



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Masteroppgave 2017  
30 stp + 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

## **Utvikling og testing av læringsplattform for vannturbiner**

### **Development and testing of learning base for water turbines**

Sverre Galby & Håkon Bækkevold Ersland  
Maskin, prosess- og produktutvikling



# Utvikling og testing av læringsplattform for vannturbiner

av

Håkon Bækkevold Ersland og Sverre Galby



Masteroppgave i maskin og produktutvikling  
Norges miljø- og biovitenskapelige universitet  
Fakultet for realfag og teknologi





## FORORD

Etter snart 5 år som studenter ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, er det på tide å levere masteroppgaven vår. Vi har tidligere hatt et godt samarbeid gjennom små og store prosjekter, der vi har diskutert oss frem til mange gode løsninger og spilt hverandre gode. Derfor velger vi å fortsette det gode samarbeidet og skrive masteroppgave sammen. Denne oppgaven er det største prosjektet vi noen gang har gjennomført, og det har vært en svært lærerik prosess.

Vi samarbeidet i høst om utviklingen av et mobilt vannkraftverk og det er denne oppgaven som har inspirert oss videre til å utvikle en testrigg for vannturbiner. Den største utfordringen har vært å fokusere på produktutviklingsmetodikken samtidig som det ble forsøkt å ta hensyn til hydrodynamikk. Selv om vi med stor fordel skulle hatt mer kunnskap om hydrodynamikk før oppgavens start, har vi lært utrolig mye også på dette fagfeltet som det kan være interessant å bygge videre på. Vi synes det har vært spesielt spennende og motiverende å bygge en fysisk prototype som også ble testet.

Vi har fått mye god støtte og veiledning under arbeidet med denne oppgaven og det er derfor flere personer som skal takkes. Først vil vi takke førsteamanuensis Odd Ivar Lekang, som har vært hovedveilederen vår i største delen av semesteret. Han har bidratt med godt humør og god veiledning gjennom hele perioden. Videre vil vi takke førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for veiledningen i den hektiske innspurten før levering. Overingeniør Kristian Sørby Omberg takkes for mange gode innspill samt for å ha introdusert oss for Deep River AS. Takk til teamet i Deep River AS for godt samarbeidet og for å ha tatt oss med på inspirerende messer. Universitetslektor Vegard Nilsen fortjener en takk for hjelp med hydrodynamiske beregninger - et område hvor vi selv hadde manglende kunnskap. Vitenskapelig assistent Ola Sjøby Omberg er den personen, utenom hverandre, vi har tilbragt mest tid med under arbeidet med denne masteroppgaven. Vi vil takke ham for å ha vært tilgjengelig på alle døgnets tider, gode diskusjoner og kreative innspill. Til slutt vil vi gjerne takke venner, familie og kjærester for god støtte under arbeidet med denne masteroppgaven.

---

**Håkon Bækkevold Ersland**

Sivilingeniørstudent, maskin og  
produktutvikling

---

**Sverre Galby**

Sivilingeniørstudent, maskin og  
produktutvikling



## SAMMENDRAG

Bakgrunnen for denne rapporten er en masteroppgave i maskin og produktutvikling ved NMBU. Oppgaven sitt innhold er en videreføring av erfaringer gjort i faget TIP300 høsten 2016. Det ble da skrevet en rapport som omhandler utvikling av et mobilt vannkraftverk og det ble oppdaget at forskningsgrunnlaget for vannturbiner som utnytter energi fra lave fallhøyder ikke var tilstrekkelig [1]. Det er på dette grunnlaget det ble bestemt å utvikle en læringsplattform hvor brukeren kan evaluere forskjellige turbiner i forhold til hydrodynamiske forhold.

Hovedmålet for oppgaven var å utvikle en modulær læringsplattform for vannturbiner som gir brukeren mulighet til å evaluere et turbinding design mot hydrodynamiske forhold. Videre var det forskjellige delmål og produktmål som blant annet beskrev at produktet skal gi brukeren mulighet til å evaluere virkningsgraden til turbinen, det skal være mulig å generere en virvel i forkant av turbinen og at anlegget skal simulere reelle forhold for et pico-system. Med pico-system menes små vannkraftverk som genererer en elektrisk effekt på under 5 kW og stort sett opplever fallhøyder på mellom 1 og 10 meters vannsøyle [2]. Det skal også bygges en prototype basert på 3D-printede materialer. Det ble anslått at produktet grovt spesifisert vil være 1850 mm høy, 600 mm bred, 800 mm lang og veie rundt 50 kg.

Det er brukt forskjellige produktutviklingsmetoder for å komme frem til de mest gunstige løsningene for å utvikle en testtrigg. Pughs metodikk er brukt for å gi forskjellige alternativer en verdi i henhold til forskjellige kriterier. Det er utviklet en funksjonsanalyse for å kartlegge alternative løsninger til de forskjellige funksjonene i produktet. Videre er det brukt seleksjonsmatriser for å velge ut de mest hensiktsmessige løsningene. Digitale verktøy ble brukt for å fremstille produktet i 3D og utføre enkle strømningssimuleringer. Fysiske tester av en prototype er også utført for å verifisere måloppnåelse.

Det første trinnet i prosessen var å samle informasjon om aktuelle turbintyper, relevant bakgrunns-teori og se på lignende løsninger. Videre ble det utarbeid viktige produktegenskaper og en funksjonsanalyse. Det ble valgt løsninger ut fra funksjonsanalysen som videre ble designet i 3D. Det neste trinnet var å utarbeide enkle produksjonsanvisninger og utføre forskjellige forsøk rundt bruken av 3D-printede materialer i sammenheng med trykksatt vann. Etter resultatene av testene ble det utarbeidet enkle produksjonsanvisninger og bygget en prototype. Det ble deretter utført forskjellige tester hvorvidt prototypen fungerte slik den var tiltenkt og hvorvidt produktet innfrir måloppnåelsene.

Resultatene i oppgaven bygger hovedsakelig på testing av prototypen og materialtesting underveis i byggeprosessen. Det har blitt utviklet en læringsplattform som oppnår hovedmålet for oppgaven. Det er mulig for brukeren å generere en virvel i forkant av turbinen og analysere hvilken effekt dette har på virkningsgraden til turbinen. Eksempelvis ble det for et turbinding design og et alternativt oppsett 1,75 % virkningsgrad ved ledeskovler i virveloppetter vinklet 30 grader og 0,86 % virkningsgrad ved rette skovler. Det er også mulig å måle forskjellen på to forskjellige turbinding design. Produktet simulerer forskjellig hydrodynamiske forhold avhengig av hvilke moduler som benyttes, men ingen av oppsettene som ble testet simulerte reelle forhold for pico-systemer. Det høyeste potensielle trykkfallet over turbinen ble etter utregninger fastsatt til å være 0,71 meter. Prototypen ble bygget basert på 3D-printede materialer, men den ble ikke tilstrekkelig robust eller vanntett. Prototypen ble likevel robust og vanntett nok for å foreta nødvendige tester.

Det videre arbeidet vil bestå i å finne løsninger for å oppnå produktmålene som ikke ble innfridd. Det anbefales å videreutvikle designet slik at virkningsgraden til en turbin kan regnes ut med færre feilkilder og antakelser og høyere grad av målenøyaktighet. De forskjellige kildene til store tap i systemet må identifiseres og det må sørges for at utregningene er i henhold til relevante standarder og håndbøker. Det må også videreutvikles design for å teste med flere turbintyper for flere alternative oppsett. Det anbefales til slutt at det utarbeides produksjonsmetoder for bruk av andre materialer og for utvikling av mer robuste anlegg.

## ABSTRACT

This report represents a master thesis in mechanical engineering and product development at the University of Life Science (NMBU) at Campus Ås, Norway. The master project is a continuation of a project performed in TIP300 at NMBU fall 2016 [1]. In the TIP300-project it was developed a pallet-sized hydropower station for low head applications. During this project, it was discovered that it was not sufficient research regarding low head hydro applications. Therefore, it was decided to develop a learning platform for testing turbines in various hydrodynamic conditions for this master project.

The main goal for this thesis was to develop a modular learning platform for water turbines, which provides the user an opportunity to evaluate different turbine designs relative to hydrodynamic conditions. Furthermore, it was desirable for the project to obtain the possibility to evaluate the efficiency of different turbines, and simulate realistic conditions for pico-systems. Another sub-goal was to generate a whirl ahead of the turbine and evaluate the efficiency. A pico-system is a hydropower station that provides less than 5 kW of energy and usually experience between 1 and 10 meters of head [2]. Also, a prototype will be built and tested using 3D-printed materials. The prototype is estimated to be 1850 mm in height, 600 mm wide, 800 mm long and weigh about 50 kg.

To fulfil these goals, different methods regarding product development was used. To arrange different alternatives regarding different criteria, Pughs method was used. An analysis of the products different functions was developed, and matrices was set up to select the most suitable alternatives. Furthermore, the suitable alternatives were modelled in 3D, and assembled for the final product. The next step was to prepare manufacturing directions before a prototype was built and tested.

The results in this thesis were mainly based on testing the prototype and different materials during the building process. A learning platform for water turbines has been built, thus, the main goal was achieved. It was possible to generate a whirl ahead of the turbine to evaluate different turbine designs regarding different whirl intensities. A given setup for one of the turbine alternatives resulted in a 1,75 % efficiency with the whirl generators set to 30 degrees. An efficiency of 0,86 % was obtained with the whirl generators set to neutral. The user can measure and calculate the mechanical power on the turbine shaft, and thereby calculate the efficiency of the turbine. It was shown that two different turbine designs showed different efficiencies. The product simulated different hydrodynamic conditions depending on which modules that were mounted. However, none of the setups could simulate conditions that were applicable for pico-systems. The largest pressure potential over the turbine was estimated to be 0,71 meters. The prototype was built based on 3D-printed materials, but it was not sufficient regarding durability or strength. Nevertheless, the prototype was robust enough to complete testing.

Further recommendations consist of finding better solutions to achieve the unfulfilled goals. It is recommended to improve the design, making it possible to calculate efficiency easier. The different sources of loss in the product must be identified to make design improvements possible. The design should be developed further to include different types of turbines. Finally, alternative manufacturing directions for more durable materials should be developed.



# INNHold

Side:

FORORD .....	i
SAMMENDRAG .....	iii
ABSTRACT .....	v
1. INNLEDNING .....	1
1.1. Bakgrunn .....	1
1.2. Tidligere arbeid .....	2
1.3. Problemstillinger og teknologiske flaskehalsar .....	2
1.4. Oppdragsbeskrivelse .....	3
2. PROSJEKTPLAN .....	5
2.1. Målsettinger .....	5
2.1.1. Hovedmål .....	5
2.1.2. Delmål .....	5
2.2. Arbeidsplan og milepæler .....	5
2.3. Begrensninger for arbeidet .....	6
3. METODEBESKRIVELSE .....	7
3.1. Terminologi og begreper .....	7
3.1.1. Symboler .....	7
3.1.2. Begreper .....	8
3.1.3. Formler .....	8
3.1.4. Forkortelser .....	9
3.2. Metodebruk og løsningsverktøy .....	9
3.2.1. Metodebruk .....	9
3.2.2. Løsningsverktøy .....	9
3.3. Kvalitetssikring .....	10
3.4. Prosesstrinn .....	11
4. TEORI OG TEKNOLOGIUTREDNING .....	13
4.1. Teorigrunnlag .....	13
4.1.1. Energibevaring .....	13
4.1.2. Effekt og virkningsgrad .....	14
4.1.3. Systemkurve .....	16
4.2. Studie av turbintyper .....	19
4.2.1. Pelton- og Turgoturbiner .....	19
4.2.2. Skovlhjulsturbin .....	20
4.2.3. Crossflow-turbin .....	21

	Side:
4.2.4. Archimedes skrueturbin.....	22
4.2.5. Propellturbin inklusiv Kaplan.....	22
4.2.6. Francisturbin .....	23
4.2.7. Propellturbin med virvel-generering .....	24
4.2.8. Valg av turbintype til testtrigg .....	25
4.3. Lignende løsninger .....	26
4.3.1. Eksisterende løsninger på universiteter i Norge .....	26
4.3.2. Armfield .....	27
4.3.3. Veekay Industries .....	28
4.3.4. Vurdering av lignende løsninger.....	29
5. PRODUKTSPESIFISERING .....	31
5.1. Produktmålsetting .....	31
5.2. Rangering av viktige egenskaper .....	31
5.3. Metriske grensespesifikasjoner.....	32
5.4. Metrisk grovspeifisering av produktet .....	32
5.5. Tidlige kostnadsvurderinger.....	33
6. KONSEPTGENERERING .....	35
6.1. Funksjonsanalyse for produkttypen .....	35
6.2. Funksjonsalternativer .....	35
6.3. Hovedoppsett for testtrigg.....	36
6.3.1. Løsning A: Lukket rørkrets.....	36
6.3.2. Løsning B: Lukket rørkrets med åpen tank.....	36
6.3.3. Løsning C: Lukket tank med kompressor .....	37
6.3.4. Løsning D: Åpen tank med pumpe .....	37
6.3.5. Løsning E: Vann fra «Veggen».....	38
6.4. Valg av oppsett.....	38
6.5. Funksjonsalternativer .....	39
6.5.1. Trykk og volumstrømregulering .....	39
6.5.2. Volumstrømmåling .....	40
6.5.3. Trykkmåling .....	41
6.5.4. Måling av mekanisk effekt .....	42
6.5.5. Turbinrør .....	44
6.5.6. Utslagsrør.....	44
6.5.7. Turbinopplagring .....	46
6.5.8. Turbin.....	47
6.5.9. Virveloppretter .....	48



7.	EGENSCREENING OG KONSEPTVALG .....	49
7.1.	Utvikling av seleksjonsmatrise .....	49
7.1.1.	Trykk- og volumstrømregulering .....	49
7.1.2.	Volumstrømmåling .....	50
7.1.3.	Trykkmåling .....	50
7.1.4.	Måling av mekanisk effekt .....	51
7.1.5.	Turbinrør .....	51
7.1.6.	Utslagsrør .....	52
7.1.7.	Turbinopplagring .....	52
7.1.8.	Turbin .....	53
7.1.9.	Virveloppretter .....	53
8.	PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN .....	55
8.1.	Sammenstilling .....	55
8.2.	Design av hovedelementer .....	56
8.2.1.	Rammeverk .....	56
8.2.2.	Turbin .....	56
8.2.3.	Rørdeler .....	57
8.2.4.	Virvelsystem .....	57
8.2.5.	Koblingsboks .....	58
8.2.6.	Tanksystem .....	59
8.2.7.	Bremsesystem .....	59
8.2.8.	Pumpe .....	60
8.3.	Design av komponenter .....	60
8.4.	Modularisering og standardkomponenter .....	62
8.4.1.	Modulisering .....	62
8.4.2.	Standardkomponenter .....	64
8.5.	Materialegenskaper, overflatebehandling, styrke og vedlikehold .....	66
9.	PRODUKSJON AV PROTOTYPE .....	69
9.1.	Produksjon av prototype .....	69
9.2.	Utvikling av sensorsystem .....	73
9.3.	Kostnads kalkyle for prototype .....	74
10.	PRESENTASJON AV PROTOTYPE .....	77
10.1.	Renderte fremstillinger av prototype .....	77
10.2.	Fotografier av prototype .....	79
11.	MATERIAL OG FUNKSJONSTESTING .....	81
11.1.	Material- og funksjonstesting .....	81

	Side:
11.1.1. Strømningssimulering av turbin og virveloppretter .....	81
11.1.2. Produksjonsmetoder for vanntette 3D-printede deler .....	83
11.1.3. Skruemoment ved akrylflenser .....	87
11.1.4. Funksjonstest av elektroniske trykksensorer .....	89
11.1.5. Lekkasjetest av komplett rørsystem med vinkelmodul .....	91
11.1.6. Funksjonstest av komplett anlegg .....	92
11.1.7. Utbedringstest etter drift.....	94
11.2. Brukstest av anlegg.....	96
11.2.1. Virkningsgrad med 2 forskjellige turbiner for anlegg med vinkelmodul .....	96
11.2.2. Virkningsgrad med 2 forskjellige turbiner for horisontalt system.....	102
12. PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON .....	107
12.1. Konseptutviklingsarbeidet og forbedringspotensialer .....	107
12.2. Design- og produksjonsrevisjon .....	107
12.2.1. Designrevisjon .....	107
12.2.2. Produksjonsrevisjon.....	108
12.3. Læringsgevinst.....	109
13. KONKLUSJON .....	111
13.1. Resultater .....	111
13.2. Anbefalinger .....	111
13.3. Videre arbeid.....	112
14. REFERANSER .....	113
14.1. Vitenskapelige artikler og bøker.....	113
14.2. Personlige meddelelser.....	114
14.3. Nettkilder .....	115

## 1. INNLEDNING

Det vil innledningsvis bli redegjort for bakgrunnen for oppgaven, det tidligere utførte arbeidet, de aktuelle problemstillingene og en oppdragsbeskrivelse.

### 1.1. Bakgrunn

1,3 milliarder mennesker lever i dag uten tilgang på elektrisitet [3]. I fattige områder i Afrika, Asia og Sør-Amerika er tilgangen til elektrisitet tilstedeværende, men svært ustabil. Mellom 18-21 % av verdens befolkning har ikke tilgang på elektrisitet i det hele tatt og ytterligere 13 % er avhengig av ustabile kraftnettverk.

65 % av verdens energiforbruk kommer fra fossile energikilder, hvor 43 % av energien fra disse fossile energikildene er fra kullkraftverk [4]. I dages samfunn er det lite akseptert å fyre med kul, likevel dør fortsatt 7 millioner mennesker hvert år med dødsårsak relatert til luftforurensing fra kullkraftverk [4]. Med økende folketall og forbruk er forskere enige om at verden står ovenfor en utfordring angående energiforbruk.

Vannkraftverk utgjør omkring 20 % av verdens totale energiproduksjon i dag [5]. Vannkraft har vært brukt som energikilde siden før år 900 [6]. I starten ble det utnyttet vannkraft for å male korn og pumpe vann, og i Norge ble det første vannkraftverket etablert i 1882 [7]. Vannkraft har gitt Norge muligheten til å dekke hele sitt energibehov samtidig som strøm eksporteres til utlandet. Det ble produsert 134 TWh energi i Norge i 2013 hvor 129 TWh kom fra vannkraft [8]. Den mest brukte metoden for å omforme vannkraft til elektrisk energi er gjennom store vannkraftanlegg med demninger og jevn produksjon [9].

De siste årene har det vært et økende fokus på de store naturinngrepene som følger et stort vannkraftverk med demning. Demninger blokkerer for naturlig fiskemigrasjon og samler opp sedimenter som kan være essensielle for å vedlikeholde naturen og dyrelivet på nedsiden av demningen [10]. Det finnes fortsatt stort potensiale for flere vannkraftverk, spesielt i utviklingsland, men av miljøhensyn er det uenighet hvorvidt flere store vannkraftverk bør utbygges [11].

Det er en tydelig sammenheng mellom fattigdom og tilgang til elektrisitet [12]. I avsidesliggende områder i fattige land er prosentandelen med tilgang til elektrisitet lav, ofte grunnet høye kostnader knyttet til utbygging av infrastruktur [2]. I slike områder er behovet for elektrisitet i første omgang knyttet til essensielle bruksområder og ikke sammenlignbart med overforbruket i den vestlige verden. I dag brukes for eksempel parafinlamper som lyskilde, som er dyre i drift, gir dårlig lys og er forbundet med helsefare [2]. Diesel-aggregat kan benyttes for å generere elektrisitet i slike områder, men i en rapport fra verdensbanken kommer det frem at småskala vannkraftverk som produserer under 5 kW vil være en av de rimeligste løsningene for å få elektrisitet til slike områder [2]. Slike kraftverk kalles for pico-systemer.

Pico-systemer bygges ikke som store fastmonterte kraftverk, men demningsløse applikasjoner som monteres i elven eller ved elveleiet. Systemene er derfor ikke et like kraftig naturinngrep samtidig som det lettere kan levere elektrisitet uavhengig av infrastruktur og kraftnett. Det finnes lite forskning på hvordan et pico-system kan bygges mest hensiktsmessig, hvilken turbintype som bør benyttes og andre forhold. Hensikten med denne oppgaven er å utvikle og bygge en testtrigg som kan fungere som en læringsplattform for å finne ut av spørsmål og utfordringer knyttet til pico-systemer.

Det ble derfor bestemt å utvikle en testtrigg som skal fungere som en læringsplattform hvor det kan eksperimenteres med forskjellige turbintyper i forhold til trykk og volumstrømmer som et reelt pico-system opplever. Parametere som det forventes at et pico-system kan oppleve er vist i tabell 1-1. Det er ønskelig at oppgaven kan være et bidrag i det voksende forskningsmiljøet rundt pico-systemer, samt hjelpe Deep River til å gjøre riktige valg og bidra med generell forståelse for vannsystemer blant studentene ved NMBU.

**Tabell 1-1. Reelle forhold det forventes at et pico-system opplever. Det er ønskelig å simulere forhold tilsvarende disse verdiene.**

Reelle forhold for pico-system	
Trykk [m]	Vannhastighet [m/s]
1-10	1-10

## 1.2. Tidligere arbeid

Undertegnede har siden sommeren 2016 vært engasjert i utviklingsprosjekter i samarbeid med bedriften Deep River AS og Norges miljø- og biovitenskapelige universitet(NMBU). Samarbeidet startet som følge av felles interesser for en fremtidsrettet, nyskapende og miljøvennlig fagretning.

I høst ble det skrevet en hovedfagsoppgave i faget Konsept og produktrealisering(TIP300), hvor det ble utviklet et mobilt pico-system med konsepttegninger [1]. Under prosjektfasen ble det satt en rekke begrensninger knyttet til viktige elementer som blant annet valg av turbintype. Konseptet som ble utviklet har senere virket som et springbrett for ytterligere løsningsalternativer og viser at mulighetene for å bygge et kostnadseffektivt pico-system er tilstede.

Masteroppgaven har sitt utspring fra det som ble definert som «videre arbeid» i TIP300-oppgaven. En av de større usikkerhetsmomentene fra denne oppgaven var valg av turbintype i forhold til de forskjellige forholdene et slikt system blir utsatt for.

## 1.3. Problemstillinger og teknologiske flaskehals

Problemstillingene denne oppgaven søker å besvare er listet punktvis under.

- Hvilke turbintyper er mest hensiktsmessig å implementere i et pico-system?
- Hvordan kan en testtrigg som gir læringsgevinst relatert til pico-systemer utformes?
- Hvor stor læringsgevinst har produktet for sluttbrukeren?

Teknologiske flaskehals er kritiske punkter som, dersom de trer i kraft, kan forhindre at utvikling og produksjon blir vellykket. Punktene under må det utøves ekstra varsomhet rundt under utviklingen.

- Det er ikke nok energi i systemet for at turbinen går rundt.
- Det er ikke nok mekanisk effekt på akslingen for at den er målbar.
- De forskjellige komponentene i testtriggen tåler ikke trykket i systemet.
- De tilgjengelige materialene har ikke tilfredsstillende egenskaper.
- Komponenter og materialer blir for kostbare i forhold til tilgjengelig budsjett.
- Testtriggen blir for stor og mister mobiliteten.
- Testtriggen blir ikke vanntett der det er nødvendig.
- Testtriggen blir ikke robust nok og får en lav levetid.

## 1.4. Oppdragsbeskrivelse

Oppdraget er å utvikle en læringsplattform som gir brukeren mulighet til å eksperimentere med forskjellige turbindinger i forhold til forskjellige hydrodynamiske forhold.

For at produktet skal være realistisk er det viktig at det enkelt kan endres for å simulere forskjellige reelle applikasjoner. Dette innebærer at produktet må være modulerbart og at nødvendige deler enkelt kan erstattes eller endres for å simulere ønskede forhold.



## 2. PROSJEKTPLAN

Dette kapitlet vil omhandle målene for oppgaven med tilhørende arbeidsplan og milepæler. Videre vil begrensningene for oppgaven bli beskrevet.

### 2.1. Målsettinger

Det blir her presentert hovedmål og delmål.

#### 2.1.1. Hovedmål

Å utvikle, bygge og teste en modulær læringsplattform for vannturbiner som gir brukeren mulighet til å evaluere et turbindingdesign mot hydrodynamiske forhold.

#### 2.1.2. Delmål

For å nå hovedmålet må følgende delmål være gjennomført:

- Å utføre en teknologiutredning på turbintyper, lignende løsninger og fysiske prinsipper.
- Å lage problemstillinger med tilhørende mål og sette begrensinger for oppgaven.
- Å utføre en funksjonsanalyse, vurdere materialvalg og utforme produksjonsanvisninger
- Å designe testriggeren ved hjelp av 3D-modellering og utføre enkle strømningsmoduleringer.
- Å bygge en prototype og gjennomføre relevante tester.
- Å lage renderte fremstillinger av prototypen og ferdigstille rapporten for levering.

### 2.2. Arbeidsplan og milepæler

Arbeidsplanen er et nyttig verktøy for å holde fremgang i prosjektet og beskrevet i tabell 2-1. Planen under er grov, men beskriver i hvilket tidsrom de forskjellige oppgavene skal arbeides med og fullføres.

**Tabell 2-1. Arbeidsplan med milepæler. Milepæler er markert med nummererte trekanter.**

Delmål	Tidsperiode					
	Jan.	Feb.	Mars.	April.	Mai.	Juni.
Teknologiutredning, lignende løsninger og fysiske prinsipper.		▲1				
Lage problemstillinger, mål og begrensinger for oppgaven.			▲2			
Funksjonsanalyse, materialvalg og produksjonsanvisninger.				▲3		
Design testriggeren i 3D og utføre strømningsmoduleringer.					▲4	
Bygge prototype og utføre relevante tester.						▲5
Lage renderinger og ferdigstilling av rapport						▲6
Lage presentasjon og forsvare oppgaven.						▲7

Fra tabell 2-1 kan en se at det er beregnet spesielt god tid til designing, bygging og testingen av prototypen, da dette vil være en tidkrevende prosess og viktig del av oppgaven. Det kommer også frem at rapporten skal ferdigstilles 15. mai og forsvares med presentasjon 9. juni. Hvilken dato de forskjellige milepælene skal være fullført er beskrevet i Tabell 2-2.

**Tabell 2-2. Oversikt over når milepæler sa være oppnådd.**

Milepæler	Dato
1	15. Februar
2	29. Februar
3	15. Mars
4	31. Mars
5	15. April
6	15. Mai
7	9. Juni

Fra tabellen 2-2 kan en for eksempel se at milepæl 3 «Funksjonsanalyse, materialvalg og produksjonsanvisninger» skal være fullført innen 15. mars.

### 2.3. Begrensninger for arbeidet

Prosjektet anses som omfattende i forhold til tiden det skal utføres på og det blir derfor nødvendig å sette begrensninger for oppgaven. Begrensningene for oppgaven blir listet opp under.

- På grunn av begrenset budsjett vil det bli brukt tilgjengelig utstyr som finnes på universitetet. Dette innebærer blant annet at det ikke blir innkjøpt en best egnet pumpe. Det blir også kun brukt verktøy som er tilgjengelig på universitets verksted og Eik Ideverksted.
- Selve turbinen og turbinbladene blir ikke videre optimalisert da kun prinsippet skal testes. Det etterstrebes derfor ikke å få god virkningsgrad for turbinen.
- Det vil ikke bli gjort CFD-simuleringer av hele anlegget, kun over turbin og virveloppretter.
- Det vil ikke bli analysert hvorfor en turbin oppnår en virkningsgrad eller hvorfor en turbin har bedre virkningsgrad enn en annen, kun legge til rette for at brukeren skal kunne gjøre dette.
- Det vil ikke bli gjort FEM-analyser.
- Det vil ikke bli lagt vekt på valg av hjul, det blir heller ikke tegnet inn i 3D-tegninger.
- Det vil kun bli 3D-printet deler i ABS-plast.
- Det vil ikke bli laget noen anvisning for sammensetting eller målsatte tekniske tegninger, kun enkle produksjonsanvisninger av viktige komponenter.
- Det vil ikke bli undersøkt markedsbehov og potensiale, kun en vurdering mot lignende løsninger.
- Det vil ikke bli utført en vurdering av hvor konkurransedyktig produktet er i forhold til kostnader, kun gjort en vurdering av kostnader tilknyttet prototyping.
- Det vil ikke bli utført en analyse av miljøavtrykket til produktet.



### 3. METODEBESKRIVELSE

Dette kapitlet tar for seg de forskjellige metodene brukt i oppgaven. Hensikten er at leseren kan bla tilbake til dette kapitlet for å finne betydningen av et symbol, et begrep eller lignende dersom det oppstår tvil. Kapitlet gir også en kort beskrivelse av de forskjellige metodene og verktøyene brukt i oppgaven og de forskjellige prosessene oppgaven er et resultat av.

#### 3.1. Terminologi og begreper

De forskjellige symboler, begreper og formler som er brukt i oppgaven vil bli presentert i dette delkapitlet.

##### 3.1.1. Symboler

Delkapitlet inneholder en liste over de forskjellige symbolene som er brukt i oppgaven (Tabell 3-1).

**Tabell 3-1. Symbolliste. Oversikt med beskrivelse og enhet over de forskjellige symbolene som er brukt i oppgaven.**

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
$m$	Masse	$kg$
$g$	Tyngdekraftakselerasjon	$m/s^2$
$v$	Hastighet	$m/s$
$p$	Trykk	$N/mm^2$
$\rho$	Tetthet	$kg/m^3$
$h$	Høyde	$m$
$I$	Annet arealmoment	$mm^4$
$\omega$	Vinkelhastighet	$rad/s$
$I_a$	Strøm	$A$
$U$	Spenning	$V$
$Q$	Volumstrøm	$m^3/s$
$L$	Lengde	$m$
$D$	Diameter	$m$
$r$	Radius	$m$
$P$	Effekt	$W$
$Z$	Vertikal avstand	$m$
$f$	Friksjonsfaktor	-
$T$	Moment	$Nm$
$F$	Kraft	$N$

### 3.1.2. Begreper

Det blir her listet forskjellige spesielle begreper brukt i oppgaven (Tabell 3-2).

**Tabell 3-2. Begrepsliste. Oversikt over de forskjellige begrepene som er brukt med forklaring.**

Begrep	Forklaring
<b>Diffusor</b>	En kanal utformet for å redusere hastighet og øke trykk i en væske- eller gasstrøm.
<b>Skovler</b>	Blader plassert i en strømmende væske for å endre strømningsbildet.
<b>Løpehjul</b>	Den delen av turbinen som spinner rundt sin egen akse.
<b>Utslagsrør</b>	Den delen etter en reaksjonsturbin som leder ut vannet og sørger for at vann ikke blir dratt tilbake til turbinen. Inneholder ofte en diffusor.
<b>Virveloppretter</b>	Betegnelse på et system som blir brukt for å lage en virvel i vannstrømmen.
<b>Periferi-hastighetsfaktor</b>	Relasjon mellom hastighet på vannstrømmen og rotasjonshastigheten til turbinen.
<b>Tachometer</b>	Utstyr for å måle rotasjonshastigheten til en aksling

### 3.1.3. Formler

En liste over de forskjellige formlene brukt i oppgaven er listet under (tabell 3-3). De forskjellige formlene er indeksert og indeksen vil være synlig til høyre for formlene der de er benyttet i oppgaven.

**Tabell 3-3. Formelliste. Liste over formler med betydning og indeks.**

Betydning	Formel	Indeks
<b>Potensiell Energi</b>	$E_p = mgh$	3.1
<b>Kinetisk Energi</b>	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$	3.2
<b>Bernoullis likning</b>	$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$	3.3
<b>Rotasjonsenergi</b>	$E_{Rot} = \frac{1}{2}I\omega^2$	3.4
<b>Elektrisk effekt</b>	$P = UI_a$	3.5
<b>Virkningsgrad</b>	$\eta = \frac{P_m}{P_h}$	3.6
<b>Mekanisk effekt</b>	$P_m = T\omega$	3.7
<b>Hydraulisk effekt</b>	$P_h = \rho g Q h$	3.8
<b>Friksjonstap i rør</b>	$h_f = f \cdot \frac{Lv^2}{D2g}$	3.9
<b>Volumstrøm</b>	$Q = \pi \cdot r^2 \cdot v$	3.10

### 3.1.4. Forkortelser

De forskjellige forkortelsene brukt i oppgaven er listet under (Tabell 3-4).

**Tabell 3-4. Forkortelsesliste. Liste over forkortelser med utledning for hver forkortelse.**

Forkortelse	Utledning
<b>IPD</b>	Integrated Product Development
<b>NMBU</b>	Norges Miljø- og Biovitenskapelige universitet
<b>ABS</b>	Akrylnitril-butadien-styren
<b>NTNU</b>	Norges Teknisk-naturvitenskapelige universitet
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>FEM</b>	Finite Element Method

## 3.2. Metodebruk og løsningsverktøy

Det vil i dette delkapittelet bli gjennomgått de forskjellige metodene brukt i oppgaven og en beskrivelse av forskjellige løsningsverktøy

### 3.2.1. Metodebruk

De forskjellige metodene for produktutvikling og seleksjon som er brukt i oppgaven, blir kort forklart i dette kapittelet.

#### **Integrert produktutvikling**

Integrert produktutvikling (IPD) bygger på at det benyttes en «huskeliste» for viktige elementer som skal være med i et produktutviklingsprosjekt. Metoden benyttes av mange bedrifter i hele verden og trekker inn flere fagområder som psykologi og miljø. Kartlegging av markedets krav, kundens behov og relevante dataverktøy er eksempler på elementer innen IPD. Hovedhensikten med IPD er å sørge for at ting blir gjort i riktig rekkefølge uten at noen viktige elementer uteblir [13].

#### **PUGH**

Pugh er en enkel seleksjonsmetode for å velge det beste alternativet blant flere konsepter. Fra et valgt sett med kriterier blir hvert alternativ gitt poeng innenfor hvert kriterium. Det er viktig å velge gode kriterier, da disse påvirker utfallet i stor grad. Typisk angis det poeng mellom 1 og 5, der 5 angir den beste verdien. Det alternativet med flest poeng totalt vil etter Pughs metode være det mest hensiktsmessige å videreføre [14].

### 3.2.2. Løsningsverktøy

De forskjellige digitale løsningsverktøyene som er benyttet i oppgaven blir kort forklart i dette kapittelet.

#### **Microsoft Word 2016**

Microsoft Word er et tekstbehandlingsverktøy som er brukt til å skrive oppgavens innhold, legge til bilder, formatere teksten og lignende oppgaver.

**Microsoft Excel 2016**

Microsoft Excel er et digitalt regneark. Det er brukt for å lage grafer, tabeller og enkelte utregninger.

**Solid Works 2016/2017**

Solid Works er et program som lar brukeren designe digitale modeller i 3D og gjøre diverse analyser av slike modeller. Solid Works har blitt brukt for å designe alle fysiske komponenter og produsere renderte fremstillinger av disse. Det er også brukt for å utføre strømnings simuleringer av systemet.

**CES Edupack 2016**

CES Edupack er brukt for å finne ut av materialegenskaper til forskjellige aktuelle materialvalg.

**PUMP-FLO V.10**

PUMP-FLO er et program brukt for å simulere systemkurver for gitte parametere. Dette ble brukt for å estimere hvordan systemkurven for testtriggen kan se ut.

**Flashprint 3.16.2**

Flashprint er et program for å klargjøre en 3D-fil for 3D-printing. Programmet planlegger hvordan dysen i 3D-printeren mest hensiktsmessig skal bevege seg for å oppnå godt resultat. Programmet er brukt for alle 3D-printede deler i oppgaven.

**3.3. Kvalitetssikring**

For at produktet skal oppnå ønsket kvalitet er viktig at utformes i henhold til hensiktsmessige standarder. For testtriggen vil det være nødvendig å ha kjennskap til forskjellige standarder for å blant annet tolke måleusikkerhet og kvalitetssikre at brukerne ikke blir lært noe som ikke stemmer. Det er i tabell 3-5 vist en oversikt over standarder og håndbøker som kan bli berørt.

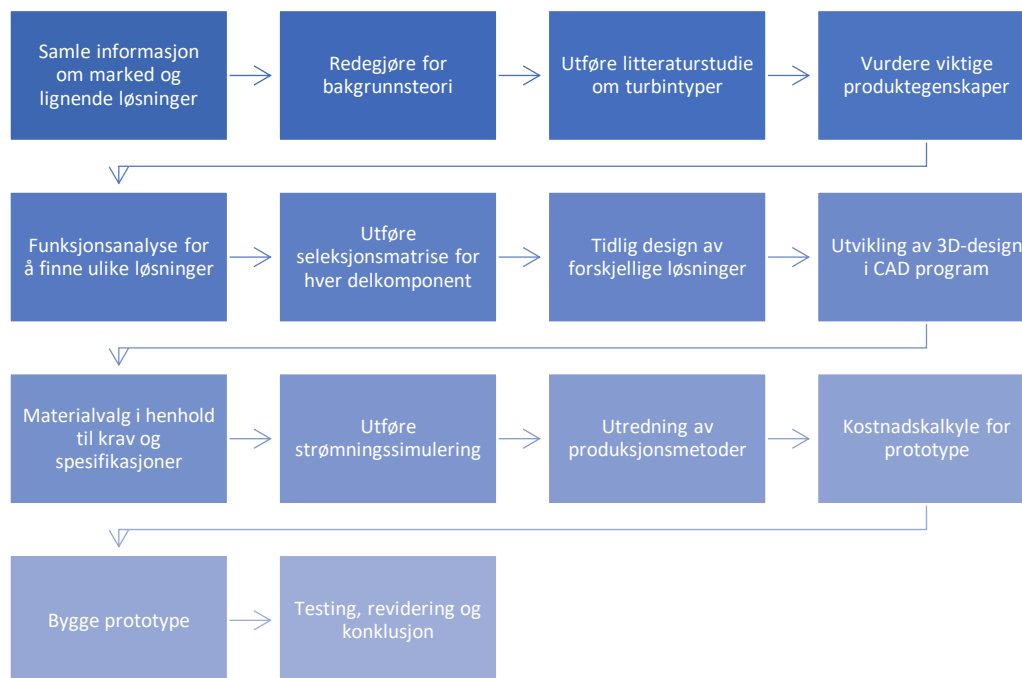
**Tabell 3-5. Oversikt over standarder og håndbøker som kan bli berørt i prosjektet.**

Område	Standard eller håndbok
Konstruksjon og styrkeberegning	Eurocode 3, 4 og 5
Vannette komponenter	IP-sertifisering
Kvalitetsstyring	ISO9000
Måleusikkerhet	Håndbok for beregning av måleusikkerhet ved miljølaboratorier, NIVA [15].

For å hente inn så relevant informasjon som mulig vil det, i så stor grad som mulig, bli brukt litteratur fra godkjente lærebøker på universitetet og vitenskapelige artikler fra anerkjente tidsskrift. Det vil være viktig å kvalitetssikre resultatene som fremkommer ved bruk av testtriggen og å analysere relevante standarder og håndbøker dersom det fremkommer uventede resultater.

### 3.4. Prosesstrinn

De forskjellige trinnene i produktutviklingsprosessen denne rapporten tar for seg er vist under (figur 3-1). Etter hvert som nye elementer dukker opp er det mulig å gå tilbake til tidligere trinn for å forbedre eller endre hver prosess.



**Figur 3-1. Oversikt over prosessstrinnene for oppgaven.**



## 4. TEORI OG TEKNOLOGIUTREDNING

Det blir i dette kapitlet gitt en innføring i relevant teorigrunnlag knyttet til testtriggen og en innføring i forskjellige turbintyper og hvilke som mest hensiktsmessig kan implementeres i produktet.

### 4.1. Teorigrunnlag

Det vil bli gjort en gjennomgang av forskjellige fysiske formler og prinsipper som er viktig i utarbeidingen av en testtrigg for vannturbiner. Det vil bli gjennomgått teori vedrørende energibevaringsprosessen, effekt, virkningsgrad og system- og pumpekurver. Dette er nødvendig kompetanse for å evaluere og forstå parameterne som måles i testtriggen.

#### 4.1.1. Energibevaring

Siden testtriggen skal fungere som en læringsplattform og danne grunnlaget for en labmanual, er det interessant å se på den totale energibevaringen, selv om all teorien ikke benyttes direkte for å finne resultatene.

Energien fra rennende vann kommer av høydeforskjell og den potensielle energien. Desto større avstand i høydemeter det er fra vannreservoaret til turbinen, desto mer potensiell energi kan det tilføres systemet.

$$E_p = mgh \quad (3.1)$$

Når vannet er i bevegelse har det kinetisk energi og i en impulsturbin blir all energien omformet til kinetisk energi gjennom en dyse. I en reaksjonsturbin hvor hele turbinen er omringet av vann utnyttes også trykket i vannet direkte for å skape rotasjon. Den kinetiske energien er gitt med formelen under.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.2)$$

Bernoullis ligning kan brukes for å regne ut trykket før og etter tverrsnittoverganger og høydeforskjeller i systemet. For testtriggen vil vannet på et tidspunkt strømme fra et mindre tverrsnitt i en slange til et større tverrsnitt i røret hvor turbinen er montert. Avhengig av hvor det er kjent trykk, og hvor man ønsker å finne trykket, må Bernoullis likning benyttes. For at ligningen skal være balansert må den totale energien i to punkter være lik. Dersom  $v_2$  reduseres må altså  $p_2$  eller  $h_2$  øke.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (3.3)$$

I de tilfeller hvor den totale energien ikke er lik i to punkter, kan Bernoullis ligning benyttes for å regne ut trykktapene. Ligningen blir da som vist under.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 - \tau ap = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

Ved hjelp av potensiell og kinetisk energi, avhengig av turbintype, omformes energien til mekanisk rotasjonsenergi om en aksling. Rotasjonsenergien er avhengig av annet arealmoment til turbinen og vinkelfarten. Det betyr at en turbin med større diameter vil rotere saktere enn en med mindre diameter dersom den samme energien blir påført.

$$E_{Rot} = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (3.4)$$

Den mekaniske effekten er den effekten akslingen gir som kan bli tatt opp av en generator. Selv om testtriggen ikke vil bli koblet til en generator i første omgang, er det lærerikt å få kjennskap til hvordan effekten fra generatoren blir. Ved å koble akslingen til en generator kan den elektriske effekten bestemmes ved å lese av strømmen og spenningen som blir induisert.

$$P = UI_a \quad (3.5)$$

Den totale gangen energikonvertering blir da:

$$E_{Potensiell} \rightarrow E_{Kinetisk} \rightarrow E_{Rotasjon} \rightarrow E_{Elektrisk}$$

#### 4.1.2. Effekt og virkningsgrad

For å bestemme hvor godt turbinen opererer innenfor de gitte forholdene er det hensiktsmessig å se på virkningsgraden. Virkningsgraden vil være forholdet mellom energien akslingen leverer og energien som er til rådighet i vannstrømmen. Henholdsvis den mekaniske energien og den hydrauliske energien. Virkningsgraden til en turbin kan derfor bestemmes som forholdet mellom den mekaniske effekten og den hydrauliske effekten.

$$\eta = \frac{P_m}{P_h} \quad (3.6)$$

Rotasjonsenergien fra akslingen gir en mekanisk effekt. Denne mekaniske effekten er gitt som produktet av momentet på akslingen og vinkelhastigheten. Begge disse verdiene er målbare ved hjelp av enkle metoder, slik at den mekaniske effekten kan bestemmes for videre bruk.

$$P_m = T\omega \quad (3.7)$$

Den hydrauliske og høyest teoretisk mulige effekten kan utledes fra definisjonen av effekt.

$$\text{Effekt} = \text{kraft} \cdot \text{hastighet}$$

Dersom areal innføres både som teller og nevner uten å endre på ligningen kan effekt uttrykkes som produktet av trykk og volumstrøm.

$$\text{Effekt} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Areal}} \cdot \text{hastighet} \cdot \text{areal} = \text{trykk} \cdot \text{volumstrøm}$$

Når det blir gjort beregninger i forbindelse med vannkraftverk er det vanlig å uttrykke trykket som antall høydemeter vannet er, eller kunne vært for et slikt trykk, over et gitt referansepunkt. For reelle forhold er også gravitasjon og tetthet gjeldende faktorer og den hydrauliske effekten blir da:

$$P_h = \rho g Q h \quad (3.8)$$

Fra innholdet i formelen kommer det frem at kun volumstrøm og fallhøyde er variable verdier som endrer den hydrauliske effekten, med vann som flytende medium.

For et reelt system plassert i naturen kan ikke fallhøyden til vannet brukes direkte fra den vertikale høydeforskjellen mellom turbin og rørinnngang. Grunnen for dette er at det vil være energitap i røret på vei til turbinen. Den reelle fallhøyden er derfor gitt ved følgende likning:

$$\begin{aligned} h_{tot} &= h - h_f \\ h_f &= f \cdot \frac{Lv^2}{D2g} \end{aligned} \quad (3.9)$$

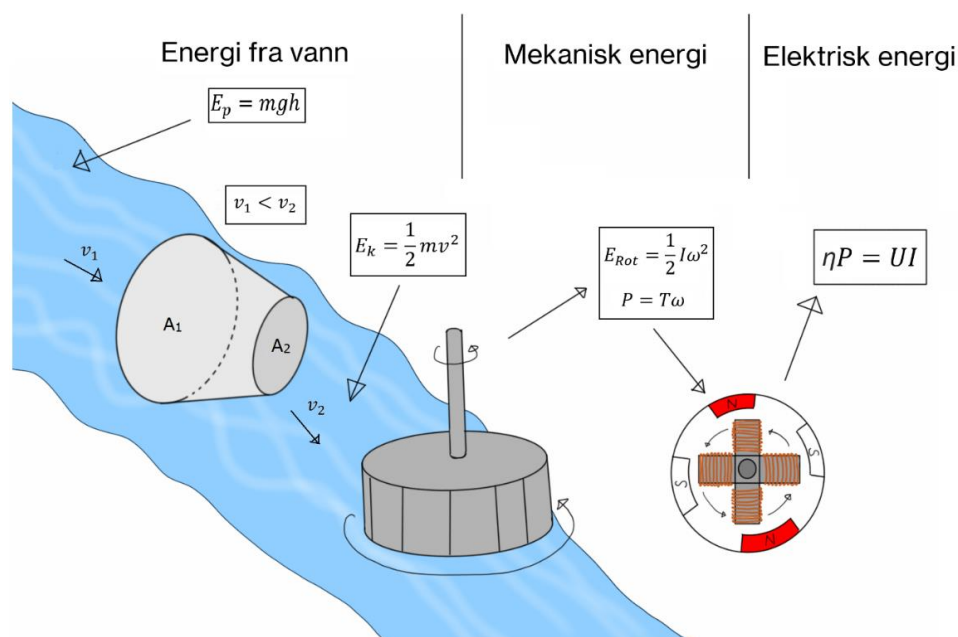


Her er  $f$  Darcy-Weisbachs dimensjonsløse friksjonsfaktor, som inneholder ruheten til rørets flater, og et reynoldstall avhengig av hvor laminær strømmen i røret er [16]. Friksjonsfaktoren kan regnes ut på forskjellige måter avhengig av de faktiske forholdene, dette gjøres ved å sette  $h_f$  inn som tap i Bernoullis likning (formel 3.3).

Volumstrømmen er avhengig av hastigheten til vannet gjennom et tverrsnitt med gitte dimensjoner. Volumstrømmen er gitt som følger:

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot v \quad (3.10)$$

Figur 4-1 viser en oversikt over et eksempel med de forskjellige funksjonene og hvordan energiomformingen foregår gjennom prosessen. Til venstre i figuren er det det en vannføring med potensiell energi som gjennom prosessene mot høyre blir omgjort til elektrisitet.



**Figur 4-1. Veien fra energi i rennende vann til elektrisk energi ut fra generator. Øverst til venstre er det potensiell energi i vann som blir kinetisk energi som går inn i turbinen. Her blir hastigheten hevet ved å minske arealet. Vannet i bevegelse skaper rotasjonsenergi som skaper en mekanisk effekt. Til slutt blir mekanisk effekt omgjort til elektrisk effekt i generatoren [1].**

Det er interessant å regne ut hva den hydrauliske effekten eksempelvis kan være for et pico-system. Volumstrømmen og fallhøyden er parametere som varierer avhengig av lokasjonen og røroppsettet til turbinen. For eksempelet bestemmes det en fallhøyde på 5 meters trykk og en vannhastighet på 5 m/s. For slike forhold antas det at et rør med diameter på 200 mm kan være et fornuftig alternativ for å lede vannstrømmen. Volumstrømmen er da gitt som:

$$Q = \pi \cdot (0,1m)^2 \cdot 5 \text{ m/s} = 0,157 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.10)$$

Med alle parametere for hydraulisk effekt kjent og en antakelse om 5 m fallhøyde inkludert eventuelle tap, er det interessant å se hva den hydrauliske effekten for eksempelet er.

$$P_h = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,157 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 5 \text{ m} = 7704,8 \text{ W} \quad (3.8)$$

Utrekningen viser at dersom turbinen tar opp all energien i vannet og ingen andre tap oppstår, vil et resultat på over 7,7 kW være oppnåelig. Det er urealistisk, men sier noe om hvilke størrelsesforhold

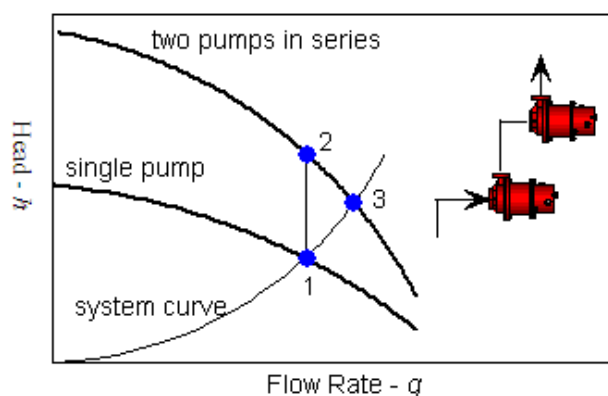
det opereres med. Det kan være interessant å legge merke til at teoretisk effekt øker fra 7,7 kW til 17,34 kW kun ved å øke diameteren på røret fra 200 mm til 300 mm.

#### 4.1.3. Systemkurve

Siden energien i et vannkraftverk, uansett størrelse, avhenger av trykk og volumstrøm er det interessant å se hvordan disse parameterne avhenger av hverandre.

Forholdet mellom trykk og volumstrøm kan bare endres i forhold til anleggets systemkurve. Systemkurven sier noe om trykkets ( $h$ ) avhengighet av volumstrømmen ( $Q$ ), og er en grafisk fremstilling av energilikningen for systemet [17]. Systemkurven er oftest brukt for å velge riktig pumpe for et gitt anlegg, men er også nyttig for å forstå hvordan volumstrøm og trykk avhenger av hverandre.

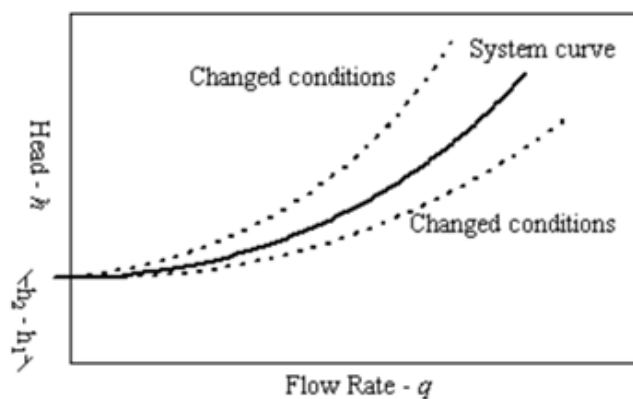
Dette kan illustreres ved å koble pumper i parallell eller serie. Dersom to pumper er koblet i parallell ville det vært nærliggende å tro at volumstrømmen dobles samtidig som trykket holdes konstant, så lenge rørtverrsnittet før og etter koblingen holdes konstant. I realiteten forandres begge parameterne i henhold til systemkurven. Dersom pumpene ble koblet i serie ville det vært naturlig å tro at trykket økte mens volumstrømmen ble holdt konstant, men også her forandres begge parametre i henhold til systemkurven. Fra figur 4-2 er det tydelig at systemet ikke endres fra punkt 1 til 2, men at det endres fra punkt 1 til 3 når en ekstra pumpe blir koblet inn i serie.



**Figur 4-2. Systemkurve med én og to pumper når pumpene er koblet i serie [18].**

Dersom selve utformingen på anlegget forandres, vil systemkurven endre seg. Dette kan være justering av lengde på rør eller høydeforskjeller i anlegget (figur 4-3). Systemkurven er avhengig av det statiske trykktapet som følger av høydeforskjeller i systemet og dynamisk trykktap fra friksjon i rør og viskositeten i vannet.

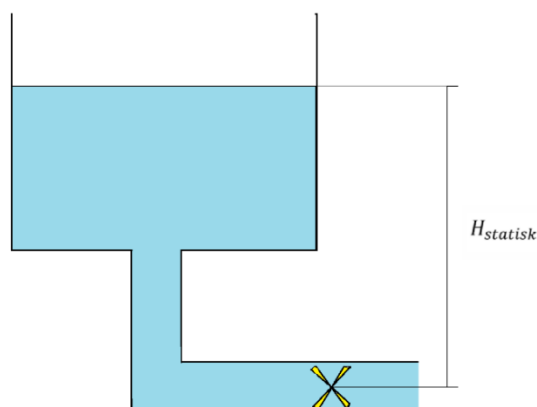
Tilsvarende finnes det pumpekurver som sier noe om hvilke trykk og volumstrømmer en spesifikk pumpe kan operere innenfor. For å finne en passende pumpe for et gitt system er det viktig å se hvor disse kurvene krysser for å finne en gunstig driftsverdi [18]. Pumpekurver er oftest gitt av produsent og vil ikke bli grundigere gjennomgått.



**Figur 4-3.** Forandring i systemkurven ved forandring av systemet [19].

#### Statiske tap:

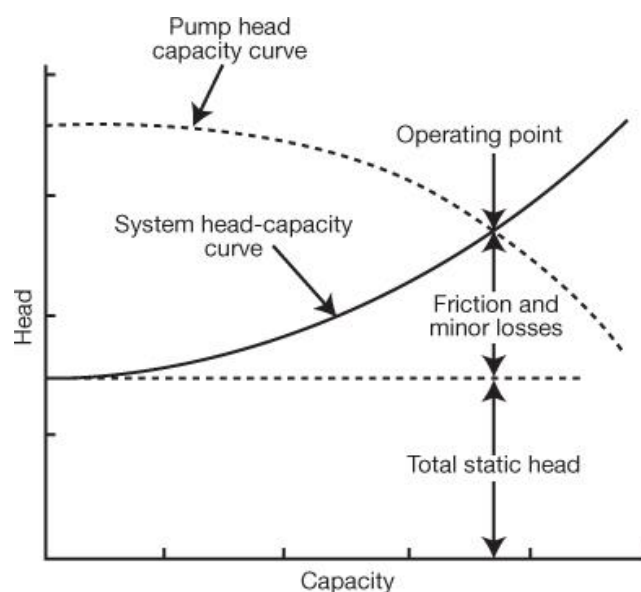
For å finne systemkurven er det først nødvendig å finne det statiske trykktapet i systemet. For et alternativt oppsett av testriggen med åpen tank er trykktapet gitt av høydeforskjell mellom tank, turbinrør og turbin. Det er ikke mulig å regne ut det statiske tapet for testriggen før alle dimensjoner er kjent. Den statiske trykkhøyden for et system med tank og turbin er gitt som  $H_{statisk}$  i figur 4-4.



**Figur 4-4.** Statisk trykkhøyde i system med turbin.

#### Dynamiske friksjonstap:

Friksjonstapene er dynamiske tap som varierer med volumstrømmen. Disse tapene inkluderer friksjon i rør og viskositet i vannet [20]. Friksjonstapene vil øke ettersom volumstrømmen øker, og det totale tapet i systemet starter derfor på nivå med de statiske tapene og øker ettersom volumstrømmen øker (figur 4-5). I testriggen vil også trykkfallet over turbinen, tverrsnittoverganger, eventuelle lekkasjer og ventiler være elementer som har innvirkning på de dynamiske tapene.



**Figur 4-5.** Volumstrømmen og trykket følger hverandre langs systemkurven avhengig av det statiske tapet og det dynamiske tapet [20].

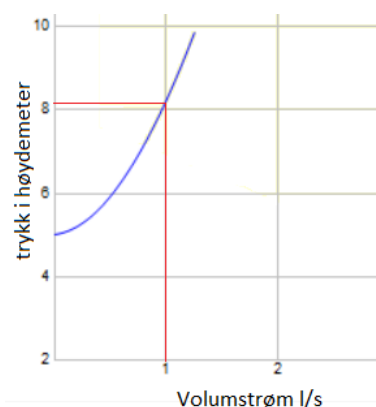
Det nødvendige trykket for å overkomme de dynamiske friksjonstapene kan uttrykkes som en proporsjonalitetskonstant avhengig av rør og komponenter multiplisert med kvadratet av volumstrømmen.

$$h_{dynamisk} = k \cdot Q^2$$

Dette gir den totale formelen for systemkurven for anlegget:

$$h = h_{statisk} + k \cdot Q^2$$

Det er ikke mulig å lage en eksakt systemkurve for testtriggen før alle dimensjoner og oppsett er bestemt. Det finnes digitale verktøy hvor forskjellige parametere kan velges for å designe systemkurver for å samsvare med pumpekurver. En kurve med verdier nærliggende slik en testtrigg kan bli vist under (figur 4-6).



**Figur 4-6.** Et eksempel på hvordan en systemkurve for et pico-system kan se ut.

Fra systemkurven kan det legges merke til at kurven starter på 5 høydemeter som tilsvarer det statiske trykket i anlegget. Dersom det er ønskelig med 1 l/s i volumstrøm gjennom systemet må pumpen generere i overkant av 8 m trykk.

## 4.2. Studie av turbintyper

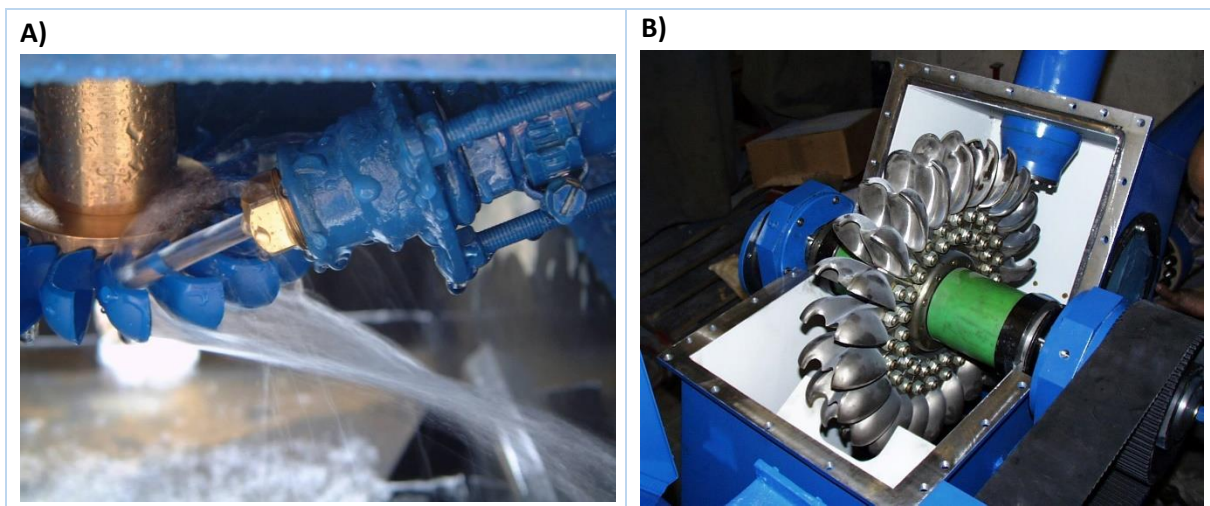
Det vil bli gjort en gjennomgang av forskjellige turbintyper for å se hvilke som er mest relevant for å implementeres i et pico-system og en testrigg. De forskjellige turbintypene blir beskrevet for å besvare følgende punkter:

- Hvordan forskjellige typer turbiner virker?
- Under hvilke forhold og forutsetninger forskjellige turbintyper virker?
- Hvilke turbintyper som har størst potensialet i pico-systemer

### 4.2.1. Pelton- og Turgoturbiner

Det er begrenset med forskning og data tilgjengelig om Turgoturbiner, men de er oftest sammenlignet og sidestilt med Pelton-turbiner.

Både Pelton og Turgo fungerer ved at en konsentrert vannstråle fra en dyse strømmer inn på skovlene og driver løpehjulet [21]. Når vannet forlater vannskovlene faller det ned i en utgangsjakt og turbinene roterer i luft. Turgoturbiner har skovler som fungerer optimalt ved at jetstrålen treffer turbinbladene fra en viss vinkel (figur 4-7 A). Pelton-turbiner bruker samme prinsipp, men har alltid jetstrålen vinkelrett på turbinbladene (Figur 4-7 B).



**Figur 4-7.** A) Turgoturbinene har skovler som er avhengig av at vannstrålen treffer fra en viss vinkel slik bildet viser [22]. B) Pelton-turbiner har skovler som er delt på midten og symmetrisk om hver side. Vannstrålen må treffe tangensielt rett på skovlene for å deles likt på hver side [23].

Vurderingen rundt disse turbinene bygger på en laboratorietest av to turgoturbiner med ytre diameter på 16,9 cm [24]. Dette er en størrelse som kan være tenkelig for bruk i pico-systemer. Resultatene fra testen blir sammenlignet med en tilsvarende test av pelton-turbiner [24]. Turgoturbinene viste muligheter for en virkningsgrad på 80 % ved en periferi-hastighetsfaktor på 0,46. Dersom hastighetsgraden avviket fra dette, ble virkningsgraden redusert. Reduksjonen viste seg å øke eksponentielt når avviket ble større [24].

Dersom vannstrålen til turgoturbinene ble flyttet vekk fra sitt ideelle punkt på 20 grader i forhold til løpehjulet, falt virkningsgraden umiddelbart med 10-20 % [24]. Pelton-turbinene som har ideelt treffpunkt fra vannstrålen direkte tangensielt på skovlene, hadde også betydelig fall i virkningsgrad dersom vannstrålen avviket fra dette punktet. Studier understreker viktigheten av et nøyaktig og stabilt installasjonssystem og at implementering i pico-systemer vil være komplisert på grunn av kravet

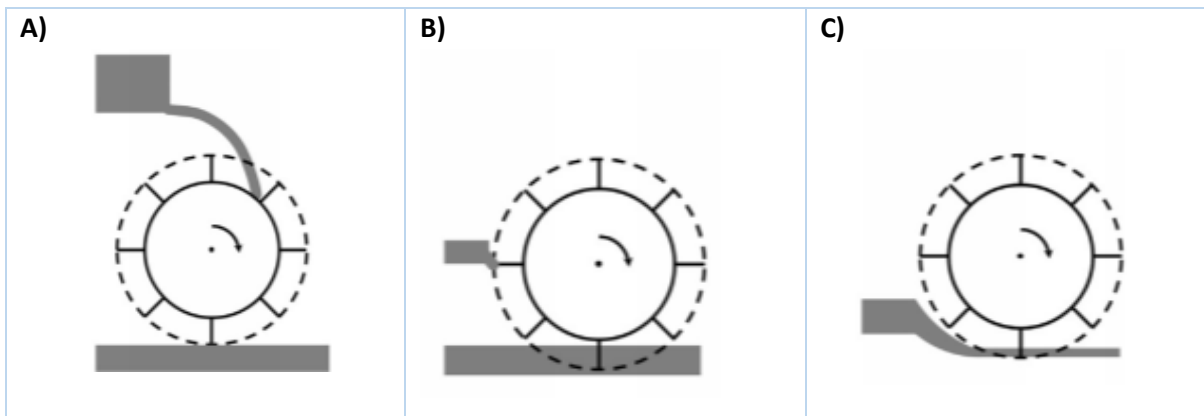
til nøyaktighet [24]. Det kan være upraktisk å endre vanntrykket etter installering. For et pico-system som ikke bruker demning for å sikre jevn vannstrøm, vil dette være en utfordring.

Fordi Pelton- og Turgoturbiner er sammensatte konstruksjoner med flere deler, antas det å være et ømfintlig system. Det betyr at feil eller skader på systemet som følge av hyppig forflytting og ytre påkjenninger vil være en utfordring knyttet til disse turbintypene. Av samme årsak vil systemet også bli lite plassbesparende. Den viktigste forskjellen mellom Turgo og Pelton er at Turgo kan operere effektivt med betydelige høyere volumstrøm enn Pelton [24]. Dette gir grunnlag for bedre virkningsgrad ved lavere fall.

En annen studie viser at turgoturbiner kan ha en virkningsgrad på 81-85 % ved forsøk på turbiner i størrelsesorden for å passe i pico systemer [24]. I den samme studien er turgoturbiner for bruk mellom 20 kW og 10 MW oppgitt med en virkningsgrad på 85 % [25]. Tilsvarende resultater fra Peltonturbiner i størrelsesorden for pico-systemer viser en virkningsgrad på 75-80 % [24]. Enda en studie viser at en turgoturbin skalert for pico-størrelsesorden kan ha 91 % virkningsgrad ved 3,5 m fall og 87 % virkningsgrad ved 1,0 m fall [26]. Dette ble da oppnådd i et eksperiment hvor vinkelen til jet-strålen var 10 grader og treffpunktet nærmere toppen av turbinbladet. Også denne studien understreker viktigheten av et nøye plassert og sammensatt system hvor endring i trykk og volumstrøm spiller en stor rolle.

#### 4.2.2. Skovlhjulsturbin

Skovlhjulet er sannsynligvis den enkleste turbintypen, og den har mange likheter med det tradisjonelle vannhjulet. Når vannhjulet har en horisontal akse finnes det tre måter vannet kan entre vannhjulet på. Enten kommer vannet ovenfra, på midten eller på undersiden av vannhjulet [2](Figur 4-8).



**Figur 4-8. A) Inntak fra oversiden. B) Inntak på midten. C) Inntak fra undersiden. [2]**

I forprosjektet til denne oppgaven var det et skovlhjul med stående aksling som var turbinløsningen [1](Figur 4-9). Det er gjort lite nyere forskning på skovlhjulet som turbin, men en studie fra 2015 viser at det ved vanninntak på oversiden er mulig å oppnå en virkningsgrad på 75 % [2]. De to andre mulighetene for vanninntak viste betydelig lavere virkningsgrader og er ikke aktuelle. Ut i fra forsøk gjort i forbindelse med forprosjektet i høsten 2016 var det for få kjente parametere til å regne ut nøyaktig virkningsgrad, men den målte effekten var veldig lav [1]. Med 340 W som resultat blir det antatt at virkningsgraden var lav, sannsynligvis under 20 %. Turbinen kan enkelt settes sammen av rette plater og valsede aluminiumsdelene, og er derfor enkel i produksjon. I tillegg til at den er billig og enkelt kan produseres i u-land, vil også den svært enkle konstruksjonen gjøre den driftssikker og robust.

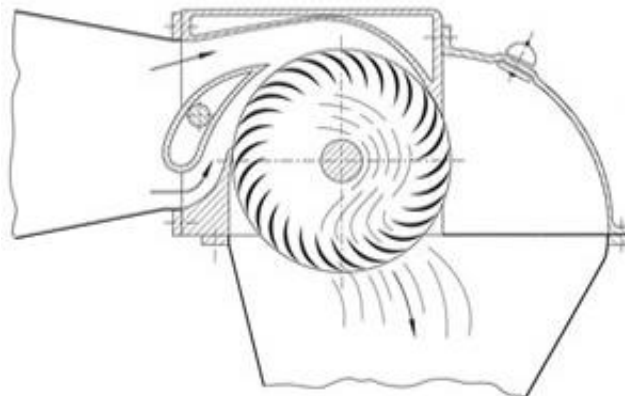




**Figur 4-9.** Skovhjul turbin som ble brukt i forprosjekt [1].

#### 4.2.3. Crossflow-turbin

Crossflow-turbinen består av et løpehjul med turbinblader og en dyse for vanninnngang. Løpehjulet er satt sammen av en serie buede blader sammenkoblet av sirkulære diskene på hver side. Turbinen kan operere i et vidt spekter av rotasjonshastigheter [27]. Diameteren på turbinen trenger ikke være avhengig av volumstrømmen. Turbinen er enkel å sette sammen, og ved riktig materialvalg vil hovedelementene kunne produseres og settes sammen over store deler av verden, også ressursfattige steder. Likevel må dysen designes etter de faktiske forholdene på lokasjonen [11]. Vannet passerer turbinbladene to ganger for å utnytte mest mulig av energien i vannet (figur 4-10).



**Figur 4-10.** Illustrasjonen over viser hvordan energien fra vannet blir hentet ut i to omganger av Crossflow-turbinen [28].

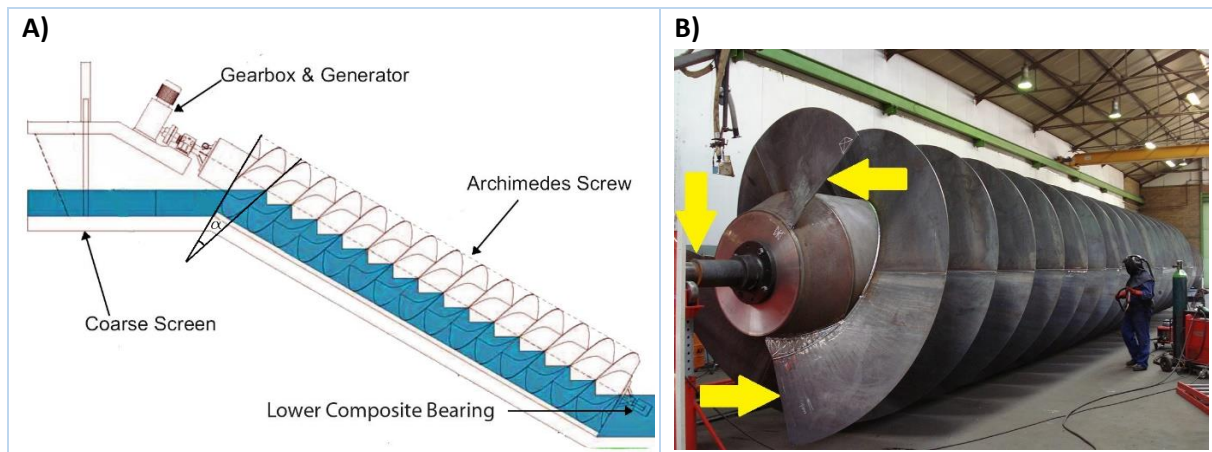
Størrelsesforholdet mellom inner- og ytterdiameter på turbinbladene er av betydning. En test på en liten crossflow-turbin med 170 mm som ytterdiameter og 114 mm bredde ble utført og analysert i 1998 [27]. Testen ble utført med fallhøyder i spekteret 8-30 m, og resultatet fra testen viste at høyest effektivitet ble oppnådd ved størrelsesforhold mellom inner- og ytterdiameter på 0,75. Virkningsgraden ble da målt til 72 %. Crossflow er designet for medium og lav fallhøyde, og er i mindre grad enn andre turbintyper avhengig av en konstant volumstrøm for å virke optimalt [27].

Viktige parametere for et optimalt fungerende design er antall blader, størrelsesforholdet mellom indre- og ytre diameter på løpehjulet, vinkelen på bladene og formen på bladene [27]. Selv om det kreves en del nøyaktighet for et godt fungerende resultat, er det fortsatt mulig å konstruere turbinen med få ressurser [11]. Dette fordi designet generelt er relativt enkelt. På samme måte som Pelton- og Turgoturbin krever også Crossflow-turbinen en dyse, som igjen gjør turbinen mer kompleks.

#### 4.2.4. Archimedes skrueturbin

Archimedes skrueturbin er utformet som en skruer hvor gjengene er byttet ut med blader som kan variere med forskjellige størrelser, antall og vinkler (figur 4-12 B) [29]. Den vanligste skrueturbinen har 3 blader og en vinkel  $\alpha$  på  $22^\circ$  (Figur 4-11.A). Vannet blir ledet inn i turbinen aksielt fra oversiden og turbinen spinner om sin egen akse. Skrueturbinen er drevet av hydrostatisk trykkforskjeller på bladene og er effektiv ved lave fall [26].

I en undersøkelse ble det gjort en småskalatest med 7 forskjellige skrueturbindesign og 8 forskjellige vinkler ( $26^\circ$ - $36^\circ$ ) på bladene. I undersøkelsen ble det oppnådd virkningsgrader på over 84 %, der det høyeste resultatet var virkningsgrad opp mot 94 % [29]. Selv om skrueturbinen kan ha en høy virkningsgrad, trenger den store vannmengder for å fungere. I undersøkelsen for samme studie er det hentet ut data fra 71 anlegg i Europa, der den laveste volumstrømmen er  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$  og den elektriske effekten ut ble 4 kW ved 1 m fallhøyde. Denne turbinen hadde en ytterdiameter på 1 meter over turbinbladene og diameter på sylindern som holder bladene lik 0,3 meter. Gjennomsnittlig virkningsgrad for anleggene i undersøkelsen var på 69 %. Denne virkningsgraden er for fastmonterte anlegg som er spesialisert i forhold til lokasjonen de skal virke på.



**Figur 4-11. A) Archimedes skrueturbin sett fra siden [30]. B) Archimedes skrueturbin sett skrått fra siden med markerte 3 blader [31].**

#### 4.2.5. Propellturbin inklusiv Kaplan

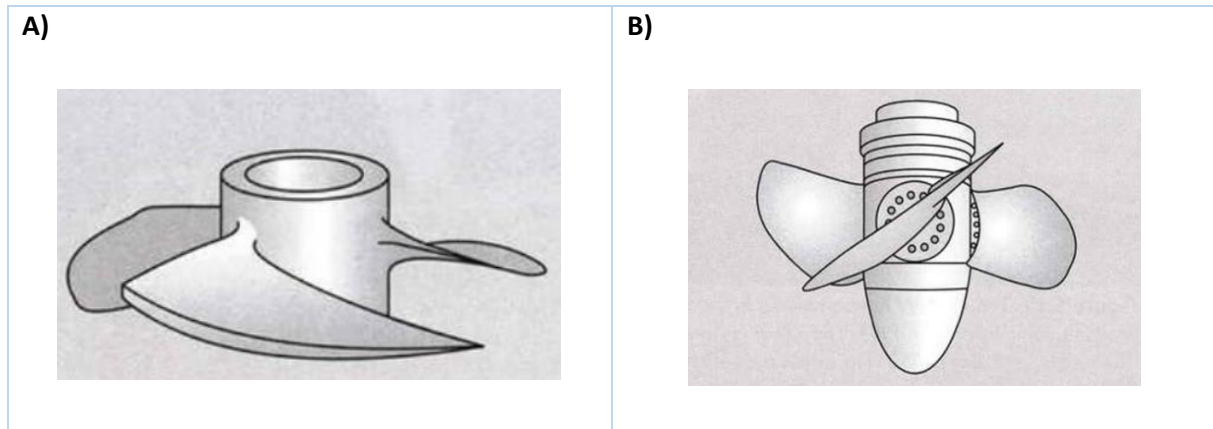
Propellturbinen kan utseende- og formmessig sammenlignes med propellen som drives av båtmotorer, bare at den er rettet motsatt vei [32]. Propellturbinen er en aksial-strømturbin slik at akslingens lengderetning er tilsvarende retningen vannet strømmer [33] [34]. Propellturbinen har vanligvis 4-8 blader hvor bladene har liten klaring til kanten av beholderen [34]. Propellturbiner har en virkningsgrad opp mot 75 % mellom 2-3,5 meter fall når turbinen har utslagsrør [2]. Det finnes i hovedsak to forskjellige typer propellturbiner (figur 4-12). Den ene turbinen er en propellturbin med fastmonterte blader, og den andre er en Kaplanturbin hvor vinkelen på bladene kan varieres.

Både propellturbinene med fastmonterte blader og Kaplanturbinene er effektive der det er lav fallhøyde tilsvarende forhold som pico-systemer opererer i [33]. En ulempe med den fastmonterte propellturbinen er at den blir lite effektiv dersom det er stor variasjon i volumstrøm og hastighet i forhold til hva turbinen er designet for. Dersom volumstrømmen blir mindre enn 80 % av optimal strøm, vil den fastmonterte propellturbinen bli betydelig mindre effektiv [32]. Kaplanturbinen påvirkes ikke på samme måte når hastigheten og volumstrømmen som treffer bladene endres. De variable



turbinbladene kan stilles slik at turbinen alltid vil være mest effektiv i forhold til hastigheten på vannet som treffer turbinbladene. Bladene til Kaplan-turbinen beveger seg hydraulisk ved hjelp av en regulator som styrer bladene på turbinen slik at de er synkronisert med volumstrømmen [34].

Det er viktig at vinkelen på tuppen av propellbladene er korrekt i forhold til ønsket rotasjonshastighet og effektuttak, sett opp mot hastigheten på vannstrømmen [35]. Der hvor en propelltupp med 77 grader vinkling gav 658 W elektrisk effektuttak, gav en vinkling på 85 grader kun 452 W effektuttak for de samme forholdene [35]. Det er dermed viktig at propellen er nøye utformet etter hvordan resten av systemet er utviklet og hvordan forholdene er på lokasjonen.

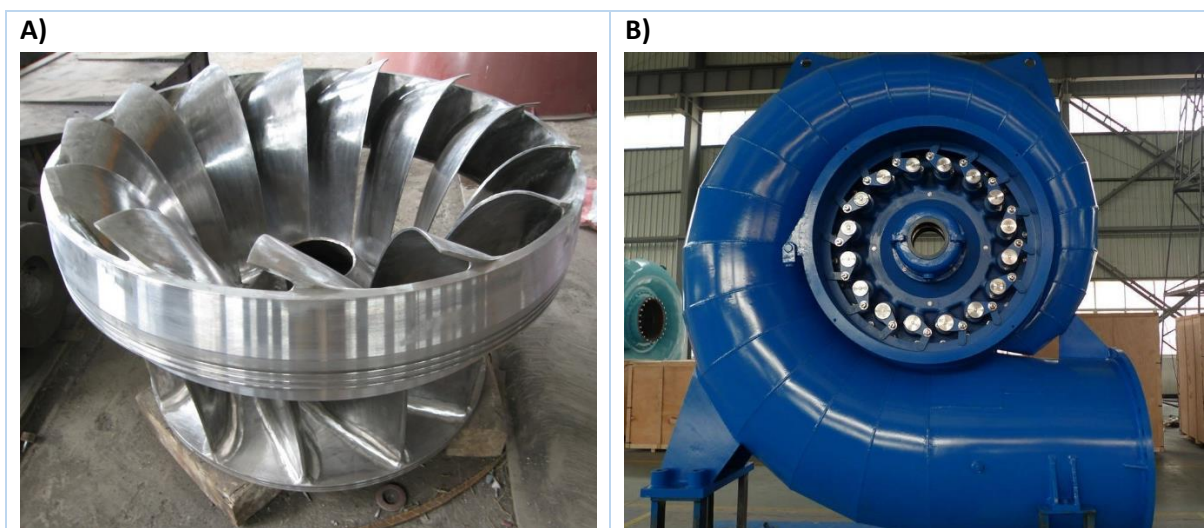


**Figur 4-12. A) Fastmontert propellturbin sett fra siden. B) Kaplan-turbin sett fra siden. [36]**

#### 4.2.6. Francisturbin

Francisturbinen er den vanligste brukte turbintypen på vannkraftstasjoner i verden og kan fungere med alt fra 1-900 meters fall [33]. I Norge bruker 70 % av kraftverkene Francisturbiner [37]. Det er den mest brukte turbintypen, noe som gjør at Francisturbinen kan antas å være en driftssikker turbintype. Francisturbinen har en lukket spiralformet beholder der inntaket er radielt på turbinen og utgangen er aksielt med turbinen (figur 4-13 B). Francisturbinen er derfor en blanding mellom en radiell og en aksiell turbin. Inne i den spiralformede beholderen er det ledeskovler som fører vannet inn til løpehjulet og turbinbladene (figur 4-13 A) [34]. Ledeskovlene i turbinhuset kan være variable for å få riktig og jevn hastighet på vannet inn til turbinbladene. Ved hjelp av ledeskovlene snevres arealet inn til turbinbladene samtidig som de slipper inn vann. Dette gjør at trykket og hastigheten på vannet holdes konstant, samtidig som det blir en jevn volumstrøm inn til turbinbladene. Større Francisturbiner har også ytre ledeskovler som er fastmonterte. Disse ledeskovlene er der både for å lede vann inn til de variable ledeskovlene og for å støtte det spiralformede turbinhuset mot vekten av generatoren [34].

Francisturbiner kan ha en virkningsgrad opp mot 70 % dersom turbinene er designet riktig i forhold til forholdene [2]. Virkningsgraden kan oppnås ved en fallhøyde på 2-3,5 meter med utslagsrør, som passer godt med utgangspunktet på fallet i et pico-system, som typisk er 1-10 meter. Kombinasjonen med spiralhus og utslagsrør gjør at francisturbinen er lite plassbesparende. Francisturbiner blir lite effektive ved volumstrøm på mindre enn 50 % av det den er designet for [32].



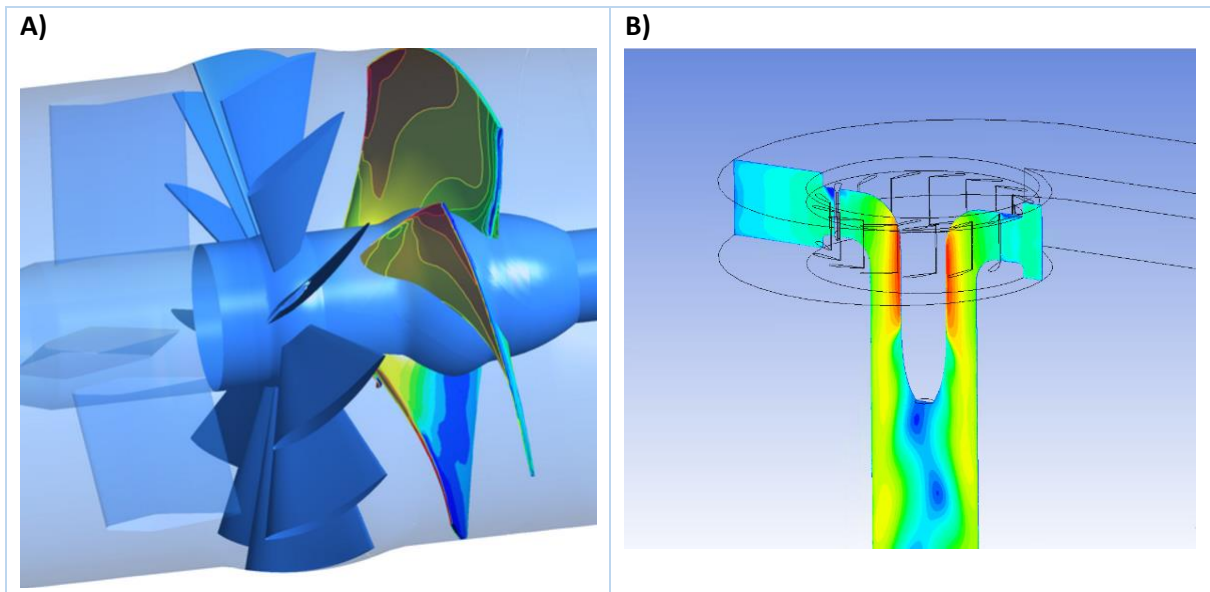
**Figur 4-13.** A) Slik løpehjulet ser ut inni spiralhuset [38]. B) Spiralformet beholder til francisturbin med styresystem til ledeskovlene [39].

#### 4.2.7. Propellturbin med virvel-generering

For å øke virkningsgraden til propellturbiner kan det skapes en virvel i vannet før turbinbladene. Dette kan gjøres ved hjelp av skovler som er plassert med en vinkel foran turbinen. Vannet vil da treffe skovlene og skape en virvel som treffer turbinbladene [35]. Det kan også skapes en virvel ved å plassere turbinen i en spiralformet beholder, på samme måte som en Francisturbin [32].

Bulb-propellerturbin er en type turbin som har ledeskovlene plassert i forkant av propellen (Figur 4-14 A) [40]. En studie som omhandler optimalt design av ledeskovler for mindre bulbturbiner understreker viktigheten av at ledeskovlene er nøye designet med hensyn på flere vinkler og fasong på overflater [40]. Den samme studien viser også at vinkelhastigheten til propellen økte ved riktig bruk av ledeskovler i forkant av propellen. Det ble da brukt en propell med ytre diameter på 0,5 m. Bulbturbiner er som oftest utstyrt med en Kaplan-turbin som gjør systemet mer komplisert, siden et styresystem for bladene må installeres. Dersom dette blir det aktuelle alternativet vil det også sees på muligheten for å bruke 3D-print teknologi for å enkelt produsere flere propeller for rask utskifting med hensyn til forholdene turbinene blir utsatt for.

Gjennom anbefalinger fra Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), og et samarbeid mellom Deep River og det norske selskapet EDR Medeso, foreligger det et forslag om å benytte et system basert på en propell med Francis-basert innløpsrør. Dette fungerer ved å benytte seg av et spiralformet inngangsrør med skovler, slik som i en Francisturbin, for å skape en virvel i vannet før det entrer røret der propellturbinen befinner seg (figur 4-14 B). Det er tidligere utviklet et slikt spiralsystem i dimensjoner som er sammenlignbare med det som er ønsket for dette prosjektet [37]. Det spiralformede inngangsrøret er utviklet og testet hos NTNU, og består hovedsakelig av rette plater som gjør den lettere å produsere. EDR Medeso har utført strømnings-simuleringer på et slikt system i kombinasjon med en propell og oppnår da en virkningsgrad på 80 % [41].



**Figur 4-14.** A) Simulering av propell med ledeskovler i forkant for å lage virvler [42]. B) Strømingssimulering av spiralinnegang mot propell, gjort av EDR Medeso [41].

Tilgjengelig forskning viser at dette er mulig, hvor forsøk på systemer med likhetstrekk viser virkningsgrad i underkant av 80 %. Eksempelvis er det gjort et forsøk på propell med generert virvel i forkant hvor det ble målt en virkningsgrad på 74 % [35].

Det er tenkt ut flere metoder for å bruke dette systemet uten at det blir for komplekst. Det er tidligere gjort en studie på NTNU for hvordan en slik type spiral kan utformes med lave kostnader og enkle materialer [43]. I hovedsak består spiralen av aluminiumsplater som ved hjelp av valsing og knekking kan settes sammen.

#### 4.2.8. Valg av turbin type til testrigg

I forhold til at den valgte turbin typen skal fungere i et mobilt vannkraftverk hvor det er lave fall som virker på turbinen, vil noen av turbin typene bli lite hensiktsmessige. Impulsturbinene er alle avhengige av en dyse som konsentrerer en stråle på turbinbladene. Dysen avhenger av å treffe i riktig vinkel på turbinbladene, for å få størst effekt. Løpehjulet krever i tillegg stor plass for å virke fritt uten motstand fra utgående vann. Impulsturbiner fungerer best ved store fallhøyder der trykket er høyt. Dette gjør at impulsturbinene er uaktuelle for bruk i testriggen.

Det er spesielt tre turbinløsninger som skiller seg positivt ut; Fast propell, Kaplan turbin og propell med virvel-generering. Alle disse løsningene bruker en form for propell turbin. Propell turbinene er enkle, men med forholdsvis god virkningsgrad. Det vil derfor bli brukt en propell turbin for videre arbeid med testriggen. En oversikt over hvilke virkningsgrader de forskjellige turbin typene kan operere opp mot, er vist i tabell 4-1.

**Tabell 4-1.** Oversikt over virkningsgradene til de forskjellige turbintypene ved trykk tilsvarende det som er typisk for pico-systemer. Virkningsgradene er ikke direkte sammenlignbare da de er beregnet ut i fra forskjellige forhold. Tabellen gi derfor bare et estimat på hvilken virkningsgrad en kan forvente av de forskjellige turbintypene.

Turbintype	Virkningsgrad
Turgo	0,81
Pelton	0,75
Skovlhjul	0,75
Crossflow	0,72
Skrueturbin	0,84
Propell/Kaplan	0,75
Francis	0,70
Propellerturbin med spiralhus	0,80

### 4.3. Lignende løsninger

Det er viktig å se på lignende løsninger for å finne ut om det finnes et markedssegment som forsvaret utviklingen av en ny testtrigg. Det finnes allerede løsninger på markedet i dag for å utføre småskalatester for turbiner. De fleste av løsningene er relativt like og bygger på de samme prinsippene, men det er likevel stor variasjon i pris, hvilke forhold de simulerer og andre faktorer.

Hver løsning er beskrevet med funksjonalitet og gitt en vurdering av kostnader, volumstrøm og generert trykk. Dette er tre parameterne som blir ansett som viktig for testtriggen. I tillegg vil hver lignende løsning bli evaluert på en rekke flere faktorer.

Det finnes absolutt flest testtrigge tilpasset pelton-turbiner. Det ble i litteraturstudien i kapittel 4.2.8 konkludert med at impulsturbiner ikke er hensiktsmessige for bruk ved lavt trykk. Kun løsninger med muligheter for å teste reaksjonsturbiner vil derfor bli vurdert.

Løsningene som vil bli beskrevet er:

- Eksisterende løsninger på universiteter i Norge
- 2 Francis-løsninger fra Armfield
- Propell-løsning fra Armfield
- Francis-løsning fra Veekay Industries
- Propell-løsning fra Veekay Industries

#### 4.3.1. Eksisterende løsninger på universiteter i Norge

NTNU i Trondheim har testtrigge som kan levere en vannstrøm på 1000 liter per sekund og opp mot 100 meters trykk [44]. NMBU har testtrigge fra Armfield der den ene kan kjøre laboratorietester på en Pelton turbin. NMBU har ikke testtrigge som kan teste propellturbiner eller andre reaksjonsturbiner.

Slike anlegg er mye større eller ikke relevante i forhold til testtriggen som skal utvikles i denne oppgaven og vil ikke bli vurdert ytterligere.

### 4.3.2. Armfield

Armfield har i hovedsak to løsninger for å teste turbiner. Ved hjelp av to forskjellige baser kan ekstrautstyr monteres for å få en gitt funksjon. Ekstrautstyret må da bestilles separat slik at det blir to kostnader som utgjør en totalsum. Dette gjør systemene modulerbare. Den eneste propellbaserte løsningen fra Armfield er ikke modulerbar, men et selvstendig system. Løsningene vil bli kort beskrevet under med mer data presentert i tabell 4-2.

#### Løsning A: F1-10 utstyrt med francisturbin

Løsningen baserer seg på en flyttbar benk på hjul med tilhørende tanker og pumpe innebygd i benken (figur 4-15 A) [45]. Denne benken er basen for testing av en rekke forskjellige laboratorieoppgaver i forbindelse med hydrodynamikk, hvor testing av Francisturbin er en av dem. Løsningen har mulighet for å justere trykk, volumstrøm og ledeskovler inn til turbinen. Det er denne løsningen med en peltonturbin som NMBU bruker i dag. Basen har hjul og kan enkelt flyttes rundt.

#### Løsning B: FM6X utstyrt med francisturbin

Denne løsningen er også en modulær løsning [46]. Det er en mindre testrigg med mindre tank uten hjul (figur 4-15 B). I denne løsningen må også utstyr for videre testing med impuls og reaksjonsturbiner bestilles separat. En av løsningene er da basen utstyrt med francisturbin. Produktet kan kobles til PC for digitale resultater, analyse og regulering av trykk og volumstrøm. Det er derimot ikke mulig å endre på ledeskovlene inn til turbinen.

#### Løsning C: FM63

Denne løsningen er en mindre rigg for å teste fastmontert propell [47] (figur 4-15 C). Det er en egen rigg som ikke er tilknyttet noen av basene beskrevet over. Denne riggen har egen pumpe, tank og turbin og krever derfor ikke noen ytterligere bestilling av deler. Det er ikke mulig å avmontere propellen for å bruke andre turbintyper eller moduler. Riggen er heller ikke montert på hjul for enkel transportering. Testriggen har ledeskovler for virvelgenerering før turbinen, men ikke mulighet for å justere på disse.



**Figur 4-15.** A) F1-10 base med pumpe og tank fra Armfield [45]. B) FM6X base med pumpe og tank fra Armfield [46]. C) Komplet oppsett for propelltest fra Armfield [47].

For å evaluere de forskjellige mulighetene fra Armfield er det først gjort en vurdering av spesifikasjonene til de forskjellige basene og den selvstendige riggen for fastpropell. Spesifikasjonene og kostnadene knyttet til de forskjellige løsningene er vist i tabell 4-2.

**Tabell 4-2. Oversikt over Armfield testtrigge med spesifikasjoner og pris [45] [46] [47]. Pris ble oppgitt på e-post fra leverandør [48].**

Baser for testtrigge				
EGENSKAPER	ENHET	MODELL		
		F1-10	FM6X	FM63
Ekstramodull		Francis-modul	Francis-modul	Integrert propell
Volum tank	l	250	28	75
Max volumstrøm	l/min	81	20	264
Max trykkehøyde	m	21	30	14
Digitalisering		nei	Ja	Ja
Høyde	m	1,00	0,73	1,12
Bredde	m	1,13	0,80	0,91
Dybde	m	0,73	0,51	0,66
Diameter turbin	mm	60	Småskala	småskala
Pris base eks MVA	Kr	50 125	148 378	-
Totalpris eks MVA	Kr	160 207	203 805	200 134

Av tabellen kommer det frem at F1-10 basen er rimeligere, men med dyrere ekstrautstyr. Det er derfor tenkelig at FM6X basen kan totalt sett være rimeligere dersom det skal benyttes mye forskjellige ekstrautstyr. Det var ikke mulig å finne turbindiameter for FM6X og FM63, men det er tydelig på illustrasjoner at turbinene her er i samme størrelse eller mindre enn F1-10 varianten.

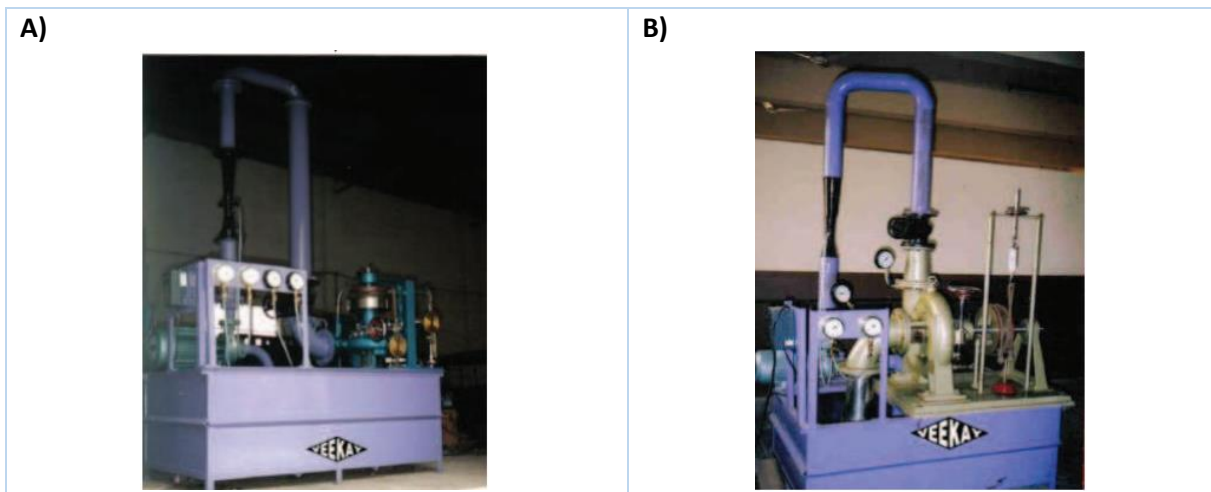
#### 4.3.3. Veekay Industries

Veekay Industries er et indisk firma som produserer og eksporterer testutstyr [49]. De leverer testtrigge for Kaplan-, Francis- og Peltonturbiner i to forskjellige versjoner med forskjellig størrelse på turbiner og forskjellig effekt i pumpen som driver systemet (figur 4-16). For å sammenligne med testtriggen som skal utvikles er det de minste versjonene som er mest relevante. Disse leverer omkring 1 kW mekanisk effekt fra turbinakslingen, mens de større versjonene leverer tilsvarende 4 kW.

Testtriggene fra Veekay Industries baserer seg på en vanntank som vannkilde og en pumpe for å skape trykk og volumstrøm. For å regne ut effekten utføres en bremsetest på akslingen ut fra turbinen ved hjelp av et system med fjærvekter. Riggene består for det meste av støpejern og stål. I tillegg til at de har en tank for vann, vil det dermed bli tunge konstruksjoner. Produktene står ikke på hjul og fremstår lite mobile. Det fremkommer ikke mulighet for å justere på ledeskovler, eller om det er slike, på noen av produktene.

Bilder og informasjon er hentet fra katalog, som er fått på mail fra Veekay Industries [50]. Pris er også fått på e-post fra Veekay Industries og inkluderer ikke frakt og moms.





**Figur 4-16.** A) Oppsett for test av kaplanturbin fra Veekay Industries [50]. B) Oppsett for test av Francisturbin fra Veekay Industries [50].

På samme måte som produktene fra Armfield er spesifikasjonene på produktene fra Veekay fremvist i en tabell (tabell 4-3).

**Tabell 4-3.** Oversikt over testtrigg fra Veekay Industries med pris og spesifikasjoner [50] [51].

EGENSKAPER	ENHET	MODELL	
		Kaplan Testrigg	Francis Testrigg
Volum tank	l	1094	736
Max volumstrøm	l/min	1500	1000
Max trykkehøyde	m	8	14
Diameter på turbin	mm	150	75
Digitalisering		Analog avlesning	Analog avlesning
Høyde [m]	m	2,5	2,5
Bredde [m]	m	2	2
Dybde [m]	m	1	1
Pris	Kr	59 263	83 160

Av tabellen kommer det frem at modellen for testing av Francisturbiner er mer kostbar enn modellen for kaplanturbin. Begge modellene har en svært høy volumstrøm og dette samsvarer med at det på illustrasjonene ser ut til å være store vannrør som tillater stor volumstrøm.

#### 4.3.4. Vurdering av lignende løsninger

De lignende produktene vil bli vurdert for å finne ut hvor markedet allerede har gode aktører og hvilket potensiale en ny testrigg har. Løsningene vil bli vurdert på følgende punkter:

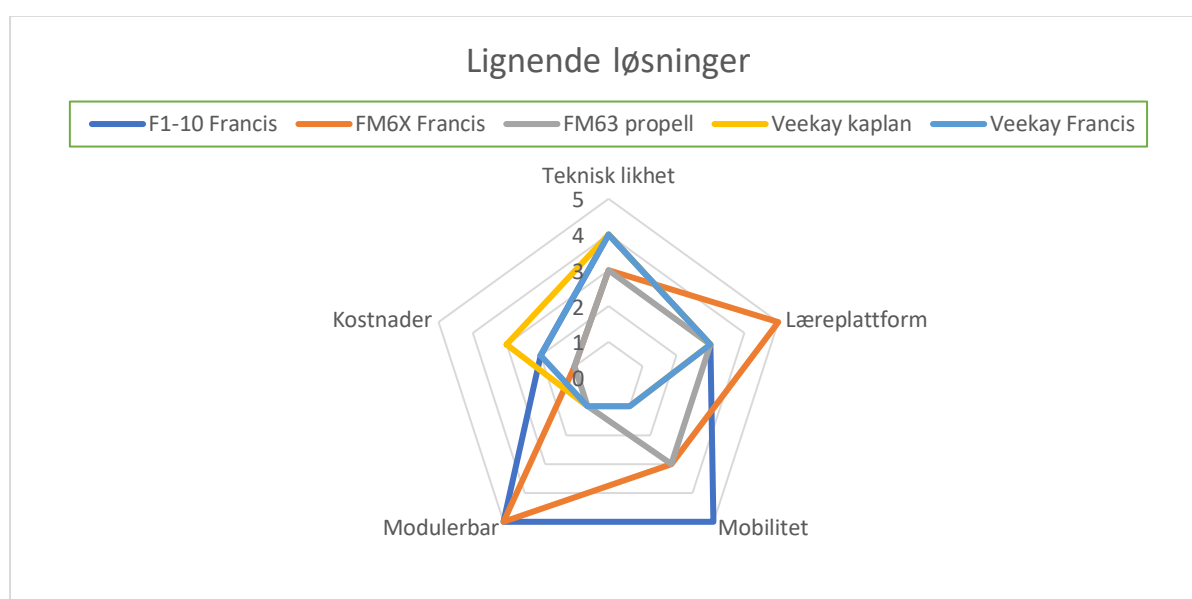
- **Teknisk likhet:** Vurdering av hvor nærme produktet er i forhold til reelle forhold for et pico-system i forhold til trykk, volumstrøm og størrelse.
- **Læringsutbytte:** Hvor enkelt kan verdier leses av og nyttiggjøres, digitalisering av resultater.
- **Mobilitet:** Hvor enkelt kan produktet flyttes på etter brukerens ønske.
- **Modulerbar:** Hvor enkelt kan produktet endres for å teste nye turbintyper eller variere verdier.
- **Kostnader:** Hvor mye produktet koster.

Hver av de lignende løsningene vil bli gitt en karakter mellom 1 og 5 for hvert kriterium presentert ovenfor. 1 er laveste verdi og 5 er høyeste verdi.

**Tabell 4-4. Sammenligning av lignende løsninger.**

Kriterium	F1-10 Francis	FM6X Francis	FM63 propell	Veekay kaplan	Veekay Francis
Teknisk likhet	4	3	3	4	4
Læreplattform	3	5	3	3	3
Mobilitet	5	3	3	1	1
Modulerbar	5	5	1	1	1
Kostnader	2	1	1	3	2

Verdiene er presentert i et radardiagram (figur 4-17) for å lettere visualisere hvor et eventuelt markedssegment for testtriggen vil være.



**Figur 4-17. Grafisk oversikt over egenskapene til lignende løsninger.**

Det kommer frem at de forskjellige lignende løsningene er svært varierende grad av tilfredstillelse innenfor de forskjellige kriteriene. Løsningene fra Armfield scorer høyt innenfor modulerbarhet, mobilitet og læringsplattform, men er også de mest kostbare løsningene. Løsningene fra Veekay i India er rimeligere, men mangler egenskaper angående mobilitet og modulerbarhet. De to propell- og kaplanløsningene, som er mest lik slik testtriggen vil være i førsteomgang, scorer spesielt dårlig på modulerbarhet og mobilitet. Ingen av propell-løsningene har mulighet for å justere ledeskovler ettersom volumstrømmen endrer seg slik testtriggen er tiltenkt.

Ut i fra vurderingen er det tydelig at det finnes et markedssegment for testtriggen. Målet med testtriggen i første omgang ikke å serieprodusere den og selge den på markedet, men å bruke den i forbindelse med forskning på NMBU og nærliggende bedrifter. Likevel finnes det muligheter for å produsere flere enheter og selge til andre skoler og universiteter. Det er da viktig at testtriggen kan konkurrere på pris samtidig som den innfrir de praktiske og tekniske kravene og fungerer som en læringsplattform. Det er ikke funnet informasjon om noen propellbaserte løsninger på markedet som også er modulerbar i noen grad.



## 5. PRODUKTSPEISIFISERING

Dette kapitlet tar for seg produktmål, beskriver viktige egenskaper ved produktet og spesifiserer grovt forventede dimensjoner.

### 5.1. Produktmålsetting

Følgende punkter skal produktet oppnå.

- Produktet skal gi mulighet for å teste virkningsgraden til en turbin.
- Produktet skal gi mulighet for å regulere trykk og volumstrøm.
- Produktet skal gi brukeren mulighet til å lese av trykk og volumstrøm.
- Produktet skal simulere trykk og volumstrøm tilsvarende reelle forhold for et pico-system.
- Produktet skal gi brukeren mulighet til å justere virvelgenerering i forkant av turbinen.
- Produktet skal gi mulighet for å bytte ut turbinen og andre essensielle deler for å kunne teste andre typer turbiner.
- Produktet skal, ved å være gjennomiktig på hensiktsmessige plasser, gi brukeren innsyn i hvordan systemet fungerer.

### 5.2. Rangering av viktige produktegenskaper

De viktigste produktegenskapene er beskrevet i tabell 5-1. Kriterium for seleksjon senere i oppgaven tar utgangspunkt i disse viktige produktegenskapene.

**Tabell 5-1. Oversikt over rangering av viktige produktegenskaper. Hver egenskap blir gitt en verdi mellom 1 og 5 etter hvor viktig den egenskapen er, der 5 er mest viktig.**

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse
<b>Modulerbart</b>	Hvor enkelt er det å endre produktet for å teste flere turbintyper eller oppsett.	4	Muligheten for å teste flere turbintyper og oppsett med den samme basen gir produktet bredere bruksområde.
<b>Kostnad</b>	Kostnad av ferdig produkt, drift og vedlikehold.	4	Det er essensielt å tilby en konkurransedyktig pris.
<b>Sikkerhet</b>	Brukerens sikkerhet knyttet til montering og bruk.	5	Testriggeren opererer med vannstrømninger og flere bevegelige deler. Det må være trygt å befinne seg i nærheten av testriggeren.
<b>Brukervennlig</b>	Hvor enkelt er det for brukeren å operere produktet.	5	Dersom brukeren ikke forstår hvordan testriggeren benyttes, har produktet ingen funksjon.
<b>Driftssikkerhet</b>	Tid i drift mot vedlikehold og reparasjoner.	4	Produktet må være klar til bruk som planlagt. «Nedetid» betyr økte kostnader og tapt tid.

Tabell 5-1. forts.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse
<b>Kompleksitet</b>	Hvor enkelt sammensatt er systemet.	4	Et enkelt sammensatt system har færre komponenter som kan bli ødelagt og er lettere å feilsøke.
<b>Automatikk</b>	Hvor mye egeninnsats fra bruker kreves for å benytte produktet.	3	Dersom testtriggen ved hjelp av automatikk kan fremlegge resultater, vil dette gjøre produktet enklere å bruke.
<b>Miljø</b>	Produktets påvirkning med tanke på lokalmiljø og klimautslipp.	3	Testtriggen er et ledd mot utnyttelse av miljøvennlig energi og det er viktig at alle ledd er miljøvennlige.
<b>Relevans</b>	Hvor relevant produktet er i forhold til reelle forhold for pico-systemer.	5	Testtriggen må kunne levere testforhold som er sammenlignbare med naturlige forhold.

### 5.3. Metriske grensespesifikasjoner

Det er ønskelig å holde grensespesifikasjonen innenfor det som, uten for store komplikasjoner, kan flyttes på av en person. Samtidig må testtriggen ha dimensjoner som legger til rette for et ryddig design. Det er ønskelig å holde produktet så kompakt som mulig samtidig som det oppleves ryddig og oversiktlig for brukeren. Det forventes at det ferdige produktet vil være innenfor de oppsatte metriske grensespesifikasjonene (tabell 5-2).

**Tabell 5-2. Oversikt over minimale, optimale og maksimale dimensjoner og vekt. Vekten er uten vann i system og tanker.**

Dimensjon	Enhet	Minimal	Optimal	Maksimal
<b>Bredde</b>	mm	450	600	800
<b>Lengde</b>	mm	450	800	1000
<b>Høyde</b>	mm	1000	1500	2000
<b>Vekt</b>	kg	30	50	80

### 5.4. Metrisk grovspesifisering av produktet

Som en grovspesifisering av produktet antas det at ytre dimensjoner vil være nærliggende det som er fremvist i tabell 5-3. Det antas da at produktet er oversiktlig og at det er rom for å eksperimentere med forskjellige løsninger.

**Tabell 5-3.** Oversikt over de ytre dimensjonene og vekten på produktet. Vekten er uten vann i system og tanker.

Dimensjon	Enhet	Verdi
Bredde	mm	600
Lengde	mm	800
Høyde	mm	1850
Vekt	kg	50

## 5.5. Tidlige kostnadsvurderinger

For prototypen er det tiltenkt å holde produksjonskostnadene under 3000 kr, som er det masterprosjektet får i støtte fra universitet. For å holde prosjektet innenfor budsjettet vil det være viktig med gjenbruk av komponenter som er tilgjengelig på universitetet og forhandle frem gunstige avtaler med underleverandører der dette er mulig.

Det ferdige produktet, som kan serieproduseres, vil være dyrere enn prototypen ettersom mye av materiellet som skal bli tatt i bruk er tilgjengelig på universitet. Det antas at dette produktet kan produseres for under 15.000 kr og derav bli rimeligere i større produksjonsskala.

Det estimeres at 2 personer bruker 2000 timer på dette prosjektet. Dersom det estimeres en timespris på 550kr blir da totale utviklingskostnader 1,1 millioner. Det vil ikke bli utbetalt lønn for utvikling i realiteten, og denne kostnaden kan dermed skrives av.



## 6. KONSEPTGENERERING

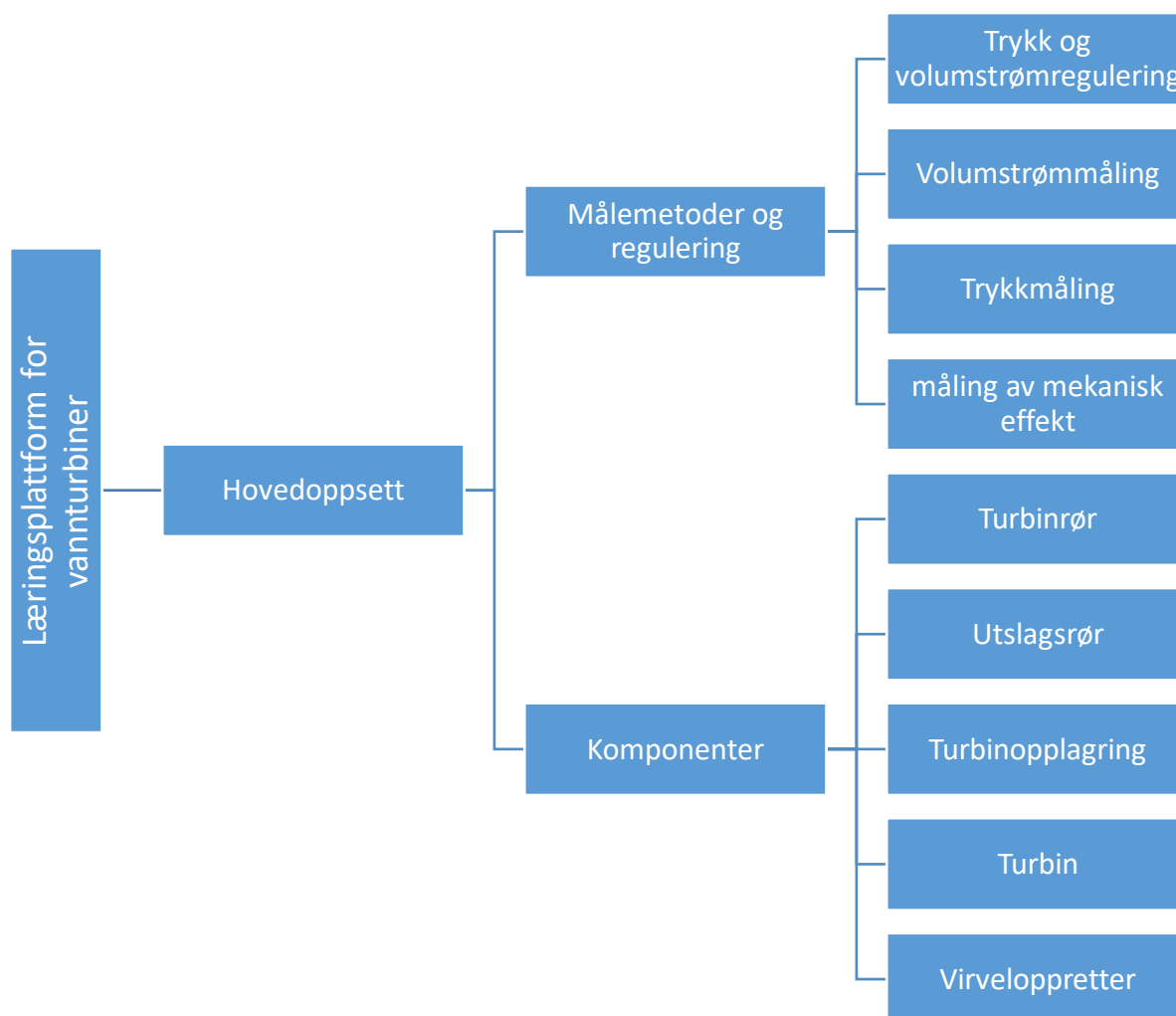
Kapitlet tar for seg en funksjonsanalyse av produktet og beskriver forskjellige alternative løsninger. Hovedoppsett vil selekteres i dette kapitlet slik at det blir klarere hvilke videre funksjonsalternativer som er aktuelle.

### 6.1. Funksjonsanalyse for produkttypen

Produktets hovedfunksjon er å gi brukeren mulighet til å analysere hvordan en turbin fungerer for et sett parametere av volumstrøm, trykk og andre hydrodynamiske forhold. For å oppnå dette er det en rekke prosesser som må skje. En utredning av energiomforming fra potensiell energi i vann til mekanisk effekt over en turbinaksling er vist i kapittel 4.1.2 [1].

### 6.2. Funksjonsalternativer

Figur 6-1 viser et oppsett av de forskjellige funksjonene som er nødvendig for å innfri de forskjellige målene. Innenfor hver av funksjonene vil det bli selektert mellom forskjellige alternativer.



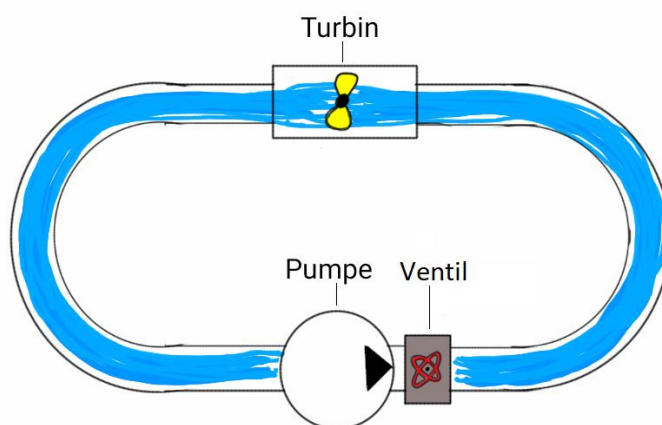
Figur 6-1. Oversikt over testtriggens funksjoner.

### 6.3. Hovedoppsett for testtrigg

Det som skiller de forskjellige hovedoppsettene er stort sett hvilken metode som benyttes for å skape eller endre trykk og volumstrøm. Det er mange måter å justere disse faktorene på. De neste delkapitlene beskriver de forskjellige alternativene for hovedoppsett.

#### 6.3.1. Løsning A: Lukket rørkrets

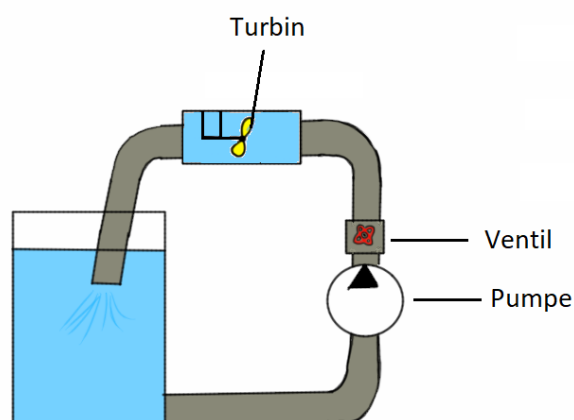
En måte å sette opp testtriggen på er å ha en lukket rørkrets med vannpumpe. Trykket reguleres da avhengig av pumpetrykket. Dette vil være en lukket krets hvor vannet blir sendt i en sirkel for å kunne bli brukt igjen (figur 6-2). Denne løsningen vil kunne ligge flatt og det vil derfor ikke bli noen forskjell i trykk som følge av høydeforskjeller. Ulempen med en slik løsning er at det kan være vanskelig å fylle rørene helt med vann og ved bytting av turbintype vil alt vannet renne ut.



**Figur 6-2. Lukket rørkrets med Pumpe, ventil og turbin. Kretsen er sett ovenfra.**

#### 6.3.2. Løsning B: Lukket rørkrets med åpen tank

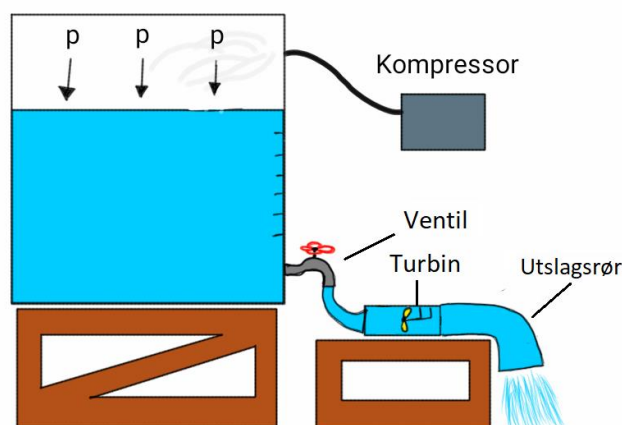
En løsning er å ha en lukket rørkrets fra en åpen tank (figur 6-3). Ved hjelp av en vannpumpe vil vannet bli sugd ut fra bunnen av tanken gjennom et rør. Vannet blir så pumpet gjennom pumpen og opp til turbinen før vannet blir sendt tilbake til tanken igjen. Ved hjelp av en Pumpe og ventil vil det kunne påføres ønsket trykk og volumstrøm til turbinen.



**Figur 6-3. Lukket rørkrets med åpen tank. Kretsen er sett fra siden.**

### 6.3.3. Løsning C: Lukket tank med kompressor

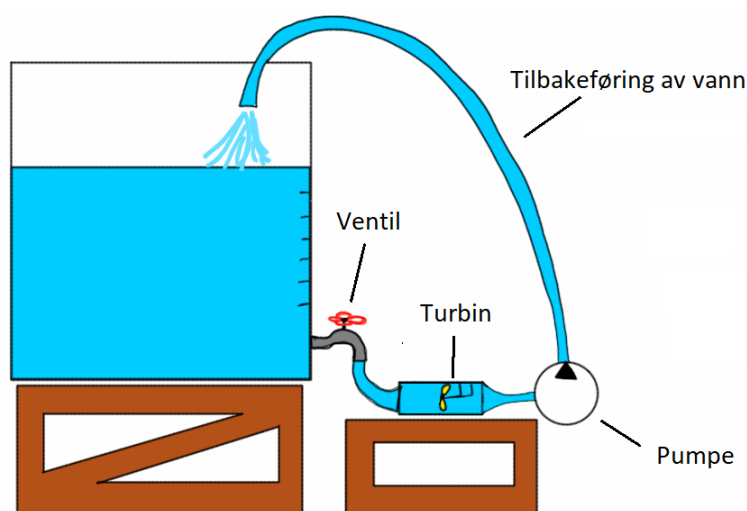
Løsningen illustrert i figur 6-4 er en løsning som baserer seg på en stor lukket tank med luftkompressor. Kompressoren sin funksjon er å skape et høyere lufttrykk over vannet som igjen vil resultere i et høyere vanntrykk. Vannet blir sluppet inn til turbinen gjennom en ventil for så å sendes ut av systemet etter turbinen. For å ha jevnt trykk i systemet må det være en form for reguleringsystem i forbindelse med kompressoren, slik at det lufttrykket øker etter hvert som vannstanden i tanken minker. Tanken må også være helt tett og kan ikke være ekspanderbar for å holde på trykket. Vanntanken må fylles mellom hver gjennomføring da det ikke er system for tilbakeføring av vannet.



**Figur 6-4.** Lukket tank med kompressor for å regulere trykket. Systemet er sett fra siden.

### 6.3.4. Løsning D: Åpen tank med pumpe

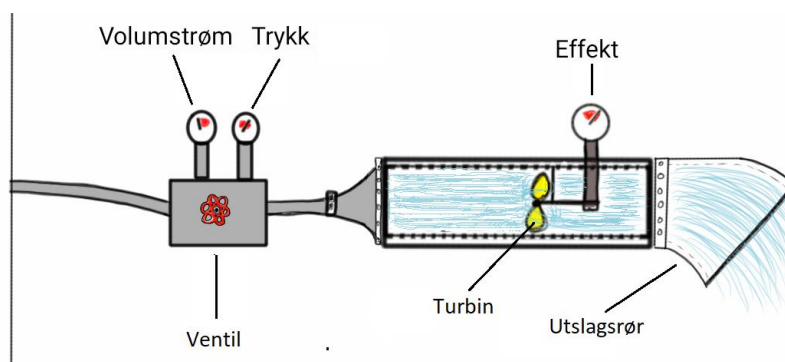
Løsningen bruker kun høyden av vannsøylen i tanken for å bygge opp trykk i systemet (figur 6-5). For å holde konstant trykk i turbinen, pumpes vannet tilbake til tanken etter at det har vært gjennom turbinen. Trykket kan da justeres med mengden vann i tanken, da en full tank vil gi mer trykk enn en nesten tom tank. Dette er en enkel løsning selv om det kommer til å være tidkrevende og tungvint å justere trykket ved å ta ut vann fra tanken. En annen ulempe med en slik løsning er at det vil være veldig lavt trykk med mindre tanken er plassert høyt eller det er høy vannsøyde.



**Figur 6-5.** Åpen tank med pumpe etter turbinen. Her det bare vannhøyden i tanken som regulerer trykket og pumpen pumper vannet tilbake i tanken for å holde jevnt trykk. Systemet er sett fra siden.

### 6.3.5. Løsning E: Vann fra «Veggen»

Ved å bruke vanntrykket og volumstrømmen som er i rørene fra «veggen» kan det være mulig å utføre småskala tester på turbiner. Vannet blir ført ut fra røret i veggen inn i en ventil som kan justere trykk og flow, før vannet blir sendt videre gjennom turbinen. Denne løsningen krever lite utstyr i forhold til de andre løsningene, ettersom den ikke trenger pumpe eller tank. Samtidig er trykket uforutsigbart og endres avhengig av hvor mange brukere som benytter seg av systemet samtidig. I det kommunale ledningsnettet er det normalt trykk på mellom 2 og 6 bar [52].



**Figur 6-6.** Løsning med vann fra «veggen». Her utnyttes vanntrykket i veggen for å drive turbinen. Systemet er sett fra siden.

### 6.4. Valg av oppsett

For å velge ut det beste hovedkonseptet brukes en PUGH-matrise som seleksjonsverktøy. Da blir verdiene 1 til 5 gitt ut ifra valgte kriterier til de forskjellige konseptene. Kriteriene som brukes er de samme som ble introdusert som viktige produkttegenskaper i kapittel 5.2. Kriteriene er gitt et vektall i prosent der totalen utgjør 100 %. Det konseptet som scorer best blir brukt videre som det valgte hovedoppsettet.

**Tabell 6-1.** Seleksjon av oppsett for testrigg. Det blir gitt en score mellom 1 og 5, der 5 er best, på hver av egenskapene som blir multiplisert med den gitte vektningen. Sammen blir det en vektet score som blir brukt til å velge ut antatt beste løsning.

Kriterier	Vekt [%]	A) Verdi	B) Verdi	C) Verdi	D) Verdi	E) Verdi
Modulerbart	15	2	4	3	4	4
Kostnad	5	4	4	2	3	5
Sikkerhet	15	4	4	3	4	5
Brukervennlig	15	3	4	2	4	4
Driftssikkerhet	5	3	3	3	3	3
Kompleksitet	15	2	4	2	4	4
Automatikk	5	3	3	3	3	3
Miljø	5	3	3	3	3	4
Relevans	20	4	5	5	3	2
Vektet totalverdi		3,1	4,05	3,05	3,6	3,7
Valgt løsning		Nei	Ja	Nei	Nei	Nei

Alternativ B, lukket rørkrets med åpen tank, er valgt som hovedoppsett for videre utvikling av testriggen. Ut i fra seleksjonsmatrisen var dette det klart beste alternativet. Alternativet har fått en jevnt god score på de fleste av kriteriene.



## 6.5. Funksjonsalternativer

Videre i dette kapittelet vil det bli beskrevet alternative løsninger for alle de forskjellige funksjonsalternativene innad i hovedkonseptet.

### 6.5.1. Trykk og volumstrømregulering

Det finnes forskjellige metoder for å regulere trykk og volumstrøm i et vannsystem. De forskjellige alternativene vurdert for testtriggen blir beskrevet her.

#### Alternativ A: Sentrifugalpumpe og Ventil

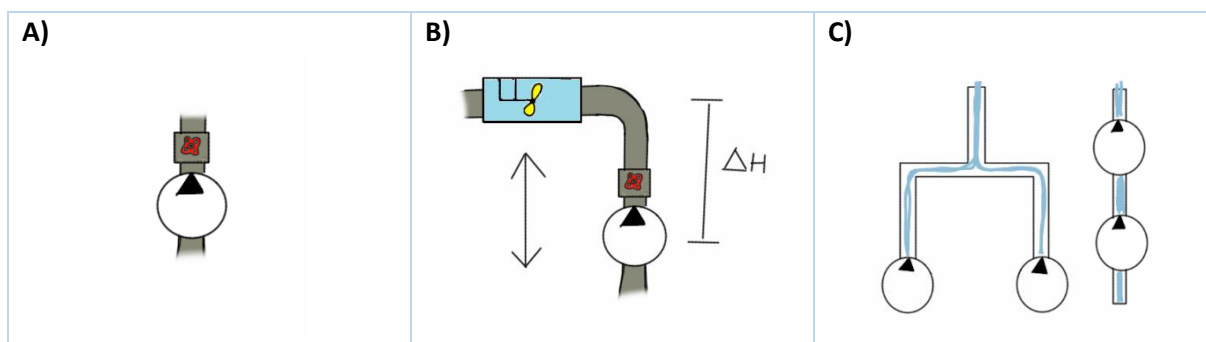
Ved hjelp av en ventil er det mulig å regulere vanntilførselen i større eller mindre grad for å bygge opp trykket (figur 6-7 A). Dette fungerer fordi sentrifugalpumpen gir et gitt trykk og volumstrøm avhengig av motstanden i systemet. Ved å regulere ventilen endres motstanden i systemet og derfra også trykket og volumstrømmen. Verdiene avhenger da av pumpekurven og systemkurven.

#### Alternativ B: Høydejustering av turbin

Ved å justere høyden hvor turbinen er plassert i forhold til trykkilden, vil trykket endres (figur 6-7 B). Dersom turbinen flyttes høyere enn pumpen vil trykket avta. På samme måte vil trykket øke dersom turbinen flyttes nedover. Det er vanskelig å se for seg løsningen uten et mekanisk komplekst system. Turbinen må flyttes 10 m vertikalt for å oppnå en endring på 1 bar. På samme måte kan også pumpen flyttes i forhold til turbinen.

#### Alternativ C: Pumper koblet i parallell og serie

Ved å bruke flere pumper kan det skapes forskjellig trykk og volumstrøm. Pumpene kan enten kobles i parallell eller i serie for å øke trykket og volumstrømmen (figur 6-7 C). Verdiene vil da endres i henhold til systemkurven. Den ekstra pumpen kobles da inn og ut avhengig av hvordan verdiene skal endres. Alternativet krever at det finnes eller investeres i en ekstra pumpe.



**Figur 6-7.** A) Løsning med ventil etter pumpe. B) Regulering av trykk og volumstrøm ved å heve turbinen i forhold til pumpe. C) Regulering av trykk og volumstrøm ved å ta i bruk to pumper, enten i koblet i parallell eller i serie.

For å enkelt måle disse alternativene mot hverandre er det satt opp en tabell med fordeler og ulemper for hvert alternativ (tabell 6-2).

**Tabell 6-2. Fordeler og ulemper i forhold til valg av de forskjellige løsningene.**

Alternativ	Fordeler	Ulemper
<b>A)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enkel konstruksjon</li> <li>• Kostnadseffektivt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ikke like tydelig visualisering av reelle forhold i naturen</li> </ul>
<b>B)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tydelig visualisering av reelle forhold i naturen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Krever svært stor høydejustering</li> <li>• Kompleks utforming</li> <li>• Lite kostnadseffektivt</li> </ul>
<b>C)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tillater større trykk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Krever to pumper, lite kostnadseffektivt</li> </ul>

### 6.5.2. Volumstrømmåling

For å gjennomføre beregninger og analysere forskjellige parametere i testriggen er det nødvendig å vite hva volumstrømmen i systemet er. For måling av volumstrøm er det funnet fire løsninger som blir beskrevet her.

#### Alternativ A: Overfallsvern

Overfallsvern er en åpning på en demning med en spesiell form (figur 6-8 A). Det er mulig å lese av høyden til vannet gjennom denne åpningen, og dermed bestemme volumstrømmen til vannet [53]. De vanligste formene er trekant og firkant. Denne løsningen krever en oppdemning og utstyr for å måle høyden på vannet som renner gjennom åpningen.

#### Alternativ B: Tidsmåling av ekstratank

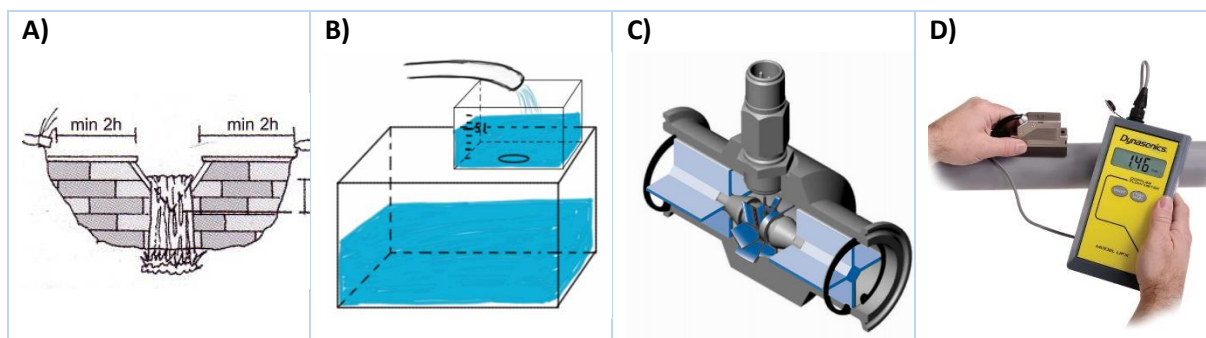
Ved å ha en ekstra måletank med tydelig avmerking for vannmengde på siden, vil det være mulig å måle volumstrømmen (figur 6-8 B). Når måletanken fylles opp, blir tiden tatt med en stoppeklokke. Etter tidtakingene er det mulig å regne ut volumstrømmen ved å dele målt volum med tiden. Når målingen er gjort eller måletanken er full, tømmes videre i systemet.

#### Alternativ C: Volumstrømmåler med løpehjul

En løsning for å måle volumstrømmen er å bruke et flowmeter som har et løpehjul som referansepunkt [54]. Dette kalles også et flygel [21]. Flygelet er en enkel og rimelig løsning, men gir ingen tydelig visualisering av volumstrømmen for brukeren (figur 6-8 C).

#### Alternativ D: Volumstrømmåler med ultralyd

Ved å feste en elektronisk måler på utsiden av røret kan volumstrømmen finnes ved hjelp av ultralyd [55]. Løsningen er enkel og nøyaktig, da måleren kan kobles rett på røret (figur 6-8 D). Denne løsningen påvirker ikke systemet, men er kostbar i forhold til de andre løsningene.



**Figur 6-8.** A) Måling av volumstrøm ved hjelp av et overfallsvern [56]. B) Måling av volumstrøm ved hjelp av en ekstra tank og tidtåkning. C) Måling av volumstrøm ved hjelp av et flygel [57]. D) Måling av volumstrøm ved hjelp av ultralyd [58].

Det er satt opp en tabell med fordeler og ulemper for å enkelt måle de forskjellige alternativene mot hverandre (tabell 6-3).

**Tabell 6-3.** Fordeler og ulemper i forhold til valg av de forskjellige løsningene for måling av volumstrøm.

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bra læringsutbytte for bruker</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kompleks</li> <li>Krever eget opplegg i tank</li> </ul>
B)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enkel og billig løsning</li> <li>Bra læringsutbytte for bruker</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Krever en ekstra tank</li> <li>Må ha stoppeklokke</li> </ul>
C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kan bestilles</li> <li>Enkel løsning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Påvirker systemet</li> <li>Lite læringsutbytte</li> <li>Usikkerhet rundt bestillingstid</li> </ul>
D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Detaljert avlesning</li> <li>Kan bestilles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kostbart</li> <li>Lite læringsutbytte</li> <li>Usikkerhet rundt bestillingstid</li> </ul>

### 6.5.3. Trykkmåling

Det er essensielt å måle trykket for å finne den hydrauliske effekten i systemet. Det er vurdert tre ulike alternativer for trykkmåling.

#### Alternativ A: Mekanisk manometer

Mekaniske manometer kan fungere på flere måter. Den tradisjonelle metoden er at det ved hjelp av et U-formet rør hvor den ene siden er koblet til vanntrykket og den andre er i friluft kan leses av høydeforskjellen [59]. Det er også mekaniske manometer som benytter en fjær for å påvise en trykkforskjell (figur 6-9 A). Produktene er rimelige og lett å anskaffe. Manometeret kan monteres i rør og overganger uten store komplikasjoner.

#### Alternativ B: Elektronisk trykksensor

Elektroniske trykksensorer registrerer trykkforandringer og gjør om disse til elektriske signaler (figur 6-9 B). Dette gir mulighet for å implementere avleste resultater med mikrokontroller, digitale fremvisere og andre digitale analyseverktøy.

**Alternativ C: Vannsøyle**

Ved å forgrene deler av vannet ut i en vertikal søyle, kan trykket leses av som hvor høyt vannet beveger seg opp i søylen (figur 6-9 C). Denne løsningen krever stor plass ved store trykk.



**Figur 6-9.** A) Måling av trykk ve hjelp av et manometer [60]. B) Måling av trykk ved hjelp av en elektronisk trykksensor [61]. C) Måling av trykk ved hjelp av en vannsøyle.

De forskjellige alternativene er oppsummert med fordeler og ulemper for å enkelt vurdere de opp mot hverandre (tabell 6-4).

**Tabell 6-4.** Fordeler og ulemper i forhold til valg av de forskjellige løsningene for måling av trykk.

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rimelig og enkelt</li> <li>Driftssikkert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Legger ikke opp til automatikk og digital avlesing</li> <li>Unøyaktig manuell avlesing</li> </ul>
B)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lave kostnader</li> <li>Driftssikkert</li> <li>Nøyaktig detaljert avlesing</li> <li>Mulighet for automatikk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ikke mulighet for manuell avlesing ved teknisk svikt</li> <li>Mer komplekst og tidkrevende oppsett</li> </ul>
C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Driftssikkert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plasskrevende</li> <li>Unøyaktig manuell avlesing</li> <li>Komplekst og lite kostnadseffektivt</li> </ul>

**6.5.4. Måling av mekanisk effekt**

Det er nødvendig å måle den mekaniske effekten fra akslingen for å videre kunne regne ut virkningsgraden til en turbin. Det er beskrevet tre alternativer for hvordan dette kan gjøres.

**Alternativ A: Bremsetest med reim**

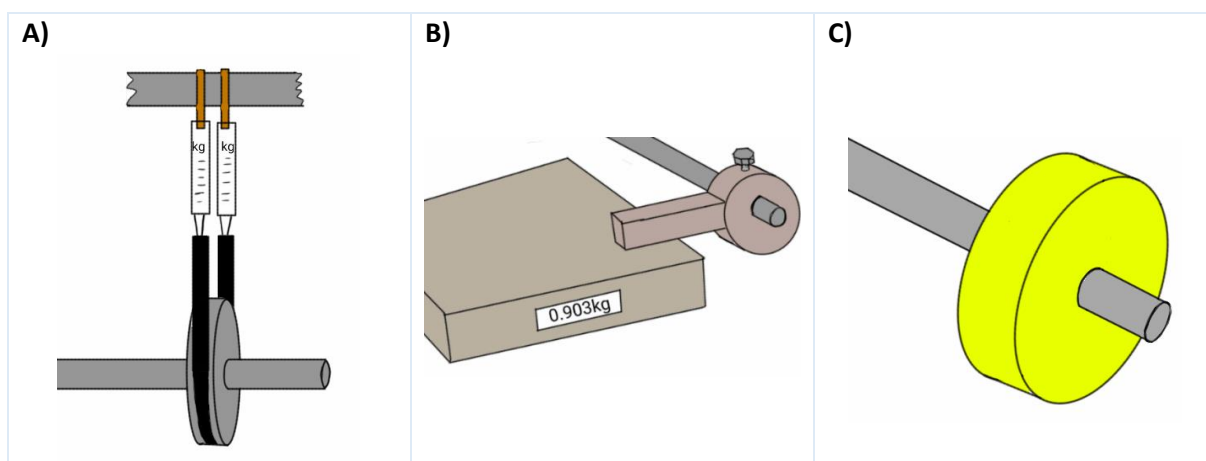
En velkjent måte å utføre effekttest på er ved hjelp av en reim og to fjærvekter (figur 6-10 A). Det må da først monteres en disk på akslingen med kjent radius. Reimen legges rundt disken og fjærvektene festes til hver sin ende av reimen. Fjærvektene står parallelt med hverandre og ved å dra i fjærvektene vil det bli økt friksjon mellom disken og reimen som dermed bremser akslingen. Ved å lese av verdiene på fjærvektene og bruke differanseverdien mellom avlesningene, kan kraften som brukes i formelen for mekanisk effekt finnes. I kombinasjon med et tachometer som måler omdreiningshastigheten til akslingen er alle parametre for å regne ut mekanisk effekt kjent.

**Alternativ B: Bremsetest med skrue**

Alternativet bygger på de samme prinsippene som i alternativ A. I stedet for fjærvekter er det her en stang som er festet i akslingen som presser på en vekt. Stangen er festet til akslingen ved hjelp av en slusekobling som kan strammes med en skrue. Skruen kan da strammes avhengig av hvor stor motstand det ønskes å påføre akslingen. Ved å lese av verdiene på vekten kombinert med lengden på stangen, er det mulig å finne momentet for utregning av den mekaniske effekten. Omdreiningshastigheten blir funnet på samme måte som i alternativ A, ved hjelp av et tachometer.

**Alternativ C: Generator**

Ved å koble en generator til akslingen er det mulig å regne ut den mekaniske effekten til akslingen dersom virkningsgraden til generatoren er kjent (figur 6-10 C). En generator gir også innsikt i hvordan et lite kraftverk vil fungere. Når generatoren er koblet til, kan en bruke et multimeter for å måle spenningen og strømmen som generatoren gir ut. For å regne ut den elektriske effekten multipliseres spenningen og strømmen sammen. For å få mekanisk effekt må den elektriske effekten divideres med virkningsgraden til generatoren.



**Figur 6-10.** A) Bremsetest ved hjelp av reim og to fjærvekter. B) Bremsetest ved hjelp av en arm som blir skrudd fast til akslingen. C) Effektmåling ved hjelp av en generator. Den gule sylindren visualiserer generatoren.

De forskjellige alternativene er summert opp med fordeler og ulemper for å enklere vurdere de opp mot hverandre (tabell 6-5).

**Tabell 6-5.** Fordeler og ulemper i forhold til valg av de forskjellige løsningene for måling av effekt.

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enkel løsning</li> <li>Lave kostnader</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unøyaktig målinger</li> <li>Analoge målinger</li> </ul>
B)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enkel løsning</li> <li>Lett å stille motstand</li> <li>Lave kostnader</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mindre grunnlag for forståelse ved læring</li> <li>Utfordring å finne slitesterke materialer for slusekobling</li> </ul>
C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gir innsikt i strømproduksjon</li> <li>Kan regne ut elektrisk og mekanisk effekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Får bare målt mekanisk effekt dersom det er kjent virkningsgrad</li> <li>Lite kostnadseffektivt</li> </ul>

### 6.5.5. Turbinrør

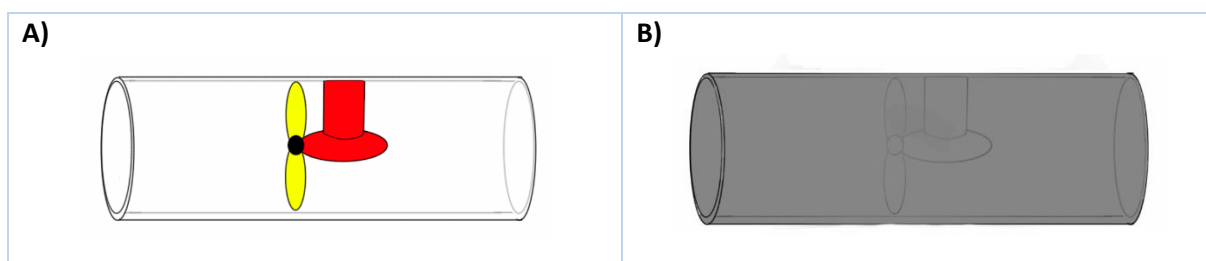
Turbinrøret er det røret som omslutter selve turbinen og tilhørende deler. Turbinrøret vil kunne ha forskjellige egenskaper ettersom hvilke materialer røret er laget i.

#### Alternativ A: Gjennomsiktig rør

For å kunne bruke testtrigen til læring er det en fordel at røret er gjennomsiktig (figur 6-11 A). Plast- og glassrør er gjennomsiktige, men er ikke like robuste som metallrør. Dersom turbinen skulle stoppe vil det være lettere å se hva som er feil, uten å måtte koble fra turbinrøret. Det er også mulighet for brukeren å se rotasjons hastighet og alternativet kan blant annet kombineres med sytråder eller blekk for å visualisere bevegelsesmønsteret til vannstrømmen.

#### Alternativ B: Metallrør

Metallrør er ikke gjennomsiktige, men er mer robust enn plast- og glassrør (figur 6-11 B). Noen metaller er utsatt for korrosjon, noe som vil være et problem da materialet vil være i kontakt med vann. Metallrør er lette å bearbeide og har muligheter for å bli sveiset.



Figur 6-11. A) Gjennomsiktig rør. B) Metallrør som ikke er gjennomsiktig.

De to alternativene er også her summert opp med fordeler og ulemper for å enkelt vurdere de mot hverandre (tabell 6-6).

**Tabell 6-6. Fordeler og ulemper i forhold til valg av de forskjellige løsningene for rør.**

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gjennomsiktig</li> <li>Ruster ikke</li> <li>Hyllevare</li> <li>Mulighet for å visualisere strømningsbildet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kan sprekke</li> <li>Mindre robust</li> </ul>
B)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mer robust</li> <li>Lett å bearbeide</li> <li>Hyllevare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Noen metaller ruster</li> <li>Ikke gjennomsiktig</li> </ul>

### 6.5.6. Utslagsrør

Utslagsrør brukes for å senke farten og øke trykket etter vannet har passert turbinen. Dette gjøres for å forhindre at vann blir dratt tilbake til turbinen. Det er også nyttig for å forhindre kavitasjon [34]. Det blir videre beskrevet fire forskjellige løsninger for utslagsrør.

**Alternativ A: Vinkel utslagsrør**

Som følge av å sende vannet gjennom en vinkel vil hastigheten synke og dermed oppstår en trykkøkning (figur 6-12 A).

**Alternativ B: Konisk diffusor med tverrsnittsovergang**

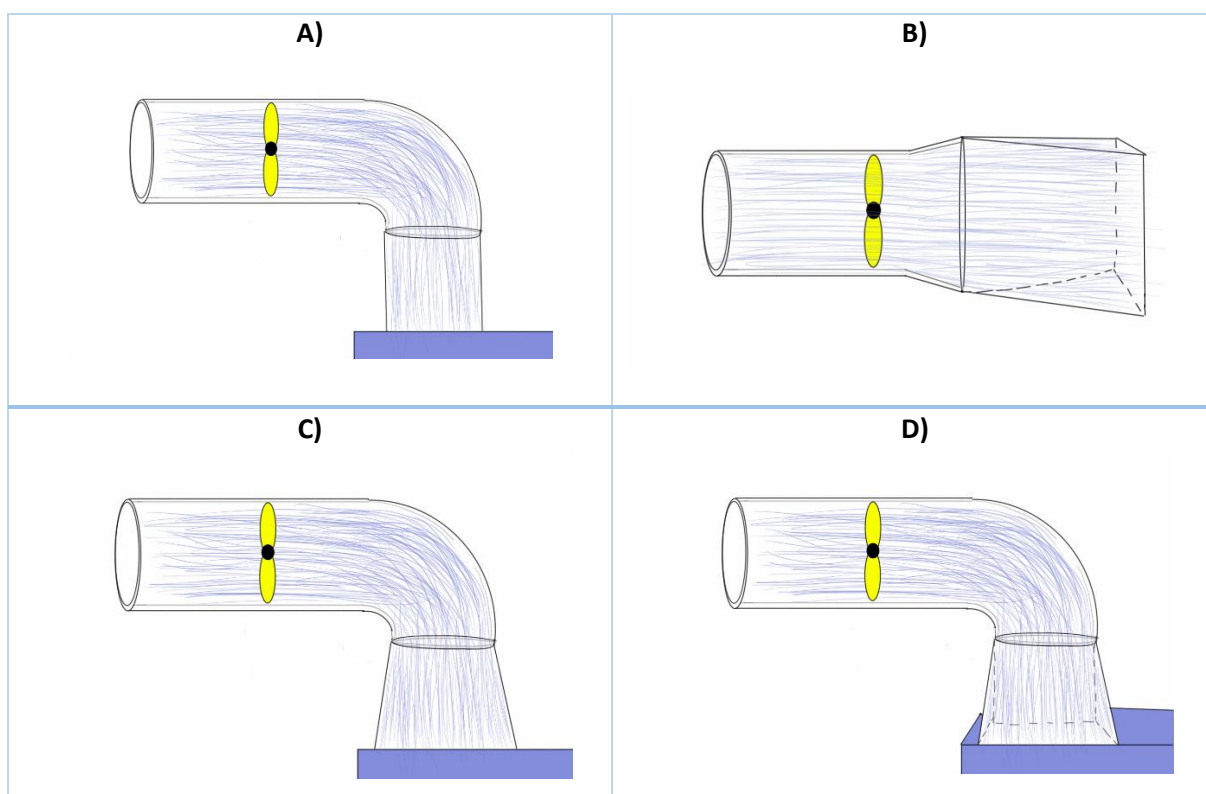
Alternativet er typisk brukt på bulb-turbiner. Etter turbinen er det to faser. Første fase er en konisk utvidelse for å senke farten, deretter er det en tverrsnittsovergang fra rør til firkant som også øker motstanden slik at vannet mister hastighet (figur 6-12 B).

**Alternativ C: vinkel mot konisk diffusor**

Ved å benytte både vinkel og konisk diffusor vil vannet bli bremsset i to faser. Først ved å sende vannet gjennom en vinkel og deretter ved å bremse vannet gjennom en konisk utvidelse (figur 6-12 C).

**Alternativ D: Vinkel mot konisk diffusor med tverrsnittsovergang.**

Alternativet er det mest komplekse. Vannet blir bremsset og trykket øker i to faser. Dette skjer ved først en vinkel og deretter en tverrsnittsovergang på samme måte som forklart i de andre alternativene (figur 6-12 D).



**Figur 6-12. A) Vinklet rør. B) Rett rør med tverrsnittsovergang. C) Vinklet rør med konisk diffusor. D) Vinklet rør med tverrsnittsovergang.**

Fordeler og ulemper ved de forskjellige alternativene er summert opp for å enkelt vurdere de mot hverandre.

**Tabell 6-7. Fordeler og ulemper i forhold til valg av de forskjellige løsningene for utslagsrør.**

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enkel å produsere</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liten trykkforandring</li> </ul>
B)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Større bulb-turbiner kan brukes som referanse for utvikling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utfordring å få vannet tilbake til tanken</li> </ul>
C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lett å føre tilbake til tank</li> <li>• Enkel i produksjon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• For stor konisk utvidelse kan føre til at vannstrømmen ikke er laminær</li> </ul>
D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stor trykkforandring</li> <li>• Enkelt å føre tilbake til tank</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompleks utforming</li> <li>• Tidkrevende utvikling og produksjon</li> </ul>

### 6.5.7. Turbinopplagring

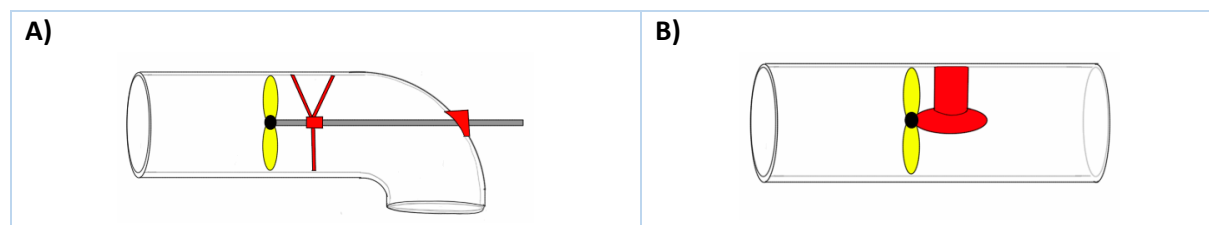
Det er viktig å ha solid løsning for opplager, slik at ingen deler som ikke skal være bevegelige blir bevegelige og omvendt. Akslingen bør også være tilgjengelig på utsiden av røret for at det skal være mulig å måle mekanisk effekt. Det blir videre beskrevet to løsninger for hvordan akslingen til turbinen skal bli opplagret.

#### Alternativ A: Fra vinklet rør

Dersom akslingen fortsetter horisontalt ut fra turbinopplagring vil den måtte komme ut av systemet gjennom et vinklet rør (figur 6-13 A). Like etter turbinen vil det da være et opplager festet innvendig i tanken som holder turbinen og akslingen i riktig posisjon i systemet. På samme måte vil det være et opplager i det vinklede røret som sørger for at akslingen også her holder riktig posisjon. Dette opplageret må også sørge for at systemet er vanntett ved akslingsutgang. Ved denne løsningen vil akslingen enkelt kunne brukes til effektmåling utenfor systemet.

#### Alternativ B: Fra rørvegg

Ved å bruke en kort aksling som er opplagret i en kapsel bak turbinen, er det ikke nødvendig å trekke ut akslingen gjennom en rørvinkel (figur 6-13 B). Det må da være et hulrom fra utsiden av tanken gjennom en vanntett passasje til akslingen. På den måten er det mulighet for å få tilgang til aksling og utføre effekttester. Løsningen anses som kompleks grunnet utfordringene med å holde kapselen og tilhørende passasje vanntett. Det er også usikkert hvor enkelt de forskjellige elementene kan utbedres eller byttes ut ved skader.



**Figur 6-13. A) Akslingen opplagres i tre punkter på rørveggen og går ut av røret i et vinklet rør. B) Opplagring av turbin fra et stort punkt på rørveggen.**

De to alternativene er summert opp med fordeler og ulemper for å enkelt vurdere de mot hverandre. (tabell 6-8).



**Tabell 6-8. Fordeler og ulemper i forhold til valg av de forskjellige løsningene for turbinopplagring.**

Alternativ	Fordeler	Ulemper
<b>A)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aksling på utsiden av røret</li> <li>• Enklere produksjon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utfordrende å tette rundt en roterende aksling ved rørvinkel</li> <li>• Lang aksling</li> </ul>
<b>B)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rett rør</li> <li>• Kompakt løsning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effekten må hentes ut ved hjelp av reimer eller lignende</li> <li>• Vanskelig å holde vanntett</li> </ul>

### 6.5.8. Turbin

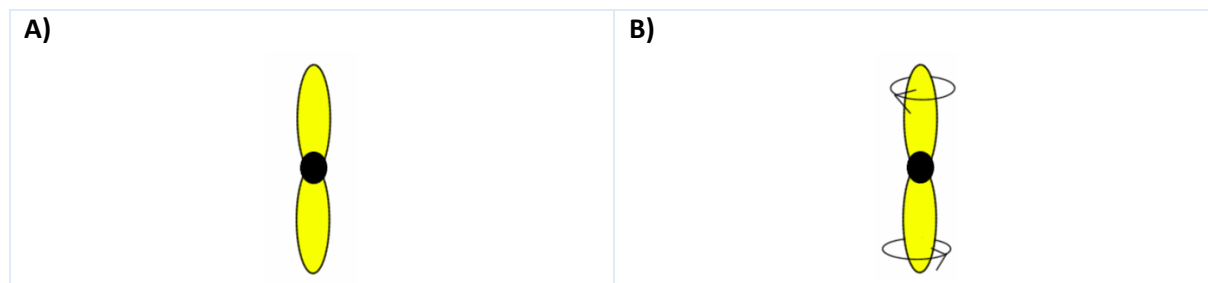
Turbinen er antakeligvis den mest essensielle delen av testriggen. Selv om det ikke vektlegges optimalisering av turbin i denne oppgaven, vurderes det to alternativer for hvordan turbinen kan være.

#### Alternativ A: Utbyttbar fastmontert propell

Ved å benytte fastmontert propell er selve propellen enkel i utforming og produksjonen blir også en enkel prosess (figur 6-14 A). Ved hjelp av 3D-print teknologi kan propellen enkelt produseres og det kan produseres forskjellige varianter for å eksperimentere med forskjellige utforminger.

#### Alternativ B: Propell med justerbare blader

En propell med justerbare blader gir muligheten for å endre vinkelen til turbinbladene etter forholdene som det er ønskelig å teste (figur 6-14 B). Dette gir muligheter for ytterligere eksperimentering i forhold til virkningsgrad for forskjellige forhold. De justerbare bladene gjør produksjonen av turbinen mer kompleks.

**Figur 6-14. A) Propell med faste blader. B) Propell med justerbare blader.**

De to alternativene er summert opp med fordeler og ulemper for å enklere ta en avgjørelse på hvilken som er mest hensiktsmessig å benytte (tabell 6-9).

**Tabell 6-9. Fordeler og ulemper i forhold til valg av løsning for turbin.**

Alternativ	Fordeler	Ulemper
<b>A)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enkel produksjon</li> <li>• Lave kostnader</li> <li>• Mulighet for å produsere flere forskjellige varianter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Må byttes ut for å regulere vinkel på turbinblad</li> </ul>
<b>B)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mulighet for å justere vinkelen på turbinbladene</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompleks og kostbar produksjon</li> <li>• Tidkrevende utvikling</li> </ul>

### 6.5.9. Virvelopprettet

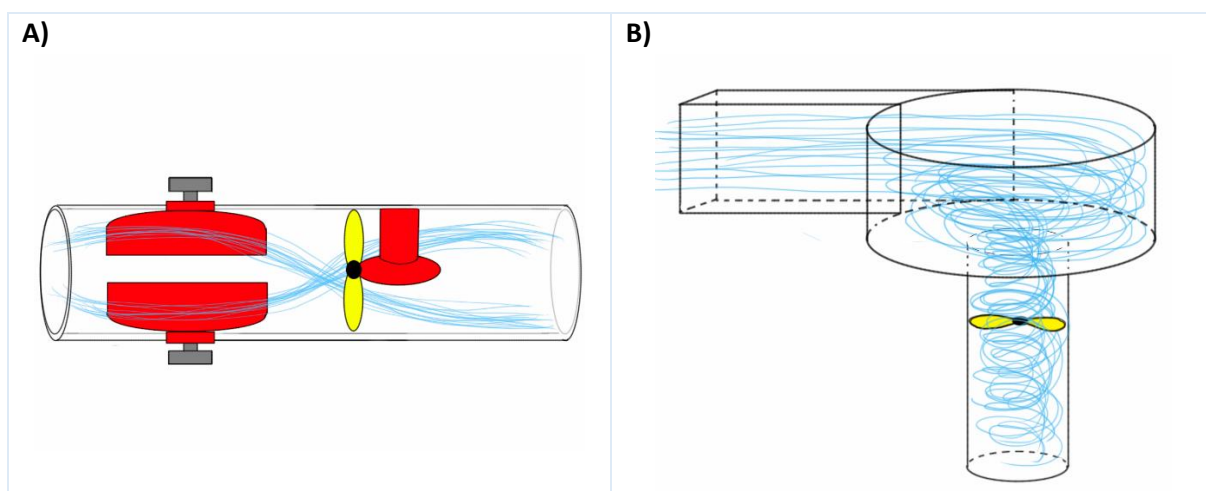
Ved å opprette en virvel før turbinen kan turbinen oppnå en bedre virkningsgrad [32]. Det finnes flere forskjellige metoder å opprette en virvel på, de to vanligste er ledeskovler og spiralhus.

#### Alternativ A: Ledeskovler i rør

Ved å plassere ledeskovler i røret i forkant av propellen er det mulig å skape en virvel. Ledeskovlene kan være variable og med mulighet for justering fra utsiden. Ledeskovlene brukes slik at når den ene blir rotert med klokken blir den andre rotert mot klokken. På den måten generer begge skovlene virvel samme vei. Dersom begge skovlene er plassert vannrett skal det ikke genereres noen virvel.

#### Alternativ B: Spiralhus

Spiralhuset baserer seg på turbinhuset til en Francisturbin og er der for å skape en virvel i vannet som strømmer inn til turbinen (figur 6-15 B). Ved at vannet kommer tangentielt inn i et sirkelformet kammer vil vannet forme en virvel før det fortsetter ned i en sjakt mot propellen. Spiralhuset er mer kompleks enn ledeskovler i et rør og det vil være vanskeligere å regulere størrelsen på virvelen.



**Figur 6-15.** A) Ledeskovler i rør for å opprette virvel. B) Spiralhus for å opprette virvel.

Fordelene og ulempene for de to alternativene er summert opp for å lettere sammenligne de (tabell 6-10).

**Tabell 6-10.** Fordeler og ulemper i forhold til valg av løsning for oppretting av virvel.

ALTERNATIV	FORDELER	ULEMPER
A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enkel løsning</li> <li>• Mulig å justere ledeskovlene</li> <li>• Lettere å gjøre modulerbar</li> <li>• Mulighet for ingen virvel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mulig at det blir for liten virvel</li> </ul>
B)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mulig større virvel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vanskeligere å bygge</li> <li>• Mer kompleks justering av virvel</li> <li>• Tar større plass</li> <li>• Alltid virvel</li> </ul>

## 7. EGENSCREENING OG KONSEPTVALG

Dette kapittelet omhandler utvelgelsen av en løsning fra de forskjellige alternativene i funksjonsanalysen. Hensikten er å velge den beste løsningen som skal videreutvikles.

### 7.1. Utvikling av seleksjonsmatrise

For å finne den beste løsningen fra funksjonsanalysen brukes PUGH-matrisen som seleksjonsverktøy. Alternativene blir gitt verdien 1 til 5 for de valgte kriteriene, der 5 er den scoren som teller mest positivt. Ettersom de valgte kriteriene har ulik betydning i forhold til de forskjellige løsningene, vil kriteriene bli vektet forskjellig avhengig av hvilken løsning som skal velges. Noen av kriteriene vil ikke være relevant for enkelte av løsningene og vil da heller ikke bli medberegnet.

Kriteriene som blir brukt i PUGH-matrisene, der de er relevante, er som følger:

- **Kompleksitet:** Hvis løsningen består av mange deler, er vanskelig å produsere eller det er stor sjanse for at noe går i stykker, vil løsningen score lavt på kompleksitet.
- **Brukervennlighet:** Ettersom det ferdige produktet skal være en læringsplattform som også skal kunne brukes av studenter, vil det telle negativt dersom løsningen bidrar til at produktet blir vanskelig å bruke.
- **Kostnad:** Dersom løsningen fører til større kostnader til prosjektet en nødvendig vil dette virke negativt.
- **Nøyaktig måling:** Siden produktet skal brukes til testing og måling, er det viktig å få så nøyaktige målinger som mulig. Dersom alternativet bidrar til at det blir mer feilkilder i systemet enn nødvendig vil dette telle negativt.
- **Driftssikkerhet:** Dersom det antas at alternativet vil føre til få feil og lite nedetid vil dette virke positivt.
- **Læringsutbytte:** Dersom et alternativ øker læringsutbytte til brukeren vil dette telle positivt.

#### 7.1.1. Trykk- og volumstrømregulering

Alternativer for trykk og volumstrømregulering er vurdert i Tabell 7-1. Kompleksitet og brukervennlighet blir der vektet som de viktigste kriteriene. Grunnen til dette er at systemet ikke skal være for komplisert å bygge samtidig som det skal være mulig for studenter å bruke testriggen.

**Tabell 7-1. Oversikt over valg av løsning. De forskjellige kriteriene er vektlagt i forhold til kriteriets relevans. Videre blir hver løsning gitt en verdi fra 1 til 5, der 5 er mest viktig. De vektete verdiene summeres og gir en pekepinn for hvilken løsning som antas å være best.**

KRITERIER	ALTERNATIVER						
	Vekting	A) Pumpe og ventil		B) Høydejustering		C) parallell/serie	
		Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	25 %	4	1	2	0,5	3	0,75
<b>Brukervennlighet</b>	25 %	5	1,25	2	0,5	3	0,75
<b>Kostnad</b>	20 %	4	0,8	3	0,6	2	0,4
<b>Nøyaktig måling</b>	15 %	3	0,45	3	0,45	3	0,45
<b>Læringsutbytte</b>	15 %	3	0,45	4	0,6	4	0,6
<b>Totalt</b>	100 %		3,95		2,65		2,95
<b>Valgt løsning</b>			Ja		Nei		Nei

Alternativ A med sentrifugalpumpe og ventil er den løsningen som kommer best ut av PUGH-matrisen. Det er spesielt brukervennligheten som skiller denne løsningen fra de andre, da de andre løsningene krever at man fysisk løfter turbin eller må kontrollere to pumper.

### 7.1.2. Volumstrømmåling

I tabell 7-2 blir de ulike løsningene for volumstrømvlesning vurdert. For å finne den beste løsningen er læringsutbytte vektet som det viktigste kriteriet. Dette fordi det er viktig at brukeren forstår hvordan systemet virker. Av samme grunn blir brukervennlighet og nøyaktighet viktige kriterier. Kompleksiteten blir også ansett som viktig da det lite komplekse løsninger er enklere å bygge.

**Tabell 7-2. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som i overstående delkapittel.**

KRITERIER	ALTERNATIVER								
	Vekting	A) Overfallvern		B) Tidsmåling		C) Løpehjul		D) Ultralyd	
		Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	20 %	4	0,8	5	1	3	0,6	3	0,6
<b>Brukervennlighet</b>	20 %	3	0,6	3	0,6	4	0,8	4	0,8
<b>Kostnad</b>	10 %	4	0,4	4	0,4	2	0,2	2	0,2
<b>Nøyaktig måling</b>	20 %	4	0,8	4	0,8	2	0,4	4	0,8
<b>Driftssikkerhet</b>	10 %	4	0,4	5	0,5	2	0,2	3	0,3
<b>Læringsutbytte</b>	20 %	4	0,8	4	0,8	2	0,4	2	0,4
<b>Totalt</b>	100 %		3,8		4,1		2,6		3,1
<b>Valgt løsning</b>			Nei		Ja		Nei		Nei

For volumstrømvlesning var det alternativ B, tidsmåling av ekstratank, som ble den beste løsningen. Alternativet visualiserer volumstrømmen på en ryddig og praktisk måte, som er hovedgrunnen til alternativet blir videreført.

### 7.1.3. Trykkmåling

Tabell 7-3 viser vektingen og utvelgelsen av ulike løsninger for trykkmåling. Her blir Læringsutbytte, brukervennlighet og nøyaktig måling ansett som de viktigste kriteriene.

**Tabell 7-3. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som de overstående delkapitlene.**

KRITERIER	ALTERNATIVER						
	Vekting	A) Manometer		B) Elektronisk		C) Vannsøyle	
		Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	10 %	4	0,4	3	0,3	2	0,2
<b>Brukervennlighet</b>	20 %	5	1	4	0,8	2	0,4
<b>Kostnad</b>	10 %	3	0,3	2	0,2	3	0,3
<b>Nøyaktig måling</b>	20 %	4	0,8	5	1	3	0,6
<b>Driftssikkerhet</b>	10 %	4	0,4	3	0,3	4	0,4
<b>Læringsutbytte</b>	30 %	2	0,6	5	1,5	4	1,2
<b>Totalt</b>	100 %		3,5		4,1		3,1
<b>Valgt løsning</b>			Nei		Ja		Nei

Fra PUGH-matrisen er det løsning B, elektronisk trykksensor, som kommer best ut. Digital trykkmåler er rimelig, driftssikker og det er potensielt stort læringsutbytte dersom brukeren må bygge og programmere systemet rundt sensoren.

#### 7.1.4. Måling av mekanisk effekt

For måling av mekanisk effekt er læringsutbytte det kriteriet som er vektet høyest med 30 %. Effektmålingen er en av de viktigste parameterne for å regne ut virkningsgraden til en turbin og det er essensielt at brukeren forstår prinsippene rundt dette. Tabell 7-4 viser vektingen og utvelgelsen av en løsning for effektmåling.

**Tabell 7-4. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som i overstående delkapitler.**

KRITERIER	ALTERNATIVER						
		A) Bremsetest Reim		B) Bremsetest Skrue		C) Generator	
	Vekting	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	20 %	4	0,8	3	0,6	5	1
<b>Brukervennlighet</b>	20 %	4	0,8	5	1	5	1
<b>Kostnad</b>	10 %	4	0,4	4	0,4	2	0,2
<b>Nøyaktig måling</b>	20 %	4	0,8	4	0,8	3	0,6
<b>Læringsutbytte</b>	30 %	5	1,5	4	1,2	2	0,6
<b>Totalt</b>	100 %		4,3		4,0		3,4
<b>Valgt løsning</b>			Ja		Nei		Nei

Alternativ A, Bremsetest med reim, var den løsningen som kom best ut av PUGH-matrisen. Det er en brukervennlig, enkel og nøyaktig metode å måle mekanisk effekt på, med stort læringsutbytte for brukeren. Bremsetest med skrue gjør det også bra, men alternativet er litt mer kompleks og gir ikke like stort læringsutbytte som bremsetest med reim og fjærvekter.

#### 7.1.5. Turbinrør

Tabell 7-5 beskriver vektingen og utvelgelsen for bruk av gjennomsliktig plastrør eller metallrør rundt turbinen. Her er læringsutbytte og kompleksitet vektet høyest fordi konseptet skal være en læringsplattform og enkel i produksjon.

**Tabell 7-5. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som i overstående delkapittel.**

KRITERIER	ALTERNATIVER				
		A) Gjennomsliktig rør		B) Metallrør	
	Vekting	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	30 %	3	0,9	4	1,2
<b>Brukervennlighet</b>	15 %	4	0,6	3	0,45
<b>Kostnad</b>	15 %	3	0,45	4	0,6
<b>Læringsutbytte</b>	40 %	4	1,6	2	0,8
<b>Totalt</b>	100 %		3,55		3,05
<b>Valgt løsning</b>			Ja		Nei

Det er løsning A, gjennomiktig rør, som kommer best ut av PUGH-matrisen. Dette er fordi den scorer best på læringsutbytte, som er vektet høyest av kriteriene. Et gjennomiktig rør vil gjøre det mulig å se hvordan turbinen oppfører seg når det blir pumpet vann i systemet, og vil derfor gi et større læringsutbytte enn et rør som ikke er gjennomiktig.

### 7.1.6. Utslagsrør

Tabell 7-6 beskriver vektingen av kriteriene som utslagsrøret blir vurdert etter og utvelgelsen av den antatt beste løsningen. De kriteriene som er høyest vektet er kompleksitet og læringsutbytte. Mange kriterier er her valgt å se bort ifra. Kompleksiteten beskriver i dette tilfelle hvilken deler som blir antatt til å være mest komplisert å produsere. Driftssikkerheten beskriver i hvilken grad det antas at løsningen vil oppfylle funksjonen og dermed holde anlegget i drift.

**Tabell 7-6. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som i overstående delkapitler.**

KRITERIER	ALTERNATIVER								
	Vekting	A) Vinkel		B) Konisk med tverrsnittovergang		C) Konisk med vinkel		D) Vinkel med tverrsnittovergang	
		Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	40 %	5	2	3	1,2	4	1,6	2	0,8
<b>Driftssikkerhet</b>	20 %	3	0,6	3	0,6	4	0,8	4	0,8
<b>Læringsutbytte</b>	40 %	3	1,2	3	1,2	4	1,6	4	1,6
<b>Totalt</b>	100 %		3,8		3		4		3,2
<b>Valgt løsning</b>			Nei		Nei		Ja		Nei

Fra PUGH-matrisen er det Løsning C, vinkel mot konisk diffusor, som kommer best ut. Løsning A med vinklet rør ligger bare 0,2 vektete poeng bak, men gjør det ikke like bra på læringsutbytte og driftssikkerhet. Den valgte løsningen kan produseres med kjente verkstedsteknikker på universitetet og er dermed mindre komplisert å produsere enn enkelte av de andre alternativene.

### 7.1.7. Turbinopplagring

Tabell 7-7 beskriver vektingen av kriterier og utvelgelsen av løsning for hvordan turbinen skal opplagres. Kompleksitet blir vektet høyest for at løsningen ikke skal bli unødvendig komplisert å bygge. De andre kriteriene som er tatt med er vektet likt.

**Tabell 7-7. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som i overstående delkapitler.**

KRITERIER	ALTERNATIVER				
	Vekting	A) Fra vinklet rør		B) Fra rørvegg	
		Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	40 %	4	1,6	3	1,2
<b>Brukervennlighet</b>	20 %	4	0,8	3	0,6
<b>Nøyaktig måling</b>	20 %	3	0,6	3	0,6
<b>Driftssikkerhet</b>	20 %	4	0,8	3	0,6
<b>Totalt</b>	100 %		3,8		3
<b>Valgt løsning</b>			Ja		Nei

Løsning A, fra vinklet rør, var løsningen som kom best ut av PUGH-matrisen. Den gjorde det best på kompleksitet ettersom alternativet er avhengig av færre bevegelige deler enn alternativ B. Det antas også at det er lettere for brukeren å operere testriggen med denne løsningen.

### 7.1.8. Turbin

Kompleksitet og kostnad er kriteriene som vektlegges mest i seleksjon av turbin. Det er ønskelig med rimelige løsninger som er enkle i produksjon. Brukervennlighet og læringsutbytte er også av betydning og vektet med 20 % hver. Utvelgelsen av turbinløsning er beskrevet i tabell 7-8.

**Tabell 7-8. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som i overstående delkapitler.**

KRITERIER	ALTERNATIVET				
	Vekting	A) Fastmontert propell		B) Justerbare blader	
		Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	30 %	5	1,5	2	0,6
<b>Brukervennlighet</b>	20 %	3	0,6	4	0,8
<b>Kostnad</b>	30 %	4	1,2	2	0,6
<b>Læringsutbytte</b>	20 %	3	0,6	5	1
<b>Totalt</b>	100 %		3,9		3
<b>Valgt løsning</b>			Ja		Nei

Alternativ A, utbyttbar fastmontert propell, er den løsningen kommer best ut av PUGH-matrisen. Den fastmonterte propellen er en enkel og rimelig løsning. Hovedgrunnen til at alternativ B ikke er aktuelt, er fordi alternativet er så komplekst at det ikke er sannsynlig å gjennomføre i dette prosjektets tidsperspektiv.

### 7.1.9. Virveloppretter

For komponenten som skal skape virvel før vannet treffer turbinen er det kompleksitet og læringsutbytte som er de høyest vektete kriteriene med 30 %. Brukervennlighet er også viktig og vektet med 20 %. Utvelgelsen av løsning for virvelopprettet er beskrevet i tabell 7-9.

**Tabell 7-9. Oversikt over valg av løsning. Seleksjonsmatrisen fungerer på samme måte som i overstående delkapitler.**

KRITERIER	ALTERNATIVER				
	Vekting	A) Ledeskovler i rør		B) Spiralhus	
		Verdi	Vektet verdi	Verdi	Vektet verdi
<b>Kompleksitet</b>	30 %	4	1,2	2	0,6
<b>Brukervennlighet</b>	20 %	4	0,8	3	0,6
<b>Kostnad</b>	10 %	4	0,4	3	0,3
<b>Driftssikkerhet</b>	10 %	3	0,3	4	0,4
<b>Læringsutbytte</b>	30 %	4	1,2	3	0,9
<b>Totalt</b>	100 %		3,9		2,8
<b>Valgt løsning</b>			Ja		Nei

Alternativ A, ledeskovler i rør, var den løsningen som scoret best i forhold til de vektete kriteriene. Den er mindre kompleks enn spiralhuset ettersom spiralhuset krever en mye større konstruksjon. I tillegg gjør muligheten for å sende vann gjennom uten å lage virvel en større driftssikkerhet og brukervennlighet.

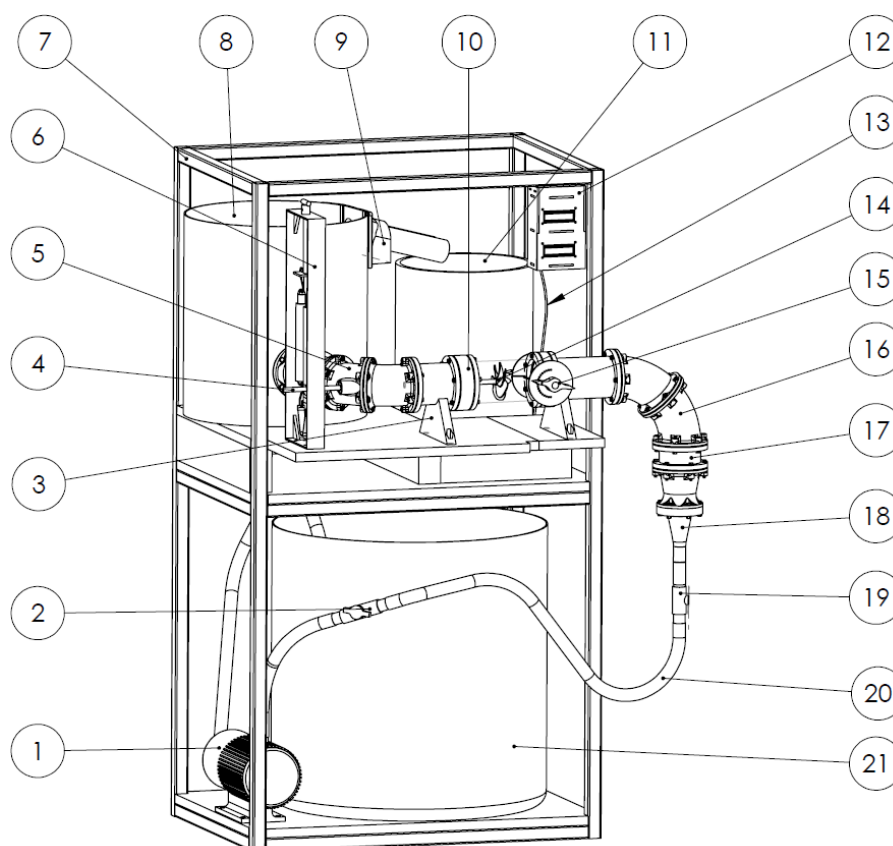


## 8. PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN

I dette kapitelet vil hele produktet og produktets komponenter bli presentert med figurer og mer detaljerte beskrivelser.

### 8.1. Sammenstilling

Testtriggen består av mange komponenter og deler. Figur 8-1 under er en oversikt over de forskjellige komponentene og komponentenes plassering.



**Figur 8-1.** Skisse av testtrigg med nummerering og plassering av hovedkomponentene.

De nummererte komponentene i figur 8-1 er forklart med kort beskrivelse i tabell 8-1 under.

**Tabell 8-1.** Beskrivelse av nummererte komponenter i figur 8-1.

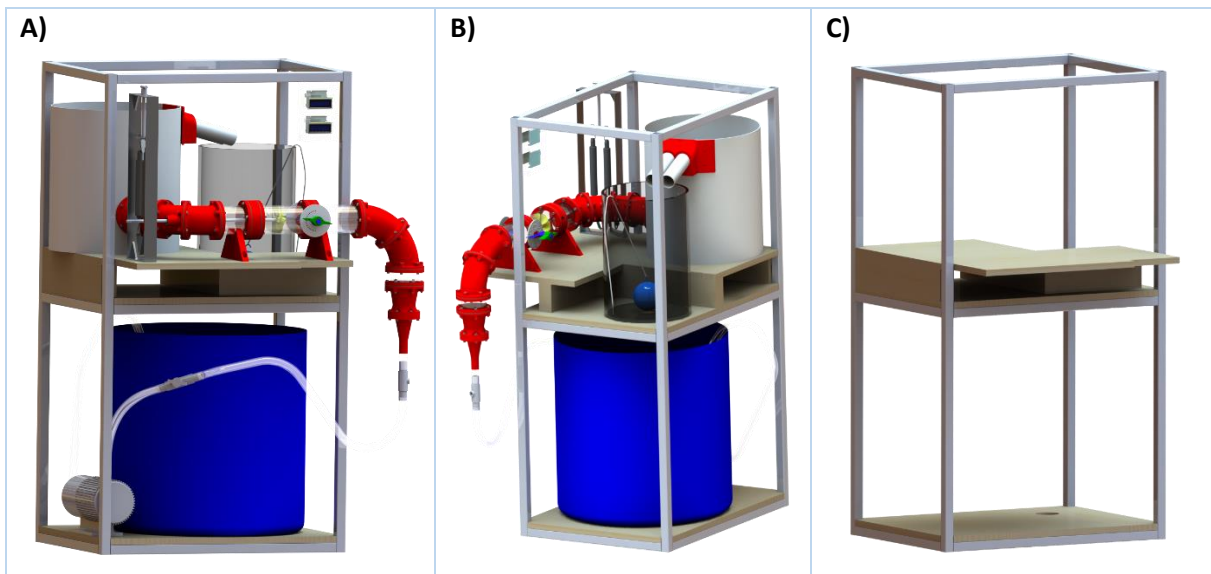
Nr.	Beskrivelse	Nr.	Beskrivelse	Nr.	Beskrivelse
1	Pumpe	8	Buffertank	15	Virvelsystem
2	Ventil	9	Rennesystem	16	Rørdeler med vinkel
3	Støtte	10	Opplager & sensorfeste	17	Akrylrør
4	Aksling	11	Måletank	18	Overgang tverrsnitt
5	Rørdel med akslinguttak	12	Koblingsboks	19	Rørdel med sensorfeste
6	Bremsesystem	13	Proppsystem	20	Slange
7	Rammeverk	14	Turbin	21	Hovedtank

## 8.2. Design av hovedelementer

Videre følger en forklaring av de forskjellige hovedelementene i designet.

### 8.2.1. Rammeverk

Rammeverket er den komponenten som rommer alle de andre komponentene og holder de sammen. Det består av treplater, planker og firkantprofiler som er festet sammen som vist i figur 8-2. Rammeverket har to etasjer der hovedtank og pumpe er i den nederste etasjen og de resterende komponentene som blant annet turbin og bremsesystem er montert i andre etasje. Figur 8-2 viser rammeverket med og uten tilhørende komponenter fra forskjellige vinkler.



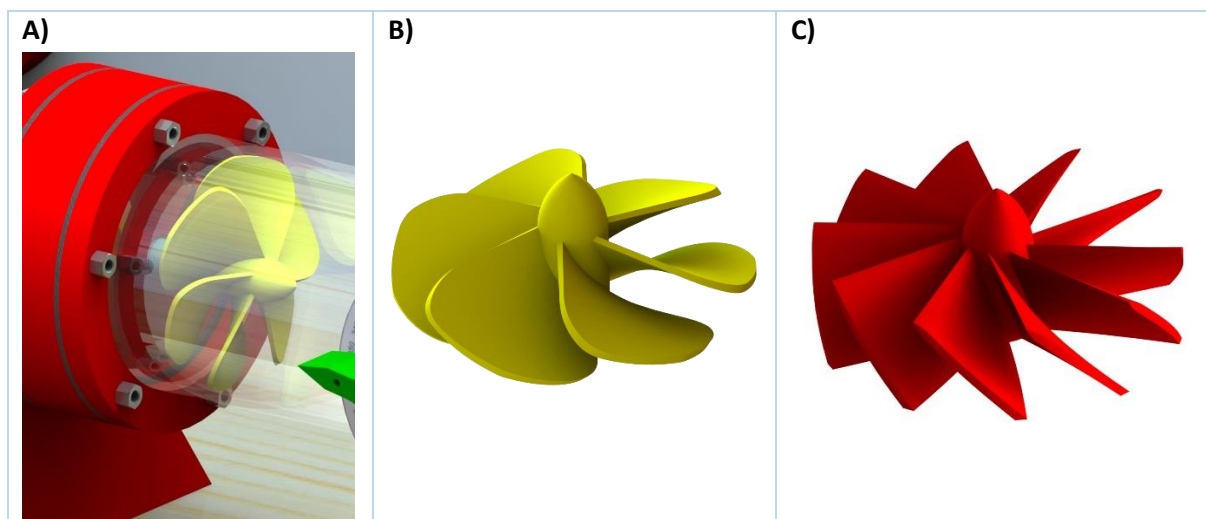
**Figur 8-2.** A) Komplettestrigg med rammeverk sett forfra. B) Komplettestrigg med rammeverk sett skrått bakfra. C) Rammeverk sett skrått forfra.

### 8.2.2. Turbin

For å kunne teste flere forskjellige varianter ble de designet 2 forskjellige propeller. Den ene har 6 blader med forholdsvis store flater mot vannets strømningsretning. Vinkelen mellom flaten på propellbladet og fartsretningen til vannet varierer her fra 20 grader innerst til 76 graders vinkel ytterst på bladene. Propellen er illustrert med gul farge i figur 8-3 B.

Den andre turbinen har 10 blader og en mindre overflate mot strømningsretningen til vannet på hvert blad. Vinkelen mellom flaten på propellbladet og vertikalplanet varierer her fra 10 grader innerst til 47 grader ytterst. Denne propellen er illustrert med rød farge i figur 8-3 C.

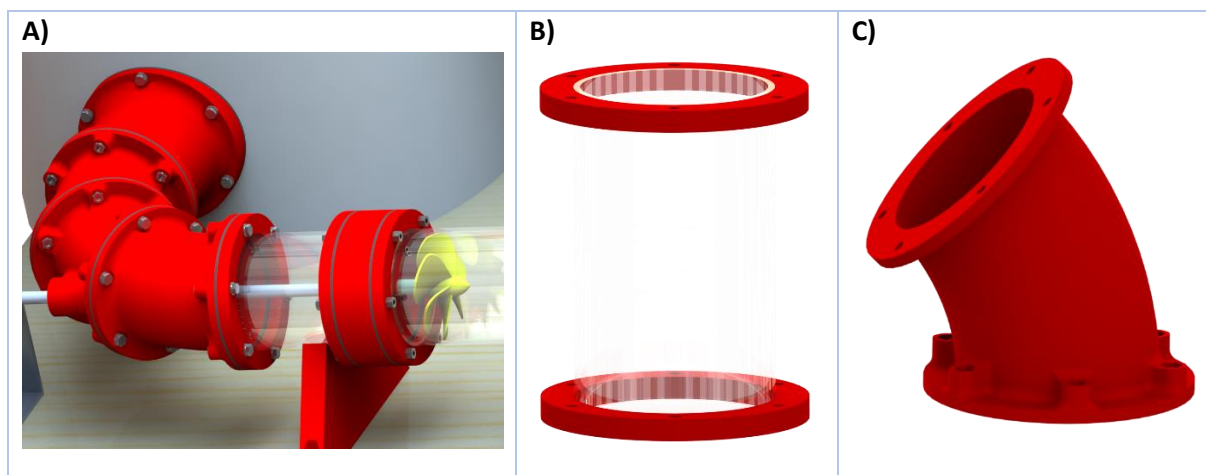
Begge propellene er designet for å dekke mest mulig av røret og har en diameter på 82 mm, der innerdiametere på røret er 84 mm. Det er ingen spesiell grunn til at propellene har fått de gitte vinkler og mål, kun for å forsøke å vise at resultatene blir annerledes ved å endre turbindingen. Figur 8-3 A viser hvordan propellen er plassert i systemet. Videre i oppgaven vil propellene omtales som «propell med 6 blader» og «propell med 10 blader».



**Figur 8-3.** A) Turbin montert på innsiden av røret på tetsriggeren. B) Gul propell med 6 blader. C) Rød propell med 10 blader.

### 8.2.3. Rørdeler

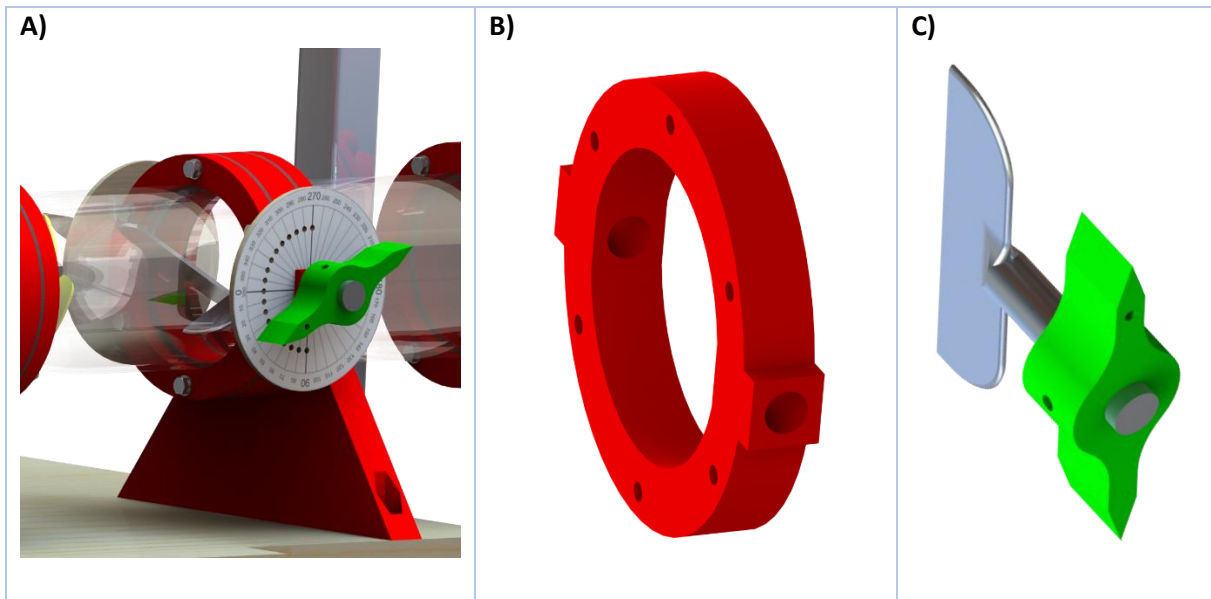
Testriggeren består av flere rørdeler. Det er i hovedsak rette deler som er gjennomsiktig eller deler med en vinkel. Rørdelene er montert sammen med flenser hvor det er tillaget hull for bolter og muttere. Flensene er integrert i delene som ikke er gjennomsiktig og pålimt de gjennomsiktige rørene i ettertid. Dette samsvarer med hvilke materialer og produksjonsmetoder som er brukt. Rundt hullene i de integrerte flensene er det forhøyninger for å forhindre gjennom boring av mutter i grunnmateriale. Det er også spor slik at mutteren ikke roterer om sin egen akse. Figur 8-4 viser rørdelene koblet sammen og eksempler på gjennomsiktige deler og rørdeler med vinkel.



**Figur 8-4.** A) Sammensetting av rørdeler fra buffertank til og med turbin. B) Gjennomsiktig rørdel. C) Rørdel med 45° vinkel.

### 8.2.4. Virvelsystem

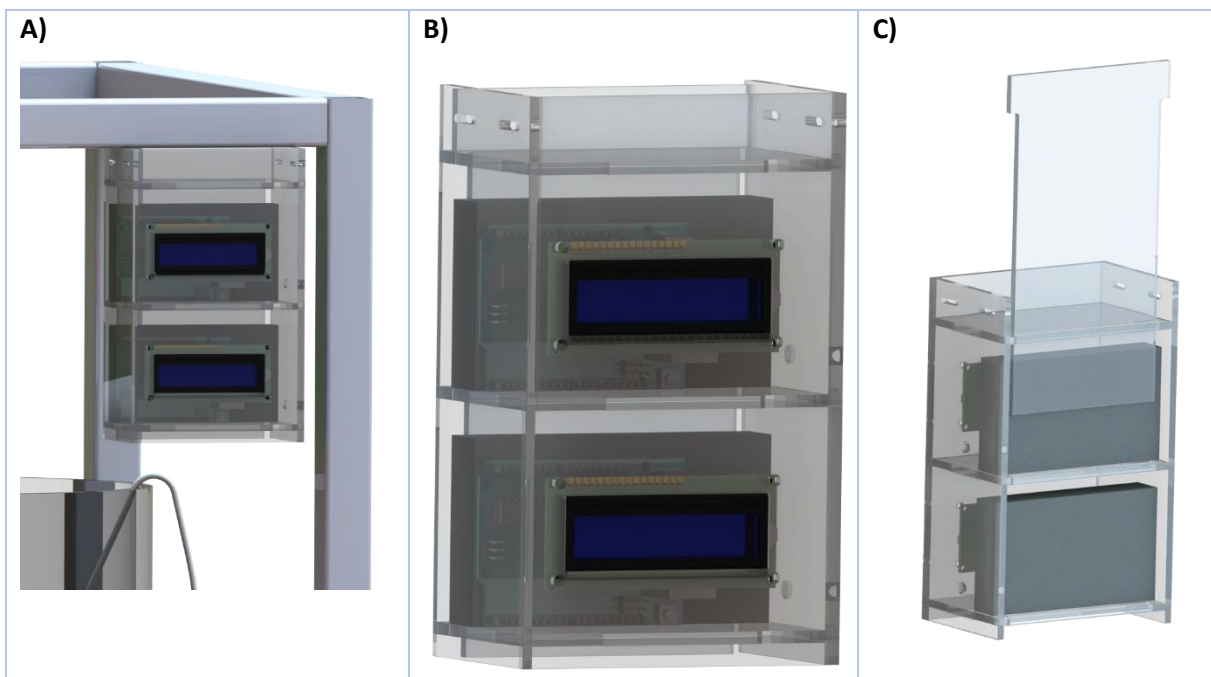
Virvelsystemet er plassert foran turbinen for å skape en virvel i vannet før vannet treffer turbinbladene (figur 8-5). Ved å vri på håndtaket på utsiden av røret kan en sette bladene i virvelsystemet til den vinkelen det ønskes å teste for. Ved å plassere en liten bolt gjennom hullene på håndtakene kan bladene låses i ønsket vinkel. Hele systemet er montert fast i en ring som har samme ytter- og innerdimensjon som resten av flensene og er derfor enkel å montere.



**Figur 8-5.** A) Sammensetting av virvelsystem montert på testriggeren. B) Virvelmodul som holder skovlene oppe og fester virvelsystemet til resten av rørsystemet. C) Skovlblad og Vinkeljustering festet sammen.

### 8.2.5. Koblingsboks

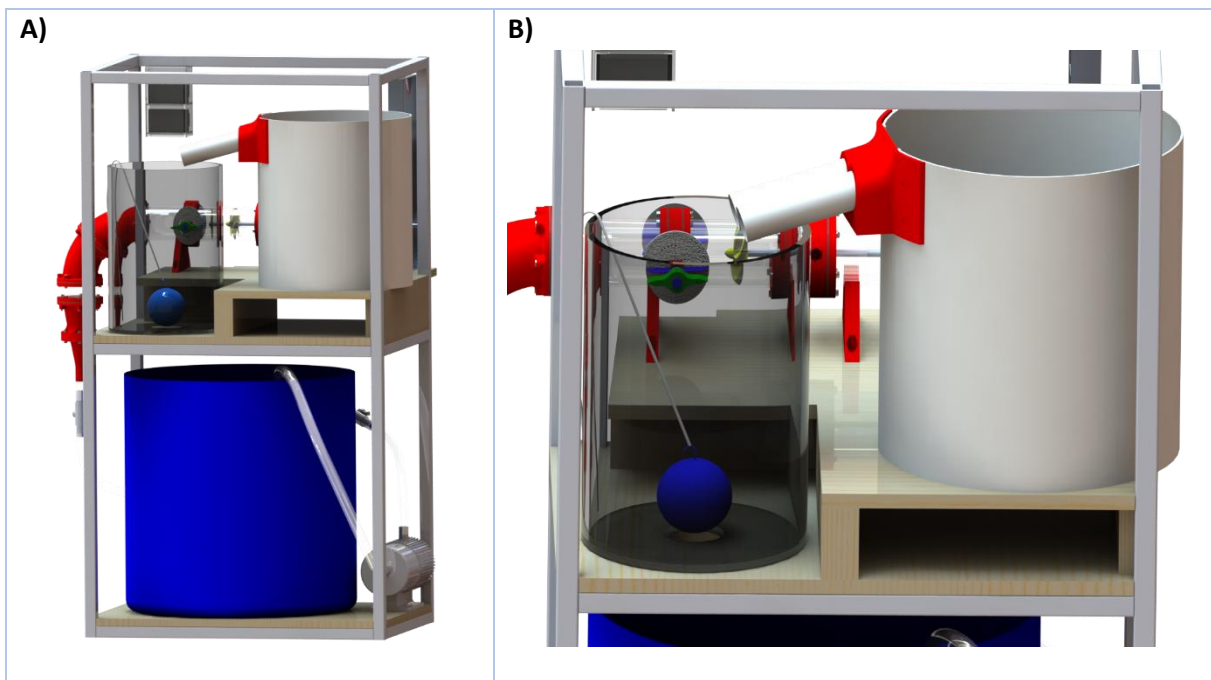
Koblingsboksen huser sensorsystemene og har et gjennomsiktig design for å lettere kunne se om ledninger har falt ut fra tilhørende plasser. Boksen er mulig å åpne fra baksiden og beskytter komponentene fra det meste av støt og vannsprut. Den er delt i to rom, slik at de to sensorene har sitt eget rom for digitalt display, arduinokort, ledninger og batteripakke. Figur 8-6 viser koblingsboksen med digitale displayer og kort. 3D-modeller av digitalt display og kort er hentet fra nettet [62] [63]. Den svarte boksen visualiserer batteripakken som gir strøm til systemet. Øverst har koblingsboksen hull for å lett kunne feste det til rammeverket med strips eller lignende. Ledningene fra kortet til sensoren vil gå ut av hullet i veggen til høyre i figur 8-6 B.



**Figur 8-6.** A) Komplette koblingsboks plassert på testriggeren. B) Nærbilde av koblingsboks sett skrått forfra. C) Koblingsboks sett bakfra med åpent bakdeksel.

### 8.2.6. Tanksystem

Testriggeren har tre tanker. Hovedtanken har som funksjon å romme vannforsyningen til testriggeren og er vist med blå farge i figur 8-7 A. Det er fra denne tanken pumpen forsynes med vann. Etter at vannet har vært gjennom rørsystemet og turbinen vil vannet strømme inn i buffertanken. Buffertanken er alltid fylt med vann og er det høyeste punktet i testriggeren. På den måten sørger buffertanken for at rørsystemet også alltid er fylt med vann. Buffertanken sender vannet over til måletanken gjennom to rør. Måletanken sin funksjon er å gjøre måling av volumstrøm i systemet. Måletanken har markert antall liter på siden og har et hull i bunnen for å kunne tømme tanken. For å ta en måling tettes hullet med en gummipropp, som vist på figur 8-7, da vil måletanken fylle seg og ved å ta tiden kan volumstrømmen i systemet regnes ut. Vannet kan deretter renne fra måletank tilbake til hovedtank.

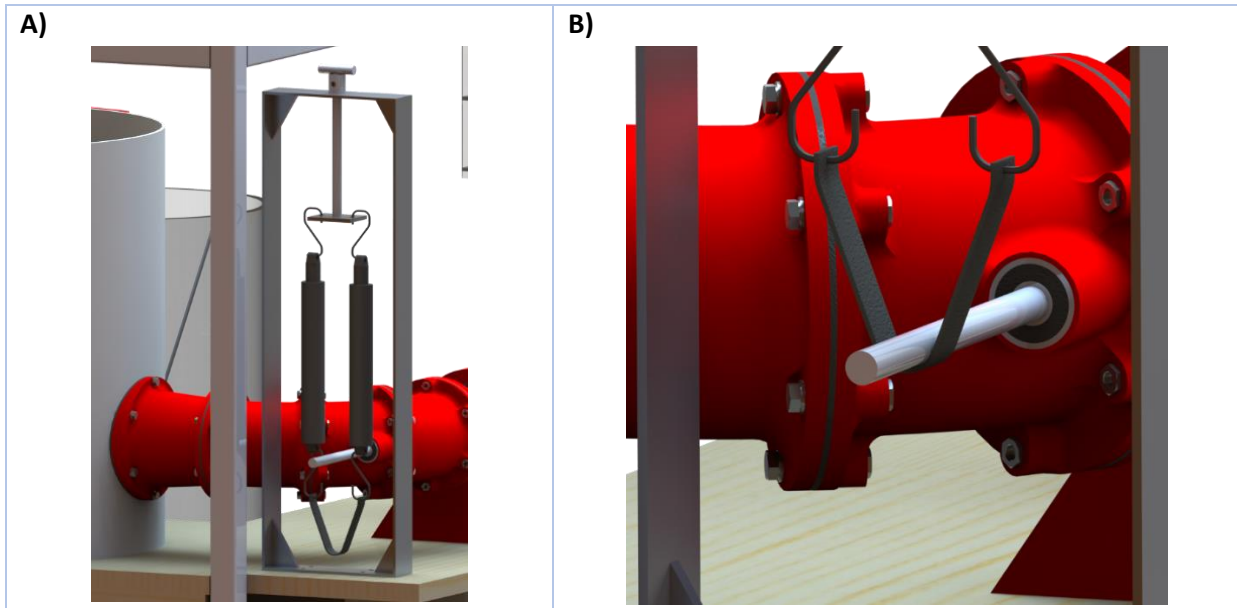


**Figur 8-7.** A) Testriggeren sett bakfra. Figuren viser hvordan plasseringen av tankene oppe og nede. B) Øverste delen av testriggeren sett bakfra. Her vises hvordan de øverste tankene er plassert i forhold til hverandre med rennesystem.

### 8.2.7. Bremsesystem

For å beregne effekten på akslingen, som er drevet av turbinen, utføres det en bremsetest. Det utføres ved å bremse akslingen med en reim. Reimen er festet til fjærvæker på begge sider slik at det er mulig å regne ut momentet gitt av akslingen. Under bremsingen må også turtallet måles med et tachometer, slik at den mekaniske effekten kan beregnes. Reimen blir strammet rundt akslingen ved at fjærene blir løftet opp med en stang og låst fast med en bolt, som vist i figur 8-8. Når reimen ikke er i kontakt med akslingen går akslingen fritt, uten påvirkning fra bremsesystemet.

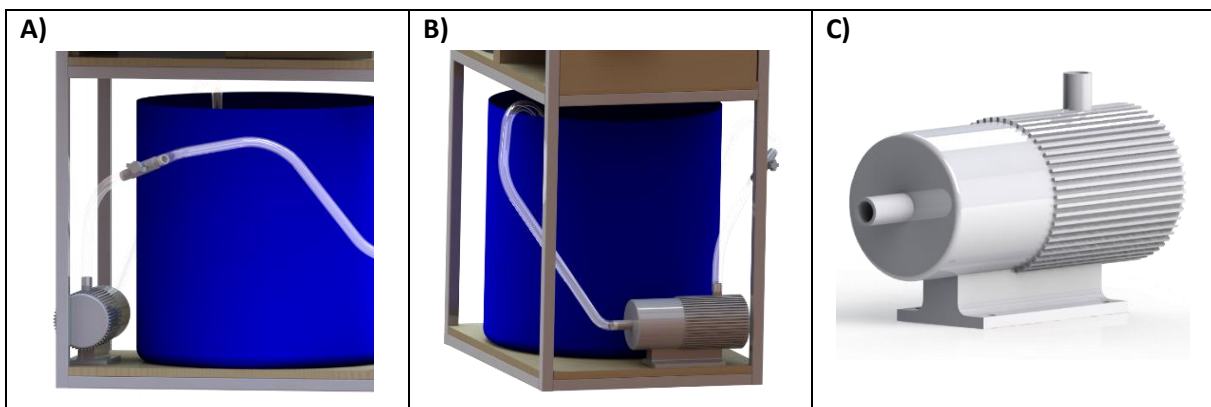




**Figur 8-8.** A) Bremsesystemet koblet fra akslingen. B) Nærmere bilde av reimen koblet til akslingen.

### 8.2.8. Pumpe

Pumpen er den komponenten som driver hele systemet. Pumpen pumper vann fra hovedtanken og videre gjennom turbinen. Pumpens plassering er vist i Figur 8-9. Etter pumpen er det en ventil for å kunne regulere vanntilførselen til resten av systemet. Selve pumpen i figur 8-9 er en skisse av en eksempelpumpe som illustrerer størrelse og plassering.

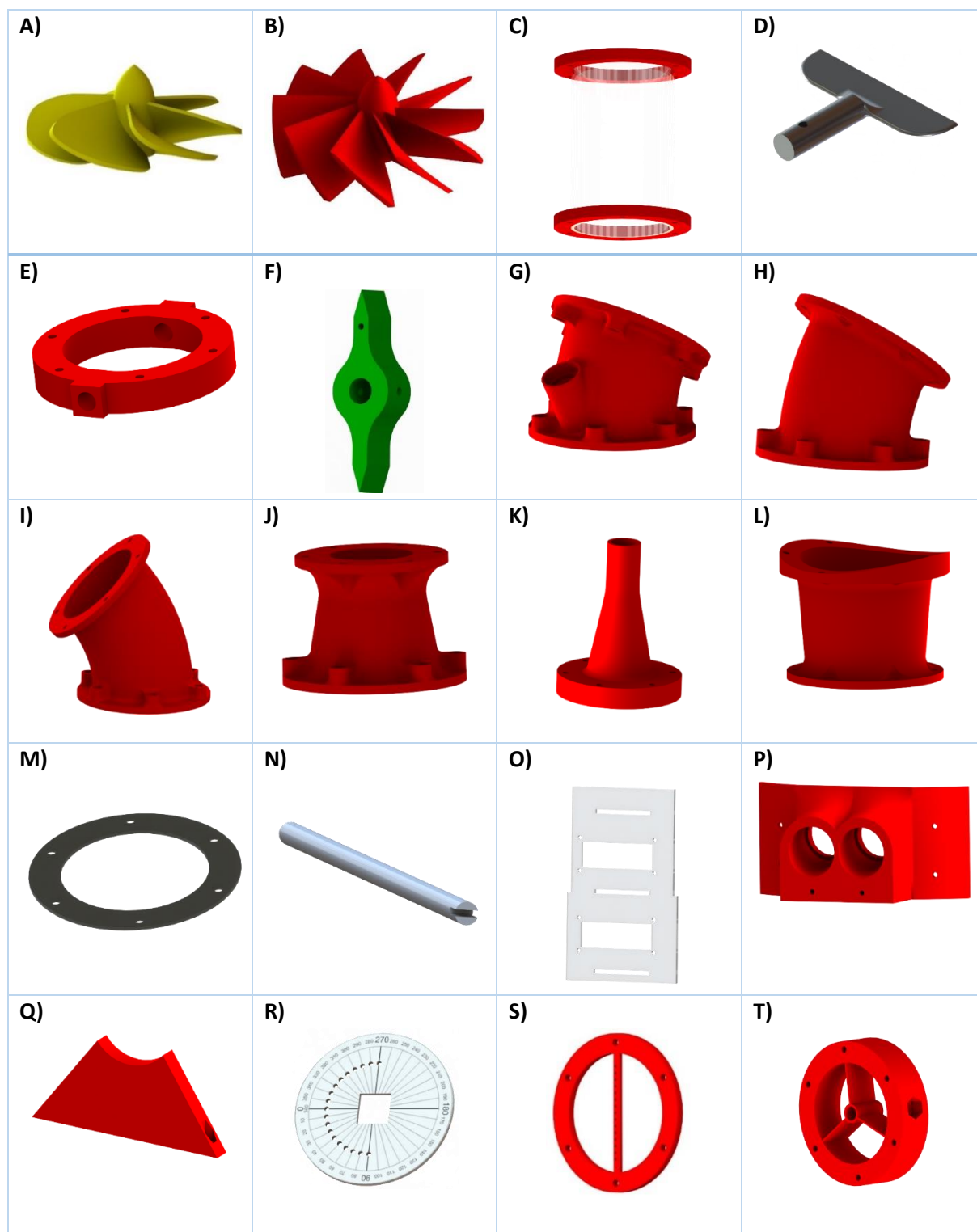


**Figur 8-9.** A) Pumpens plassering når testtriggen er sett forfra. B) Pumpens plassering når testtriggen er sett fra siden. C) Nærmere bilde av hvordan eksempelpumpen ser ut.

## 8.3. Design av komponenter

Videre kommer en oversikt over de egendesignede delene. Tabell 8-2 viser en illustrasjon av de designede delene og tabell 8-3 beskriver de samme delene. Hver del er merket med en bokstav for å enkelt referere mellom de to tabellene.

**Tabell 8-2.** Oversikt over egendesignede komponenter. Oversikt over komponenter og funksjon, i forhold til bokstavmerking, følger i tabell 8-3.



**Tabell 8-3.** Oversikt med komponentnavn og funksjon til de forskjellige komponentene i tabell 8-2.

KOMPONENT	NAVN	FUNKSJON
A	6-bladet propell	Gul propell med 6 blader med bratt vinkel.
B	10-bladet propell	Rød propell med 10 blader og slak vinkel.
C	Gjennomsiktig rørdel	Rørdel som er gjennomsiktig for å se strømming og turbin.

Tabell 8-3. Forts.

KOMPONENT	NAVN	FUNKSJON
D	Skovblad	Skaper virvel i vannet om det forskjell på strømningsretningen og bladvinkelen.
E	Virvelmodul	Holder systemet for virveloppretting sammen og kan festet til resten av rørsystemet.
F	Vinkeljustering	Er montert til skovblad slik at ved å rotere på denne delen vil skovlene på innsiden av røret også bevege seg.
G	30 grader rørvinkel med akslingsutgang	Rørdeel med 30 grader bøy med utgang for akslingen og montering av kulelager.
H	30 grader rørvinkel	Rørdeel med 30 grader bøy.
I	45 grader rørvinkel	Rørdeel med 45 grader bøy.
J	Stor konisk overgang	Rørdeel som har forskjellig innertverrsnitt i begge ender.
K	Small konisk overgang	Rørdeel som har forskjellig innertverrsnitt i begge ender, med mulighet for å feste til slange i den ene enden.
L	Diffusor	Rørdeel som er festet til buffertanken og er bindeleddet mellom buffertanken og resten av rørsystemet.
M	Pakning	Pakningen er mellom to rørdeler for at rørsystemet skal være tett.
N	Aksling	Akslingen er festet til turbinen og går ut av rørsystemet for at det skal være mulig å måle effekten på akslingen.
O	Koblingsboksplate	Koblingsboksplatene er deler av koblingsboksen som skal holde digitalt display, arduinokort og batteri på plass, og forhindre at det kommer sprut på ledninger og kort.
P	Renneholder	Renneholderen har som funksjon å holde rørene som leder vannet ut av buffertanken.
Q	Støtte	Støttene støtter opp rørsystemet, slik at rørdeler blir holdt på plass horisontalt og ikke går i brudd.
R	Vinkelskive	Vinkelskiven gjør det mulig å låse virvelskovene i ønsket vinkel i forhold til vannstrømmen.
S	Trådmodul	En modul der det kan bli festet sytråder for å se hvordan virvelen oppfører seg før turbinen.
T	Opplagermodul	Hoder akslingen fast i midten av røret, har uttak til sensoren og har boltehull for å kunne koples sammen med resten av systemet.

## 8.4. Modularisering og standardkomponenter

Delkapittelet tar for seg hvordan modularisering er en viktig del av testtriggen og hvilke standardkomponenter som er benyttet under produksjon.

### 8.4.1. Modulisering

En viktig egenskap for testtriggen er modulerbarhet. Med modularitet menes det komponenter med like tilslutninger som kan brukes til forskjellige formål og settes sammen på nye måter for å oppnå nye



egenskaper [64]. Det som i hovedsak gjør testtriggen modulerbar, er bruken av 3D-printede rørdeler. Ved å printe nye deler, kan de gjeldende rørdelene enkelt byttes ut med nye design så lenge de benytter samme dimensjoner i forhold til flenser og muttere. En betydelig del av testing utført senere i kapittel 11 er derfor med hensyn på materialeegenskapene til 3D-printet plast. Uavhengig av om 3D-printing kan benyttes i det ferdige produktet er det fordelaktig å bruke 3D-printing under prototyping for enkelt kunne endre til det beste designet.

Flere av komponentene som virvelsystem, trådmodul og turbinopplagring er bygget på det samme oppsettet med 3D-print og like flenser. Disse komponentene kan derfor enkelt byttes ut eller modifiseres etter brukers preferanser.

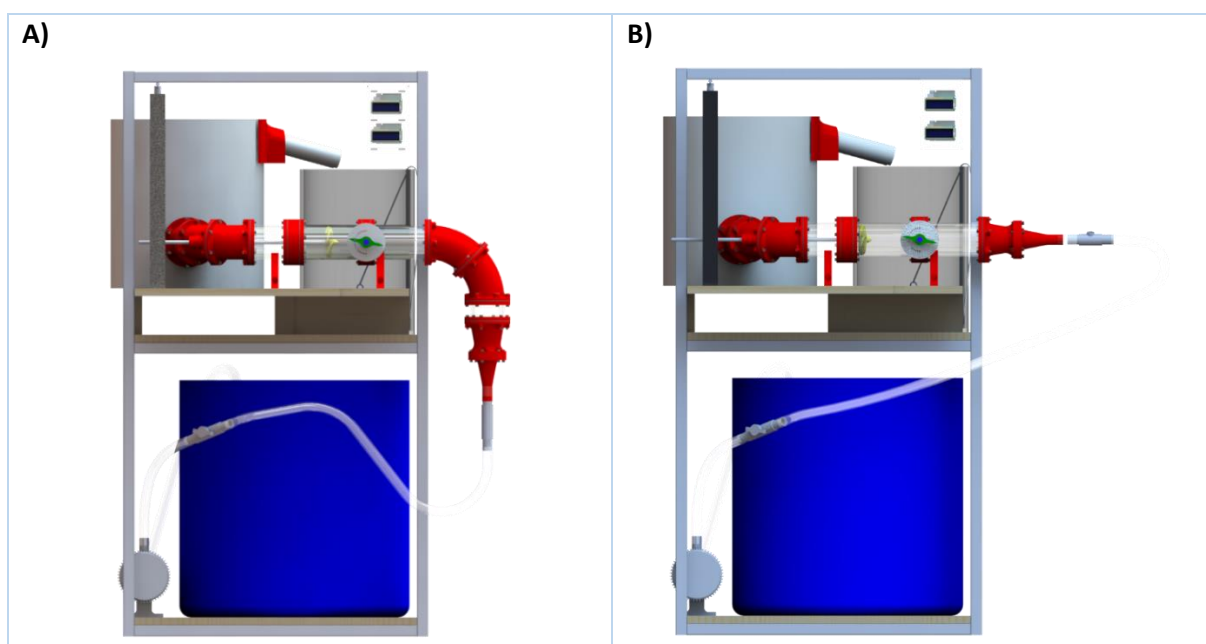
Systemet er i denne oppgaven kun designet for propellerbaserte turbiner, men det antas at testtriggen kan bygges om til å teste Francisturbiner og andre reaksjonsturbiner uten for store modifikasjoner. I denne oppgaven er det laget to forskjellige modulsammensettinger som er testet senere i kapittel 11. De to modulsammensettingene er beskrevet under.

### Testtrigg med horisontalt system

Vannet blir ført helt horisontalt gjennom alle rørdelene, med en konisk utvidelse fra slange og inn i rørsystem (figur 8-10 B). Det er nødvendigvis en bøy på slangen før den sammenkobles med rørsystem og konisk utvidelse. Testtrigg med horisontalt system er den enkleste modulsammensettingen oppsettet kan ha slik det fremstår i denne oppgaven.

### Testtrigg med vinkelmodul

Testtriggen har påmontert en vinkelmodul mellom det horisontale røret hvor propellen sitter og slangen. I tillegg er det en vinkel på 15 grader mellom vinkelmodulen og vertikalplanet. Slik at vannet går fra slangen, inn i en konisk utvidelse hvor vannet blir ført på skrå oppover inn i et bend mot det horisontale røret hvor turbinen sitter (figur 8-10 A). Det er ingen spesiell grunn til at vinkelmodulen har de gitte vinkler og mål, men er kun et eksempel for hvordan brukeren kan modellere systemet etter eget ønske for å teste forhold nærliggende til det som er i en faktisk applikasjon.



**Figur 8-10.** A) Testtrigg med vinkelmodul. B) Testtrigg med horisontalt system.

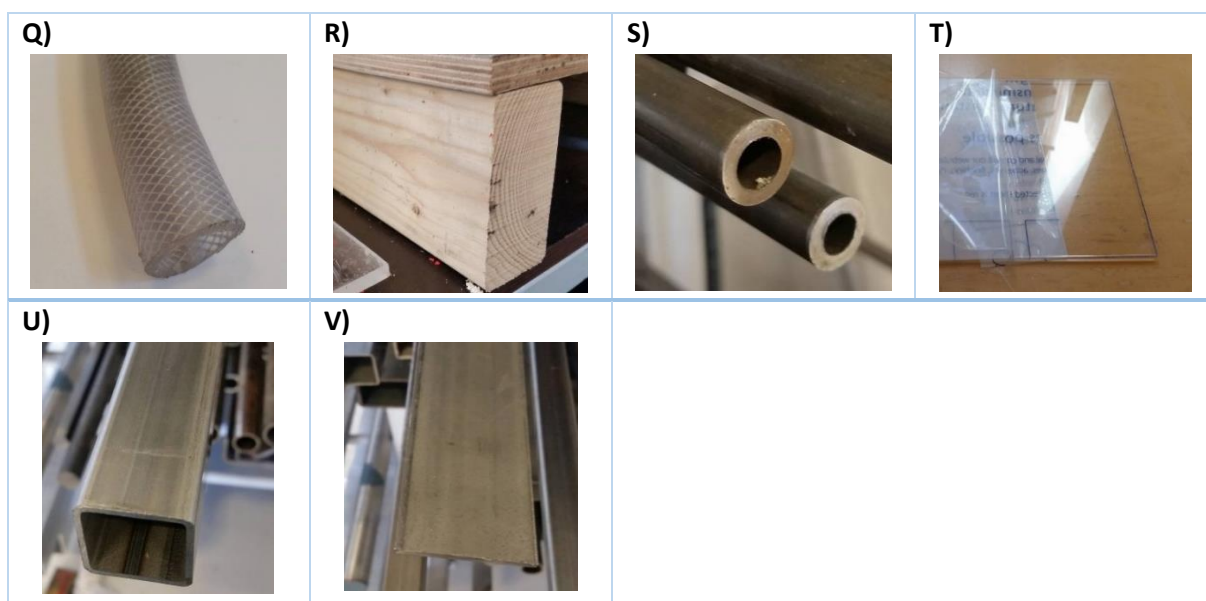
## 8.4.2. Standardkomponenter

For at prototypen til testriggeren skal bli så lite kostbar som mulig, vil det bli tatt i bruk mange standardkomponenter og hyllevarer. For å få oversikt over disse er de illustrert med fotografi i tabell 8-4. med tilhørende beskrivelser i tabell 8-5.

**Tabell 8-4. Oversikt over de forskjellige delene som kjøpes inn som ferdig komponent eller er nødvendig for å lage andre komponenter. Bokstavbeskrivelse følger i tabell 8-5.**

<p>A)</p> 	<p>B)</p> 	<p>C)</p> 	<p>D)</p> 
<p>E)</p> 	<p>F)</p> 	<p>G)</p> 	<p>H)</p> 
<p>I)</p> 	<p>J)</p> 	<p>K)</p> 	<p>L)</p> 
<p>M)</p> 	<p>N)</p> 	<p>O)</p> 	<p>P)</p> 

Tabell 8-4. Forts.



Tabell 8-5. Oversikt med komponentnavn og funksjoner til komponentene i tabell 8 - 4.

Komponent	Navn	Funksjon
A	Pumpe	Pumper vann og driver systemet rundt
B	Skrueventil	Åpner og lukker vanntilførselen til systemet etter pumpen.
C	Bolt, mutter og skive	Festemiddel for alle rørdeler og komponenter.
D	Propp	En gummiball som blir brukt til propp i systemet, for å ta måling av volumstrøm
E	Fjærvekt	Vekt til å måle momentet som akslingen gir når den er belastet.
F	Gummiduk	Pakningsmateriale i neoprengummi som blir brukt til å lage 2 mm tykke pakninger.
G	Rørdel med sensorfeste	Rørdel med gjenget hull for montering av sensor.
H	Sensor	Trykksensorer for måling av trykk.
I	Arduiono UNO	Mikrokontroller for styre sensor og digitalt display.
J	Digitalt display	Skjerm som viser trykket som virker på sensoren.
K	Batteripakke	Batteripakken leverer strøm til arduino-kortet og sensorene.
L	Kulelager	Kulelageret lar akslingen rotere fritt.
M	Stort akrylrør	Et stort akrylrør som blir kuttet til og brukt som måletank.
N	Tønne	En tønne som blir delt og brukt som hovedtank.
O	Plasttank	En plasttank som blir kuttet til og brukt som buffertank.
P	Akrylrør	Akrylrøret blir kuttet
Q	Slange 1''	En armert slange som leder vann inn til rørsystemet.
R	Treverk	Planker og treplater brukt for å konstruere rammeverk.
S	Metallrør	Metallrør for bremsesystem og aksling.
T	Akrylplate	Materiale for å kutte ut Koblingsboks.
U	Firkantprofiler	Firkantprofiler til å lage rammeverk.
V	Flattstål	Flattstål til å lage bremsesystem.

## 8.5. Materialelegenskaper, overflatebehandling, styrke og vedlikehold

For at testtriggen skal produseres i henhold til tidlige kostnadsvurderinger er det essensielt at det blir benyttet de materialer og verktøy som er tilgjengelig på universitetet.

Angående 3D-printing er det først og fremst ABS- og PLA-plast som er tilgjengelig. ABS-plast er blant de rimeligste filamentene som er mulig å kjøpe til 3D -printere og er et mindre sprøtt materiale enn PLA. Plast generelt er materialer med lav pris og høy styrke i forhold til egenvekt og egner seg derfor godt til prototyping. Ettersom 3D-print fungerer ved at smeltet plast blir lagt lag på lag, er ikke 3D-printede deler vanntette i utgangspunktet. Derfor må den ferdig printede delen etterbehandles for å gjøre det vanntett. Acetondamp har evnen til å smelte sammen plastlagene og det er mulig å oppnå en jevn vanntett overflate [65]. En betydelig del av kapittel 11 bygger på testing rundt dette prinsippet. Aceton er et velkjent løsemiddel og ettersom «likt løser likt», har ABS-plast kjemiske likheter med aceton [66].

Siden testtriggen benytter vann som medium i rørsystemer, er det ikke gunstig å bruke materialer som er utsatt for korrosjon. Det er derfor valgt å bruke aluminium som turbinaksling. Aluminium er i tillegg enkel å maskinere, rimelig og har en lav egenvekt i forhold til materialstyrke. Ettersom Aluminium ikke rustet vil det ikke bli nødvendig med overflatebehandling. Kulelageret og sensorene består av ståldeler som kommer i kontakt med vann og blir dermed mer utsatt for korrosjon. Testtriggens svakeste punkt i forhold til korrosjon er kontaktflaten mellom kulelageret i stål og aluminiumsakslingen. Når stål og aluminium er i kontakt er området utsatt for galvanisk korrosjon [67]. Kulelageret burde derfor bli overflatebehandlet eller det burde bli vurdert andre materialer som er mer motstandsdyktige mot korrosjon. Grunnen for at de valgte materialene brukes er i hovedsak tilgjengelighet og kostnad.

Rammeverket til bremsesystemet består også av stål, men med lavere kvalitet og karboninnhold enn for eksempel kulelageret. For å forhindre at det skal oppstå korrosjonsskader må dette overflatebehandles. Det samme gjelder rammeverket til hele testtriggen. Selv om disse delene i utgangspunktet ikke behøver å være i kontakt med vann, er det nærliggende å tro at vannsprut eller vanndamp kan forekomme.

Alle gjennomsiktige rørdeler og delene til koblingsboksen består av akrylplast. Dette er et veldig sprøtt materiale som sprekker lett om blir behandlet røft. Akrylplasten blir også ekstra utsatt for sprøbrudd når det blir varmebehandlet gjennom laserkutting og senere limt sammen med akrylplastlim. Dette er fordi det oppstår interne spenninger i materialet når det blir kuttet med laser og ved bruk av lim [68]. Akryl ble likevel valgt for denne prototypen fordi det var mye tilgjengelig akryl på universitetet. Et materiale som kan være mer ideelt er polykarbonat. Polykarbonat er gjennomsiktig, men ikke like sprøtt som akryl. Polykarbonat er dyrere en akryl, men også enklere å bearbeide uten at det oppstår skade. De forskjellige materialene som er tatt i bruk og de forskjellige materialene som ble vurdert er oppført i tabell 8-6 med tilhørende egenskaper.

**Tabell 8-6.** Oversikt over forskjellige materialer og deres fysiske egenskaper hentet fra CES Edupack [69]. Det er uvisshet rundt spesifikasjonene på de tilgjengelige materialene, derfor er også de innhentede dataene generelle.

Materiale	Spesifisering	Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	E-modul [GPa]	Flytgrense [MPa]	Korros- jon	Pris [NOK/kg]
<b>Plast</b>	ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	1020 - 1080	2 - 2,9	29,6 – 44,1	OK	22,1 – 26,6
<b>Plast</b>	Akryl, PMMA (Polymethylmethac rylate)	1170 - 1200	2,24 – 3,24	53,8 – 72,4	OK	27,8 – 33,1
<b>Plast</b>	PLA (Polylactide)/ (Polylactic acid)	1240 - 1270	3,3 – 3,6	55 – 72	OK	24,8 – 30,3
<b>Metall</b>	Aluminium	2500 - 2900	72 - 89	50 – 330	OK	20 – 23,3
<b>Metall</b>	Høy karbon stål	7800 - 7900	200 - 215	400 - 1160	Ikke OK	5,14 - 5,23
<b>Plast</b>	PC (Polycarbonate)	1140 - 1210	2 – 2,44	59 - 70	Ok	33 – 36
<b>Plast</b>	PVC (Polyvinylchloride)	1300 - 1580	2,14 - 4,14	35,4 – 52,1	Ok	14,9 – 18,2



## 9. PRODUKSJON AV PROTOTYPE

Det vil i dette kapittelet redegjøres for hvilke produksjonsmetoder som benyttes for de forskjellige komponentene og fremvist en kostnadskalkyle for prototypen.


### 9.1. Produksjon av prototype

For produksjon av prototypen er det kun brukt de tilgjengelige verktøyene som finnes på universitets verksted og Eik Idéverksted. Alt av maskinering av deler blir gjort på verkstedet til universitetet og alle deler som er 3D-printet eller laserkuttet er gjort med Eik Idéverksted sitt utstyr. Rammeverk, tanker, treplater, akrylrør og planker er gjenbruk av deler og ressurser som var tilgjengelig på universitetet. Videre blir det forklart hvordan de forskjellige komponentene er produsert.

#### Rammeverk

Tabell 9-1 forklarer hvordan rammeverket er produsert og hvilke materialer som er brukt.


**Tabell 9-1. Produksjonsmetoder for rammeverket.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Stål og treverk</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gjenbruk av rammeverk med hjul.</li> <li>Kutte til treplater med stikksag.</li> <li>Skru sammen treplater og planker til rammeverk med drill, treskruer og bolter.</li> </ul>	

#### Rørdeler med innsyn

Det ble først sammensatt et alternativ med akrylflenser, som under testing i kapittel 11.1.7 ikke viste seg å være robust nok. Det er derfor utformet en produksjonsmetode for akrylrør med akrylflenser (tabell 9-2) og en for akrylrør med ABS flenser, som ble erstatningsløsningen.

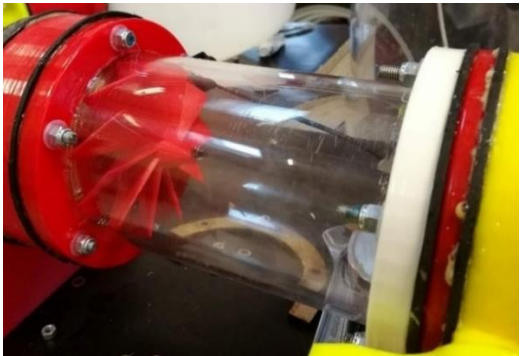
**Tabell 9-2. Produksjonsmetoder for rørdeler med innsyn og akrylflenser.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Akryl</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kutting av akrylrør med båndsgag i riktige lengder.</li> <li>Laserkutting av flenser fra akrylplate.</li> <li>Feste akrylflensen til akrylrøret ved hjelp av akryplastlim.</li> <li>Pussing av overflate med sandpapir for å få bort limrester og ujevnheter.</li> </ul>	



Tabell 9-3 beskriver produksjonsmetoder for erstatningsløsningen med ABS flenser.


**Tabell 9-3. Produksjonsmetoder for rørdeler med innsyn og ABS flenser.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Akryl og ABS-plast</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kutting av akrylrør med båndsg i riktige lengder.</li> <li>• 3D-printe flenser i ABS.</li> <li>• Feste ABS-fensen til akrylrøret ved hjelp av akryplastlim.</li> <li>• Pussing av overflate med sandpapir for å få bort limrester og ujevnheter.</li> </ul>	

### Resterende rørdeler og turbin

Med resterende rørdeler menes det alle vinkler og koniske utvidelser i anlegget. Det er også tilsvarende produksjonsmetode for turbinen (tabell 9-4).


**Tabell 9-4. Produksjonsmetoder for rørdeler og turbin laget med 3D-printer.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>ABS - Plast</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Design av deler i CAD-program.</li> <li>• Printing av deler i 3D-printer i henhold til testkapittel.</li> <li>• Bruk tang, kniv og sandpapir for å fjerne støttemateriale og jevne ut overflater.</li> <li>• Behandling deler i acetondamp i henhold til testkapittel.</li> </ul>	

### Tanker

Det er totalt tre tanker i produktet. Det ble funnet tanker på diverse lager på NMBU som kunne brukes og produksjonsmetodene er dermed kortfattet (tabell 9-5).

**Tabell 9-5. Produksjonsmetoder for tanker funnet på universitetet.**


Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Plast</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gjenbruk av tanker på universitetet.</li> <li>• Kutte til hull og åpninger med drill og stikksag.</li> </ul>	



## Aksling

Tabell 9-6 forklarer hvordan akslingen er produsert og hvilket materiale som er brukt.


**Tabell 9-6. Produksjonsmetoder for akslingen som er brukt i testriggen.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Aluminium</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kutting av aluminiumsstang til riktig lengde med båndsgag eller baufil.</li> <li>• Kutt til spor i akslingen for turbinfeste med båndsgag.</li> <li>• Drei til akslingen i en dreiebank for riktig diameter. Bruk Sandpapir for å ikke dreie bort for mye materiale.</li> <li>• Puss til spor med sandpapir for å få akslingen til å passe i sporet til propellen.</li> </ul>	

## Bremsesystem

Det blir i tabell 9-7 forklart hvordan de enkelte delene i bremsesystemet er produsert og hvordan systemet er satt sammen (tabell 9-7).


**Tabell 9-7. Materialer og produksjonsmetoder for bremsesystemet til testriggen.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Stål</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kutte til rammedeler fra plate med platesaks og båndsgag.</li> <li>• Kutte til stålstenger med båndsgag eller baufil.</li> <li>• Kutte til stålhylse fra stålør med båndsgag.</li> <li>• Bore hull i hylse.</li> <li>• Lage gjenger i hull med gjengetapp.</li> <li>• Sveise sammen deler med sveiseapparat.</li> </ul>	

## Rennesystem

Det ble først utviklet en midlertidig renne i aluminium. Det blir i dette kapittelet kun forklart hvordan den endelige løsningen for prototypen blir produsert (tabell 9-8).

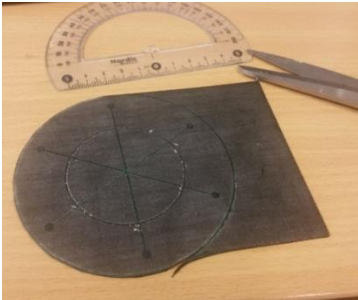
**Tabell 9-8. Materialer og produksjonsmetoder for rennesystemet til testriggen.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>ABS og Plastrør</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Designe i CAD-program.</li> <li>• 3D printe ABS-plast.</li> <li>• Kutte til plastrør.</li> <li>• Lime plastrørene til ABS-del.</li> </ul>	

## Pakninger

Tabell 9-9 viser hvordan pakningene er produsert.


**Tabell 9-9. Pakningen produseres ut fra en gummiduk.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Neopren-gummi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Skjære ut pakning fra neopren-gummiduk med saks og tapetkniv.</li> <li>• Kutte ut hull med «hullpipe» og hammer.</li> </ul>	

## Kraftfordeler

Det er i tabell 9-10 vist hvordan kraftfordeleren, som skal fordele flatetrykket ved skruer i flens, er produsert.


**Tabell 9-10. Kraftfordelerne er produsert ved hjelp av laserkutting.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Kryssfiner</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Designe i CAD-program.</li> <li>• Kutte ut deler fra kryssfinerplate med laserkutter.</li> </ul>	

## Koblingsboks

Det er i tabell 9-11 vist hvordan koblingsboksen, uten innmat, er produsert ved hjelp av laserkutter.

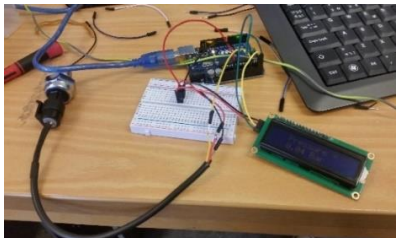
**Tabell 9-11. Sammensetting og produksjon av deler til sensorsystem.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
<b>Akryl</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Designe i CAD-program.</li> <li>• Laserkutte akrylplate.</li> <li>• Lime sammen med akrylplastlim.</li> </ul>	

## Sensorsystem

Sensorsystemet består av flere deler og det er i tabell 9-12 vist hvordan hele systemet monteres sammen.

**Tabell 9-12. Sammensetting og produksjonsmetoder for sensorsystem.**

Materiale	Produksjonsmetode	Bilde
Stål, kobber med mer.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koding av mikrokontroller.</li> <li>• Lodding av ledninger.</li> <li>• Kople digitalt display, batterier og mikrokontroller sammen.</li> </ul>	

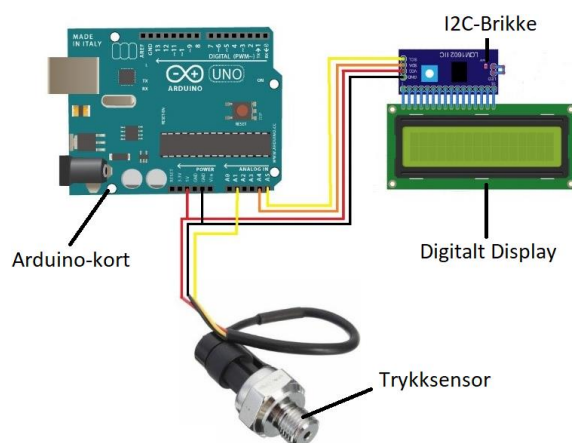
## 9.2. Utvikling av sensorsystem

For å få digital avlesning av trykket i systemet ble det benyttet trykksensorer som er kompatibel med Arduino mikrokontroller. Arduino er en programmerbar mikrokontroller som kan kombineres med mange forskjellige komponenter. Hovedkomponentene for sensorsystemet er et Arduino Uno-kort, SKU237545 trykksensor og I2C kompatibel QAPASS digitalt display.

Arduino Uno-kortet har totalt 14 digitale inn- og utporter og 6 analoge input-porter [70]. Av de 6 analoge portene blir 3 av dem brukt for å koble til digitalt display og sensor. Kortet kan enten få strøm gjennom USB-port, fra Power Bank eller fra PC. Kortet kan også få strøm fra batteripakke med AA-batterier, som det vil bli brukt i dette prosjektet.

Trykksensoren er beregnet for måling av trykk i både gass- og væskefylte systemer. Virkeområdet for sensoren er mellom 0 og 1,2 MPa (0 – 12 Bar) i temperaturer mellom 0 og 85°C ([71]). Sensoren er praktisk utformet i den forstand at den lett kan bli skrudd inn i gjengede hull på 12 mm.

Det digitale displayet er I2C kompatibel, som betyr at det enkelt kan kommunisere med mikrokontrolleren gjennom enkel programmering og trenger kun 2 tilkoblinger i tillegg til strøm og jording [72]. De to tilkoblingene heter SDA og SCL, der SDA er en tilkobling for å overføre data og SCL er en tilkobling for å synkronisere data i forhold til tid. De to kobles til Arduino-kortet til analog innport, som vist i figur 9-1. Det digitale displayet har et blått bakgrunnslys og kan vise totalt 32 tegn.



**Figur 9-1. Sensoroppsett med arduino-kort og digitalt display. Figuren viser hvordan arduino-kortet [73], det digitale displayet [74] og sensoren [71] er koblet sammen med ledninger.**

Under kodingen og testing av oppsett av arduinobrikken ble det brukt et «breadboard» for å enkelt kunne koble ledninger midlertidig sammen uten å måtte lodde. Koden som er blitt brukt er utviklet ved å modifisere koder som allerede er fritt tilgjengelig på internett [75]. Koden er også modifisert slik at det digitale displayet fremviser trykket i bar og blinker hver gang den oppdaterer seg.

### 9.3. Kostnadskalkyle for prototype

Dette kapittelet omhandler kostnadene for utviklingen av testtriggen. Det vil bli gitt et grovt estimat for hva det koster å utvikle en prototype for prosjektet derom alle kostnader er reelle (tabell 9-13).

**Tabell 9-13. Kostnadskalkyle som inkluderer konseptutvikling, prototyping og materialkostnader.**

KONSEPTUTVIKLING	Timer	Kvantum	Pris	Sum[NOK]
Utredningsarbeid	350	-	550	192500
Formgivning og design	170	-	550	93500
3D-fremstillinger	180	-	550	99000
Prosjektrapport	600	-	550	330000
<b>Delsumkonseptutforming</b>	<b>1300</b>	<b>-</b>	<b>550</b>	<b>715000</b>
PROTOTYPING	Timer	Kvantum	Pris	Sum[NOK]
<b>Arbeidskostnader:</b>				
Konstruksjonstegninger	30	-	550	16500
Maskinering	30	-	550	16500
3D-printinting	20	-	550	11000
Laserkutting	10	-	550	5500
Montering	30	-	550	16500
EL-arbeid og Programmering	30	-	550	16500
Testing	450	-	550	247500
<b>Delsum prototypearbeid:</b>	<b>600</b>	<b>-</b>	<b>550</b>	<b>330000</b>
Materialer og Komponenter:	Timer	Kvantum	Pris	Sum[NOK]
Aluminium	-	1 kg	200	200
Stål	-	2 kg	50	100
ABS -plast	-	3kg	333,3	1000
Aryplater	-	1 m <sup>2</sup>	300	300
Akrylrør	-	2 m	300	600
Kryssfinér	-	1 m <sup>2</sup>	100	100
Bolter, muttere og skiver	-	100 stk	-	400
Pakningsmateriale	-	1,5 m <sup>2</sup>	-	600
Slanger	-	4 m	80	320
Pumpe	-	1 stk	3800	3800

**Tabell 9-13. Forts.**

Materialer og Komponenter:	Timer	Kvantum	Pris	Sum[NOK]
Slangeklemmer	-	5 stk	20	100
Tanker	-	3 stk	-	3000
Rammerverk med hjul	-	1 stk	3000	3000
Silikon, lim og tetningsmidler	-	5 stk	-	250
<b>Delsum Materialer og komponenter:</b>	-	-	-	<b>13770</b>
<b>Delsum prototyping:</b>	-	-	-	<b>343770</b>
<b>Totalsum utvikling og prototype:</b>	-	-	-	<b>1058770</b>

Tabellen over gir er et grovt anslag på hvor mye tid og materialer det er brukt på utviklingsarbeid og prototyping, med tilhørende kostnader. Timesprisen er basert på at masterstudenter utfører alt arbeidet på universitetet. Kostnadene i forhold til arbeidstimer kan skrives fra i denne omgang, da dette er timer brukt i forbindelse med en masteroppgave og vil ikke bli utbetalt. Kostnadene i forhold til arbeidstimene kunne vært reelle om dette prosjektet var i forbindelse med næringslivet.

De reelle kostnadene for prosjektet er en del mindre enn oppsummert i tabellen over. Grunnen for dette er at det er brukt mye materialer som var tilgjengelig på universitet og det er lånt en del utstyr. Tabell 9-14 gir en oversikt over de faktiske kostandene i prosjektet.

**Tabell 9-14. Oversikt over de faktiske kostnadene knyttet til den første prototypen.**

Materialer og komponenter	Kvantum	Sum[NOK]
Filament til 3D-printing	3 kg	1000
Pakningsmateriale	1,5 m <sup>2</sup>	587
Fjærvekter	2 stk	447
Bolter, skiver og muttere	100 stk	314
Skralle og pipesett	1 stk	220
Lim og tetningsmiddel	3 stk	110
Gummiball og skruekrok	1 stk	50
<b>Sum totalt</b>	-	<b>2728</b>

Grunnen for at summen fra tabell 9-14 er en del mindre enn delsummen for materialer og komponenter i tabell 9-13 er blant annet fordi at pumpen, rammeverket og tanker er lånt eller donert fra universitetet. Til sammen er det spart omtrent 11000 kroner ved å låne komponenter og bruke restmaterialer i forhold til å kjøpe nye komponenter.





## 10. PRESENTASJON AV PROTOTYPE

Hensikten med dette kapitlet er å vise testriggeren i forskjellige settinger slik den er ment å brukes. Det vil først bli vist renderte fremstillinger og deretter fotografier av prototypen som er bygget.

### 10.1. Renderte fremstillinger av prototype

Testriggeren fremvist i lokaler ved NMBU sammen med et annet studentprosjekt, Ecotwin (figur 10-1).



**Figur 10-1.** Testriggeren plassert i et av universitetets lokaler. I bakgrunnen er Ecotwin, et prosjekt som andre masterstudenter tidligere har jobbet med.

En annen naturlig setting for testriggeren vil være på et teknisk laboratorium. Figur 10-2 og figur 10-3 viser testriggeren er fremvist på to laboratorier ved NMBU.



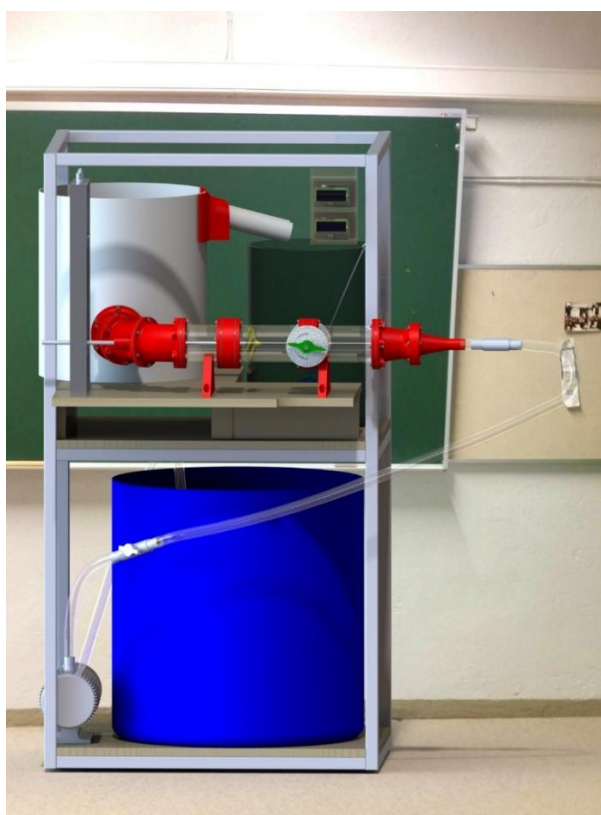
**Figur 10-2.** Testrigger plassert på testlaboratorium med horisontalt system.

I figur 10-3 er testriggeren vist i et laboratorium på NMBU hvor det i dag utføres andre vannlaborer. Dette er dermed en aktuell lokasjon for å plassere produktet.



**Figur 10-3.** Testriggeren plassert på et av universitetets laboratorier med påmontert vinkelmodul.

Testriggeren er ment til å være en læringsplattform og derfor vil et klasserom være naturlige omgivelser for testriggeren. Figur 10-4 viser testriggeren redigert inn i et klasserom tilhørende NMBU.



**Figur 10-4.** Testriggeren med horisontalt system plassert i klasserom.

Dersom testriggeren i tillegg får montert på hjul skal den enkelt kunne flyttes mellom forskjellige klasserom.



## 10.2. Fotografier av prototype

Figur 10-5 og figur 10-6 viser bilder av prototypen under testing. Testingen foregikk utendørs på universitetets område. Det første bildet er med påmontert vinkelmodul og er tatt mens vann strømmer gjennom anlegget. Det er blant annet mulig å se vannet som helles over i måletanken fra buffertanken.



**Figur 10-5.** Testing av testrigg utendørs på NMBU sitt område. Testing med 6-bladet propell og påmontert vinkelmodul.

På bildet er det en del forskjellige farger enn på de renderte fremstillingene. Ved å bytte filament på 3D-printeren kan det velges hvilken farge som skal brukes. Ved å sortere de filamentene som var tilgjengelig ble det forsøkt å holde et tema med rød og gul farge.

Figur 10-6 viser testriggeren med horisontalt system klar for testing utenfor lokaler ved NMBU. Det er blant annet mulig å se hvordan den ene skjermen er påslått for å fremvise trykket i et punkt i systemet.



**Figur 10-6.** Testing av testrigg utendørs på NMBU sine lokaler. Test med 10-bladet propell og uten vinkelmodul.



## 11. MATERIAL OG FUNKSJONSTESTING

Det er ikke kjent at noen tidligere har laget et lignende produkt med tilsvarende produksjonsmetoder. Det viste seg derfor nødvendig å gjennomføre en rekke tester for å redegjøre for materialbruk og hvorvidt produktet opererer innenfor produktmålene. Testkapittelet er inndelt i 2 delkapitler for bedre oversikt.

### 11.1. Material- og funksjonstesting

Det vil her bli gjort forskjellige tester angående hvilke materialer som egner seg for prototyping av testrigger og strømningssimulering av turbin og virveloppretter.

#### 11.1.1. Strømningssimulering av turbin og virveloppretter

Forsøket er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

##### Lokasjon og tid:

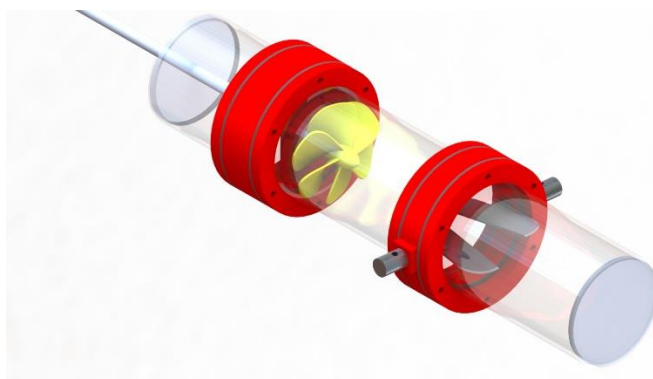
Simuleringen ble utført på NMBU i tidsrommet 27. april til 28. april 2017.

##### Forsøksmål:

Utføre strømningssimuleringer for å visualisere effekten av virveloppretter og trykkfall over turbin.

##### Utførelse:

Fordi det tar lang tid og krever mye datakraft å simulere strømninger i hele systemet, ble det bestemt at det kun simuleres i området rundt virveloppretter og turbin (figur 11-1). For simuleringen ble det antatt at det var et laminært strømningsbilde inn til denne delen av systemet. Siden denne testen tidsmessig ble utført sist, er det brukt faktiske parametere angående trykk og volumstrøm tilsvarende det som kommer frem i kapittel 11.2. Den er likevel vist først, ettersom den gir nyttig forståelse i forkant av det som kommer senere i kapittelet.

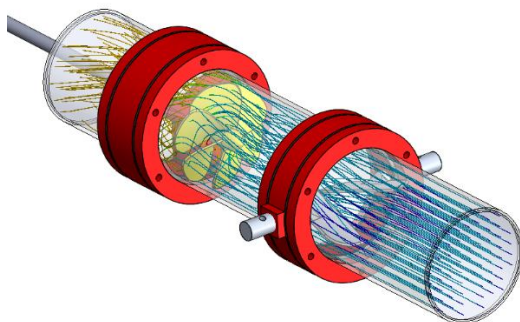


**Figur 11-1.** Delen av anlegget som vil bli benyttet til strømningssimulering.

Det ble simulert linjer som visualiserer hvilket bevegelsesmønster vannet har gjennom anlegget. Disse linjene endrer også farge avhengig av trykket i det punktet av anlegget. Det ble så analysert hvordan bevegelsesmønsteret forandrer seg avhengig av innstillinger på virveloppretteren. For hver av innstillingene ble det simulert 100 linjer som fra starten av simuleringen er jevnt fordelt i tverrsnittet.

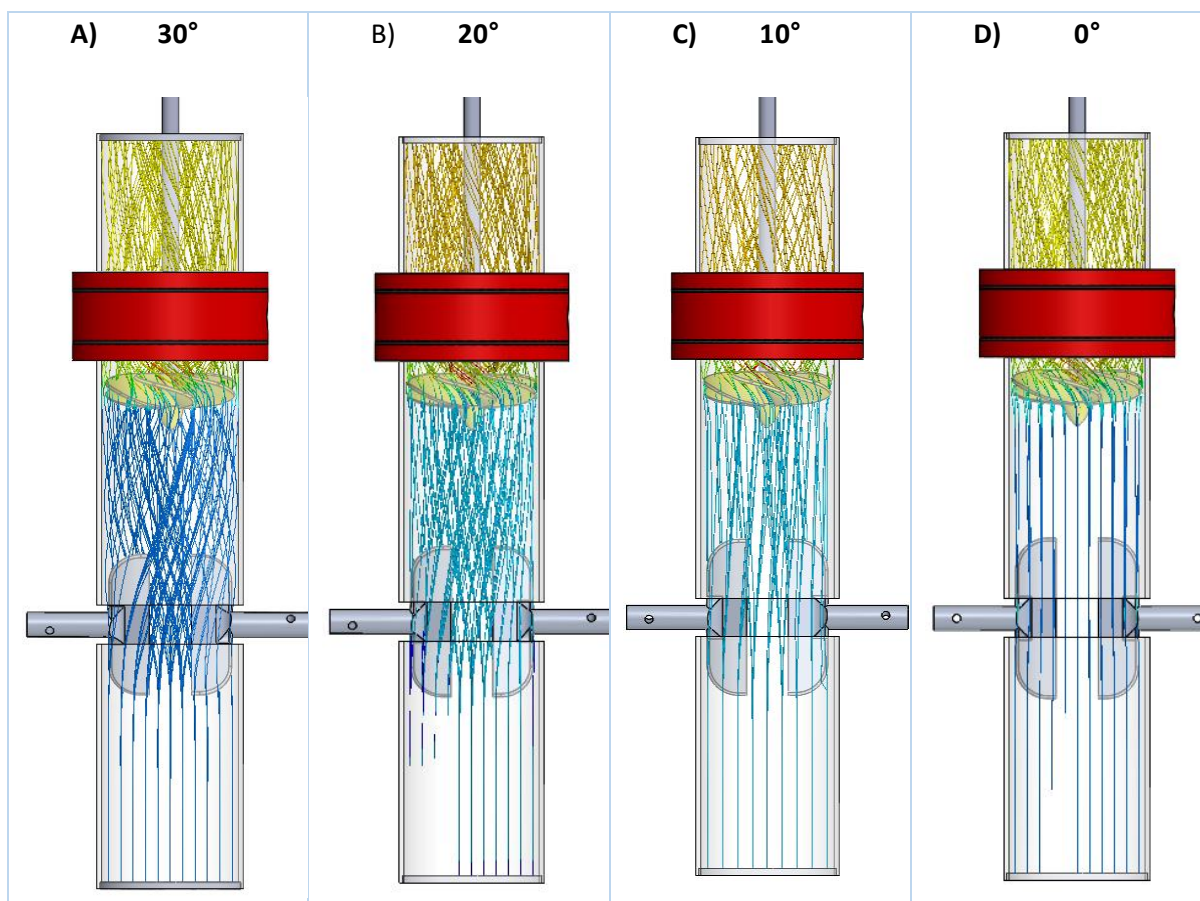
**Resultat:**

Det er tydelig at den laminære strømmingen blir til en virvel ved ledeskovlene (figur 11-2). Blå farge på linjene visualiserer det høyeste trykket, gul et mellomnivå og farger nærmere rød er de laveste trykkverdiene i simuleringene. Av fargene er det tydelig det oppstår et trykkfall over turbinen, da fargene endrer seg fra blå-grønn like før turbinen til en gul-nyanse like etter turbinen.



**Figur 11-2.** Visualisering av bevegelsesmønsteret til vannet over virveloppetter og turbin.

Det er også mulig å registrere hvordan virvelen i forkant av turbinen blir kraftigere avhengig av innstillingene på virveloppetteren (figur 11-3).



**Figur 11-3.** A) Ved 30 graders vinkel på skovlene er en tydelig virvel i forkant av turbinen. B) Ved 20 graders vinkel på skovlene er det virvel i forkant av turbinen, men den er betydelig mindre enn ved 30 grader. C) Ved 10 graders vinkel på skovlene er det tydelig at vinklene endrer bevegelsesmønsteret til vannet, men med begrenset utslag. D) Ved rette skovler er det ingen eller liten antydning til endring i bevegelsesmønsteret til vannet.

Fra figuren er det tydelig at det ved rette skovler er lite eller ingen virvel før turbinen, mens det blir en kraftigere virvel desto større vinkel det er på skovlene. Ved 30 graders vinkel på hver av skovlene motsatt rettet av hverandre slik at virvelen går med klokken, er det en tydelig virvel som har rotasjon med klokken (figur 11-3 A).

### 11.1.2. Produksjonsmetoder for vanntette 3D-printede deler.

Forsøket er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

#### Lokasjon og tid:

Testen ble utført på lokaler ved NMBU i tidsrommet 09. mars 2017 til 18. mars 2017.

#### Forsøksmål:

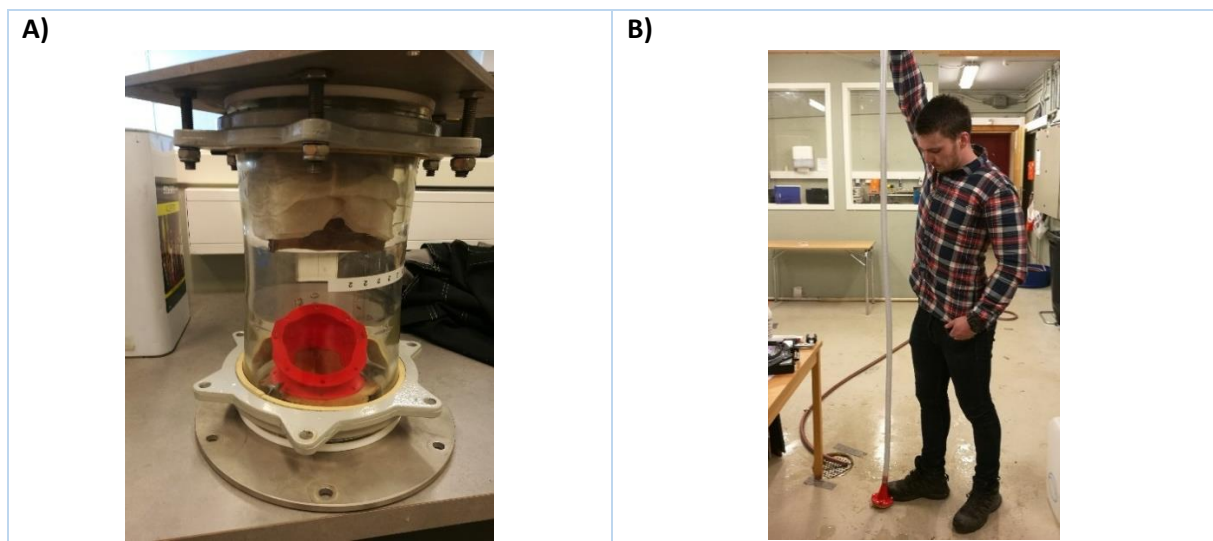
Teste hvorvidt aceton kan brukes som overflatebehandling for å gjøre 3D-printede materialer vanntett, hvilke printerinnstillinger som gir tilfredsstillende resultat og hvilke materialer som egner seg som pakning mellom 3D-printede deler.

#### Utførelse:

Det ble først utført en visuell test for å se hvordan aceton påvirker overflaten i materialet. En glasstank fra et tidligere studentprosjekt på universitetet viste seg nyttig som beholder for acetoneksperimentet (Figur 11-4 A).

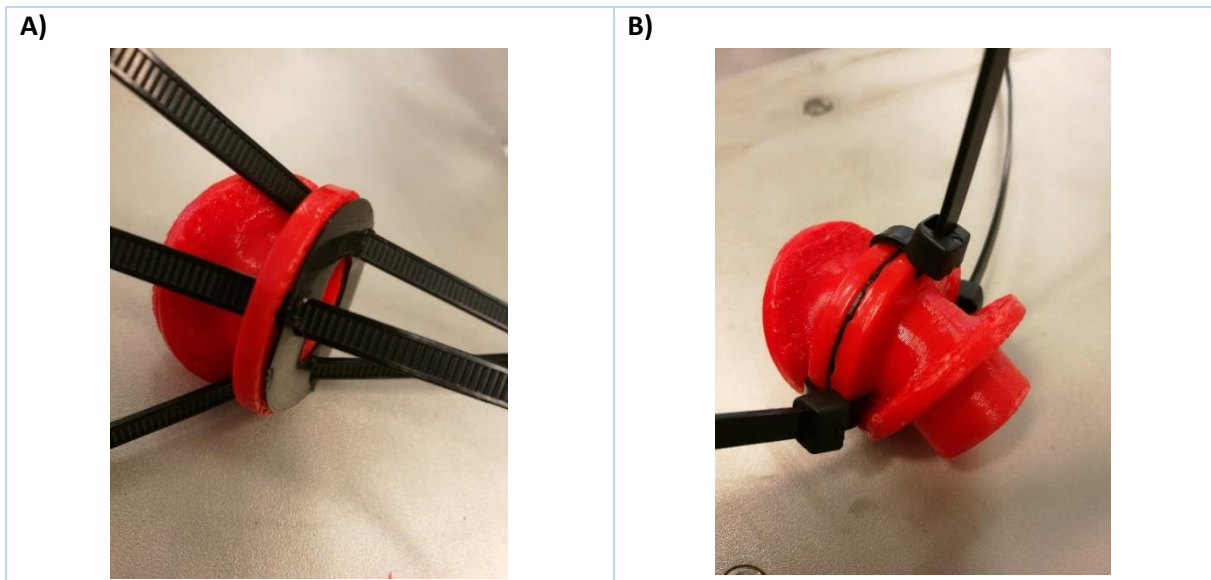
Tørkerullpapir ble surret rundt et pappstykke og satt i spenn i toppen av beholderen. Tørkerullpapiret ble deretter satt inn med flytende aceton. Siden acetondamp er tyngre enn luft vil acetondampen bevege seg fra tørkerullen i toppen av beholderen til bunnen av beholderen, hvor plastdelen er plassert [76]. Pakninger i topp og bunn sørger for at acetondampen holdes inne i beholderen. Det er denne acetondampen som reagerer med plastoverflaten til plastdelen.

Det ble i første omgang printet en del av en rørvinkel for å inspisere overflaten. Rørvinkelen var ikke ferdig tegnet for produksjon, men det var interessant å se hvordan aceton påvirket materialet på dette stadiet tidsmessig.



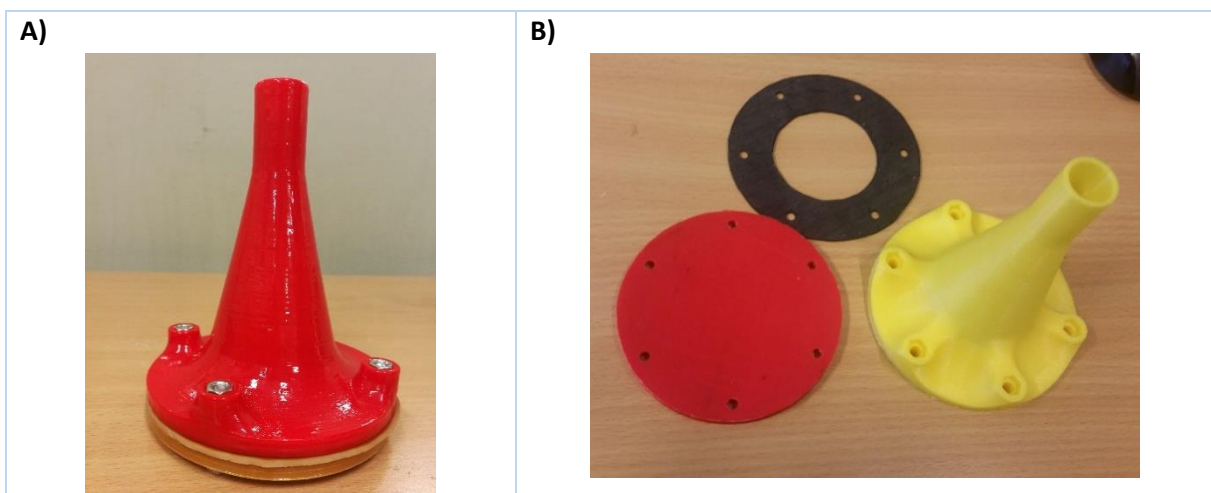
**Figur 11-4.** A) Glassbeholder for acetonbehandling av 3D-printede deler. B) Trykkesting av 3D-printede deler med vannsøyle i slange.

Den neste fasen ble å teste 2 deler med vanngjennomstrømning. En vinkel på totalt 60 grader ble printet i to deler med flens mellom delene og acetonebehandlet. For å enkelt gjøre en rask test med vanngjennomstrømning ble hele vinkelen nedskalert for å kunne monteres sammen med en normal hageslange som har innvendig diameter tilsvarende en halv tomme (figur 11-5). På grunn av nedskalering var det ikke plass til å sette inn bolter og det ble derfor benyttet plast-strips (figur 11-5). Det var interessant å teste hvorvidt pakninger også kan 3D-printes. Ved å benytte et spesialutviklet materiale for 3D-printere kalt «semi-flex», er det mulig å printe fleksible mykere plastdeler. En pakning i slikt materiale ble montert mellom de to delene (figur 11-5).



**Figur 11-5.** A) Småskalatest av 3D-printet pakning. B) Småskalatest av 3D-printet pakning der plastdeler er festet sammen ved hjelp av plaststrips.

Videre ble det utført fullskala tester for å få datagrunnlag nærmere reelle forhold. Delen som ble testet er den koniske overgangen fra rørtverrsnittet ved pumpen til hovedrøret. Dette fordi dette er den plastdelen som står lavest og antas utsettes for høyest trykk. Delen ble modifisert slik at overgangen til pumpen passet til hageslangen. Delen ble montert mot en flat 3D-printet plate med pakning mellom og festet med bolter (figur 11-16).



**Figur 11-6.** A) 3D-printet del for testing med hageslange. Denne delen har fire boltehull. Her er plate, pakning og delen som kan festes til slangen skrudd sammen med bolter. B) Videre testing med ny pakning og design på rørdele. Her har delene seks boltehull.



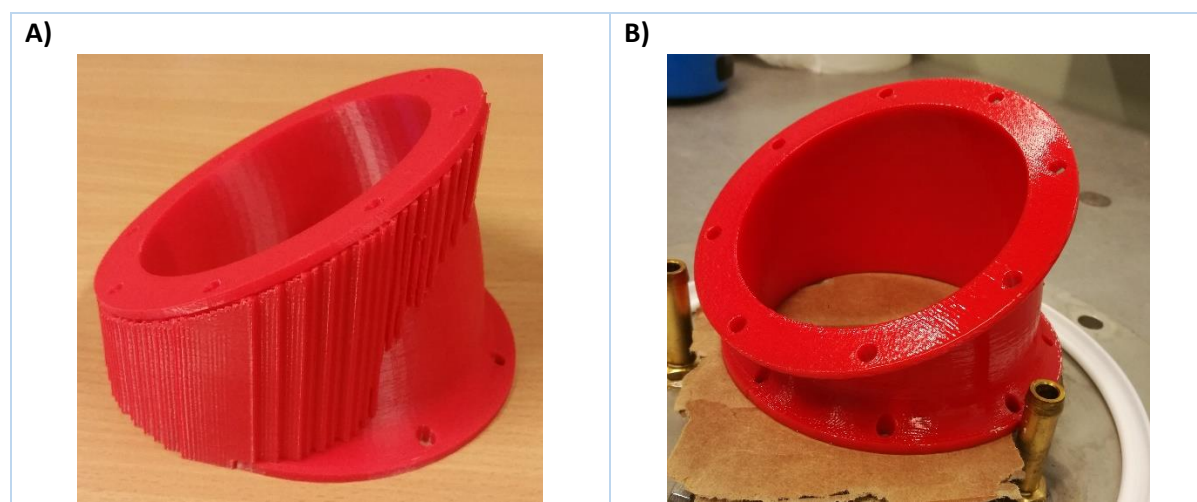
Systemet ble så trykksatt på 2 forskjellige måter. Det ble benyttet en slange på 2 meter som ble fylt med vann og holdt vertikalt for å gi 0,2 bar til systemet (figur 11-4 B). Dersom hensiktsmessig etter den testen, ble systemet koblet til hageslangen. Trykket i hageslangen varierer som nevnt tidligere mellom 2 til 6 bar [52]. Det ble deretter gjort eksperimenter med forskjellige oppsett av den koniske overgangen der printertetthet, behandlingstid med aceton, pakningsmateriale, godstykkelse ved bolthull og antall hull for bolter ble forandret (tabell 11-1). Med printertetthet menes det hvor tett plastlagene blir lagt og hvor mye hulrom som er inni materialet ved 3D-printing.

**Tabell 11-1. Oversikt over testing med forskjellige innstillinger og alternativer. Resultater fra testene blir beskrevet i tabell 11-2.**

Oppsett	Printertetthet	Behandlingstid	Godstykkelse	Pakningsmateriale	Paknings-tykkelse	Hull
1	20 %	1 time	2 mm	-	-	-
2	20 %	1 time	1 mm	semi-flex	1 mm	3
3	20 %	1 time	6 mm	gummi	2 mm	4
4	50 %	2 timer	6 mm	Neopren-gummi	2 mm	6
5	65 %	2 timer	6 mm	Neopren-gummi	2 mm	6

#### Resultater:

Før oppsett 1 ble satt i acetonbehandling var det tydelig at lagene fra 3D-printeren var synlige og overflaten bar preg av å være ru (figur 11-7 A). Etter behandlingen er det tydelig at overflaten har fått et glattere preg og det er derfor nærliggende å anta at plastlagene ved overflaten har smeltet sammen ved hjelp av en kjemisk prosess (figur 11-7 B).



**Figur 11-7. A) 3D-printet del med støttemateriale. B) 3D-printet del etter nylig å ha blitt behandlet med Aceton.**

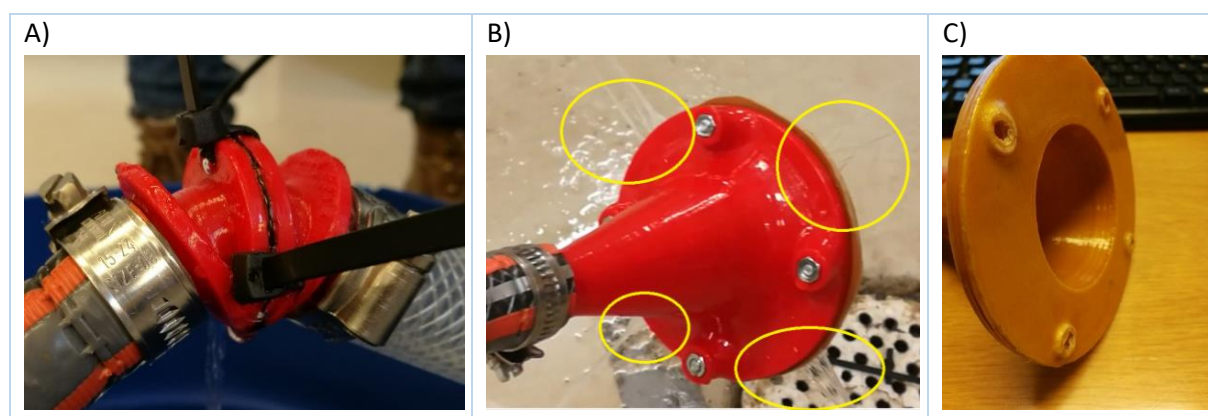
Det ble også bemerket at det fortsatte en herdeprosess etter at delen var tatt ut av beholderen, og det endelige resultatet først forekom når delen var helt tørr og herdet 2 timer senere. Resultatene fra testene er summert opp i tabell 11-2.

**Tabell 11-2. Oversikt over vanntett-testing og resultatene fra disse testene i tabell 11-1.**

Oppsett nummer	Trykk	Visuelt resultat
1	ikke trykksatt	Glatt og Sammensmeltet overflate
2	Fri gjennomstrømning	Stor lekkasje fra pakning
3	0,2 bar	Lekkasje gjennom plastdel
	2-6 bar	Sterk vannsprut fra pakning mellom hull
4	0,2 bar	Ingen tegn til lekkasje
	2-6 bar	Lekkasje gjennom plastdel
5	0,2 bar	Ingen tegn til lekkasje
	2-6 bar	Ingen tegn til lekkasje

Ved den nedskalerte testen med 3D-printet pakningsmateriale viste det seg å være stor lekkasje selv ved fri vanngjennomstrømning (Figur 11-8 A). Vannet trengte ut gjennom yttersiden av pakningene og gjennom hullene hvor plast-stripsen var montert.

Ved oppsett 3, hvor printertettheten fortsatt var på 20 %, ble det registrert at det var lekkasje gjennom plastmateriale allerede ved 0,2 bar. Testen med hageslange ble likevel gjennomført og var da sterk vannsprut mellom pakning og plastmateriale, spesielt i punktene midt mellom boltene (figur 11-8 B). Ved demontering etter test, viste det seg også at boltene hadde fortrenget seg gjennom strukturen i plastmaterialet (Figur 11-8 C).

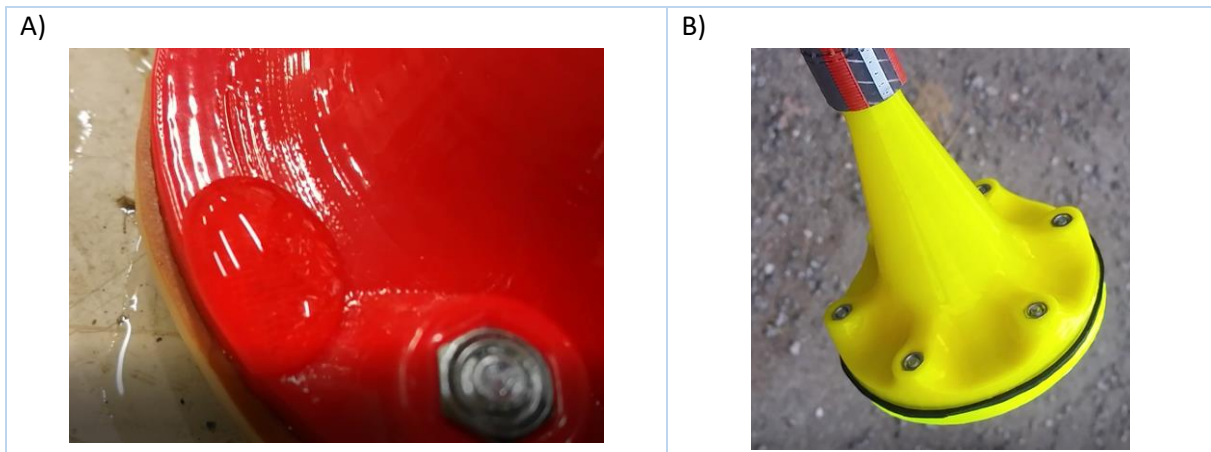


**Figur 11-8. A) Test av 3D-printet pakning med hageslange. B) Test av konisk rørdel med 4 bolter og trykk fra hageslangen. Sirklene viser områdene der vannet sprutet ut i områdene midt mellom boltene. C) Konisk del der det var for lite grunnmateriale mellom bolter og pakning.**

Oppsett 4 viste seg å være tett ved vannsøyletesten på 0,2 bar, men ved 2-6 bars trykk kom enkelte dråper gjennom strukturen i plastdelen. Det var tydelig at spesielt overgangen fra horisontal flate ved overside flens til vertikal flate ved mutterforhøyning tillot vanngjennomtrenging (Figur 11-9 A). Det var ingen synlig lekkasje mellom neoprenpakning og plastdel.

Det siste forsøket, oppsett 5, viste seg å være tett både ved 0,2 bars trykk og ved 2-6 bars trykk (figur 11-9 B). Det var ingen synlig lekkasje hverken gjennom plastmateriale eller mellom pakning og plastdel. Det var heller ingen tegn på deformasjon i plaststruktur etter én gangs bruk.





**Figur 11-9.** A) Nærbilde av rørdel der vann trenger seg gjennom grunnmaterialet. B) Oppsett 5 viser ingen tegn til lekkasje ved 2-6 bar.

### 11.1.3. Skruemoment ved akrylflenser

Forsøket er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

#### Lokasjon og tid:

Testen ble utført på lokaler ved NMBU i tidsrommet 21 til 24. mars 2017.

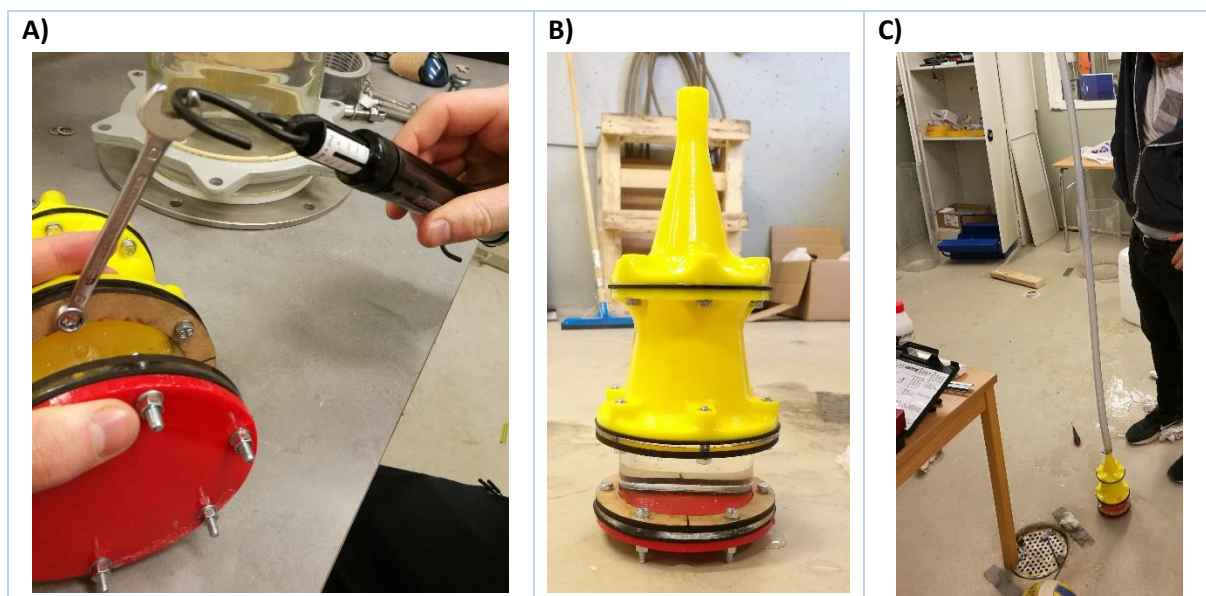
#### Forsøksmål:

Finne ut hvorvidt akrylflenser, som er kuttet med laserkutter, og ferdigkjøpte akrylrør kan sammenføres med akrylplastlim og inngå i en vanntett kobling mot 3D-printede plastdeler.

#### Utførelse:

Akrylrør sammenføyet med akrylflenser ble montert mot plastdeler med pakning mellom. Plastdeler og pakning er konstruert likt oppsett 5 i overstående forsøk. For å fordele kraften fra hver bolt utover flensen ble det brukt store treskiver med samme form som flensen. Det ble videre forsøkt å stramme boltene med forskjellige moment for å finne ut hvor mye akrylflensen tåler før det sprekker og om det finnes verdier hvor overgangen er vanntett uten at akrylflensen sprekker. Det ble også notert eventuelle brudd eller misdannelser i plastdel.

Det viste seg vanskelig å oppdrive en momentnøkkel i liten nok dimensjon og det ble derfor benyttet en fjærvekt i sammenkobling med en fastnøkkel (figur 11-10 A). Ved å alltid ha rett vinkel mellom fastnøkkel og fjærvekt, vil momentet kunne finnes som produktet av kraften på fjæren og lengden på fastnøkkelen. For hver momentverdi som ble påført ble 2 forskjellige tester utført. Først ble selve røret med plastsystem fylt med vann og det ble sjekket for lekkasjer (figur 11-10 B), deretter ble systemet koblet til en slange slik at det totale trykke ble 0,2 bar (Figur 11-10 C). Det ble deretter påført gradvis mer moment helt til det var sprekkdannelse i akrylflens, underveis ble synlige resultater notert.



**Figur 11-10.** A) Bruk av fastnøkkel og fjærvekt som momentnøkkel. B) Konisk rørdel med gjennomsiktig akrylrør fylt med vann. C) Bruk av vannslange til å skape et større trykk.

Etter de første resultatene ble det utført nye forsøk med nye deler hvor tetningsmidler ble benyttet. Det ble da brukt epoksy i mutterhull og gjengetetningsmiddel langs boltene. På bakgrunn av den første testen, var det ikke nødvendig å teste på nytt for de laveste momentverdiene.

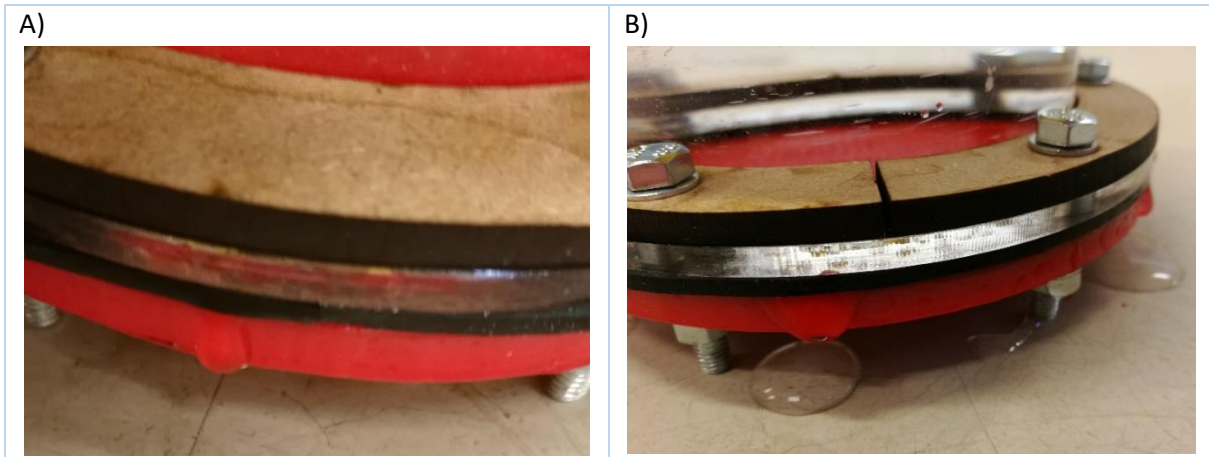
#### Resultat:

Det ble i første runde ikke funnet en verdi hvor det ikke var noe lekkasje uten tegn til sprekkvekst i akrylflensen (tabell 11-3). Ved 1,226 Nm ble det funnet en verdi hvor det kun var antydning til at litt fukt kunne sive gjennom ved pakningen (figur 11-11 A). Dette var så lite at det nesten var neglisjerbart, men ved neste økning av moment oppstod det sprekker i akrylen ved skruehull og lekkasje gjennom plastdel fra mutteren (figur 11-11 B).

**Tabell 11-3.** Testing av sammenhengen mellom skruemoment og materialbrudd.

Moment	Fylt beholder	0,2 bar	Brudd i ABS	Brudd i Akryl
0,25 Nm	Stor lekkasje	-	Ingen tegn	Ingen tegn
0,49 Nm	Noe lekkasje	-	Ingen tegn	Ingen tegn
0,74 Nm	Ingen lekkasje	Noe lekkasje i pakning	Ingen tegn	Ingen tegn
0,98 Nm	-	Enkelte dråper fra pakning	Ingen tegn	Ingen tegn
1,23 Nm	-	Fukt fra pakning	Ingen tegn	Ingen tegn
1,47 Nm	-	Lekkasje i mutter	Oppriving fra mutter	sprekkvekst

Det kan trekkes fram fra tabell 11-3 at ingen av resultatene i første runde med tester ga muligheter for et vanntett system uten sprekkdannelse i akrylflens eller skade i plastdel.



**Figur 11-11.** A) Minimal lekkasje mellom flens og pakning. B) Ved økning av momentet på boltene til 1,47 Nm sprekker akrylflensen og det oppstår lekkasjer flere steder.

I neste forsøk hvor epoxy og gjengetetning var brukt, ble det en markant forskjell. Det oppstod nå ingen tegn til brudd eller lekkasje gjennom plastdel før det oppstod sprekkvekst i akrylflens ved samme moment som forrige test (tabell 11-4). Ved 1,23 Nm ble det ikke registrert lekkasje i noen komponenter eller noen tegn til skade.

**Tabell 11-4.** Testing av sammenhengen mellom moment på bolter og lekkasjer fra beholder.

Moment	Fylt beholder	0,2 bar	Brudd i ABS	Brudd i Akryl
0,98 Nm	Ingen lekkasje	Enkelte dråper fra pakning	Ingen tegn	Ingen tegn
1,23 Nm	-	Ingen lekkasje	Ingen tegn	Ingen tegn
1,47 Nm	-	Ingen lekkasje	Ingen tegn	Sprekkvekst

Selv om det ble sprekkvekst i akrylflensen ved 1,47 Nm, resulterte dette ikke i lekkasje. Det var synlig at gjengetetningsmateriale fra bolten fordelte seg ut i akrylsprekken og fungerte som tetningsmiddel, også her.

#### 11.1.4. Funksjonstest av elektroniske trykksensorer

Forsøket er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

##### Lokasjon og tid:

Testen ble utført utenfor realtek fakultet ved NMBU 03. april 2017.

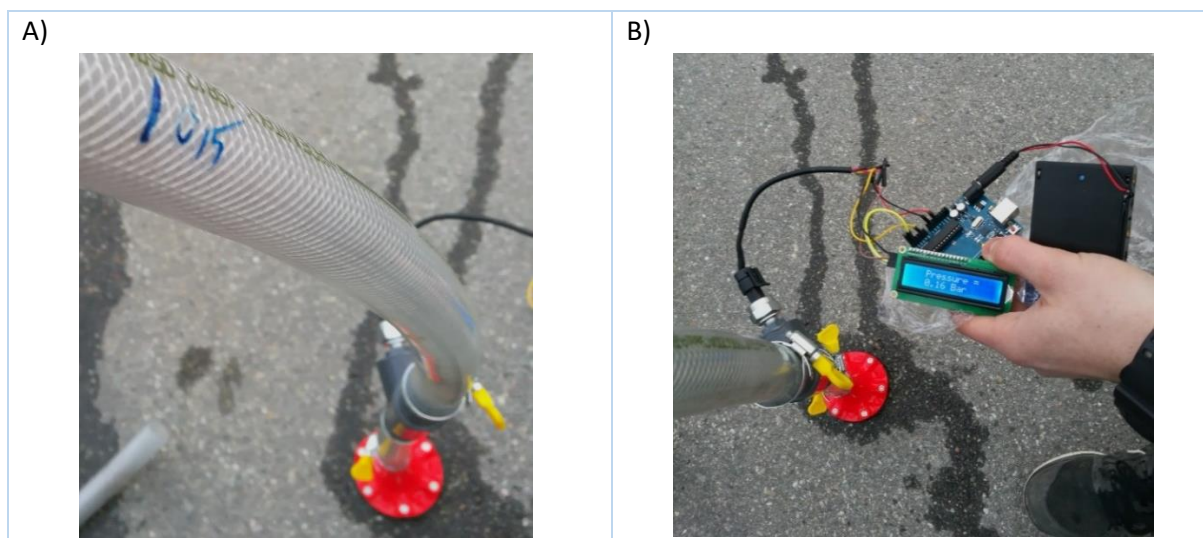
##### Forsøksmål:

Teste hvorvidt elektroniske trykksensorer måler riktige verdier og fungerer sammen med tilkoblet elektronikk.

##### Utførelse:

Det ble utført en funksjonstest av de to trykkmålerne som skal brukes i prosjektet. Dette er elektroniske trykkmålere hvor trykket blir avlest på tilkoblet digitalt display. Det ble brukt en plastslange koblet til en plastdel for å holde vannet i slangen. Trykkmåleren ble koblet inn mellom plastdel og slange. Det ble gjort målinger på slangen for ønsket vannsøyle som ble testet mot avlest

trykk på det digitale displayet. Ved å fylle vann i slangen som ble holdt loddrett opp til merket verdi, kan det gitte trykket fra vannsøylen sammenlignes med trykket avlest på digitalt display (figur 11-12).



**Figur 11-12.** A) Testing av sensorer. Bruker vanntrykket fra vannsøylen til en vannslange for å sjekke om sensorene fungerer som de skal. På bildet er det merket av 0,5 meter. B) Sensoren er koblet til slangen og trykket kommer opp på det digitale displayet..

Det ble gjort en måling ved 0 meter vannsøyde for å finne en referanseverdi. Dette var nødvendig fordi lufttrykket varierer avhengig av flere parametere som klima og lokasjon og det er usikkerhet rundt hvor godt sensoren er kalibrert i utgangspunktet [77]. Etter denne målingen er det forventet at trykket skal øke med 0,05 bar for hver halvmeter med vannsøyde.

#### Resultat:

Av tabell 11-5 kommer det frem at det største avviket var på 0,01 bar som tilsvarer en forskjell i 10 cm vannsøyde. For størsteparten av målingene var det ingen avvik mellom forventet og avlest verdi. Det er mulige feilkilder rundt hvorvidt vannsøylen ble målt nøyaktig nok og hvorvidt slangen ble holdt helt vertikalt. Dette i samsvar med at avviket er så lite, gjør at alt avvik sees på som neglisjerbart. Begge sensorene fungerer som forventet.

**Tabell 11-5.** Oversikt over resultatene i forhold til testing av sensorer.

Sensor	Vannhøyde	Forventet verdi	Avlest verdi	Avvik
Sensor 1	0 m	-	0,11 bar	-
	0,5 m	0,16 bar	0,16 bar	-
	1 m	0,21 bar	0,21 bar	-
	2 m	0,31 bar	0,30 bar	0,01 bar
Sensor 2	0 m	-	0,12 bar	-
	0,5 m	0,17 bar	0,18 bar	0,01 bar
	1 m	0,22 bar	0,22 bar	-
	2 m	0,32	0,33 bar	0,01 bar



### 11.1.5. Lekkasjetest av komplett rørsystem med vinkelmodul

Forsøket er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

#### Lokasjon og tid:

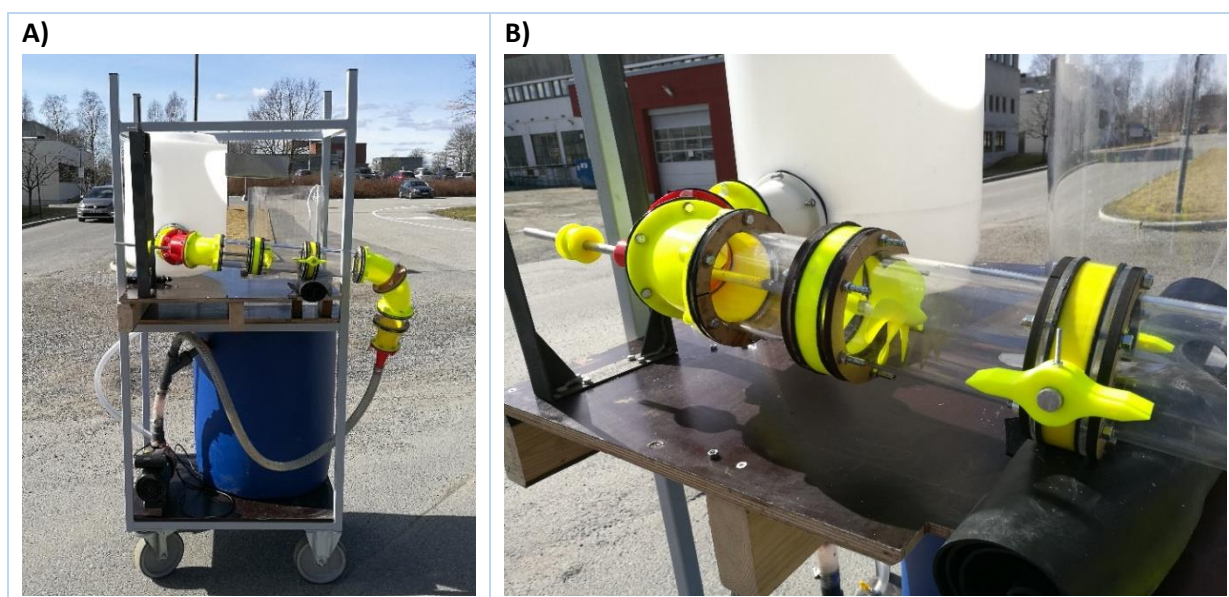
Testen ble utført utendørs ved NMBU sine lokaler 07. april 2017.

#### Forsøksmål:

Teste hvorvidt anleggets funksjoner fungerer som planlagt og sjekke for eventuelle lekkasjer.

#### Utførelse:

Hele anlegget ble skrudd sammen slik det er planlagt fra konstruksjonsanvisningene. For å få flest mulig punkter å måle lekkasje fra, ble det montert sammen med rørvinkel-modul (figur 11-13). Den øvre tanken ble deretter fylt med vann, mens ventilen ved pumpen var stengt. På denne måten vil vannet fylle øvre tank og rørsystemet uten at vannet renner videre ned i pumpen. Det var da mulig å sjekke for synlige lekkasjer eller andre elementer som behøver utbedring. Siden pumpen ikke er påslått er trykket de forskjellige komponentene opplever lik høyden fra vannspeilet øverst i systemet til den aktuelle komponenten. Eventuelle lekkasjer ble forsøkt utbedret under testen før det til slutt ble gjort en vurdering hvorvidt en funksjonstest av hele anlegget kunne iverksettes.



**Figur 11-13.** A) Prototypen sett forfra før lekkasjetest. B) Virveloppetter hviler på en gummimatte for å holde rørsystemet oppe. Bremsesystemet er ikke koblet til.

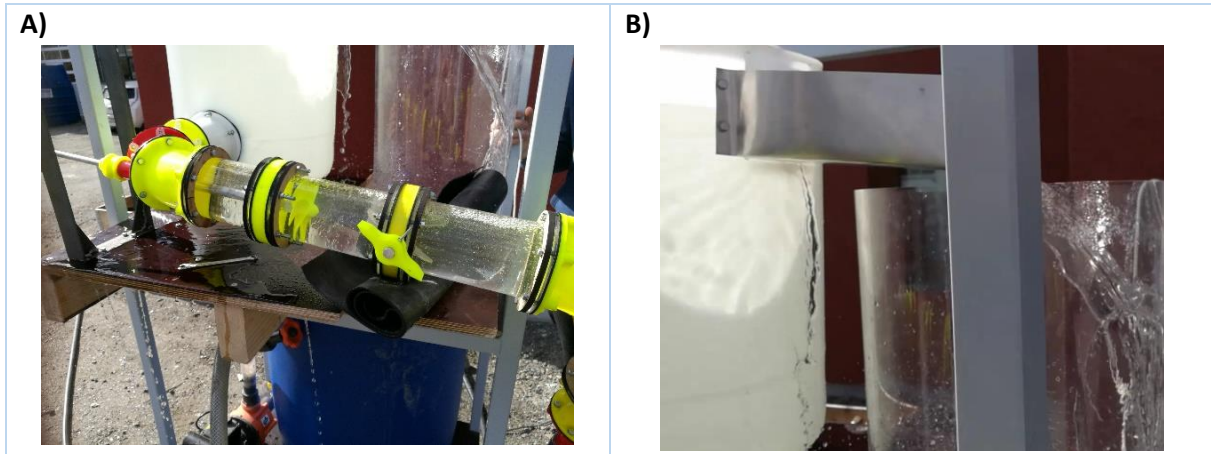
#### Resultat:

Det ble observert lekkasje på flere punkter (tabell 11-6).

**Tabell 11-6. Oversikt over resultater fra lekkasjetest.**

Lekkasjepunkt	Beskrivelse	Utbedring
Utgang aksling	Moderat drypping	Nei
Mutterhull generelt	Noe drypping	Nei
Rennesystem	Stor lekkasje	Tett med silikonbehandling
Virveljustering	Moderat drypping	nei

Det oppstod stor lekkasje mellom øvre tank og renne (figur 11-14 B). Denne viste seg å bli helt tett ved enkel silikonbehandling under testen. Det ble observert lekkasje flere steder (figur 11-14 A), men alle lekkasjene ble vurdert som små eller neglisjerbare i forhold til om de påvirker strømningsegenskapene i systemet. Det ble derfor bestemt at en funksjonstest av hele anlegget kunne gjennomføres. Samtidig ble det bestemt at alle lekkasjer må utbedres for å sikre en bedre brukeropplevelse av produktet.



**Figur 11-14.** A) Lekkasjetest av prototype. Bildet viser at det er lekkasje og vann på treplaten. B) Lekkasje fra rennesystem. Bildet viser at mesteparten av lekkasjen skjer rundt rennesystemet. Dette ble senere tettet med silikon.

#### 11.1.6. Funksjonstest av komplett anlegg

Forsøket er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

##### Lokasjon og tid:

Testen ble utført utenfor lokaler ved NMBU den 10. april 2017.

##### Forsøksmål:

Teste hvorvidt alle funksjonene til anlegget fungerer som planlagt.

##### Utførelse:

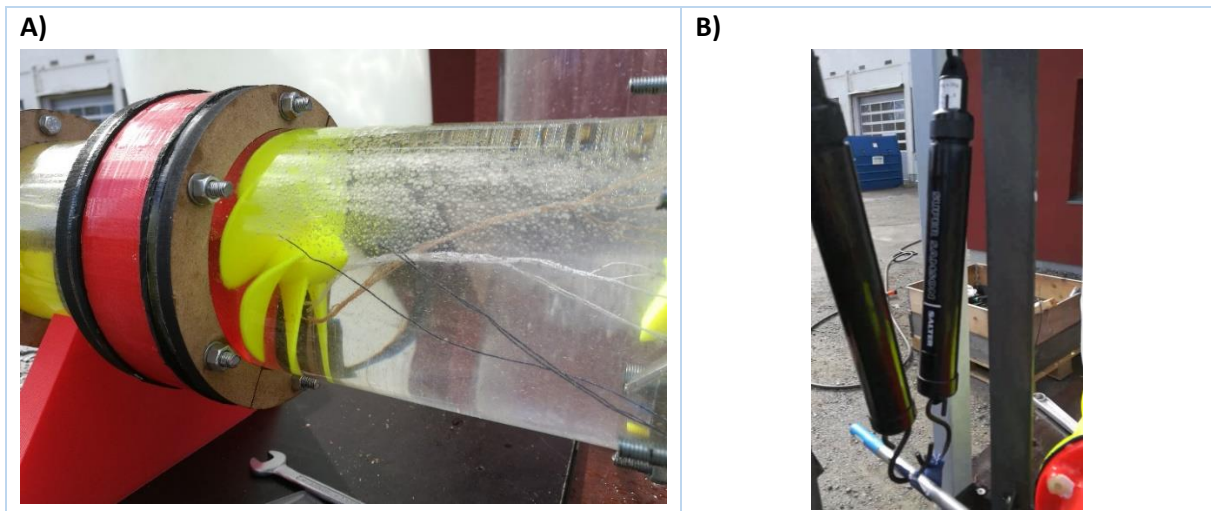
Anlegget ble benyttet sammensatt slik som det forekom i forrige test, med vinkelmodul montert. Hovedtanken ble fylt med vann og pumpen ble deretter skrudd på slik at vannet strømmer gjennom hele systemet. Det ble deretter foretatt en kontrollsjekk av alle elementer og funksjoner i anlegget og eventuelle avvik ble notert for videre utbedring. Følgende punkter ble det spesielt foretatt en synlig funksjonstest av:

- Akslingsrotasjon ved opplagring
- Sytrådmodul
- Virvelopprettet
- Slangesystem
- Bremsesystem
- Rennesystem
- Volumstrømmåling

Det ble utført en bremsetest på utgående aksling ved å benytte montert fjærvektsystem (Figur 11-15 B). Et tachometer ble benyttet sammen med refleksbånd på utgående aksling for å lese av rotasjonshastigheten. Trykket ble avlest på digitalt display og volumstrøm målt ved hjelp av buffertanken. Alle nødvendige data for å regne ut virkningsgraden til turbinen var da kjent.

### Resultat:

Det ble ikke funnet funksjonsfeil på noen av elementene under funksjonstesten. I figur 11-15 er det illustrert hvordan sytrådene roterer med virvelen og hvordan bremsesystemet gir utslag på fjærvektene.



**Figur 11-15.** A) Funksjonstest av testrigg med turbin og trådmodul. Bildet viser hvordan trådene roterer med vannstrømmen på innsiden av røret. B) Funksjonstest av bremsesystem. Det påføres en last på akslingen og momentet kan regnes ut ved hjelp av differansen på verdiene fra fjærvektene.

Videre i tabell 11-7 fremkommer hvilke observasjoner som ble gjort ved de forskjellige komponentene under funksjonstesting.

**Tabell 11-7. Oversikt over observasjonene fra funksjonstesting.**

Element	Observasjon
<b>Akslingsrotasjon ved opplagring</b>	Akslingen roterer fritt og oppnår tilsynelatende god rotasjonshastighet.
<b>Sytrådmodul</b>	Sytrådene flyter langs med strømmingen.
<b>Virveloppretter</b>	Skovlene roterer enkelt og gir tydelig utslag på sytråder og rotasjonshastighet til turbin.
<b>Slangesystem</b>	Slangesystemet mellom hovedtank og pumpe trenger bedre festeløsning da den tidvis suger seg fast i tankveggen. Mellom pumpe og rørsystem oppstår det knekk på slangen ved utgang av pumpe.
<b>Bremsemodul</b>	Det er et utslagsintervall mellom 0 g og 500 g på fjærvektene før akslingen går til full stopp.
<b>Rennesystem</b>	Systemet viderebringer vannet fra buffertank til måletank problemfritt.
<b>Volumstrømmåling</b>	Vannet fylles opp i tanken ved tetting av propp og det er ved tidtaking og avlesing mulig å beregne volumstrømmen

Fra tabellen kan det trekkes frem at det er forbedringspotensialer rundt festeløsninger til plastslanger og at det kun er et lite utslagsintervall på fjærvektene. Under funksjonstest av fjærvektene ble det kun utslag på under 500 g selv om vektene kan vise helt til 5 kg. Dette kan være uheldig da det virker som fjærvektene ikke har like lineær motstand ved kraftøkning i starten.

#### 11.1.7. Utbedringstest etter drift

Forsøket er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

##### Lokasjon og tid:

Testen ble utført ved NMBU den 12. april 2017.

##### Forsøksmål:

Sjekk hvor stor påkjenning de forskjellige delene har blitt utsatt for ved flere gangers montering og drift. Siden det er viktig at systemet er modulært, må også delene kunne demonteres hyppig uten å ta for stor skade av dette.

##### Utførelse:

Etter at alle nødvendige tester var fullført ble det på nytt registrert hvilke lekkasjer som var tilstede. Deretter ble testriggeren demontert for å se etter eventuelle skader og påkjenninger driften har påført de forskjellige delene. Visuelle skader under demontering ble notert før anlegget ble montert sammen igjen og en ny lekkasjetest ble gjennomført.

Enkelte komponenter ble utbedret før anlegget ble satt sammen igjen. Dersom flere like deler var skadet, ble kun en del utbedret for å teste virkningen av utbedringen. Det ble påført ny gjengetetning og epoksy der det var behov for dette.

##### Resultat:

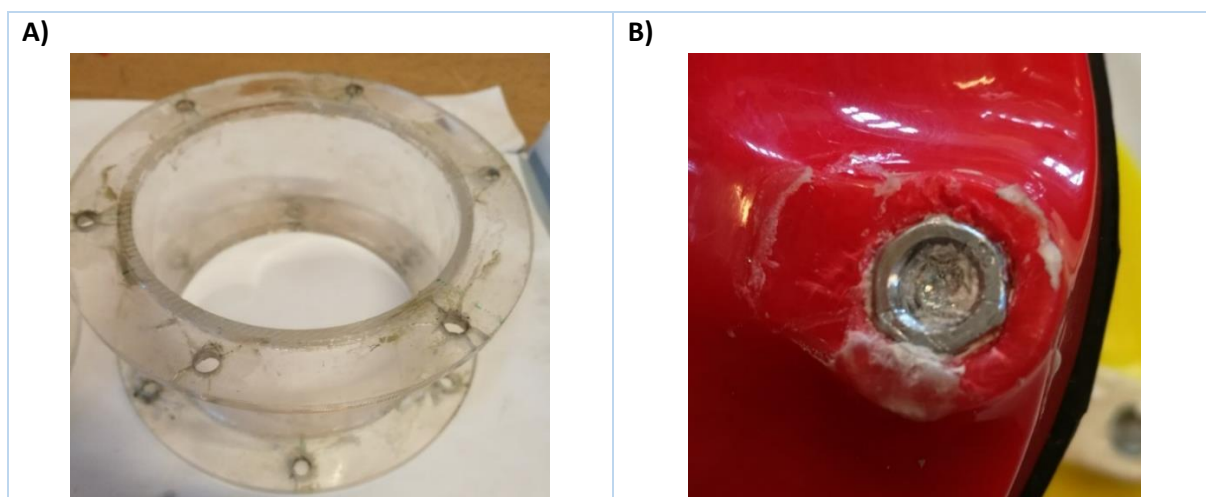
Det var åpenbart at testene i kapittel 11.1.2 og 11.1.3 vedrørende printerinnstillinger og påført moment mot akrylflens, ikke fungerer ved hyppig demontering og bruk. Ved akrylflensen var det store sprekker ved de fleste hull og det var tydelig at mutterne hadde revet opp de 6-kantede sporene i plastdelene flere steder (figur 11-16). Ved å trykke på plastdelene, som i utgangspunktet var tørket, kom det fukt sivende ut av materialet. Tabell 11-8 viser skadene etter demontering.

**Tabell 11-8. Oversikt over skader på deler etter bruk.**

Komponent	Visuell skade
Plastdeler	Vann «innefanget» i del
Mutterhull	Oppriving av spor
Akrylflens	Sprekk ved hull

Det er tydelig at spesielt akrylflensen ikke tålte påkjenningen av demontering. Ved ny test var det store lekkasjer fra akrylflensen (figur 11-17 A). Det var tydelig at hele flensen var deformert og anlegget ble ute av stand til å fungere ved normal drift.





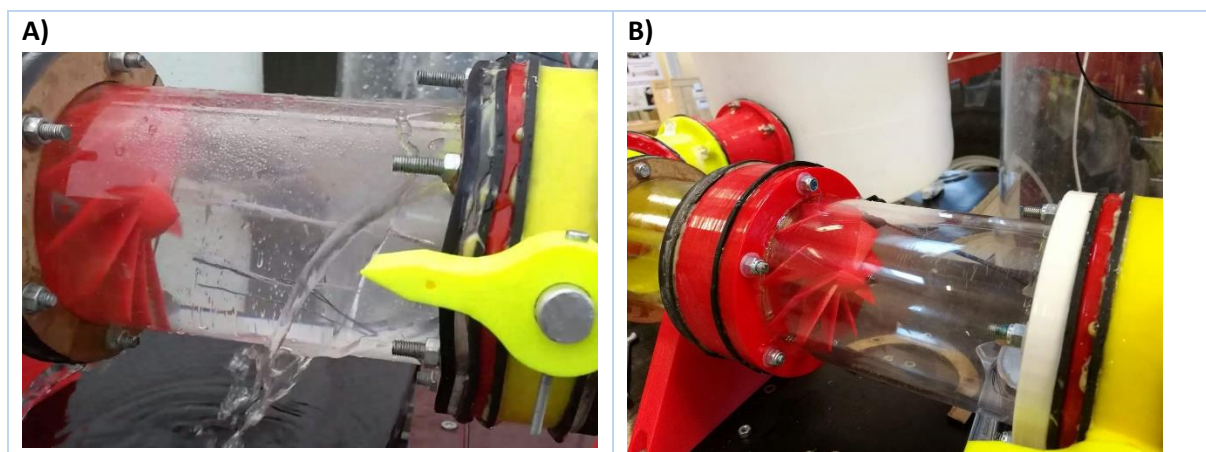
**Figur 11-16.** A) Ved demontering er det sprekker ved nesten alle hull i akrylflensen. B) Mutterhull har blitt opprevet som følge av tilstramming av mutter.

Ved mutterhull i plastdelene økte lekkasjen fra før utbedringstesten til etter ny montering. Det var tydelig at det som før kunne karakteriseres som drypping, nå var større lekkasjer. Bruken av fett gav utmerkede resultater ved virveloppretter og det var nå ingen tegn til lekkasje i dette området. Resultatet fra testen er summert opp i tabell 11-9.

**Tabell 11-9. Oversikt over lekkasjer og utbedringer.**

Lekkasjepunkt	Før demontering	Utbedring	Revidert test
Utgang aksling	Moderat drypping	fettsmøring	uforandret
Mutterhull	Moderat drypping	Ingen utbedring	Større lekkasje
Renne	Ingen lekkasje	Ingen utbedring	Uforandret
Håndtak for skovvel	Moderat drypping	fettsmøring	Ingen lekkasje
Akrylflens 1	Ingen lekkasje	Ingen utbedring	Stor lekkasje
Akrylflens 2	Ingen lekkasje	Pålimte ABS-flenser	Ingen lekkasje

Den største forandringen til siste test var å bytte ut akrylflensen med ABS-flenser for et av akrylrørene (figur 11-17 B). Disse flensene ble da printet med 100 % tetthet og festet til akrylrøret med akrylplastlim. Det viste seg å være en god løsning, som ble helt vanntett. Det ble ikke observert noen antydning til sprekker eller deformasjon i materialet.



**Figur 11-17.** A) Det er stor lekkasje ved ny montering av tidligere brukt akrylflens. B) Akrylflensen er byttet ut med ABS-flenser.

## 11.2. Brukstest av anlegg

Det er utført to forskjellige brukstester av anlegget, en med påmontert vinkelmodul og en med horisontalt system.

### 11.2.1. Virkningsgrad med 2 forskjellige turbiner for anlegg med vinkelmodul

Testen er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

#### Lokasjon og tid:

Testen ble utført utenfor NMBU sine lokaler den 10. april 2017.

#### Forsøksmål:

Teste hvorvidt anlegget kan brukes til å teste virkningsgraden til propellturbiner med variable ledeskovler og montert vinkelmodul.

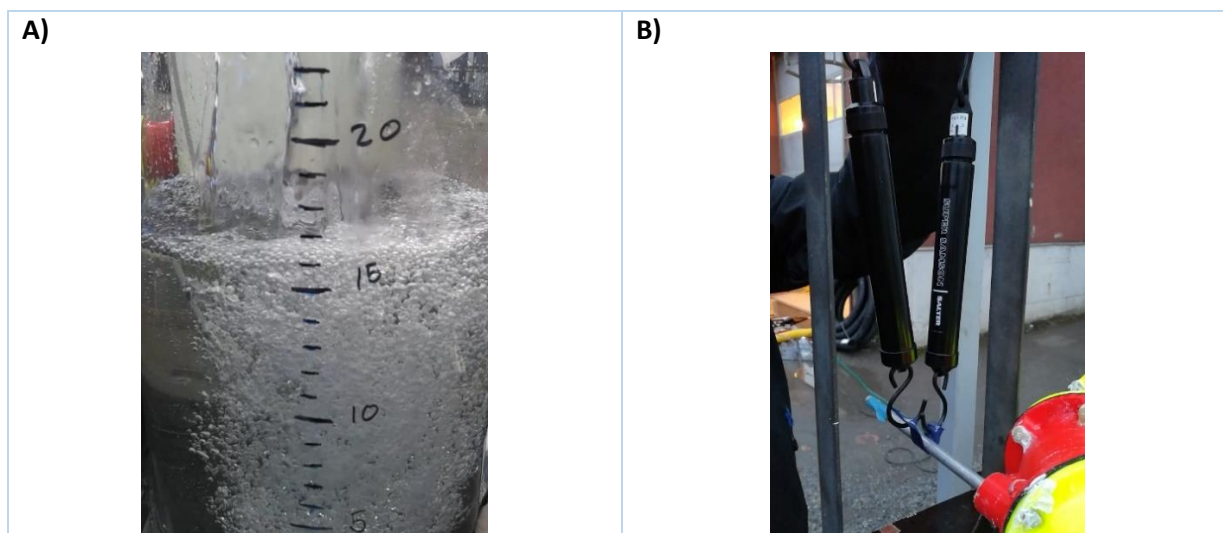
#### Utførelse:

Først ble hovedtanken fylt med vann til ønsket nivå. Deretter ble pumpen skrudd på slik at systemet fylles med vann nedenfra og opp. Når buffertanken var full og vannet rant over til måletanken og videre tilbake til hovedtanken var anlegget klart for testing (figur 11-18). Trykket ble avlest på et digitalt display ved to punkter for videre utregninger.



**Figur 11-18.** Testing av produkt med påmontert vinkelmodul. Det er tydelig at vannet renner fra buffertank til måletank.

Det ble utført bremsetester på utgående aksling ved å benytte montert fjærvektsystem (Figur 11-19B). Et tachometer ble benyttet sammen med refleksbånd på utgående aksling for å lese av rotasjonshastigheten når akslingen er nedbremset. Volumstrømmen ble målt ved å benytte måletanken (figur 11-19 A). Det ble så gjort målinger for forskjellige innstillinger på virveloppetter for videre sammenligning. Etter at målinger var gjort på propell med 6 blader, ble det byttet til propell med 10 blader og utført de samme testene. Alle nødvendige parametere for å finne virkningsgraden til turbinene for de forskjellige innstillingene var da kjent.



**Figur 11-19.** A) Måling av volumstrøm i måletank. B) Måling av effekt ved hjelp av bremsesystem.

### Resultat:

Dataene målt i forsøket er plottet i tabeller for god oversikt (tabell 11-10 og 11-11). Tallene er videre brukt i utregninger for å finne virkningsgraden for propellen ved de forskjellige innstillingene. Skovlvinkler som gir virvel med klokkeretningen er markert som positiv. Dette er den retningen det antas at en eventuell forbedring av virkningsgrad oppstår. Det er for hver turbin også gjort én test med skovlene motsatt vei for å lage vinkel mot klokkeretningen, dette er ført inn som negativ vinkel.

**Tabell 11-10.** Oversikt over resultater for propell med 6 blader.

PROPELL MED 6 BLADER				
Skovlvinkel [°]	Bremsekraft [N]	Turtall med last [o/min]	Turtall uten last [o/min]	Trådmodul
-30	1,079	43	100	Turbulent virvel mot klokken.
0	1,079	56	117	Liten virvel med klokken.
+10	1,226	60	134	Noe virvel med klokken.
+20	1,226	67	137	Tydlig virvel med klokken.
+30	1,275	85	145	Stor virvel med klokken.

Det var ikke mulig å regulere trykk og volumstrøm ved å bruke ventilen etter pumpen, da kun helt åpen ventil gav tilstrekkelig rotasjon på akslingen. Før det gjøres beregninger kan det allerede trekkes frem at virveloppetteren har hatt innvirkning på virkningsgraden til propell med 6 blader. Eksempelvis har forsøket hvor virveloppetterne var stilt 30 grader den retningen hvor forbedring var forventet, gitt et høyere maksimalt turtall enn dersom virveloppetterne var stilt i motsatt retning med lik vinkel. Det kan også trekkes frem at det er høyere maksimalt turtall ved virvel i forbedrings-retning enn ved rette skovler.

**Tabell 11-11. Oversikt over resultater for propell med 10 blader.**

PROPELL MED 10 BLADER				
Skovlvinkel [°]	Bremsekraft [N]	Turtall med last [o/min]	Turtall uten last [o/min]	Trådmodul
-30	0,834	15	37	Tydelig virvel mot klokken.
0	0,981	25	56	Liten virvel med klokken.
+10	0,981	32	66	Noe virvel med klokken.
+20	0,981	23	70	Tydelig virvel med klokken.
+30	1,030	34	84	Stor virvel med klokken.

For 10-bladet propell er det tilsvarende resultater, men med lavere verdier. Dette kan tyde på at turbinen ikke har like god virkningsgrad for de gitte forhold. For begge testene var det tydelig på sytrådene at virvelen før propellen endret seg i henhold til vinkelen på virveloppretterne. Det ble også observert ujevn rotasjon og noe turbulens i sytrådene ved flere av forsøkene. Det ble ikke klart å måle en endring i volumstrøm som følge av forskjellige innstillinger. Det kan tyde på at forskjellene er så små at målemetoden ikke er nøyaktig nok til å fange dem opp. Den målte volumstrømmen er gitt som

$$Q = 1,37 \text{ l/s} = 0,00137 \text{ m}^3/\text{s}$$

Det vil bli vist utregning for å finne mekanisk effekt og virkningsgrad for 6-bladet propell med rette virvelopprettere. Det er ikke vist utregning for de andre tilfellene, men fremgangsmåten er den samme og alle resultatene er oppsummert i tabell 11-12 og figur 11-22.

Finner først hastigheten i slangen før konisk utvidelse. Slangen har en radius på 0,0127 m.

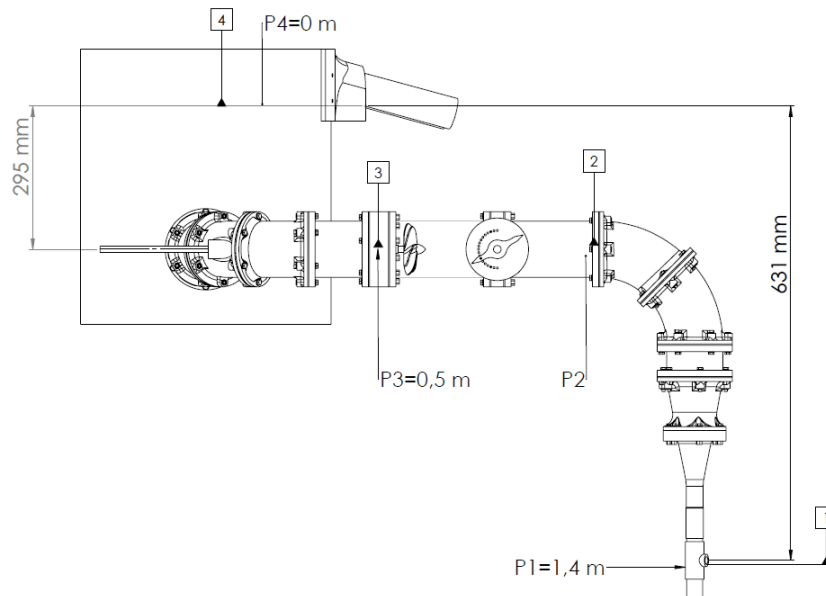
$$Q = A \cdot v$$

$$v_1 = \frac{0,00137 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^2} = 2,7 \text{ m/s}$$

Hastighet i plastrørdeler, rørdelene har en innvendig radius på 0,042 m.

$$v_2 = \frac{0,00137 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,042 \text{ m})^2} = 0,247 \text{ m/s}$$

For å finne den hydrauliske effekten må først det potensielle trykkfallet over turbinen beregnes. Først vil da trykktapet i området før turbinen, mellom punkt 3 og 4, beregnes og derfra finnes en friksjonskoeffisient (figur 11-20). Siden området mellom punkt 3 til 4 og området mellom punkt 1 til 2 hovedsakelig består av samme materialer, kan denne friksjonskoeffisienten også benyttes i dette området. Det kan så gjøres beregninger for å anslå trykktapet mellom punkt 1 og 2 og dermed beregne trykket som oppstår i punkt 2. Ut i fra dette trykket kan det beregnes et potensielt trykktap over turbinen og virveloppretteren, altså mellom punkt 2 og 3. Alle virkningsgrader presentert er altså for turbinen i kombinasjon med virveloppretteren og røret mellom punkt 2 og 3.



**Figur 11-20.** Forklaring på høyder, punkter og avstander brukt i beregninger.

For å finne friksjonskoeffisienten i området mellom 3 til 4 anslås det at det ikke er noen friksjonstap i den øvre tanken fordi hastigheten er veldig lav i det området. Benytter da Bernoullis likning (formel 3.3) med et ekstra ledd for tap i bøy og et ekstra ledd for friksjonstap. Bernoullis likning er omgjort slik at trykket alltid kan uttrykkes i meter.

$$h_3 + p_3 + \frac{v_3^2}{2 \cdot g} - k_b \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} - \frac{v_3^2}{2 \cdot g} - f \cdot \frac{L_3}{D} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} = h_4 + p_4 + \frac{v_4^2}{2 \cdot g} \quad (3.3)$$

$$h_4 - h_3 = p_3 - \left( k_b + f \cdot \frac{L_3}{D} \right) \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g}$$

Setter opp uttrykket for trykktapene.

$$k_b + f \cdot \frac{L_3}{D} = (p_3 + h_3 - h_4) \cdot \frac{2 \cdot g}{v_3^2}$$

$$k_b + f \cdot \frac{L_3}{D} = (0,5 \text{ m} + (-0,295 \text{ m}) - 0 \text{ m}) \cdot \frac{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{(0,247 \text{ m/s})^2} = 65,926$$

Fra tabell for tap i bøy er  $K_b$  gitt som følgende [34]:

$$K_b = 0,65$$

Lengden på plastrøret fra punkt 3 og inn i tanken før punkt 4 er 0,49 meter. Kan da regne ut hva friksjonskoeffisienten blir

$$0,65 + f \cdot \frac{0,49 \text{ m}}{0,084 \text{ m}} = 65,926$$

$$f = 11,190$$

Kan videre regne ut antatt trykk ved punkt 2. begynner med Bernoullis likning mellom punkt 1 og 2. Her er det også tatt med ekstra ledd for tap i konisk utvidelse i tillegg til tap i bøy.

$$h_1 + p_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - k_b \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} - k_u \cdot \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot g} - f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = h_2 + p_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (3.3)$$

Fordi radiusen er lik som i utregningen mellom 3 til 4 og 1 til 2 blir  $k_b$  den samme verdien. Fra tabell er det gitt at en konisk utvidelse med de gitte mål har  $k_u = 0,15$  [34]. For å forenkle uttrykket uttrykkes tapene for bøy og utvidelse først.

$$k_b \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + k_u \cdot \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot g} = 0,65 \cdot \frac{(0,247 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} + 0,15 \cdot \frac{(2,7 \text{ m/s} - 0,247 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,048 \text{ m}$$

Fordi tapene som følge av bøy og konisk utvidelse er små, velges det å utelate de fra videre beregning for å forenkle prosessen. Lengden på røret mellom punkt 1 og 2 er 0,54 meter. Finner da trykket ved punkt 2.

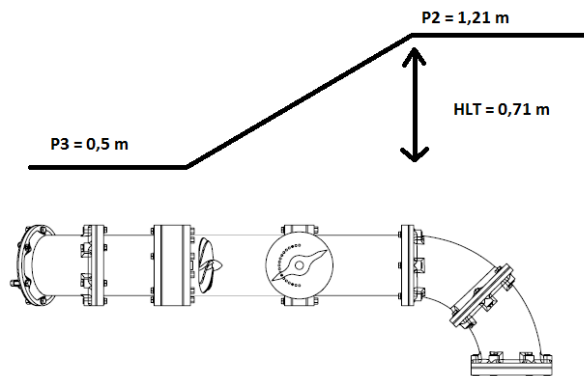
$$p_2 = h_1 - h_2 + p_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - \left( f \cdot \frac{L}{D} + 1 \right) \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

$$p_2 = -0,631 \text{ m} - (-0,295 \text{ m}) + 1,4 \text{ m} + \frac{(2,7 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} - \left( 11,19 \cdot \frac{0,54 \text{ m}}{0,084 \text{ m}} + 1 \right) \cdot \frac{(0,247 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$p_2 = 1,21 \text{ m}$$

Den hydrauliske effekten er gitt ved hjelp av det potensielle trykkfallet over turbinen og virveloppretteren (figur 11-21). Dette blir da gitt som

$$H_{LT} = p_2 - p_3 = 1,21 \text{ m} - 0,5 \text{ m} = 0,71 \text{ m}$$



**Figur 11-21. Linjen viser forskjellen på trykk før og etter turbinen med virveloppretter og akrylrør.**

Siden volumstrømmen er lik for alle forsøkene, er også den hydrauliske effekten er lik for alle forsøkene. Hydraulisk effekt gitt ved formel 3.8 som

$$P_h = \rho g Q H \tag{3.8}$$

For forsøket er hydraulisk effekt da gitt ved:

$$P_h = \rho g Q H_{LT}$$

Setter inn kjente verdier og finner hydraulisk effekt.

$$P_h = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,00137 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 0,71 \text{ m} = 9,54 \text{ W}$$

Det neste trinnet blir å regne ut den mekaniske effekten for gul turbin med rette skovler. Fra formel 7 er mekanisk effekt fra akslingen gitt som:

$$P_m = \omega T \tag{3.7}$$



$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot F \cdot r$$

Setter inn verdier for 6 bladet turbin med rette skovler fra tabell 11-10.

$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot 56 \text{ o/min}}{60} \cdot 1,079 \text{ N} \cdot 0,005 \text{ m} = 0,0316 \text{ W}$$

Presenterer virkningsgraden i prosent:

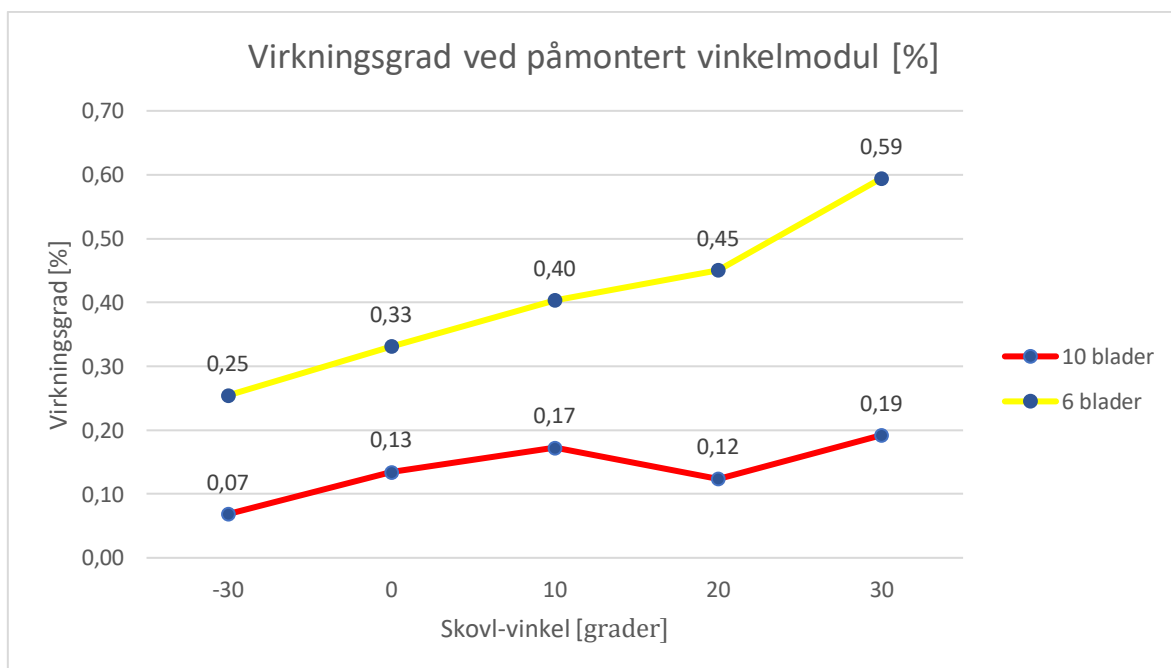
$$\eta = \frac{P_m}{P_h} = \frac{0,0316 \text{ W}}{9,54 \text{ W}} \cdot 100\% = 0,33\% \quad (3.6)$$

Den utregnede mekaniske effekten til alle de forskjellige skovl-vinklene er presentert i tabell 11-12. Det kan trekkes frem at den høyeste mekaniske effekten ble målt ved 30 graders skovlevinkel ved bruk av 6-bladet propell. Det kan også trekkes frem at 6-bladet propell har høyere mekanisk effekt enn 10-bladet propell for alle målinger.

**Tabell 11-12. Oversikt over mekanisk effekt ved forskjellig vinkler på virvelsystemet og de forskjellige turbinene.**

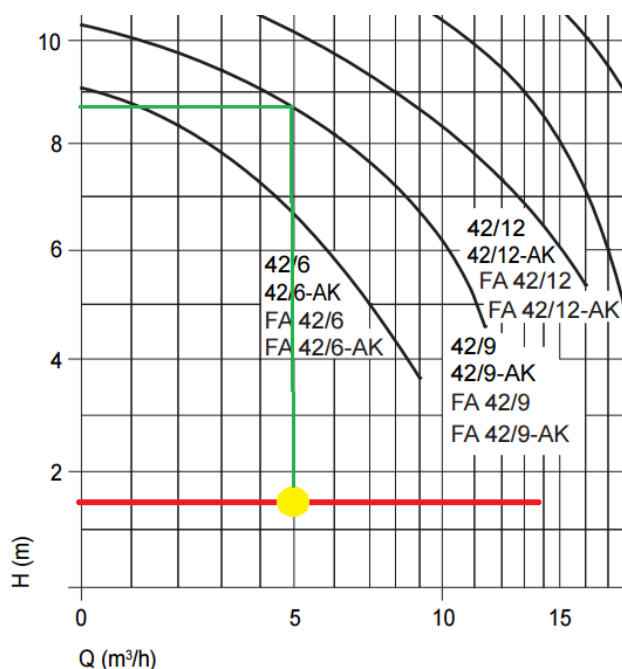
Skovlvinkel[°]	MEKANISK EFFEKT	
	6-bladet propell [W]	10-bladet propell [W]
-30	0,024	0,007
0	0,032	0,013
+10	0,038	0,016
+20	0,043	0,012
+30	0,057	0,018

Videre er virkningsgraden målt i prosent illustrert i figur 11-22. Siden alle virkningsgradene er utregnet ved hjelp av den samme hydrauliske effekten vil forsøkene med høyest mekanisk effekt også ha best virkningsgrad.



**Figur 11-22. Graf med virkningsgrader i % på de forskjellige turbinene med montert vinkelmodul.**

Det er interessant å se hvorvidt trykket og volumstrømmen stemmer overens med pumpekurven. Kurven for pumpen brukt i anlegget er den merket «42/9» (figur 11-23) [78]. Det er tydelig at pumpen ikke er egnet for bruk i så lave trykkområder, da kurven ikke viser data for trykk under 4 meter. Dersom det antas at kurven følger omtrent samme radius ned til 1,4 meters trykk, det målte trykket etter slangen nærmest pumpen, vil kurven havne et sted mellom 11 og 15  $m^3/h$ . Volumstrømmen målt under forsøk, er vist som den gule sirkelen. For den målte volumstrømmen skulle pumpen i teorien levert mellom 8 og 9 meters trykk. Dette tyder på at pumpen ikke fungerer som den skal.



**Figur 11-23.** Pumpekurven til pumpen med avmerking der trykket burde være i forhold til volumstrømmen [78].

### 11.2.2. Virkningsgrad med 2 forskjellige turbiner for horisontalt system

Testen er delt inn i forsøksmål, utførelse og resultater.

#### Lokasjon og tid:

Testen ble utført utenfor NMBU sine lokaler 11. april 2017.

#### Forsøksmål:

Teste hvorvidt anlegget kan brukes til å teste virkningsgraden til propellturbiner med variable ledeskovler ved horisontalt anlegg uten ytterligere monterte moduler.

#### Utførelse:

Anlegget ble klargjort og startet på samme måte som ved forrige forsøk. Denne gangen var ikke vinkelmodulen påmontert slik at slangen fra pumpen går horisontalt rett mot der hvor turbinen er plassert gjennom en konisk utvidelse (figur 11-24).





**Figur 11-24. Testing av testriggen uten vinkelmodul.**

Bremsetest ble også utført på samme måte som ved forrige test og avleste verdier ble notert for videre utregning av virkningsgrad. Det ble gjort forsøk med både 6-bladet og 10-bladet propell med like innstillinger på virveloppretteren som i forrige forsøk.

#### Resultat:

De målte parameterne fra forsøket er vist i tabell 11-13 og 11-14.

**Tabell 11-13. Oversikt over resultater for testing av 6-bladet propell. Positiv vinkel er justeringen på skovlene som fører til økt turtall uten last og negativ vinkel fører til lavere turtall uten last.**

6-BLADET PROPELL				
Skovlvinkel [°]	Bremsekraft [N]	Turtall med last [o/min]	Turtall uten last [o/min]	Trådmodul
-30	1,472	24	140	Stor virvel mot klokken
0	1,864	35	180	Ingen virvel
+10	1,864	52	192	Noe virvel med klokken
+20	1,962	44	204	Stor virvel med klokken
+30	2,207	60	218	Stor virvel med klokken

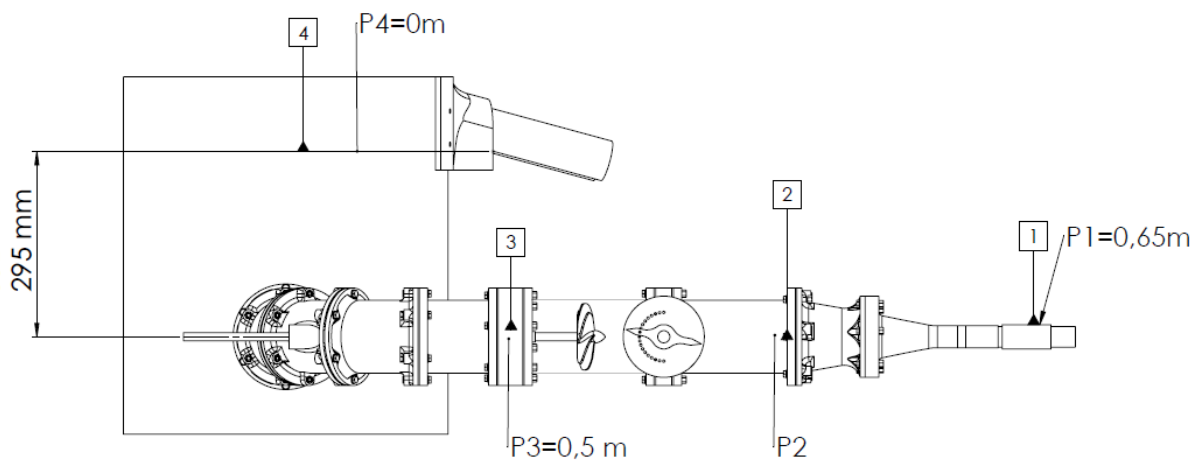
Det ble ved dette forsøket også kun mulig å benytte helt åpen ventil. Det er tydelig at virveloppretteren har hatt innvirkning på systemet også i dette forsøket. Det kan trekkes frem at både 6-bladet og 10-bladet propell opplever høyere turtall for alle innstillinger med horisontalt system enn ved montert vinkelmodul. Det kan også trekkes frem at både 6-bladet og 10-bladet propell opplever det høyeste turtallet uten last ved vinklene på skovlene satt til 30 grader.

**Tabell 11-14. Oversikt over resultater for testing av 10-bladet propell. Positiv vinkel er justeringen på skovlene som fører til økt turtall uten last og negativ vinkel fører til lavere turtall uten last.**

10-BLADET PROPELL				
Skovlvinkel [°]	Bremsekraft [N]	Turtall med last [o/min]	Turtall uten last [o/min]	Trådmodul
-30	0,491	16	33	Stor virvel mot klokken
0	0,932	23	63	Ingen synlig virvel
+10	0,883	43	74	Noe virvel med klokken
+20	0,932	35	79	Stor virvel med klokken
+30	0,932	47	95	Stor virvel med klokken

På samme måte som i den forrige testen med montert vinkelmodul, vil det regnes ut virkningsgraden for 6-bladet propell med rette skovler. Volumstrømmen for alle forsøkene ble målt til å være det samme og derfor kan også de samme hastighetene fra forrige forsøk benyttes.

Siden det ved punkt 3 er målt likt trykk som ved testen med vinkelmodul, kan samme friksjonsfaktor benyttes for dette oppsettet. Friksjonsfaktoren,  $f = 11,19$ , gjelder altså fra punkt 4 til 3 og fra punkt 1 til 2 også for dette anlegget (figur 11-25).



**Figur 11-25. Forklaring på høyder, punkter og avstander brukt i beregninger.**

Kan da regne ut antatt trykk ved punkt 2. begynner med Bernoullis likning mellom punkt 1 og 2. Tapet gitt av utvidelseskoeffisienten vil også her bli lik som ved forrige test og kan derfor på samme måte neglisjeres. Fordi punkt 1 og 2 ligger på samme høyde, vil heller ikke den vertikale avstanden være med i beregningene.

$$p_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = p_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (3.3)$$

Finner da trykket ved punkt 2:

$$p_2 = p_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - \left( f \cdot \frac{L}{D} + 1 \right) \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

$$P_2 = 0,65m + \frac{(2,7 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} - \left( 11,19 \cdot \frac{0,54 \text{ m}}{0,084 \text{ m}} + 1 \right) \cdot \frac{(0,247 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$P_2 = 0,795 \text{ m}$$

Den potensielle trykkforskjellen er da gitt ved

$$H_{LT} = P_2 - P_3 = 0,795 \text{ m} - 0,5 \text{ m} = 0,295 \text{ m}$$

Hydraulisk effekt er da gitt som:

$$P_h = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,00137 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 0,295 \text{ m} = 3,96 \text{ W} \quad (3.8)$$

Finner den mekaniske effekten for 6-bladet propell ved rette skovler (formel 7).

$$P_m = \omega T \quad (3.7)$$

$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot F \cdot r$$

Setter inn verdier funnet ved forsøk av 10 bladet propell med rette skovler fra tabell 11-13.

$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot 35 \text{ o/min}}{60} \cdot 1,864 \text{ N} \cdot 0,005 \text{ m} = 0,0342 \text{ W}$$

Virkningsgrad uttrykt i prosent:

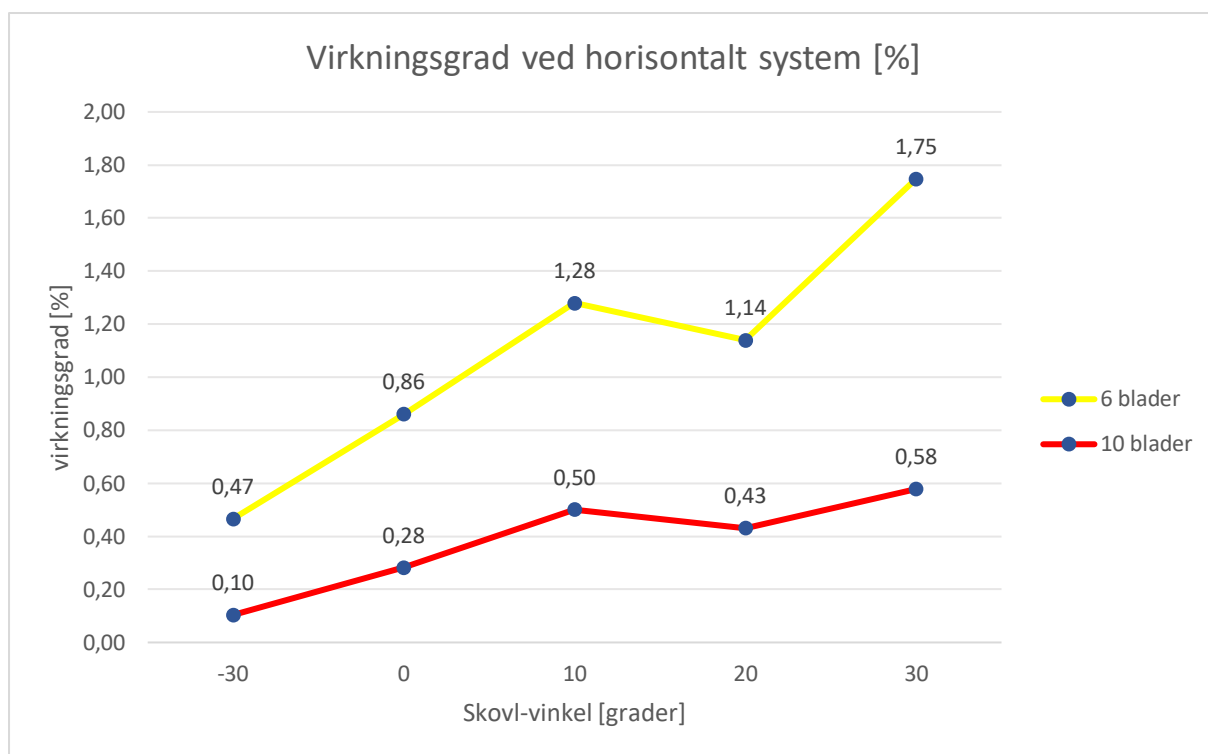
$$\eta = \frac{P_m}{P_h} = \frac{0,0342 \text{ W}}{3,96 \text{ W}} \cdot 100 \% = 0,86 \% \quad (3.6)$$

Den utregnede mekaniske effekten til alle de forskjellige skovl-vinklene er presentert i tabell 11-15. Også for dette forsøket ble 6-bladet propell med største vinkel på virveloppretteren det alternativet med høyest mekanisk effekt. 6-bladet propell har også høyest mekanisk effekt for alle målinger i forhold 10-bladet propell.

**Tabell 11-15. Mekanisk effekt for 6-bladet og 10-bladet propell med forskjellig skovlvinkel.**

Skovlvinkel[°]	MEKANISK EFFEKT	
	6-Bladet propell [W]	10-bladet propell [W]
<b>-30</b>	0,018	0,004
<b>0</b>	0,032	0,011
<b>+10</b>	0,051	0,020
<b>+20</b>	0,045	0,017
<b>+30</b>	0,069	0,023

Virkningsgraden målt i prosent for de forskjellige testene med horisontalt anlegg er vist i figur 11-26. Det kan trekkes frem at begge turbinen får lavere virkningsgrad ved 20 graders skovl-vinkel enn ved 10 og 30 grader.



**Figur 11-26.** Graf for virkningsgraden til turbinene ved de forskjellige skovl-vinklene.

## 12. PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON

Dette kapitlet vil inneholde evalueringen og diskusjonen for oppgaven.

### 12.1. Konseptutviklingsarbeidet og forbedringspotensialer

Arbeidet med å gjennomføre dette prosjektet bærer preg av lærdom fra et forprosjekt utført høsten 2016. Ut i fra forprosjektet ble det lettere å planlegge hvilken rekkefølge arbeidsoppgaver bør gjøres og det har blitt enklere å ha et overblikk over hvilke elementer oppgaven skal inneholde på et tidlig stadium.

Selv om dette er en produktutviklingsoppgave og ikke en oppgave som i hovedsak skal omhandle hydrodynamikk, kunne det vært en fordel med bedre kompetanse innen hydrodynamikk før prosjektets start. Betydelige arbeidstimer kunne da blitt fordelt på andre områder i oppgaven. En økende forståelse innen hydrodynamikk underveis i prosjektet kunne forhindre noen av punktene i kapittel 12.2.1 «designrevisjon». En tidligere forståelse innen hydrodynamikk kunne for eksempel resultere i en bedre plassering av trykksensorer og dermed gitt brukeren en enklere utregning av virkningsgrad for turbinen.

Det kan argumenteres for at konseptutviklingsarbeidet kunne vært gjort annerledes, da enkelte av de teknologiske flaskehalsene som ble identifisert tidlig i kapittel 1.3 har inntruffet. Blant annet har ikke testriggeren vært vanntett alle steder det er nødvendig og kan heller ikke sies å være robust med gjeldende materialvalg.

Det kan stilles spørsmål rundt kvalitetssikringen til produktet. Virkningsgrader på under 2 % og en friksjonsfaktor på over 11 tilsier at det er en eller flere ukjente elementer i produktet som utgjør store energitap. Friksjonsfaktoren er over ti ganger større enn det som anses normalt [34]. Det er derfor nærliggende å tro at denne faktoren tar høyde for andre elementer enn bare friksjon i rør. Det er potensiale for forbedring rundt kontrollsjekk av utregninger og oppsett mot relevante standarder og håndbøker for å minske feil og unøyaktighet i målinger.

### 12.2. Design- og produksjonsrevisjon

Det blir her diskutert rundt punkter innenfor design og produksjon som kunne vært gjort annerledes.

#### 12.2.1. Designrevisjon

Under er det listet punkter angående selve designet hvor det er funnet rom for forbedringer eller hvor designet ikke har vist ønskede egenskaper

- Høydeforskjellene i anlegget kunne med fordel vært større for å skape høyere trykk over turbinen.
- Det kunne med fordel vært brukt fjærvæker med lavere totalvekt for et større utslagsområde og økt nøyaktighet for effektberegningene.
- Trykksensorer er ikke plassert på mest hensiktsmessige lokasjoner. Dersom trykksensorene hadde vært plassert rett før og etter turbin hadde det blitt mindre feil fra estimater i beregning.
- Rennesystemet er stort nok for den brukte pumpen, men buffertanken vil overfylles ved bruk av en pumpe som gir større volumstrøm. Større volumstrøm er også ønskelig.
- Plastdeler ble ikke testet med enda tykkere flens, tettere printing eller alternativ til forhøyning rundt mutter.

- Det er fortsatt lekkasje ved akselutgang og kulelager i plastdel som det må finnes en løsning på.
- Pumpeplasseringen gjør at slanger er lengre enn nødvendig og krummes før inngang til plastdeler. Dette kan føre til unødvendig motstand og turbulens.
- Det er ikke laget tilfredsstillende løsning for å feste slange i hovedtank.
- Løsningen hvor sylindren i bremsesystem låses med bolt og fastnøkkel oppleves tungvint og uferdig.
- Løsningen med at koblingsboks og slanger er festet til rammeverk med plaststrips oppleves uferdig og lite robust.
- Måletanken er ikke festet i rammeverk, men står kun løst plassert over hull i treplate.
- Målemetoden i måletanken er ikke nøyaktig nok da samme volumstrøm blir målt til tross for at det er forskjellig motstand i anlegget.
- Der hvor det er plass, kan det brukes flere enn 6 bolter i flensene for å fordele flatetrykket og minske fare for oppriving i plastdel av mutter.

### 12.2.2. Produksjonsrevisjon

Ved montering, drift og testing var det flere elementer som må revideres. Dette delkapittelet vil ta for seg disse elementene.

Selv om det i utgangspunktet ble funnet en verdi hvor 3D-printede deler er vanntett for de gitte trykkene, er det tydelig at materialene ikke tåler flere gangers montering og bruk. Dette kommer spesielt frem i kapittel 11.1.7 «utbedringstest etter drift». Det kan argumenteres for at 3D-printing fungerer i en prototype sammen med trykksatt vann, men ikke som en varig applikasjon. Likevel er det fortsatt muligheter for å eksperimentere med enda tettere printertetthet og behandlingsmetoder. Det finnes også forskjellige typer plastmaterialer som kan 3D-printes, og det har i denne oppgaven kun blitt gjort forsøk med ABS-plast.

Akryl var fra før kjent som et sprøtt materiale og det var forventet at det skulle bli utfordrende å benytte det i en flens. Resultatet i kapittel 11.1.3 «test av skruemoment ved akrylflenser», viser at det kun er én verdi hvor flensen er tett uten å danne sprekker. Dette gir svært lite momentintervall, og det var derfor ingen stor overraskelse når akrylflensene hadde fått flere sprekker under utbedringstesten. Akryl er et materiale som enkelt kan laserkuttes til ønsket utforming og det var interessant å vite mer om hvor mye materiale tåler i ulike applikasjoner. Det ble i siste del av utbedringstesten byttet til flenser i ABS-plast, som ved første test fungerte godt. Det gjenstår likefullt å teste disse ved flere gangers montering og drift før det er mulig å si noe om levedyktigheten.

Andre punkter under produksjon og testing som kunne vært gjort annerledes eller som må tas med i videre vurderinger er listet under

- Epoxy fungerer som tetning rundt muttere og bolter hvor plastmateriale er skadet, men må påføres på nytt ved hver montering og fungerer ikke optimalt som permanent løsning.
- Silikon fungerer som tetningsmiddel, blant annet ved rennesystem, men må også påføres på nytt ved hver montering og fremstår som en midlertidig og uferdig løsning.
- Ved noen forsøk sprakk akrylrør under saging. Det må utøves stor forsiktighet og saging av akrylrør er derfor tidkrevende og risikofyllt.

- Noen 3D-printede deler ble deformert under produksjon som følge av temperaturendringer i rommet. Selv om 3D-printing er en selvgående prosess, kan det kreves ressurser til tidvis overvåking.
- Håndlagde pakninger viste seg å være unøyaktige og en ujevn overgang mellom pakninger og plastdeler er antakeligvis en bidragsyter til tap og turbulens i systemet.

### 12.3. Læringsgevinst

Fra resultatene i kapittel 11.2 er det mulig for brukeren å regne ut virkningsgraden til de forskjellige turbinene. Selv om virkningsgraden ble veldig lav, er det fortsatt mulig å skille de to turbinene og analysere hvordan forskjellige turbindinger oppnår forskjellige resultater. Fra forsøket kan brukeren fastslå at en propell med 6 blader og større areal mot strømningsretningen til vannet er for alle de målte forholdene mer effektiv enn en propell med 10 blader og mindre areal mot strømningsretningen.

Det er tydelig at brukeren kan se forskjell på virkningsgrad avhengig av innstillinger på virveloppretteren. Resultatene fra forsøkene vist i figur 11.22 og 11.26 i sammenheng med den synlige effekten fra sytrådene, gir en tydelig læringsgevinst. Det kan være interessant å se hvordan 3 av 4 forsøk i figur 1-22 og 1-26 gir lavere virkningsgrad ved vinkel på 20 grader enn ved 10 og 30 grader. Observasjonen gir brukeren mulighet til å vurdere om det eksempelvis er noe med turbindingen som ikke er optimalisert for virvler i den størrelsesordenen, eller om en virveloppretter i den innstillingen interfererer med valgte oppsett og modulvalg. Selv om det ikke i denne oppgaven vil bli svart på slike spørsmål, tilrettelegger det for refleksjon og videre læringsgevinst hos brukeren.

Fra de to forsøkene i kapittel 11.2 kommer det også tydelig frem at det er en forskjell i virkningsgrad avhengig av hvilke modulvalg som benyttes i anlegget. Dersom det tas utgangspunkt i 6-bladet propell hadde denne en virkningsgrad på 0,59% som beste resultat ved påmontert vinkelmodul, mens den hadde beste virkningsgrad på 1,75% ved horisontalt system. Begge virkningsgradene da ved 30 grader på virveloppretteren. Ved å endre modulvalg kan altså brukeren her se at virkningsgraden øker med nærmest 3 gangen. Til sammenlikning øker den mekaniske effekten mellom de to tilfellene fra 0,057 W til 0,069 W. Det er da mulig for brukeren å se hvordan modulvalget har endret det potensielle trykkfallet over turbinen og hvor stor endring i mekanisk effekt dette har resultert i.

Det kan argumenteres for at læringsgevinsten minsker når virkningsgraden blir så liten. Til sammenlikning er det kjent fra kapittel 4.2.7 at propellturbiner kan ha virkningsgrad på rundt 80 %. For et stort anlegg med mange bars trykk vil energien fra dette trykket overskygge flere mindre tap. Siden dette produktet opererer med veldig lave trykk, vil slike mindre tap være av større betydning. Videre er det vanskelig å anslå hvilken faktor som var mest avgjørende for at virkningsgraden ble så lav. Dette har også sammenheng med flere punkter i design- og produksjonsrevisjon som kunne resultert i bedre virkningsgraden dersom de ble gjennomført. Selv om de oppgitte virkningsgradene inneholder flere elementer og det er vanskelig å bedømme hvilke som er av størst betydning, krever det at brukeren gjør sine egne refleksjoner og antakelser som kan føre til økt forståelse for hydrodynamikk. følgende punkter antas å være av vesentlig betydning for hvorfor virkningsgraden ble veldig lav:

- Tap i friksjons- og rullelager.
- Optimalisering av turbindinger.
- Trehetsmoment av bevegelige deler.
- Tap over virveloppretter.

- Friksjonstap i akrylrør ved turbin.
- Unøyaktige antakelser ved utregning av potensielt trykkfall over turbin.

Videre er følgende punkter erfaringer rundt læringsgevinsten til det ferdige produktet.

- Gjennomsiktig akrylrør på strategisk plasser gir innsyn for å registrere blant annet virvler, luftbobler og turbulens.
- Måling av volumstrøm i måletank ved hjelp av tidtaking gir god visualisering av hva volumstrøm innebærer.
- Digitale sensorer åpner for tverrfaglig læring hvor enkel programmering og elektronikk blir nyttiggjort i en praktisk applikasjon.



## 13. KONKLUSJON

Det har under prosjektets gang blitt utviklet en modulær læringsplattform for vannturbiner. Produktet er bygget og testet og gir brukeren mulighet til å evaluere et gitt turbindesign mot hydrodynamiske forhold. Hovedmålet er dermed oppnådd. Videre er konklusjon delt opp i resultater, anbefalinger og videre arbeid.

### 13.1. Resultater

Utvikling og testing av læringsplattformen har gitt følgende resultater:

- Trykk og volumstrøm kan reguleres i systemet, men slik testtriggen er i dag gir den kun utslag på turbinen ved helt åpen ventil.
- Virvelgenerering gir en økning i virkningsgrad fra 0,86 % til 1,75 % ved å endre fra rette skovler til skovler innstilt på 30 grader for et horisontalt system med montert 6-blad propell.
- Det er tydelig forskjell på virkningsgraden for de to testede propellene. Ved horisontalt system og rette skovler har 6-bladet propell en virkningsgrad på 0,86 % og 10-bladet propell en virkningsgrad på 0,28 %.
- Det er utviklet to alternativer for modulvalg som endrer de hydrodynamiske forholdene. For 6-bladet propell og rette skovler ble det med påmontert vinkelmodul registrert en virkningsgrad på 0,33 % mens med horisontalt system ble en virkningsgrad på 0,86 % registrert.
- Den monterte trådmodulen med sytråder endrer bevegelsesmønster og visualiserer vannstrømmen avhengig av innstillingene på virvelopprettet.
- Gjennomsiktige rørdeler gir innsyn i hvordan komponenter innvendig i røret fungerer og forandrer egenskaper avhengig av hydrodynamiske forhold.
- Testtriggen ga det største potensielt trykkfall over turbin på 0,71 meter, som er lavere enn det som antas som reelle forhold for et pico-system.
- Det ble utregnet en friksjonsfaktor på 11,19 gjennom plastdelene, som tyder på at det også er andre tap som gjelder eller svakheter i beregningene.
- Utviklings- og produksjonskostnadene knyttet til prototype er anslått til å være 1058770 kr.
- De faktiske kostnadene knyttet til første prototype er 2728 kr.

### 13.2. Anbefalinger

Det er gjort en rekke erfaringer under utvikling og testing vist som anbefalinger for hvordan ting kan gjøres annerledes dersom prosjektet videreføres.

- Det bør gjennomføres en utredning av relevante standarder, håndbøker og litteratur for å finne ut hvorfor det er så store energitap i systemet
- Det bør gjøres en revisjon av designet for å finne ut om alternative oppsett kan gi mer hensiktsmessige resultater.
- Det bør utredes hvordan skalering og likhetslover kan relatere småskala testing til større applikasjoner.
- Det anbefales å bytte til en pumpe som fungerer i henhold til pumpekurven og gir høyere trykk og større volumstrøm slik at det også ventilen kan benyttes for å regulere disse parameterne.
- Ved å plassere trykksensorer rett før og etter turbinen kan virkningsgraden regnes ut med færre antakelser.
- Det anbefales å bruke propelldesign som er optimalisert for de opptredende forhold og tidligere testet i andre liknende applikasjoner for å verifisere at målingene er korrekte.

- Det anbefales at det gjøres en revisjon på hvilke materialer og produksjonsmetoder som skal benyttes videre. 3D-printing har vært et nyttig verktøy som har resultert i en fungerende prototype, men kan ikke benyttes som et ferdig produkt.

### 13.3. Videre arbeid

Videre arbeid tar utgangspunkt i begrensninger for oppgaven og mål som ikke er oppnådd. Dersom prosjektet videreføres er følgende punkter tiltenkt som videre arbeid.

- Identifisere alle kilder til energitap i systemet.
- Utvikle et nytt design som tillater høyere trykk og større volumstrøm.
- Utarbeide flere modulvalg for alternative oppsett av produktet.
- Utarbeide modulvalg som tillater bruk av flere turbintyper.
- Utføre ytterligere tester med forskjellige 3D-printer teknologier og innstillinger for 3D-print.
- Teste andre materialer som kan benyttes for 3D-printing.
- Teste fysiske egenskaper som hardhet og flytgrense for 3D-printet materiale før og etter acetonbehandling.
- Finne ut hvilke materialer og produksjonsmetoder som egner seg dersom produktet skal serieproduseres.
- Finne ut hvorvidt produktet er konkurransedyktig i pris ved serieproduksjon.
- Utføre analyser for å finne miljøavtrykket til produktet.
- Teste 3D-printede deler med mer fyll og tykkere flens.
- Utføre CFD simuleringer av hele anlegget og flere modulvalg.

## 14. REFERANSER

### 14.1. Vitenskapelige artikler og bøker

- [1] S. G. Håkon Erslund, «Drop And Go Turbine,» NMBU, 1432 Ås, 2016.
- [2] S. Williamson, «Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis,» *Renewable Energy, University of Bristol*, pp. 43-50, 7 7 2012.
- [4] W.Kuo, «A Risk Look at Energy Development,» i *ECS, New Orleans*, 2017.
- [5] K. B. Sopian, «Pico Hydro: Clean power from small streams,» *Research gate, National University of Malaysia*, pp. 414-419, 2015.
- [8] Olje og Energidepartementet, «Energi og Vannressurser i Norge,» p. 83, 2015.
- [11] J. Razak, «Application of Crossflow Turbine in Off-Grid Pico Hydro Renewable Energy System,» *Recent advances in applied mathematics, University Kebangsaan Malaysia*, pp. 519-526, 1981.
- [12] J. Saghir, «Energy and Poverty: Myths, Links and policy issues,» *Energy and mining sector boeard - Energy Working Notes, Amsterdam*, pp. 1-24, 2005.
- [13] J. K. Bøe, «Integrert produktutvikling, IPD,» i *del av kompendiet: Konsept- og produktrealisering, 1432 Ås, NMBU*, 2016, p. 34.
- [14] J. K. Bøe, «Ideutvikling og tidligseleksjon, Pughs metodikk, eksempler på prosjektprosesser,» i *del av kompendiet: Konsept- og produktrealisering, 1432 Ås, NMBU*, 2016, p. 25.
- [15] B. magnusson, «Håndbok for beregning av måleusikkerhet ved miljølaboratorier,» Norsk institutt for vannforskning, Norge, 2008.
- [16] E. Romeo, «Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes,» *Chemical Engineering Journal, University of Zaragoza*, pp. 369-374, 29 10 2001.
- [21] A. Kjølle, *Vannkraftmaskiner*, Oslo: Universitetsforlaget, 1967, p. 264.
- [24] B. R. Cobb, «Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations,» *Renewable Energy, Oregon State University*, pp. 959-964, 20 09 2012.
- [25] Gilkes, *The conversion of nature into electricity*, Kendal: Gilkes, 2011, p. 12.
- [26] S. Williamson, «Performance of low-head pico-hydro Turgo turbine,» *Applied Energy, University of Bristol*, pp. 1114-1126, 26 07 2012.
- [27] H. OLGUN, «Investigation of the performance of a cross-flow turbine,» *International journal of energy research, Karadeniz Technical University*, pp. 953-964, 27 04 1998.
- [29] A. Lashofe, «State of technology and design guidelines for the Archimedes schrew turbine, Bilbao Spain,» i *ResearchGate*, 2012.

- [32] O. Paish, «Small hydro power: technology and current status,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Hampshire*, pp. 537-556, 6 Februar 2002.
- [33] A. Elbatran, «Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Review, Universiti Teknologi Malaysia*, pp. 40-50, 21 November 2014.
- [34] J. B. Franzini, *Fluid Mechanics with Engineering Applications*, Tenth Edition, New York: McGraw-Hill, 2002, p. 790.
- [35] P. Singh, «Experimental optimization of a free vortex propeller runner for micro hydro application,» *Experimental Thermal and Fluid Science, University of Karlsruhe*, pp. 991-1002, 30 04 2009.
- [37] K. Haugen, «Trykkpulsasjoner i Francisturbiner,» Norges tenisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2007.
- [40] L. Ferro, «Design and experimental validation of the inlet guide vane system of a mini hydraulic bulb-turbine,» *Renewable Energy, Technical University of Lisbon*, pp. 1920-1928, 15 01 2010.
- [43] Å. Rian, «Labratorietest av en Francis mikroturbin,» NTNU, Trondheim, 2000.
- [64] J. K. Bøe, «Produktutviklingsmetodikk,» i *del av Konsept- og produktrealisering*, 1432 Ås, NMBU, 2016, p. 18.
- [67] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc, 2010, p. 885.
- [69] «CES Edupack,» Granta Design, Cambridge, 2017.

## 14.2. Personlige meddelelser

- [41] EDR Medeso, «Spiralhus,» EDR Medeso, Oslo, 2017.
- [48] E. Wiik, *Priser*, Son: Armfield Limited, 2017.
- [50] Veekay industries, «FLUID MECHANICS LAB EQUIPMENTS,» Veekay Industries, New Dehli, 2017.
- [51] Veekay Industries, *Prices*, Veekay Industries, 2017.

### 14.3. Nettkilder

- [3] «1,3 billion are living in the dark,» The Washington post, [Internett]. Available: [www.thewashingtonpost.com](http://www.thewashingtonpost.com). [Funnet 01 10 2016].
- [6] «Water wheels,» waterhistory, [Internett]. Available: [www.waterhistory.org](http://www.waterhistory.org). [Funnet 16 09 2016].
- [7] «Kraftverk,» Store Norske leksikon, [Internett]. Available: [www.snl.no](http://www.snl.no). [Funnet 16 08 2016].
- [9] «Vannkraft,» Statkraft, [Internett]. Available: [www.statkraft.no](http://www.statkraft.no). [Funnet 22 19 2016].
- [10] «Environmental Impacts of Dams,» International Rivers, [Internett]. Available: [www.internationalrivers.org](http://www.internationalrivers.org). [Funnet 16 02 2017].
- [17] «Calculating the System H-Q Curve,» Impeller, [Internett]. Available: <http://impeller.net/>. [Funnet 14 Februar 2017].
- [18] «Pumps in Parallel or Serial,» Engineering toolbox, [Internett]. Available: <http://www.engineeringtoolbox.com/>. [Funnet 18 Januar 2017].
- [19] «System Curve and Pump Performance Curve,» Engineering toolbox, [Internett]. Available: <http://www.engineeringtoolbox.com/>. [Funnet 18 Januar 2017].
- [20] «Pumping Station Optimization - Part 1,» CONTROL, [Internett]. Available: <http://www.controlglobal.com/>. [Funnet 20 Januar 2017].
- [22] «Turgo Nozzle Placement,» Hartvigsen Hydro, [Internett]. Available: [www.h-hydro.com](http://www.h-hydro.com). [Funnet 27 01 2017].
- [23] «Pelton Wheel,» Rickly, [Internett]. Available: [www.ricklyhydro.com](http://www.ricklyhydro.com). [Funnet 27 01 2017].
- [28] «Cross-flow Turbine,» TANAKA HYDROPOWER CO., [Internett]. Available: <http://www.tanasui.co.jp/>. [Funnet 26 1 2017].
- [30] «Eureka Moment for North American Hydro Generation,» Engineering.com, [Internett]. Available: <http://www.engineering.com>. [Funnet 30 Januar 2017].
- [31] «Archimedes Hydro Screw,» Flickr, [Internett]. Available: [www.flickr.com](http://www.flickr.com). [Funnet 30 1 2017].
- [36] «Types of water turbines,» Public Research Institute, [Internett]. Available: [www.publicresearchinstitute.org](http://www.publicresearchinstitute.org). [Funnet 22 1 2017].
- [38] «Francis turbine,» Pinterest, [Internett]. Available: <https://au.pinterest.com/>. [Funnet 31 Januar 2017].
- [39] «spiral\_case2,» <http://photos.tradeholding.com>. [Internett]. [Funnet 22 1 2017].
- [42] «Computational fluid dynamics (3D-CFD) for turbines,» HFM, [Internett]. Available: <http://www.hfm.tugraz.at/>. [Funnet 27 01 2017].

- [44] «Waterpower Laboratory,» NTNU, [Internett]. Available: <https://www.ntnu.edu/>. [Funnet 3 Februar 2017].
- [45] «F1 Complete fluid Mechanics Laboratory,» Armfield Limited, [Internett]. Available: <http://discoverarmfield.com>. [Funnet 5 Februar 2017].
- [46] «FM6X Turbine Service Unit,» Armfield Limited, [Internett]. Available: <http://discoverarmfield.com>. [Funnet 4 Februar 2017].
- [47] «FM63 Propeller Turbine,» Armfield Limited, [Internett]. Available: <http://discoverarmfield.com>. [Funnet 4 Februar 2017].
- [49] «Welcome to Veekay Industries,» Veekay Industries, [Internett]. Available: <http://www.veekayindustries.org/>. [Funnet 5 Februar 2017].
- [52] «Ofte stilte spørsmål om avløp,» Norsk Vann, [Internett]. Available: [www.norskvann.no](http://www.norskvann.no). [Funnet 29 03 2017].
- [53] «Weirs - Open Channel Flow Rate Measurement,» Engineering toolbox, [Internett]. Available: <http://www.engineeringtoolbox.com/>. [Funnet 9 Februar 2017].
- [54] «Turbine Flowmeter Technology,» Universal Flow Monitors, [Internett]. Available: <http://www.flowmeters.com/>. [Funnet 7 Februar 2017].
- [55] «Clamp-on ultralyd prinsipp,» Flow-Teknikk, [Internett]. Available: <http://www.flow.no>. [Funnet 10 Februar 2017].
- [56] «How do I measure the flow rate?,» CAT, [Internett]. Available: <http://info.cat.org.uk>. [Funnet 9 Februar 2017].
- [57] «Flow Technology,» Odeals Plus Company Limited, [Internett]. Available: <http://www.odealsplus.com/>. [Funnet 10 Februar 2017].
- [58] «Ultrasonic Flow Meters,» Mitchell Instrument Company inc., [Internett]. Available: <http://www.mitchellinstrument.com>. [Funnet 11 Februar 2017].
- [59] H. Ormestrand, «manometer,» STORE NORSKE LEKSIKON, 14 Februar 2009. [Internett]. Available: [www.snl.no](http://www.snl.no). [Funnet 15 Februar 2017].
- [60] «Manometers, Accessories:,» Dungs Combustion Controls, [Internett]. Available: <https://www.dungs.com>. [Funnet 11 Februar 2017].
- [61] «Bar30 Pressure Sensor Documentation,» Blue Robotics, [Internett]. Available: <http://docs.bluerobotics.com>. [Funnet 12 Februar 2017].
- [62] M. Deville, «Arduino board UNO,» GrabCAD, [Internett]. Available: <https://grabcad.com/>. [Funnet 10 April 2017].
- [63] «LCD Module with Serial Interface,» GrabCAD, [Internett]. Available: <https://grabcad.com/>. [Funnet 10 April 2017].

- [65] «7 Steps to a shiny porcelain finish on ABS parts with acetone,» Airwolf3D, [Internett]. Available: <https://airwolf3d.com>. [Funnet 10 Mars 2017].
- [66] «Effects of Acetone on Plastic,» Seattle Pi, [Internett]. Available: <http://education.seattlepi.com>. [Funnet 20 April 2017].
- [68] «Problems Gluing Laser Cut Acrylic,» Artifacture, [Internett]. Available: <https://www.artifacturestudios.com/>. [Funnet 18 Mars 2017].
- [70] «Arduino UNO & Genuino UNO,» Arduino, [Internett]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Funnet 14 April 2017].
- [71] «5V 0-1.2 MPa Pressure Transducer Sensor Oil Fuel Diesel Gas Water Air Sensor,» Banggood, [Internett]. Available: <http://www.banggood.com/>. [Funnet 17 April 2017].
- [72] «LCD Displays (Blue and Yellow) with I2C/TWI Interface,» <https://arduino-info.wikispaces.com/>. [Internett]. [Funnet 15 April 2017].
- [73] «Arduino!,» Jody Culkin, [Internett]. Available: <http://www.jodyculkin.com>. [Funnet 10 April 2017].
- [74] «LCD-I2C Analog input/output displayed,» Fritzing, [Internett]. Available: <http://fritzing.org/>. [Funnet 10 April 2017].
- [75] «Connection and Programming of SKU237545 Pressure Sensor,» Youtube, 14 April 2016. [Internett]. Available: <https://www.youtube.com/>. [Funnet 5 April 2017].
- [76] «Acetone,» PubChem, [Internett]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>. [Funnet 14 April 2017].
- [77] «Luftrykk,» Store norske leksikon, [Internett]. Available: [www.snl.no](http://www.snl.no). [Funnet 10 05 2017].
- [78] «Badu 42/9,» Speck Pumpen, [Internett]. Available: [www.speck-pumps.com](http://www.speck-pumps.com). [Funnet 30 Mars 2017].





Norges miljø- og biovitenskapelig universitet  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway