – parametriserats och kopplats till styrvärden som varvtal (RPM) och driftläge (Full Head). Övriga geometriska delar, såsom hus och sugrör, bearbetas fortsatt manuellt. Tidsbesparingen per offert har uppskattats till 8–10 timmar, baserat på jämförelse mellan modellens exekvering och den tidsåtgång som dokumenterats i tidigare projekt samt underlag insamlat genom intervjuer (se avsnitt 3.3.1).

5.3.2 Återbetalningstid

För att bedöma när den utvecklade modellen börjar ge praktisk nytta används metoden Payback Period, som inom investeringsanalys beskriver hur många användningstillfällen som krävs för att återvinna en initial satsning. I detta fall utgörs satsningen av 192 arbetstimmar för uppbyggnaden av den parametriska modellen, vilken omfattar två turbinkomponenter.

Med en genomsnittlig tidsbesparing på 8–10 timmar per offert når modellen break-even efter ungefär 21 iterationer. Därefter genererar varje ytterligare användning en direkt nettovinst i form av reducerad arbetstid.

Återbetalningstiden kan betraktas som relativt låg, särskilt med tanke på att modellen är återanvändbar i framtida projekt. Dessutom finns en potentiell effektiviseringsvinst vid vidareutveckling – om fler komponenter parametriserats kan den totala besparingen per offert öka, vilket minskar återbetalningstiden ytterligare.

Metoden Payback Period har valts som analysverktyg eftersom den ger ett konkret och lättbegripligt mått på effektivisering vid återanvändning. Som Garrison et al. [7] påpekar används den ofta i tekniska och operationella sammanhang där finansiella nyckeltal inte är fullt tillgängliga. Cotter [8] betonar att modellen är särskilt tillämplig när investeringar görs i interna processer, såsom automatisering av arbetsmoment, där besparing mäts i tid snarare än monetära värden.

6 Diskussion och reflektion

6.1 ÅtgärdsfMetodreflektion

Arbetet kombinerade teknisk utveckling med intervjubaserad behovsanalys och testning i Autodesk Inventor. Intervjuerna tydliggjorde vilka arbetsmoment som var återkommande och lämpade sig för parametrering, vilket konkretiserades genom analys av checklistor och tekniska dokument.

Den praktiska modelleringen kopplade direkt till identifierade behov, och testning med olika varvtal visade att modellen fungerade stabilt. Den iterativa koduppbyggnaden gav dessutom snabb återkoppling och möjliggjorde förbättringar under arbetets gång.

Metodens styrka låg i att den integrerade praktiska insikter med teknisk lösning. Däremot saknades kvantitativ jämförelse med alternativa tekniker, vilket begränsar generaliserbarheten.

6.2 Trovärdighet och validitet

Tidsbesparingen på 8–10 timmar per offert bygger på dokumenterad manuell arbetsgång och praktiska testkörningar i modellen, vilket ger resultatet empirisk förankring. Denna bedömning avser dock endast två parametrerade komponenter och kan inte generaliseras till hela offertflödet.

Besparingen är uttryckt i arbetstid, inte i ekonomiska termer. Någon monetär effekt har inte analyserats, vilket begränsar möjligheten att jämföra med andra investeringar. Vidare baseras analysen på enkel återbetalningstid (Payback Period) snarare än en diskonterad metod som NPV. Valet att använda enkel återbetalningstid (Payback Period) är metodologiskt motiverat eftersom analysen bygger på arbetstid snarare än ekonomiska kassaflöden. Samtidigt innebär metoden att varken tidens värde eller besparingar efter återbetalningspunkten vägs in, vilket begränsar analysens långsiktiga precision.

6.3 Effekt och tillämpbarhet

Resultatet visar att modellen når återbetalning efter cirka 21 iterationer, baserat på en genomsnittlig tidsbesparing om 8–10 timmar per offert. Efter denna punkt genererar varje ytterligare användning en direkt besparing utan någon ny investering i modellutveckling.

Modellen är uppbyggd för att återanvändas med olika indata, vilket gör den praktiskt tillämpbar i liknande projekt. Den effektiviserar flera av de mest tidskrävande och återkommande momenten i offertarbetet, såsom referenssökning och CAD-anpassning av löphjul och spiral. Däremot omfattar den ännu inte hela arbetsflödet, vilket begränsar dess effekt till delar av processen. Trots detta visar resultatet att även en partiell automatisering kan ha betydande praktisk nytta. Modellen bedöms vara direkt användbar i företagets befintliga arbetsätt och kan implementeras i andra projekt med liknande komponentlogik.

6.4 Begränsningar i kod och struktur

Den parametriska modellen omfattar i nuläget endast två komponenter: löphjul och c-spiral. Andra viktiga delar i offertflödet, såsom sugrör, hus, axel och lagersäten, hanteras fortfarande manuellt. Detta begränsar modellens totala besparingspotential och innebär att varje offert fortfarande kräver individuell anpassning i vissa delar.

Vidare saknas funktioner för automatisk export av produktionsritningar, integrerade beräkningar för verkningsgrad eller flöde samt ett grafiskt formulär för inmatning. Kodstrukturen är funktionell men förutsätter grundläggande kunskap i iLogic och Autodesk Inventor, vilket kan påverka modellens tillgänglighet för andra användare.

Begränsningarna är naturliga i detta skede av utvecklingen, men bör beaktas om modellen ska skalas upp eller användas brett i organisationen.

6.5 Möjlig vidareutveckling

Modellen har i detta arbete fungerat som en prototyp med begränsat komponentomfång, men har potential att utvecklas vidare för att täcka större delar av offertarbetet. Genom att inkludera fler komponenter – såsom hus, sugrör och axeldelar – kan den automatiserade processen utökas och återbetalningstiden reduceras ytterligare.

Det finns också möjlighet att lägga till ett formulär där användaren enkelt kan mata in värden, förbättra kodens logik med fler regler, och automatisera exporten av ritningar och diagram. På så sätt minskar det manuella efterarbetet, och modellen blir lättare att använda för fler personer.

På sikt kan modellen även kopplas till externa kalkylsystem, vilket öppnar för helintegrerade offertlösningar. I kombination med versionshantering och standardiserad dokumentation skapas då förutsättningar för en mer skalbar och robust arbetsprocess.

7 Slutsatser

7.1 Sammanfattade slutsatser

1. Det är möjligt att identifiera återkommande moment i offertarbetet som lämpar sig för parametrisering. Särskilt löphjul och c-spiral visade tydlig koppling mellan tekniska indata och modellstruktur, vilket möjliggjorde automatisering.
2. En parametrisk modell kan byggas upp i Autodesk Inventor med iLogic genom att strukturera geometrin i sektioner, koppla mått till externa styrparametrar och använda logiska regler för val och beräkningar. Den valda uppbyggnaden visade sig vara funktionell och stabil vid testning.
3. Den utvecklade modellen sparar 8–10 arbetstimmar per offert och når återbetalning efter cirka 21 iterationer. Även om modellen endast omfattar två komponenter är tidsbesparingen mätbar och visar att en delvis automatiserad lösning kan vara lönsam i återkommande offertarbete.

7.2 Rekommendationer för praktisk tillämpning

För att modellen ska få störst effekt i det praktiska offertarbetet rekommenderas följande åtgärder:

1. Utöka modellen med fler komponenter, såsom hus, sugrör och axeldelar, för att öka den totala automatiseringsgraden och minska återstående manuell bearbetning.
2. Införa ett formulär för inmatning av projektdata, vilket förenklar användningen och minskar risken för felaktiga värden.
3. Skapa kodmallar med dokumenterade regler och strukturer, så att modellen blir lättare att vidareutveckla och underhålla av andra konstruktörer.
4. Genomföra skarpa tester i pågående projekt för att utvärdera hur modellen fungerar i praktiken, inklusive uppföljning av faktisk tidsbesparing.
5. Undersöka möjligheterna att koppla modellen till befintliga offertssystem.

Dessa åtgärder kan öka modellens användbarhet, skalbarhet och långsiktiga värde inom offertprocessen.

7.3 Rekommendationer för vidare studier

Detta arbete har fokuserat på att utveckla och utvärdera en parametrisk modell inom ramen för ett specifikt offertflöde. För att fördjupa kunskapen inom området och bredda tillämpningen föreslås följande riktningar för vidare studier:

1. Genomföra kvantitativa utvärderingar av tidsbesparing med flera användare, gärna med olika erfarenhetsnivåer, för att få en mer generaliserbar bild av effektiviseringspotentialen.
2. Jämföra enkel återbetalningstid med diskonterade modeller såsom Net Present Value (NPV) för att analysera långsiktig lönsamhet vid större investeringar i automatisering.

Slutsatser

3. Utforska möjligheter till helautomatisk generering av tekniska ritningar, inklusive koppling till materialval, toleranser och tillverkningstekniska krav.
4. Studera hur parametriska modeller kan versionshanteras och underhållas i större organisationer, särskilt med fokus på spårbarhet och rollfördelning.
5. Utveckla strukturer för hur kod och geometri kan paketeras och distribueras effektivt mellan olika avdelningar och projektteam.

Vidare forskning inom dessa områden kan bidra till ökad förståelse för hur parametriska verktyg kan införas på ett hållbart, effektivt och affärsmässigt sätt.

8 Referenser

- [1] L. M. Paul Munford, "Reliable Modeling Techniques for Complex Part Design in Inventor," 2018. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Reliable-Modeling-Techniques-Complex-Part-Design-Inventor-2018>.
- [2] A. Aamodt, «Universitetet i Agder,» 2021. [Internett]. Available: <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/handle/11250/2778891>.
- [3] P. C. G. Pauline Gast, "Interactive Geometric Configuration Using Sketch-Based CAD," 2022. [Online]. Available: https://scholar.google.com/scholar?hl=sv&as_sdt=0%2C5&q=Interactive+Geometric+Configuration+Using+Sketch-Based+CAD&btnG=.
- [4] K. H. Erik Lindblom, "Den småskaliga vattenkraftens," Svenska Miljöinstitutet, Stockholm, 2016.
- [5] L. Johansson, "Dynamisk simulering och modellering," Lunds Universitet, 2009.
- [6] E. S. Daniel Franzén, "Fish Friendly Turbines for," *Fish Friendly Turbines for*, pp. 50-62, 2023.
- [7] E. W. N. C. B. Ray H. Garrison, *Managerial Accounting*, New York: McGraw-Hill, 2012.
- [8] E. Cotter, "Net Present Value and Payback Period: An Analysis," *Western Michigan University*, 12 7 2023.

9 Bilagor

Bilaga 1, Intervjusvar från konstruktör (TURAB)

1. Vad gör ni som konstruktörer när en offertförfrågan kommer in?

Vi får oftast ett underlag som innehåller tekniska data – såsom fallhöjd, flöde och vattennivåer – samt önskemål om turbintyp, till exempel Kaplan eller Francis. Det kan även förekomma krav på att återanvända befintliga generatorer. Utifrån dessa uppgifter gör vi en första dimensionering och visualiserar den övergripande layouten.

2. Hur använder ni informationen i förfrågan?

Vi matar in värdena i ett internt beräkningsprogram (inte CAD) för att ta fram verkningsgradsdiagram. Vi gör jämförelser för olika löphjulsdiametrar och varvtal för att identifiera det mest lämpliga alternativet.

3. Hur påverkar varvtal och potal val av komponenter?

Eftersom vi måste anpassa oss till 50 Hz nätfrekvens och standardiserade potal, är endast vissa varvtal tillåtna (t.ex. 750, 1000, 1500 rpm). Det påverkar hela konstruktionen. Löphjulsdiametern väljs i jämna steg, till exempel 1700 mm eller 1750 mm.

4. Hur säkerställer ni att verkningsgraden är tillräcklig?

Vi tittar på hela driftområdet, inte bara på maxpunkten. Kunden kan ange ett flödesintervall, och då optimerar vi så att verkningsgraden är god inom hela detta område. Ibland kompromissar vi något på toppverkningsgraden för att uppnå bättre prestanda över tid.

5. Vad är sughöjd och varför är den viktig?

Sughöjden är avståndet mellan löphjulets centrum och den nedre vattennivån. Om den är för stor (t.ex. över 3,3 meter) riskerar man kavitationsskador. Vi kontrollerar därför alltid att sughöjden ligger inom säkra gränser enligt uppgifterna i underlaget.

6. Gör ni hållfasthetsberäkningar innan CAD-modellen tas fram?

Ja. Vi använder ett internt verktyg för att beräkna krafter på axeln, till exempel vattentryck, egenvikt, virvelmoment och lyftkrafter vid elbortfall. Vi säkerställer att den totala spänningen inte överskrider tillåtna gränser och att axelns egenfrekvens ligger minst 30 % över det så kallade rusningsvarvtalet.

7. Använder ni tidigare projekt som referens?

Absolut. Vi har ett projektregister där turbinerna är sorterade efter typ och löphjulsdiameter. Om vi hittar ett liknande projekt, återanvänder vi delar av den befintliga CAD-modellen. Det sparar mycket tid och säkerställer beprövade lösningar.

8. Hur anpassar ni konstruktionen till platsen?

Vi justerar modellen utifrån befintliga byggnader, axellängder, golvnivåer och sugrörstyp. I vissa fall måste vi fylla igen gamla öppningar och skapa nya för att anläggningen ska fungera. Anpassningen är viktig för att konstruktionen ska fungera optimalt i verkligheten.

9. Vad levererar ni i offerten?

Vi levererar tekniska ritningar, verkningsgradsdiagram, kraftberäkningar till generatoren, referensbilder samt en teknisk beskrivning. Allt detta sammanställs i en offertfil som skickas till kunden.

10. Vad händer efter att offerten godkänts?

När kunden accepterar offerten går projektet vidare till konstruktion. Vi förfinar då modellen och tar fram slutliga ritningar, baserat på det arbete som gjorts i offertfasen.

Bilaga 2, Intervjusvar från tidigare delägare på (TURAB)

1. Vad upplever ni som de vanligaste orsakerna till att ni inte väljs i vissa upphandlingar?

I vissa fall beror det på att våra lösningar uppfattas som dyrare än konkurrenternas. Det kan hänga ihop med hur vi hanterar osäkerhet och risk – vi bygger in marginaler för kvalitet, livslängd och anpassning, vilket ibland påverkar slutpriset. Samtidigt finns situationer där priset egentligen är väl motiverat, men inte upplevs så från kundens sida.

2. Hur påverkar underleverantörer er prissättning?

Vi kan ibland lägga ut delar av arbetet till underleverantörer, men det sker endast om de har bevisad erfarenhet av liknande projekt. Om man anlitar någon som inte gjort detta tidigare kan det leda till förseningar eller prishöjningar i efterhand, vilket gör oss försiktiga. Det påverkar förstås totalkostnaden.

3. Hur arbetar ni med att förstå orsaken när en kund tackar nej till en offert?

Vi försöker alltid ta reda på varför, men det är inte alla kunder som vill ge återkoppling. När vi får information – oavsett om det gäller pris, tekniska krav eller annan faktor – försöker vi använda det för att förbättra oss. Det är en viktig del i vårt kontinuerliga utvecklingsarbete, där varje offert, även de vi inte vinner, bidrar med värdefull lärdom.

4. Vilka konkurrensfördelar har ni gentemot både svenska och utländska aktörer?

Vår närhet till kunden är en av våra största styrkor. Vi kan snabbt vara på plats, förstå lokala förutsättningar och kommunicera utan begränsning. Det gör att vissa kunder är villiga att betala lite mer för tryggheten det innebär, särskilt vad gäller garantiåtaganden och support. Närheten möjliggör även effektivare samarbete över tid.

5. Hur påverkar personalens erfarenhet er kvalitet och kostnad?

När samma personal får göra liknande uppgifter upprepade gånger minskar risken för fel och behovet av dokumentation. Det gör både kvaliteten och effektiviteten bättre. Externa utbildningar ger inte samma effekt – vi har istället utvecklat vår interna "turbinakademi".

6. Hur ser arbetsfördelningen ut i offertprocessen?

Förfrågan tas emot av offertansvarig, som definierar vad som ska offereras. Därefter tar konstruktörer fram lösningsförslag och kontrollerar om turbinen fungerar i den befintliga anläggningen. Vid behov sker återkoppling till kunden för förtydliganden. Företagets VD bistår med prisberäkningar och godkänner det ekonomiska upplägget. Denna samordning mellan rollerna påverkar både kvaliteten och kostnadsbilden i den slutliga offerten.

7. Hur påverkar garantikrav från kunder er möjlighet att vinna upphandlingar?

Längre garantier innebär att vi måste ställa ekonomisk säkerhet, oftast via bankgarantier. Det binder kapital, vilket kan begränsa hur många parallella projekt vi kan offerera samtidigt. Det påverkar vår konkurrenskraft jämfört med större aktörer. Vi har diskuterat lösningar som koncerngarantier för att minska den ekonomiska belastningen. Samtidigt är vi medvetna om att garantier är viktiga för kunderna och att vi måste hitta en balans.

8. Hur hanterar ni och återanvänder erfarenheter från tidigare offerter?

Varje offert – även de som inte leder till affär – är en investering i kunskap. Vi sparar lösningar, beräkningar och koncept som kan återanvändas. Det gör oss snabbare och säkrare i framtida offertarbeten.

9. Vad ser du som den största flaskhalsen i offertarbetet?

Den största utmaningen är bristfälliga förfrågningsunderlag. De tar mycket tid att reda ut och kräver upprepade dialoger med kunden för att få fram nödvändig information. Det fördröjer arbetet och kan skapa osäkerhet i offertens innehåll. Vi har diskuterat att hålla utbildningar för kunder om hur ett bra underlag bör se ut – det skulle gynna både dem och oss.

10. Hur hanterar ni tekniska förbättringar mellan olika projekt?

Vi gör mindre tekniska förbättringar kontinuerligt, till exempel genom att uppdatera materialval eller tätningar. Det handlar om lärdomar från tidigare installationer där vi sett förbättringspotential. Men när det gäller den hydrauliska designen är vi mer restriktiva. Sådana ändringar kräver modellprov eller CFD-simuleringar – och det är en resursfråga. Därför förbättrar vi det runtomkring, men är försiktiga med att ändra själva turbingeometrin.

11. Hur ser ni på transparens i prissättning gentemot kunden?

Det är en balans. Vi vill visa vad som ingår och hur priset är uppbyggt, men samtidigt undvika att det blir för detaljstyrt. För mycket öppenhet kan också leda till att kunden börjar jämföra delmoment utan helhetsförståelse. Vi försöker därför förklara varför vissa delar kostar mer – till exempel specialanpassning eller kort leveranstid – men behåller en viss strategisk kontroll över upplägget.

Bilaga 3, Intervjusvar från tidigare delägare på (TURAB)

Bakgrund:

Koden som styr modellen i detta arbete är byggd helt från grunden av studenten. Under arbetets gång diskuterades vissa tekniska lösningar med handledare vid TURAB. Fokus låg på att säkerställa tydlig struktur och fungerande logik i Inventor. Samtalen användes för att bekräfta och utveckla idéer som redan valts utifrån litteratur och analys.

Stöd kring arrayer:

Arrayerna byggdes för att hantera värden kopplade till RPM och Typ – två parametrar som valts baserat på vetenskaplig grund (se kapitel 2.3.3). Handledaren gav återkoppling på hur dessa kunde struktureras tydligt i tabeller, vilket studenten sedan implementerade.

Stöd kring logik:

Regelstrukturen i iLogic baserades på val som motiverats i teoriavsnittet. Handledaren föreslog hur villkorsblock kunde göras tydligare och enklare att underhålla. Dessa synpunkter användes som stöd i kodens uppbyggnad.

Stöd kring formulär:

Användningen av formulär för styrparametrar hade sin grund i litteratur om användarstyrd konfiguration (kapitel 2.2.4). Handledaren föreslogn visade exempel på hur Inventors formulär kan utformas tekniskt, vilket studenten anpassade till det egna systemet.

Stöd kring test:

Handledaren rekommenderade ett systematiskt test av olika inmatningskombinationer. Studenten följde detta och bekräftade att modellen svarade rätt mot kodens struktur och logik.

Sammanfattning:

Handledaren gav teknisk återkoppling på struktur och funktion. Alla val av parametrar, logik och uppbyggnad baserades på studentens egna beslut och teoretiska analys. Koden och formulären har byggts självständigt med stöd av litteratur, intervjuer och återkoppling från handledning.

Bilaga 4, Utdrag ur checklista för offertarbete vid nytillverkning av turbiner.

Denna bilaga visar ett urval av en intern checklista som används vid offertarbete på TURAB. Checklistan är ett stöd för att strukturera återkommande arbetsmoment i samband med nytillverkning av turbiner. Den innehåller tekniska, administrativa och strategiska kontrollpunkter som säkerställer att relevanta data hanteras korrekt redan i offertfasen.

I detta examensarbete har checklistan analyserats för att identifiera vilka tekniska moment som lämpar sig för parametrering i CAD-miljö. Urvalet av punkter nedan är baserat på denna koppling (se kapitel 3.3.2). Övriga delar av checklistan har uteslutits eller maskats av sekretesskäl.

1. Som en del av grunddata, ska anläggningens övre vattennivå (ÖVY), vid kraftverkets dämningssgräns, anges av kunden. Gällande höjdsystem används.
2. Nedströmsnivå (NVY) vid stillestånd, för att få vattenlås i sugröret, och full drift, för att få fram bruttofallhöjd, ska anges av kunden. Högsta förekommande NVY behövs för att undvika översvämning i kraftstationen.
3. För att definiera befintlig nettofallhöjd, vid full drift, presenterar kunden sin fallförlust i galler, tubintag och tub, om sådan finns. Utströmningsförlust ur sugröret kan vi själva beräkna. För att undvika obehagliga avvikelser mellan angiven och verklig nominell nettofallhöjd, med följande effektavvikelser väljer vi att använda nettofallhöjd vid full effekt som bas för våra prestandadiagram. Vi kan också välja att göra ett gånglinjebaserat prestandadiagram, där varje garantipunkt beräknas utifrån den nettofallhöjd som gäller just där.
4. Bilagda kundritningar studeras mycket noga för att säkerställa att det går att erbjuda moderna prestanda med turbinlösningar ur "Standard 2000".
5. Turbintyp väljs och dimensioneras med avseende på utbyggnadsflöde, nettofallhöjd, kavitationsrisk och flödets varaktighetsdiagram eller kundens viktning av olika garantipunkter.

Bilaga 5, Relevanta utdrag ur teknisk kravspecifikation från kundprojekt

Denna bilaga innehåller ett urval av tekniska krav från ett verkligt kundprojekt. Utdragen har valts utifrån deras koppling till specifika konstruktionsmoment, såsom turbin typ, fallhöjd, flöde, toleranser, materialval och kritiska dimensioner. Projekt- och företagsnamn har tagits bort av sekretesskäl. Informationen stödjer kapitel 3.3.3 och 4.3 i rapporten.

Utdrag från teknisk specifikation

1. Turbine type: Kaplan

2. Net head: 5.6 m

3. Flow data: Rated discharge capacity: 14.5 m³/s

4. Operating range

The turbine and its associated equipment shall be designed for continuous operation and must handle variations in flow and net head within the defined operating range.

5. Control system

The turbine control system shall allow for remote and automatic operation. Emergency shutdown procedures shall be integrated.

6. Surface finish

The guide vane surface shall have a roughness of $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$.

7. Tolerances

The gap between the guide vanes and the top/bottom rings shall not exceed 0.3 mm.

8. Critical frequency

The first critical frequency shall exceed the turbine's runaway speed by at least 25%.

9. Balancing and vibration: All rotating parts must be balanced according to ISO 1940.

10. Service life

All replaceable components shall be designed for a minimum service life of 100,000 hours.

11. Material standards

Material standards to be applied include EN 10083, ISO 683-1, and IEC 60300.

12. Runner geometry

The contractor may define the runner diameter, number of blades, blade direction, and mounting points, provided these comply with standard hydraulic design practices.