



# CHALMERS

---

## **Mikro-vattenkraft - för det smarta elnätet i framtida städer**

Examensarbete inom högskoleingenjörsexamen, Maskinteknik

Kevin Vilhjalms  
Axel Hjelm

**Mikro-vattenkraft**

För det smarta elnätet i framtida städer

Kevin Vilhjalmsen, Axel Hjelm

© Kevin Vilhjalmsen, Axel Hjelm, 2019.

Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Sweden

Telephone +46 (0)31-772 1000

Göteborg, Sverige 2019

## Förord

Denna rapport är det sammanställda resultatet av ett examensarbete utförd på institutionen för mekanik och maritima vetenskaper på Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet omfattar 15 HP av en högskoleingenjörsexamen i maskinteknik som genomfördes under våren 2019 hos ÅF Pöyry.

Vi vill börja med att tacka Lisa Damberg och Mårten Janz från ÅF Pöyry för möjligheten att utföra vårt examensarbete hos dom, samt det stöd och den handledning vi givits under arbetets gång. Vidare har detta arbetet gett oss en bättre inblick i hur ingenjörsyrket bedrivs. Slutligen vill vi tacka vår examinator Mats Andersson och övrig personal från Chalmers Tekniska Högskola som hjälpt till under arbetet och utbildningens gång.

Kevin Vilhjalmsen & Axel Hjelm, Göteborg maj 2019.

## Sammanfattning

Den starka tillväxten inom förnybar energiproduktion under de senaste åren har gett upphov till nya utmaningar för hantering och distribution av elenergin i Sverige. Vidare har denna öppnat upp en ny väg inom energimarknaden då konsumenterna numera kan sälja egenproducerad el. För att säkerställa en god driftsäkerhet i nätet krävs att man håller en god effektbalans, nämligen att lika mycket energi som konsumeras även måste produceras. Med en ökande andel intermittent energiproduktion, genom vindkraft och solenergi, och en varierande energikonsumtion bland konsumenterna krävs ett smart elnät som håller koll på effektbalansen i systemet. Ytterligare krävs att man på ett kostnadseffektivt sätt kan lagra energin som produceras vid produktionstoppar för att kunna distribuera denna under höga konsumtionstoppar.

Då energin från vattenkraft idag främst produceras genom centraliserade anläggningar som är direkt uppkopplade till stamnätet, är denna teknik inte lika aktuell när man diskuterar smarta elnät. För att säkerställa systemets tillförlitlighet är en bred kollektion av energikällor viktiga, inte minst gällande förnybara källor ty osäkra meteorologiska fluktuationer. Marknaden för mikro-vattenkraft är växande, men är i nuläget relativt begränsad.

Mikrovattenkraft definieras som system som utnyttjar hydrologiska flöden för att producera elektricitet med ett effektspann från 5kW till 100kW. Variationen av system beror primärt av att tryck och flöde varierar mycket beroende på appliceringsplats. Det som skiljer dem åt är då utformning av turbiner och hur vattnet leds in på ett effektivt sett i turbinen. Därefter med generator, elektronik och frekvensomvandlare ser alla systemen mycket likartade ut.

Ett potentiellt utvecklingsområde för mikro-vattenkraft i framtida städer är hantering av dagvatten som en del av klimatanpassningsarbetet mot översvämningar. Det centrala i ett sådant system skulle vara konstgjorda vattenreservoarer vilket även kan agera som ett energi lager för intermittent energi vid produktionstoppar. Här skulle pumpstationer omvandla elenergi till potentiell energi som sedan kan användas som en reglerbar källa vid höga konsumtionstoppar. På så vis kan man minska behovet av batteribankar vilket i nuläget inte är kostnadseffektivt. I och med att systemet är multifunktionell, kommer värdet för ett sådant system vara hög.

## Summary

The growth in renewable energy production in recent years has given rise to new challenges for management and distribution of energy in Sweden. Furthermore, this has opened a new path in the energy market, as consumers nowadays can sell self-produced energy. To ensure a good operational reliability in the power grid system, it is necessary to maintain a good power balance, namely that as much energy that is consumed must also be produced. With an increasing proportion of intermittent energy production, through wind power and solar energy, and a varying energy consumption among consumers, a smart grid is required that keeps track of the power balance in the system. Furthermore, it is required that the energy produced at production peaks can be stored in a cost-effective manner in order to be able to distribute it during high consumption peaks.

Since the energy from hydropower is mainly produced through centralized plants that are directly connected to the main grid, this technology is not as relevant when discussing smart grids. To ensure the reliability of the system, a broad collection of energy sources is important, not least for renewable sources, due to uncertain meteorological fluctuations. The market for micro-hydropower is growing, however is currently limited.

Micro hydro power is defined as systems that utilize hydrological flows to produce electricity with a power span from 5kW to 100kW. The variation of systems depends primarily on the fact that pressure and flow vary greatly depending on the application site. Those who distinguish them are then the design of turbines and how the water is led in an efficient way in the turbine. Then, however, the generator, electronics and frequency converter all look very similar.

A potential development area for micro-hydropower in future cities, is the management of rainwater as part of the climate adaptation work against floods. The central part of such a system would be artificial water reservoirs, which can also act as an energy layer for intermittent energy at production peaks. Here would pump stations convert electrical energy into potential energy, which can then be used as a controllable source at high consumption peaks. In this way one can reduce the need for battery banks, which at present is not cost-effective. Since the system is multifunctional, the value of such a system will be high.

## Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte.....	2
1.3 Avgränsningar.....	2
1.4 Precisering av frågeställning.....	2
2. Teoretisk Referensram.....	3
2.1 Energi.....	3
2.1.1 Förnybara energikällor.....	3
2.1.2 Energikonsumtion i Sverige.....	3
2.1.3 Klimatet i Sverige.....	5
2.1.4 Det traditionella elnätet.....	6
2.2 Vattenkraft.....	8
2.3 Strömningsmekanik.....	8
2.3.1 Interna flöden.....	9
2.3.2 Kanalströmning.....	11
3. Metod.....	12
3.1 Problemdefinition.....	13
3.2 Analytisk planering.....	13
3.3 Informationsinsamling och utvärdering.....	14
4. Mikro-Vattenkraft.....	15
4.1 Turbiner.....	15
4.1.1 "Impulse".....	16
4.1.2 "Reaction".....	16
4.1.3 Övrigt.....	16
4.2 Verksamma mikro-vattenkraftssystem.....	17
4.2.1 Run-of-River.....	17
4.2.2 Rörintegrerad konstruktion.....	18
4.2.3 Damning.....	18
4.2.4 Övrigt.....	19
4.2.5 Artificiella flöden.....	19
4.3 Miljö.....	19

4.3.1 Utsläpp.....	19
4.3.2 Ekologi.....	20
4.4 Juridik .....	21
4.5 Ekonomi .....	21
5. Smart Grid – Det smarta elnätet.....	22
5.2 Fallstudie – Simris.....	24
5.2.1 Intervjuformulär.....	25
6. Slutledning och diskussion.....	28
7. Slutsats.....	29
7.1 Rekommendationer .....	31
Referenser.....	33
Bilagor.....	36

## Beteckningar

MWh	Megawattimmar
kW	Kilowatt
kV	Kilovolt
Hz	Hertz
kg	Kilogram
m	Meter
s	Sekund
l	Liter
Pa	Pascal
°C	Grader Celsius
gCO <sub>2</sub> eq./kWh	Gram-koldioxidekvivalenter per kilowattimme global
kr	kronor (svenska)

# 1 Inledning

Under detta inledande kapitel kommer det som arbetet innefattar att presenteras i form av dess bakgrund, syfte, arbetets avgränsningar samt en precisering av frågeställningen.

## 1.1 Bakgrund

I en allt växande och mer sammankopplande värld spelar storstäderna en ökande roll i samhället. Med en allt växande global medelklass och en mer energiberoendelevnadsstandard kommer trycket på dessa städer att öka, inte minst gällande den ekologiska-, sociala- och ekonomiska hållbarheten. Klimatförändringarna är idag mycket aktuellt och är en grund till stor del av samhällsutvecklingen. Det finns idag en aspiration om ett fullt förnybart energisystem för att hantera klimatutvecklingens påverkan på samhället.

Strävan mot att omvandla hela energiproduktionen till förnybara källor har öppnat upp vägen till en ny energimarknad där konsumterna numera kan producera och därpå sälja överflödigt energi. Vad man benämner som det traditionella elkraftnätet saknar i sin tur den fulla egenskapen att hantera denna utväxlingen av el; dagens elkraftnät är ”endimensionell” i den form att energi primärt är enkelriktad från producent till konsument. För att dra nytta av denna nya möjligheten för konsumenterna krävs ett smart elnät – ”Smart Grid”. Då vattenkraft främst har en storskalig central elproduktion är den idag inte lika aktuell som vindkraft och solenergi när man diskuterar små lokala elnät. Genom att skala ner systemen är det enklare att tillämpa lösningen för mer lokala flöden och olika typer av flöden, vilket bland annat innefattar flöden som är en del av städernas infrastruktur (Vatten- och avloppssystem, ”Va-system”).

Projektet har utförts på ÅF Pöyry och har sin grund i framtidsvisionen om de framtida städerna – *Future Cities* – som för detta arbetet handlar om att göra energiproduktionen närgången och integrerad med nätet. Detta leds av de hållbarhetsmålen gemensamt framtagen av världens ledare under ett möte i den mellanstatliga organisationen *Förenta Nationerna* (FN). Dagligen benämnd som *Agenda 2030*, syftar överenskommelsen till att främja en hållbar samhällsutveckling utifrån 17 globala mål, se figur 1.



Figur 1. De 17 hållbarhetsmålen från Agenda 2030 med betoning på de områden som arbetet berör.

## 1.2 Syfte

Syftet med projektet är att identifiera och kartlägga de aktuella tekniska lösningarna och dess marknad för mikro-vattenkraft, vilket genom en analys skall resultera till utvecklingsmöjligheter vid eventuell vidareutveckling. Med detta som grund kommer den ekologiska påverkan och den ekonomiska hållbarheten att undersökas.

## 1.3 Avgränsningar

Arbetet kommer i sin utsträckning begränsas till urbana miljöer och dess närliggande område för att jobba mot framtidsvisionen "*Future Cities*". Därpå kommer, vid den ekonomiska analysen, en viss populationsgrupp och område väljas ut för att på ett begripligt sätt kunna utreda den ekonomiska hållbarheten.

Vattenkraft inom mikro gruppen kommer att beaktas. Ingen tydlig definition existerar men sattes för detta arbete system med en installerad effekt på <100 kW. Då syftet med arbetet främst berör den tekniska delen, kommer inga större juridiska moment att beaktas. Emellertid kommer vissa juridiska delar att behandlas vid utvärdering, om de skulle vara essentiella. Vidare kommer arbetet utgå från beprövade tekniska lösningar. Slutligen kommer ingen djupgående analys av den sociala hållbarheten att utföras, enbart översiktligt vid behov.

## 1.4 Precisering av frågeställning

Resultatet skall medföra till en lösningsöversikt på existerande mikro-vattenkraft, samt utvecklingsmöjligheter för dessa vid smarta elnätet och den framtida staden vid eventuell vidareutveckling.

Frågeställningar som skall jobbas mot och besvaras:

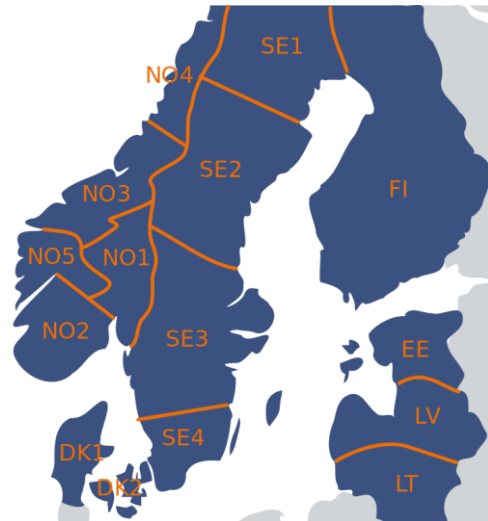
- Hur ser teknikutbudet ut på marknaden för mikro-vattenkraft?
- Med dagens teknik, är mikro-vattenkraft ett lämpligt tillskott för små lokala elnät?
- Hur påverkar de olika systemen den lokala ekologin?
- Vilken/(-a) är den främsta tekniska utmaningen för mikro-vattenkraft gällande implementering i framtida städer och det smarta elnätet?

## 2. Teoretisk Referensram

För att enklare kunna följa med i senare analyser och diskussioner, redogörs de primära beståndsdelarna för arbetet nedan. Detta innefattar en introduktion samt en grundläggande nulägesanalys för att få en bättre inblick inom respektive områden.

### 2.1 Energi

Sveriges kraftnät är sedan 1 november 2011 uppdelat i fyra elområden, se figur 2: SE1 Luleå, SE2 Sundsvall, SE3 Stockholm, SE4 Malmö [1]. Denna uppdelning har medfört att man enkelt kan identifiera och notera utväxlingar mellan områden med ett överskott respektive underskott inom dess energiproduktion. I Sverige utgör den centraliserade vattenkraftproduktionen och kärnkraften den största delen av den totala elproduktionen i landet [2]. Under de senaste åren har elproduktion genom vindkraft ökat kraftigt. Vidare pågår fortsatt utveckling inom fotovoltaiska celler.



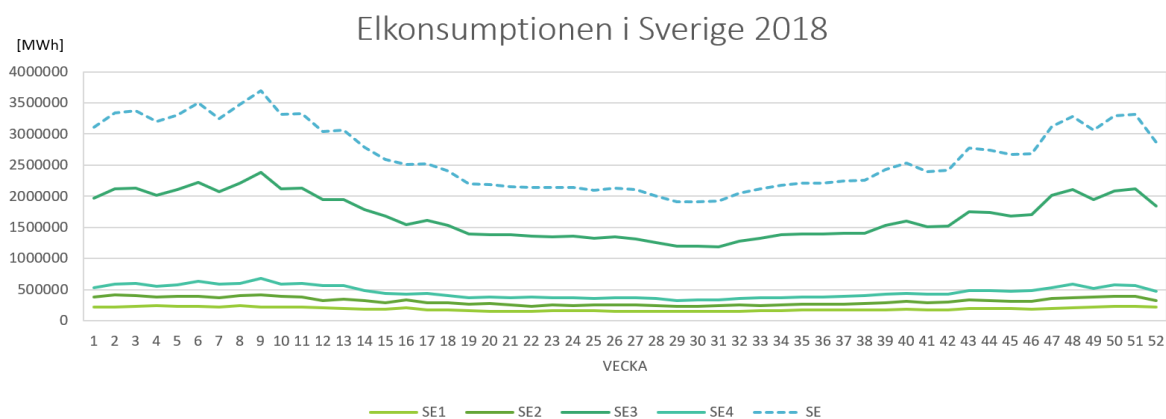
Figur 2. Nordens olika elområden.

#### 2.1.1 Förnybara energikällor

Vad man dagligen benämner som förnybara energikällor innefattar i första hand energi producerat från vatten- och vindkraft samt solenergi. Här är det endast vattenkraft som inte är starkt väderberoende [3]. Energin producerat från vindkraft och fotovoltaiska celler är med andra ord intermittent ty ett varierande meteorologiskt tillstånd. Det är i teorin fullt möjligt att med enbart förnybara energikällor kunna tillgodose världens totala energibehov. Utmaningen är däremot att kunna genomföra denna omställning och kapitalisera denna potential på ett sådant sätt som är ekonomiskt-, ekologiskt- samt socialt hållbart.

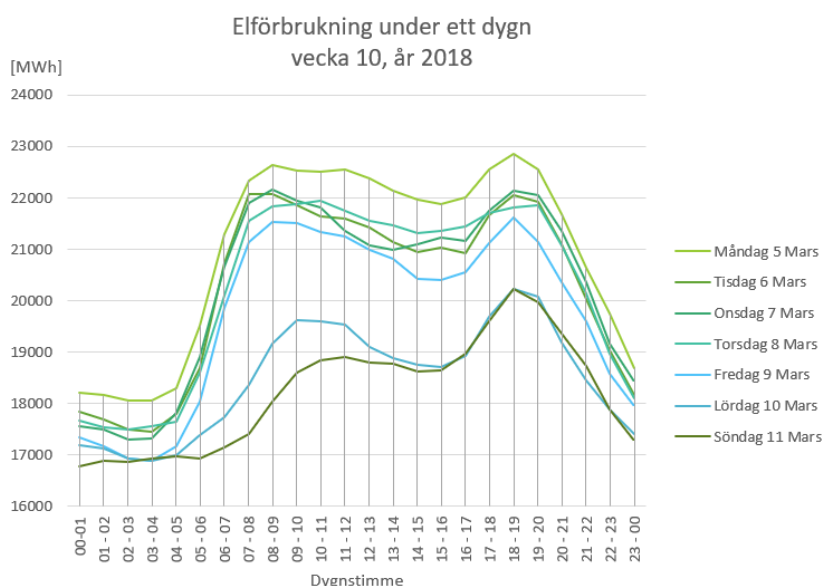
#### 2.1.2 Energikonsumtion i Sverige

Med ett kallt klimat under vinterhalvåret och en bekväm levnadsstandard har Sverige en hög elkonsumtion relativt till resten av världen [4]. Vidare består en stor del av Sveriges totala elkonsumtion av stora elberoende industrier, under 2017 stod industrisektorn för 39% av den totala elkonsumtionen i Sverige [5]. På grund av det växlande klimatet i Sverige skiljer sig konsumtionen mellan olika säsonger. Den främsta bakgrunden till denna variation är ett resultat av uppvärmningsbehovet. Energibehovet under vinterhalvåret är nästintill dubbla det för sommarhalvåret, se figur 3.



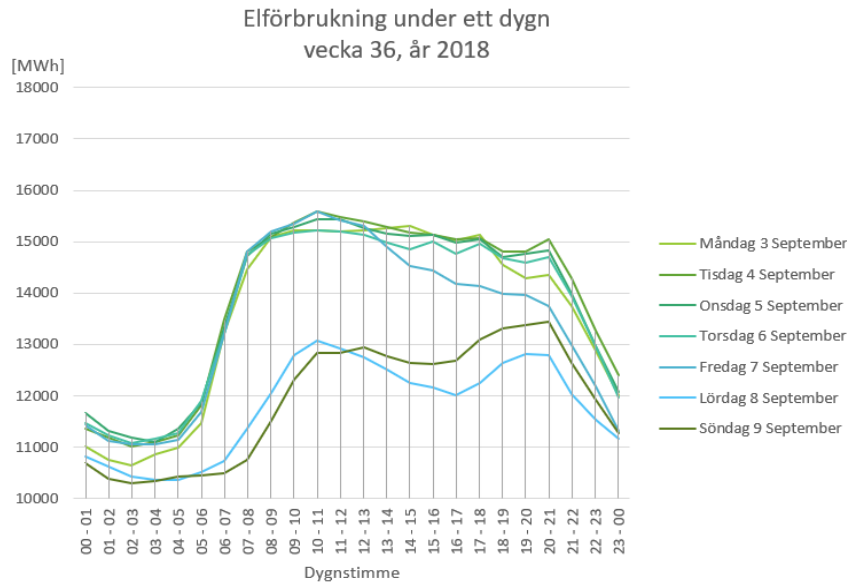
Figur 3. Veckovis varians av elkonsumention i Sverige under 2018, använd data återfinns i bilaga 1 [6].

Konsumtionsprofilen håller trots en säsongsvaryerande konsumtion, en relativt enhetlig form från dag till dag. Detta illustreras nedan i figur 4 och figur 5. Vidare kan man observera hur konsumtionsnivån är starkt kopplad till aktuell dygnstimme.



Figur 4. Elförbrukning under ett dygn under vecka 10, år 2018, använd data återfinns i bilaga 2 [6].

Tidig förmiddag och kväll är den period under dygnet som mest energi konsumeras i Sverige. Den totala elförbrukningen är större under vardagar än helgdagar på grund av en lägre aktivitet inom industrisektorn. Bakgrunden till den förhållandevis höga jämfört med sommarhalvåret, energiförbrukningen under nattimmarna har, som tidigare nämnts, att göra med uppvärmningsbehovet under vinterhalvåret.



Figur 5. Elförbrukning under ett dygn under vecka 36, år 2018, använd data återfinns i bilaga 3 [6].

### 2.1.3 Klimatet i Sverige

Belägen tillräckligt norrut för att ligga inom polcirkeln, existerar ett subarktiskt klimat i norra Sverige. Samtidigt medför jetströmmar i Atlanten till att man i södra Sverige har ett tempererat klimat, något som kännetecknas med att man i dessa områden upplever fyra årstider [7]. Det råder ingen tvekan om att klimatet på jorden håller på att förändras. Vad man däremot inte med säkerhet kan säga är hur exakt detta kommer att påverka klimatet på regional- och lokal nivå [8]. Genom att studera historiska data och analysera förändringar, nämligen klimatindikatorer, kan man däremot fastställa så kallade klimatscenarier. Syftet med dessa scenarier är att beskriva hur klimatet kan komma att förändras och se ut i framtiden. Utifrån dessa resultat kan man i Sverige räkna med både ökad nederbörds mängd och en ökad årsmedeltemperatur relativt till den historiska data [9][10].

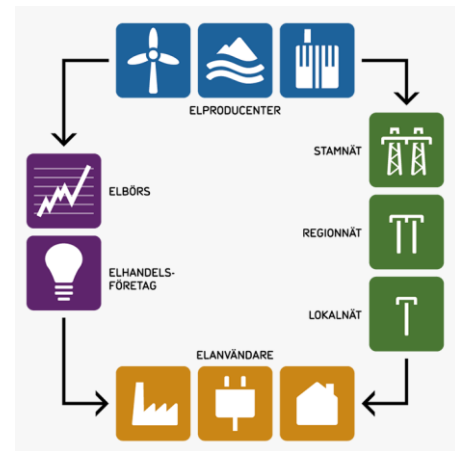
Med klimatscenerierna som grund gäller det att förbereda samhället på de förändringar som inte går att förhindra. Denna typ av förberedelser benämns som klimatanpassningar och syftar till att minimera potentiella kostnader för framtida infrastruktur- och samhällsskador där klimatförändringarna är en del av orsaken [11]. Med en förväntad ökning av nederbörds mängden och stigande vattenytor bör man därav utveckla hållbara system för bland annat hantering av dagvatten för att motverka risken för översvämning. Utöver ett underdimensionerat dagvattensystem är människans påverkan på de naturliga vattendragens hydrologiska och biologiska förhållanden ännu en faktor som ökat översvämningsrisken.

För att kunna motarbeta klimatförändringarnas påverkan på bästa sätt gäller det att identifiera risken och sannolikheten för att, i detta fallet, översvämningar ska inträffa och använda detta som underlag vid utveckling av system. Vid naturliga vattenkällor såsom hav, floder, sjöar och andra vattensamlingar kan man dela in det närliggande området i zoner utifrån risken för översvämning. Här får man kännedom om den lokala översvämningsrisken. Vid nationell- och regional nivå är låg-zoner i en mer utsatt position. Därmed kan man genom att studera

topografin fastställa de mest utsatta regionerna. Samma strategi kan tillämpas för att identifiera lokala låg-zoner vilket, utöver naturliga vattensamlingar, är dagvattnets främsta recipient [11].

### 2.1.4 Det traditionella elnätet

Sverige är ett avlångt land där en stor del av energin kan produceras i de stora älvarna norrut genom centraliserade vattenkraftverk. Samtidigt befinner sig konsumenterna kring storstäderna och dess närområden i södra Sverige. Ett resultat av detta är att det uppstår överskott och underskott inom respektive elområde; SE1 Luleå och SE2 Sundsvall har ett överskott på el, medan SE3 Stockholm och SE4 Malmö har ett underskott [12]. En konsekvens av denna geografiska motsättning är behovet av *stamnätet* för att kunna distribuera energin genom landet. Med detta som grund utgår dagens infrastruktur för energidistribution på en endimensionell strategi, vilket illustreras i figur 6. Med en allt växande marknad inom lokal energiproduktion genom förnybara energikällor, där konsumenterna numera även kan producera och sälja överflödigt energi, är denna lösning inte längre optimal för dagens elmarknad.

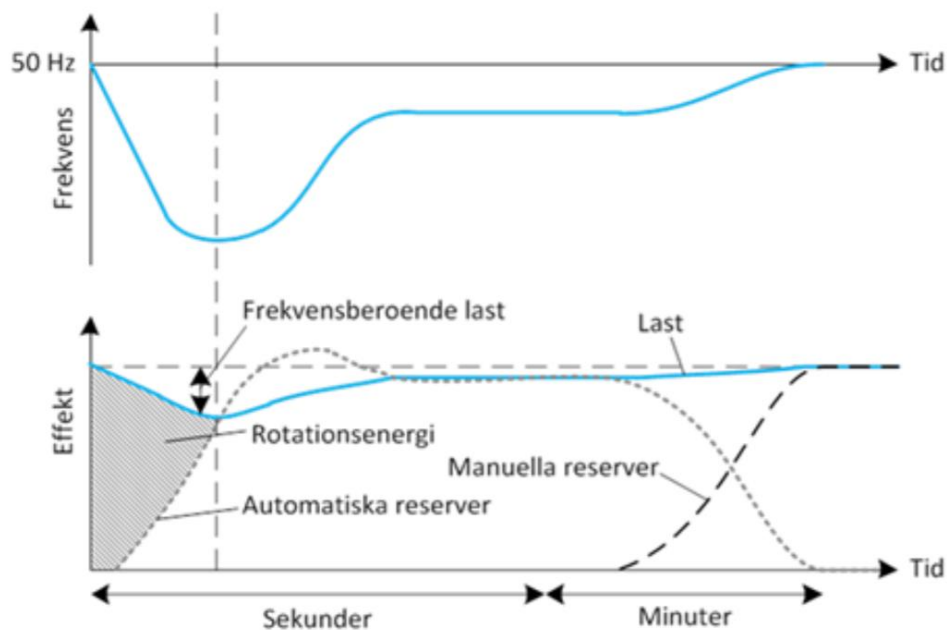


Figur 6. Elens två vägar, den fysiska överföringen och den finansiella vägen [13].

Stamnätet är den del av elkraftnätet som erhåller de högsta nominella spänningarna, vilket enligt ellagen (1997:857) omfattar spänningar som överstiger 220kV. Förutom att binda samman de regionala elnäten, kopplar stamnätet ihop det nationella nätet med grannländernas [14].

Förutom de ekonomiska aspekterna för att expandera nuvarande stamnät, finns det mer tekniska utmaningar gällande elkraftnätets framtid. I det svenska stamnätet vill man hålla frekvensen inom intervallet  $50 \pm 0,1$  Hz. Vidare kan man se avvikelser från det nominella som ett mått på hur väl balanserat nätet är vid givet tillfälle. Vid en ojämnhet mellan produktionen och konsumtionen kommer frekvensen i nätet att ge utslag: ökad frekvens vid högre produktion, vice versa för minskad frekvens [15]. För att kunna hålla denna goda balans krävs reglerbara energikällor som kan anpassas vid höga konsumtionsperioder. I nuläget är det främst centraliserad vattenkraft och kärnkraft som innehar denna egenskap. Egenskapen existerar i dessa system då systemets generatorer går synkront och är direktkopplat till nätet vilket medför en svängmassa – "förändringströghet" [16]. Med sin reglerande effekt är den centraliserade vattenkraften i Sverige således en viktig tillgång för att upprätthålla en god effektbalans i kraftnätet; lika mycket energi som konsumeras måste även produceras [17].

Svängmassan i nätet kan ses som en viss tröghet som ska agera som en buffert vid förändringar. Vid nominell kraftproduktion kommer generatorerna att rotera synkront med nätet, med en frekvens på 50Hz. När frekvensen förändras i nätet innebär det att den producerade energin antingen är större eller mindre än den aktuella konsumtionen. En minskad frekvens innebär, som tidigare nämnts, ett energiunderskott i kraftnätet. Här agerar svängmassan som en tröghet för att motverka en för snabb förändring. Den upplagrade energin som finns i de roterande massorna vid dessa anläggningar kommer då att frigöra energi som en direkt aktion mot en reduktion av dess rotationshastighet. Därefter behöver man återställa rotationshastigheten till det nominella läget – det synkrona varvtalet – genom att låta energin gå in som roterande massa. Man kan därav se svängmassan som energilagrande, se figur 7.

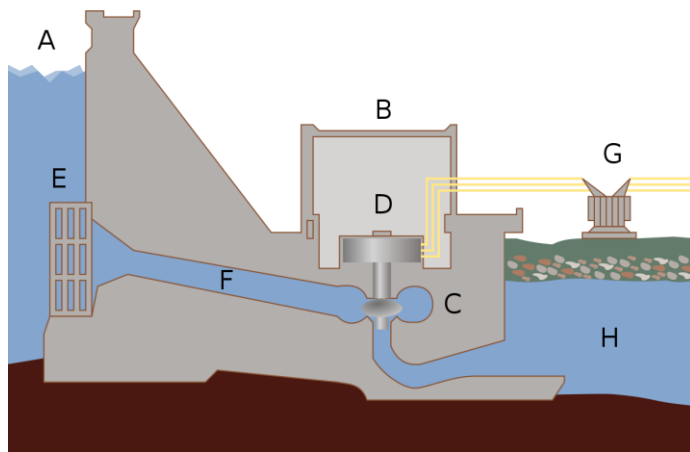


Figur 7. Visar hur rotationsenergin fördröjer frekvensavvikelsen vid en tillfällig obalans [17].

Med en förväntad ökning av förnybara energikällor, därav en större andel intermittent kraftproduktion, och en förminskning av tillgänglig svängmassa i systemet, vilket är en konsekvens av utfasning av kärnkraftsreaktorer, kommer problemet att förstärkas. För att klara denna utmaning behöver man se över det nuvarande elkraftnät och utveckla system för att hantera den volatila konsumtionens påverkan på driftsäkerheten. Det pågår studier inom området för att bland annat ta reda på hur liten svängmassan kan låtas bli innan det skulle få extrema konsekvenser. Man försöker även utveckla system som likaledes kan agera som svängmassan, genom artificiella svängmassor, alternativt batterier som kan både lagra överproducerad energi, samtidigt som den omvandlar frekvensen och reglerar effektbalansen för att sedan skicka ut det till nätet. System som använder sig av batterier för detta ändamål är ännu inte beprövade i en större utsträckning, men förväntas bli mer aktuellt i framtiden vid fortsatt utveckling [16].

## 2.2 Vattenkraft

Vattenkraften i Sverige är väl utbyggd med sin installerade effekt på drygt 16200 MW [18]. Den producerar också en mycket stor del av Sveriges totala elproduktion då 65 TWh av totalt 169 TWh vilket är cirka 40% [19]. Det finns cirka 1800 vattenkraftverk i Sverige varav 200 som är större än 10 MW. Många av dessa finns i älvarna i Norrland vilket gör att 80% av vattenkraftselekticiteten kommer där ifrån. Vattenkraft är på grund av magasinet reglerbar då vattnet kan bevaras och användas när behovet är som störst. Figur 8 visar en simplifierad illustration över ett vanligt vattenkraftverk.



A: Damm/magasin

B: Kraftstation

C: Turbin

D: Generator

E: Skyddsgaller

F: Inloppskanal/rör

G: Transformator

H: Utlopp

Figur 8. Överskådlig bild över traditionella vattenkraftanläggningar [20].

## 2.3 Strömningsmekanik

Vid analys av allsköns flöden är *Termodynamikens första lag* en central beståndsdel att tillämpa. Mer känd under beskrivningen *bevarande av energi; energiprincipen*, vilket i sin essens säger att energi varken kan skapas eller förstöras, enbart ändra sin form. Det är därav viktigt att man vid analys tar hänsyn till alla energiformer [21].

Ytterligare en viktig parameter är flödets karaktäristik, det vill säga om flödet kan anses vara laminärt eller turbulent. Vid laminär strömning är flödet jämnt, medan för turbulent existerar ett mer oordnat tillstånd. Denna karaktäristik bestäms av en dimensionslös storhet, Reynoldstalet, vilket kan beräknas med ekvation (1) [21].

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \quad (1)$$

Re: Reynolds tal [-]

$\rho$ : Fluidens densitet [kg/m<sup>3</sup>]

V: Flödeshastighet [m/s]

$D_h$ : Hydraulisk diameter [m]

$\mu$ : Dynamisk viskositet [Ns/m<sup>2</sup>]

Den hydrauliska diametern bestäms genom ekvation (2), som för cirkulära rör resulterar till att  $D_h = d$ .

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{p} \quad (2)$$

$A_c$ : Tvärsnittsarean [ $m^2$ ]

$p$ : Fluidens kontaktperiferi [m]

Då tillståndet anses vara turbulent och rören släta gäller:

$$Re < 10^5 \quad f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (3)$$

$$10^5 < Re < 10^8 \quad f = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237} \quad (4)$$

$$h_{L,total} = h_{L,major} + h_{L,minor} = \sum f_i \frac{L_i}{D_i} \cdot \frac{v_i^2}{2g} + \sum K_{L,j} \frac{v_j^2}{2g} \quad (5)$$

$h_L$ : tryckhöjdsförlust [m]

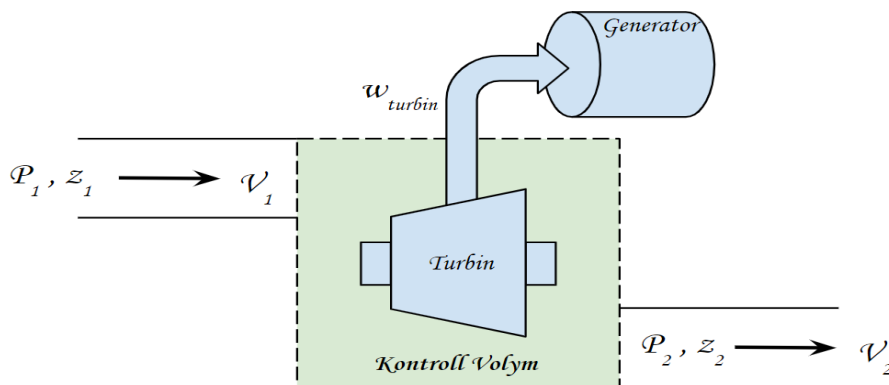
$f$ : Darcy friction factor

$K_L$ : Engångsförluster (ex. Geometriska förändringar)

För mikro-vattenkraft är det primärt två strömningstyper som är vanligt förekommande: Interna flöden i rörsystem och kanalströmning, öppna såväl som stängda.

### 2.3.1 Interna flöden

En intern strömning är ett flöde vars fluid är helt omsluten av en fast yta, vilket vanligast framkommer i form av rörsystem. På grund av denna omslutning kan fluidens flöde ändras med hjälp av tryckökning vederbörligen tryckminskning. Vid grundläggande utvärdering kan man anta ett stationärt flöde och med hjälp av en tillämpning av energiprincipen analysera flödet. I ekvation (1) nedan är termerna uttryckta per massenhet. I figur 9 kan man se de olika termerna i ett system. Vid en analys där flödet inte kan antas vara stadigt måste förloppet beskrivas som en funktion av tiden.



Figur 9. Illustrering av ingående parametrar för ett internt flöde med en turbin.

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 + w_{pump} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + w_{turbin} + e_{mek.förlust} \quad (6)$$

Med  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ ,  $w_{pump} = 0$  fås:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + w_{turbin} + e_{mek.förlust} \quad (7)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (8)$$

### 2.3.1.1 Vatten- och Avloppssystem

I Sverige omfattas vattenledningsnätet<sup>1</sup> vara uppskattningsvis 194 000km. År 2012 var dricksvattenssystemet i Sverige 70 000km långt, varav uppskattningsvis hälften anlades före årsskiftet 1972. Med en livslängdsspan på 50-100år, förnyas enbart 0,5% av vattenledningsnätet årligen. För avloppssystemet är denna siffran 0,4% [22]. Bakgrunden här är i första hand att nätet inte längre är brukbar<sup>2</sup>, samt behovet av omkonstruktion av infrastrukturen [23]. För att kunna hantera behovet av underhåll av nätet bör förnyelsetakten uppgå till 0,7% för vattenledningsnätet, och 0,6% för avloppssystemet. Vidare anser Svenskt Vatten att systemets livslängd bör uppnå en nominell livslängd på 100-150år [22]. Det är därav viktigt att man på ett effektivt och tillförlitligt sätt kan lokalisera eventuella defekter i systemet. En del av detta arbete kretsar kring mätning<sup>3</sup> av storheter såsom tryck, temperatur och flöde [22].

Med en aktuell klimatförändring, vilket för Sverige innebära ett förändrat regnmönster, kommer högre krav ställas på dessa system, för att kunna motverka risken för översvämningar, i framtiden. Således är det viktigt att man utformar framtida ledningsnät med hänsyn till framtidens olika förutsättningar. I Göteborgs stad anses hantering av dag- och avloppsvatten (underhåll av nuvarande system), och skyfallshantering som högt prioriterande som innovationsutmaningar [24].

I dag sker mycket av arbetet inom vattenledningsnätet på lokal nivå, vilket medför att utformningen av systemet skiljer sig från område till område. Något som efterfrågats av många kommuner är en mer standardiserad utformning på nationell nivå genom bland annat nationella rekommendationer från myndigheter [23]. Genom att sammanställa kunskapen inom va-systemen kan felaktigheter enklare identifieras och systemet kan därpå förbättras [22].

I varje vattenledningssystem förekommer minst en tryckzon. En region kan med andra ord delas in i tryckzoner. I varje zon kontrolleras trycket av minst en anordning som har till uppgift att reglera trycket. Det finns tre anordningar som är vanligt förekommande: pumpstationer, tryckreducerande stationer och vattenreservoarer. Lokala regioner som använder sig av pumpstationer benämns högtryckzoner, medan de med tryckreducerande stationer benämns som lågtryckzoner [25].

<sup>1</sup> För hantering och distribution av dricks-, spill- och dagvattenledningar.

<sup>2</sup> Då systemet levat ut sin livslängd, eller att skador uppkommit.

<sup>3</sup> Genom sensorer som följer fluiden i realtid.

### 2.3.2 Kanalströmning

En kanalströmning innefattar flöden som till viss del, men inte helt, omsluts av en solid yta. Större delen av de naturliga flödena och öppna artificiella flöden är därtill inom kategorin kanalströmning. Gemensamt för alla dessa flöden är att den främsta drivkraften är gravitation, till skillnad från vissa interna flöden som kan få andra strömningsmekaniska egenskaper genom bland annat tryckförändringar. För naturliga flöden gäller platsspecifika storheter såsom vattenflödet och fallhöjder.

Ekvationen nedan är en välanvänd formel vid beräkningar hos vattenkraftverk [26].

$$P_{(t)} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{(t)} \cdot (h - h_L) \cdot \eta}{1000} \quad (9)$$

$P_{(t)}$ :	Energiproduktion [kW]
$\rho$ :	Vattnets (fluidens) densitet $\sim 999,1$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$ :	Tyngdacceleration $9,81$ [m/s <sup>2</sup> ]
$Q_{(t)}$ :	flödes hastighet [m <sup>3</sup> /s]
$h$ :	Hydraulisk fallhöjd [m]
$h_L$ :	Tryckfall i systemet [m]
$\eta$ :	Systemets verkningsgrad [-]

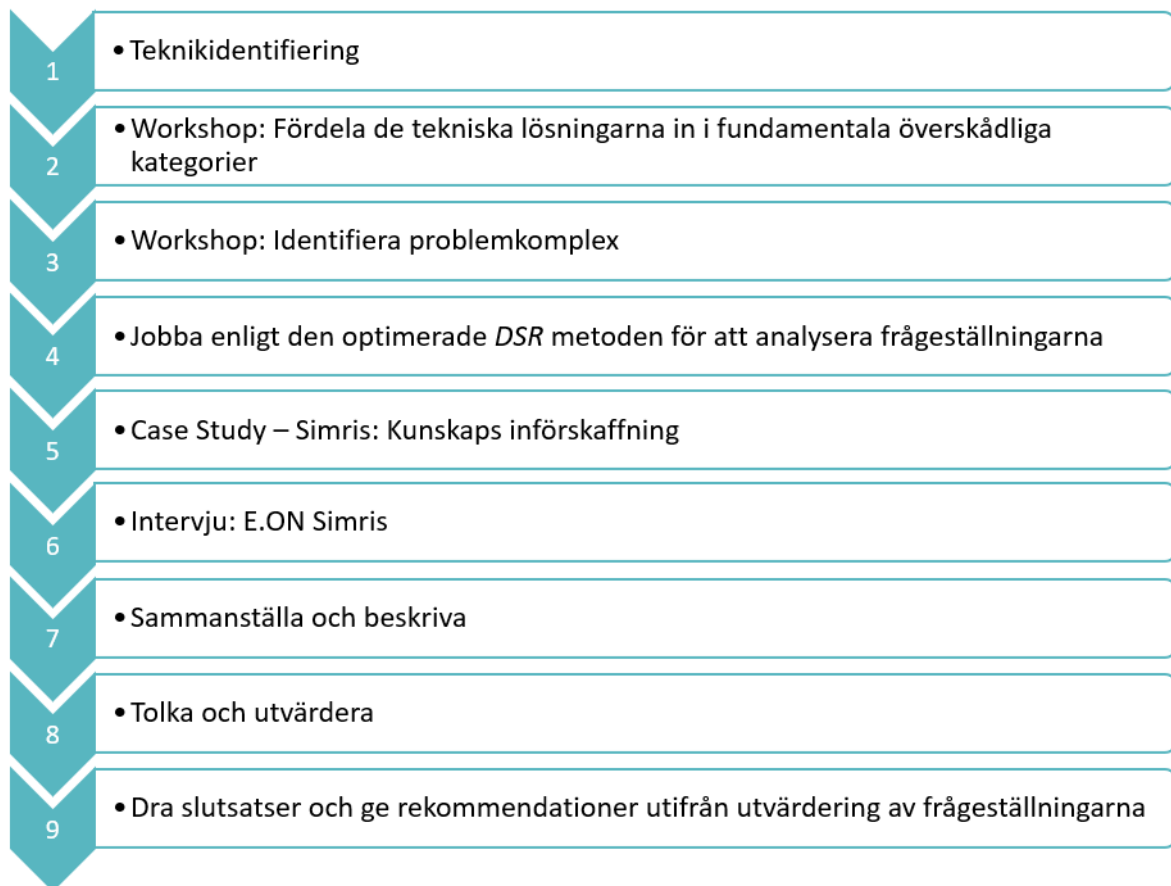
Tryckfall innefattar förluster via friktion i rören, krökningar i systemet och eventuella installerade objekt såsom skräpfångare och dammluckor.

För att beräkna den totala elproduktionen för systemet inom given tidsram adderas energiproduktionen, som beräknats med hjälp av ekvation (4), vid varje tidssteg. Beroende på anläggningens storlek och livslängd kan tidsstegen variera [26].

$$E(t) = \int_0^t P(t) \cdot dt \quad (10)$$

### 3. Metod

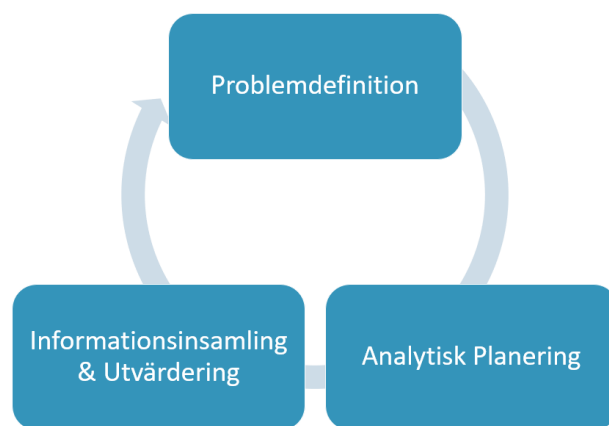
Då målet med projektet är att identifiera, kartlägga och slutligen analysera ett givet område och teknik, användes en ingenjörspanpassad<sup>4</sup> version av *Design Science Research (DSR)* metoden. Kontentan med DSR är att införskaffa en bred kännedom och vetskap inom givet område för att vidareförmedla informationen och resultatet till väl insatta intressenter [27]. Arbetet är därmed en täckande granskning för att beskriva, förklara och utvärdera givet område. Med andra ord är detta projekt en del av det inledande arbetet vid produktutveckling. På grund av områdets omfattning relativt till projektets, avgränsas därav projektet till just det inledande förarbetet i produktutvecklingsprocessen för att i ett längre perspektiv säkerställa goda resultat för arbetet. Målet är att arbetet ska användas som underlag vid eventuella vidareutvecklingar. På grund av projektets syfte och struktur valdes det att optimera metoden till att i första hand använda metodens tanke-system. Nedan följer en överskådlig beskrivning över hur arbetet utformades, se figur 10.



Figur 10. Visar hur projektet fullständiga kronologi

<sup>4</sup> Metodologin tillämpas främst inom datateknik.

Metodens utformning<sup>5</sup> bygger på en sekvens av dialoger, med experter inom respektive områden, och litteraturstudier som ska resultera till en iterativ *produkt*<sup>6</sup>. Processen sker i cykler där den iterativa produkten hela tiden utvecklas. Med en bredare vetenskap inom området kan produkten hela tiden utvecklas och en bättre förståelse över problemet kan fås; principen är att hela tiden utveckla och utvärdera. I detta projekt förenklades cykeln till tre konkreta steg: problemdefinition, analytisk planering samt informationsinsamling och utvärdering, se figur 11.



Figur 11. Schematisk beskrivning över metoden.

### 3.1 Problemdefinition

I början av varje cykel gäller det att identifiera möjliga problemkomplex som skall undersökas och sedan utvärderas. Inledningsvis görs detta genom brainstorming men övergår senare till observationer i föregående cykler; man bygger vidare på den initiala brainstormingen. Parallellt med brainstormingen fastställs *produktens* definitionsramar för att säkerställa att *produkten* alltid utvecklas mot att besvara frågeställningarna. När ett område och därtill ett problemkomplex är fastställt behövs en tydlig beskrivning över vilken information som behövs, varför den behövs och om den bör vara kvantitativ eller kvalitativ.

### 3.2 Analytisk planering

Utifrån problemdefinitionen gäller det nu att upprätta en analysplan. Denna har som syfte att på bästa sätt ta reda på rätt information för att kunna utvärdera och svara på projektets frågeställningar. Under detta segment ska alltså en plan upprättas för hur vidare informationen ska införskaffas. De främst tillämpade metoderna innefattar här:

- Rapport- och litteraturstudie
- Analys av historisk- och scenariodata
- Dialoger med insatt person

Analysplaneringen sker delvis parallellt med informationsinsamlingen och kan vid behov korrigeras under nästkommande steg. Under detta steg gäller det även att identifiera kontaktpersoner om en dialog med en insatt person är önskvärd.

---

<sup>5</sup> Den optimerade versionen

<sup>6</sup> Här kan *produkt* anses vara resultatet av varje sekvens; en kunskapsram inom området, alltså inte nödvändigtvis en fysisk produkt.

### 3.3 Informationsinsamling och utvärdering

När en plan börjar ta form kommer informationssökningen att börja. Här gäller det att följa sin analysplan för effektivt införskaffa information. Vidare ökas sannolikheten att informationen är användbar vid senare utvärdering. Då analysplanen baserades på dialoger med insatta aktörer upprättades ett frågeformulär. Som bakgrund till frågeformuläret genomfördes en förstudie inom området i fråga.

Efter att analysplanen är fullföljd gäller det att sammanställa all införskaffad information. Därefter kan den analytiska delen av arbetet påbörjas vilket i sin grund går ut på med hjälp av sin *produkt* jobba med att besvara frågeställningarna. Nu gäller det att tolka resultatet, dra slutsatser och presentera det i ett greppbart format. Denna redovisning representerar nu i sin tur den iterativa *produkten* och cykeln återupprepades tills att frågeställningarna kunde besvaras utförligt med hjälp av *produkten*.

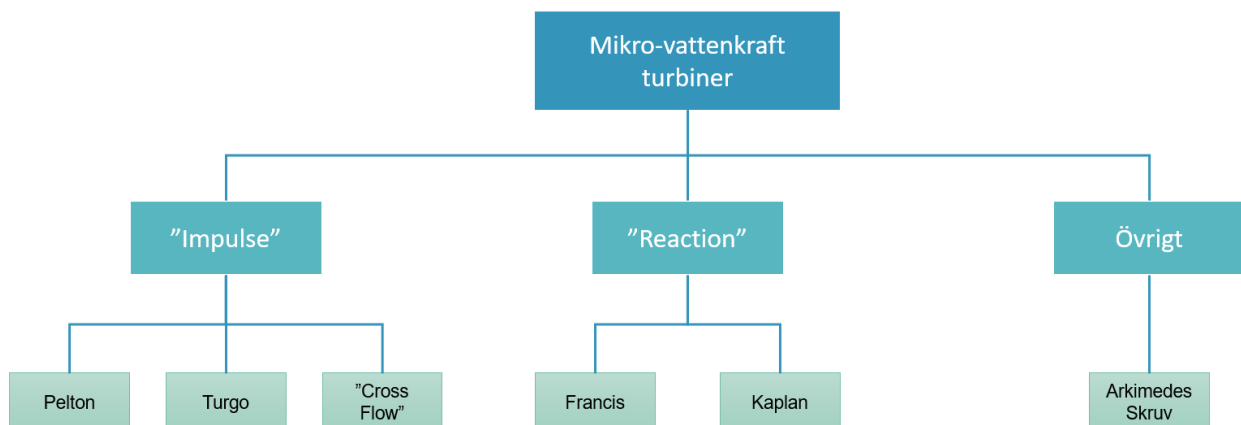
## 4. Mikro-Vattenkraft

Mikro-vattenkraft är definierat av dess effekt som den maximalt kan generera och gränserna är inte helt standardiserade, men i Sverige behandlar man system med en installerad effekt på 5–100 kW som mikro [28]. Dessa kraftverk har väldigt olika utformning beroende på applikation. De största variablerna som spelar in är tryck och flödesmängd. Dock finns det system som inte vill utnyttja hela flödet, utan snarare enbart vill utvinna energi från för högt tryck i rör. De tekniska lösningarna delas in i två generella hydrologiska kategorier: Interna flöden i rörsystem och kanalströmning, öppna såväl som stängda.

### 4.1 Turbiner

Det främsta som skiljer de olika systemen från varandra är dess turbin. Det finns ett utbud på flertalet olika turbiner som har olika applikationer och karakteristiker. Dessa kan delas upp i två olika grupper då de skiljer sig åt på en fundamental nivå. Indelningen är *“Impulse”* som beskrivs bäst som rörelse-utnyttjande, samt *“Reaction”* som beskrivs bäst av tryck-utnyttjande, se figur 12. Skillnaden är att i en rörelse-utnyttjande turbin, riktas vattnet med hjälp av jetmunstycken mot turbinen som sedan roterar av att den blir träffad av jetstrålen. Turbinen omvandlar alltså vattnets hastighet till mekanisk energi. Tryck-utnyttjande turbinen fungerar så att vattnet går igenom turbinen vilket ger turbinen ett moment och då är det tryckskillnaden mellan före och efter turbinen som ger upphov till en ström [29].

Turbiners verkningsgrad varierar en del men det viktiga är att en turbin skall klara av olika flöden och inte endast maxflödet. Detta visas i Bilaga 4 och där syns att de olika turbintyperna har relativt liknande verkningsgradkurva men vissa turbiner är mer lämpade vid flöden som är mer stabila. Bilaga 4 kan inte garanteras vara exakt då det finns kurvor med samma funktion som visar andra värden [30].



Figur 12. Visar den fundamentala uppdelningen av mikro-vattenkraftsturbiner.

#### 4.1.1 "Impulse"

Pelton-turbin är den turbin som lämpar sig bäst för högt tryck och lågt flöde. Tekniken kan ha en eller flera munstycken som är riktade mot ett hjul i vinkelrät riktning mot axeln riktning. Jetstrålen är riktad så att den skall tangera hjulet och ge det ett moment. Hjulet är utformat så att jetstrålen skall delas upp i två och sedan går längs en halvcirkel och vänder 180 grader, det gör att maximalt av energin går åt till att snurra turbinen [29].

Turgo-turbinen är lämpad för något lägre tryck men fortfarande lågt flöde. I turbinhuset sitter jetmunstycken som riktas mot hjulet men till skillnad från Pelton turbinen så riktas jetstrålen så att vattnet skall genomgå turbinen i axiell riktning. Dvs att jetstrålen är parallell med turbinaxeln eller att den är vinklad fast fortfarande parallell med turbinaxeln [29].

Crossflow har inte en jetstråle direkt men den har ett munstycke som är riktat i tangentiell riktning mot turbinen. Munstyckets tvärsnittsarea är kvadratisk och större så mängden vatten är större och hastigheten lägre. Vattnet flödar in mot mitten som är ihålig förbi turbinbladen och sedan går igenom turbinbladen ytterligare en gång då vattnet skall ut från turbinen [29].

#### 4.1.2 "Reaction"

Francisturbinen är den tryck-utnyttjade turbinen som är lämpad för högst tryck och lägst flöde. Den fungerar så att vattnet leds in likt en vortex vinkelrätt in mot turbinens axel. Detta görs genom att man formar rören likt en inåtgående spiral, man har även blad som leder vattnet åt rätt håll, dessa blad kan även göra så att turbinen kan hantera lite olika flöden och fortfarande bibehålla en hög verkningsgrad. Därefter går den in i turbinen där vattnets leds så att det går ut på undersidan [29].

Kaplanturbinen är turbinen som lämpar sig bäst för lågt tryck och högt flöde. Fungerar likt en Francisturbin då vattnet leds in likt en vortex, dock så går vattnet in i axiell led och går även ut i axiell led. Det finns olika utförande av Kaplanturbiner, det handlar om att göra så att turbinen kan ha en hög verkningsgrad även när flödet inte är konstant. Detta gör man genom att man kan variera vinkeln på bladen som leder in vattnet i en vortex eller att man kan variera vinkeln på själva turbinbladen. Högst verkningsgrad har turbinen där bägge går att variera och lägsta har den turbinen som är helt fast och endast konstruerad för ett flöde [29].

#### 4.1.3 Övrigt

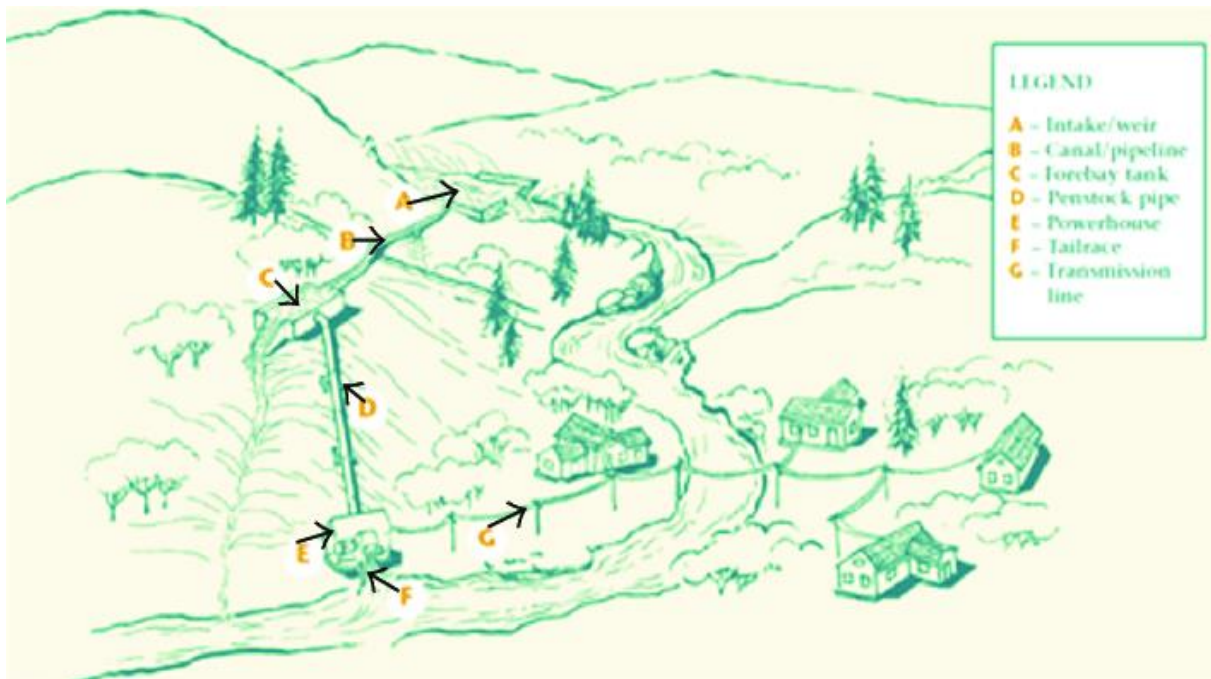
Arkimedes skruv är olik de andra då det är en lång turbin som varken utnyttjar trycket på vattnet eller hastigheten utan utnyttjar vikten av vattnet och höjden vilket vattnet måste färdas. Skruven används så att det rinner in vatten i toppen av skruven och i och med att skruven är vinklad till cirka 22 grader från horisontalläget så förflyttar sig vattnet ner längs skruven genom att den snurrar. Det är då vikten av vattnet och vinkeln på bladen som gör att skruven får ett vridmoment. Teoretiskt sett så går denna turbin att göra väldigt lång men då anläggningskostnaderna och arean som tas upp ökar mycket så brukar denna teknik inte användas vid fallhöjder över 8 meter [31].

## 4.2 Verksamma mikro-vattenkraftssystem

Vid större system används överlag endast tekniken som dammar upp vattnet. Dock ser det annorlunda ut för mikrovattenkraftverk då dessa använder överlag helt andra typer av flöden vilket skulle medföra att detta är ett ekonomiskt och ekologiskt ohållbart sett att använda den tekniken för alla flöden.

### 4.2.1 Run-of-River

Run-of-river teknik innebär att man leder en del av flödet från huvudflödet in i en konstgjord vattenväg. Denna konstgjorda väg ska erhålla så lite friktion för vattnet som möjligt då energi förloras. När vattnet gått igenom den konstgjorda vägen ska fallhöjden från vattenytan ner till turbinen vara maximal. Denna teknik är inte bunden till en särskild turbin utan denna teknik är huvudsakligen till för att inte förstöra ekologin i vattendragen och hindra vandringsvägar för fiskar. Det är även bra ifall lutningen är för liten för att man lätt skall kunna installera en turbin i flödet, se figur 13. Exempel på kompletta produkter som ofta använder denna teknik är Turbulents system.

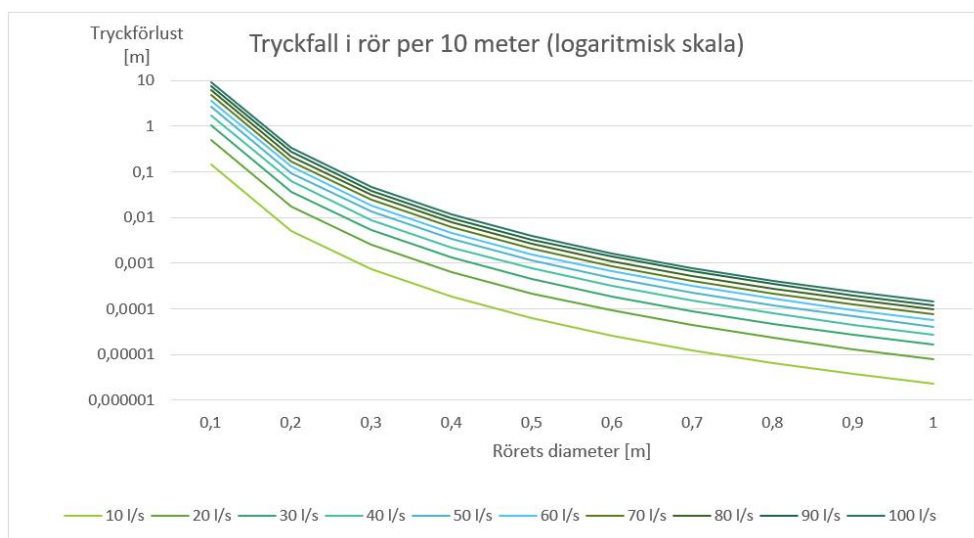


Figur 13. Visar hur run-of-river tekniken kan utnyttja flödet även om lutningen är liten [30].

- A: Intag från flod
- B: Kanal
- C: Intag till rör
- D: Rör
- E: Skydds hus för generator och elektronik
- F: Elledningar

#### 4.2.2 Rörintegrerad konstruktion

För att på bästa sätt nyttja dessa turbiner behövs olika sorters utrustning och anläggningar för åstadkomma rätt tryck och flöde. Dessa ser olika ut beroende på hur vattendraget och närområdet kring vattendraget ser ut. Då det är mindre vattendrag, som man primärt vill nyttja en stor fallhöjd, kanaliseras vattnet in i ett rör. Vid intaget från flödeskällan till röret renas vattnet från större orenheter såsom grenar och löv som kan blocka igen turbinen eller rören. Detta görs ofta genom att man låter vattnet rinna genom ett galler som inte tillåter för stora partiklar att tränga sig igenom. Vid optimal montering av detta skydd, kan man frångå behovet att manuellt rengöra gallret från flödets orenheter då flödet själv har möjlighet att spola bort det. De rör som används bör vara av lämplig storlek då det alltid förekommer friktion i röret vilket ger upphov till tryckförluster. Detta kan man minimera genom att använda sig av större rör.



Figur 14. Tryckhöjdsförlust i rör på grund av friktion.

Figur 14 visar hur tryckhöjdsförlusterna minskar när diametern på röret ökar för alla olika flöden, där y-axeln är i en logaritmisk skala. Värdena är baserad på allmänna strömningsmekaniska formler och beräkningarna är utförda med vatten vid 15°C som fluid. Det vill säga att densiteten är uppskattningsvis  $\rho=999,1\text{kg/m}^3$  och den dynamiska viskositeten  $\mu=0,001138\text{Pa}\cdot\text{s}$ . Resultatet av uträkningarna återfinns i sin helhet i Bilaga 5.

#### 4.2.3 Damning

Vid större vattenkraftverk byggs ofta dammar för att öka fallhöjden och ha en stor vattensamling som en buffert då vattenflödet naturligt inte är konstant. Detta går att göra för mikrovattenkraft dock är det dyrt att bygga dammar och det skulle inte vara lönsamt med tanke på att elproduktionen vid mikrovattenkraft är relativt liten. Dock finns det mängder av små dammar som har ett annat huvudsyfte än elproduktion där vattenkraft enkelt och billigt kan installeras. Det man gör då är antingen att det finns ett rör eller tilloppstub i botten av dammen där en turbin installeras. Det andra som är att man leder vattnet över dammen och in i ett rör som i sin tur går till en turbin [32]. Att låta vattnet rinna över dammen är tekniken som används för Arkimedes skruv.

#### 4.2.4 Övrigt

Hydrokinematiska turbiner innebär att man utnyttjar hastigheten i ett väsentligt större flöde vilket gör att det inte finns någon fallhöjd att ta hänsyn till. Detta gör man genom att sänka ner en stor turbin i ett snabbt flödande vatten och förankra den i flod botten eller via en vajer som är fäst längre upp i flödet. Ifall en vajer används så vill man inte att turbinen skall förstöra mot botten av floden så men konstruerar den så att den skall flyta. Turbinerna som används vid denna teknik är oftast baserade på en kaplanturbin fast med relativt stor variation på utseendet. För att öka vattenhastigheten förbi turbinen så brukar ett rör monteras runt turbinen som liknar ett venturirör. Det vill säga att diametern först minskas och sedan ökas igen, turbinen monteras då där diametern är som minst.

#### 4.2.5 Artificiella flöden

Med artificiella flöden menas här vattentjänster såsom system som hanterar färskvatten, dagvatten och avlopp. De tillämpningar som har hittats är tryckreducerande turbiner för färskvatten, resterande är mycket oexploaterat då ingen teknik som påstod sig klara dessa flöden hittades. Tryckreducerande turbiner för färskvatten är till för att minska energiförluster i färskvattennätet vid lågtryckzoner. Det som görs i nuläget är att man minskar trycket genom att man installerar en tryckreduceringsventil som förhindrar vattnets väg och därför ökar friktionen i röret. Om installation av en turbin istället görs, kan energi genereras och därav erhåller den en likartad funktion som tryckreducerande ventiler.

De två olika tekniker som undersökts är Soar Hydro och Lucid Energy. Soar Energy använder sig av en Francisturbin med justerbara blad för inledning av vatten i turbinen. De olika rörstorlekarna som de har modeller för är från 0,1 m till 0,6 m [33]. Lucid energy har utvecklat en egen turbin. Den är sfärisk och roterar runt sin axel som är vinkelrät mot vattnets strömningsriktning. Den är inte solid utan det är blad som går likt en halvcirkel från ena sidan av axeln till andra sidan av axeln. Dessa blad är vinklade så att när vatten flödar förbi dem så börjar turbinen rotera. Dessa turbiner är även gjorda i större utförande som har ett spann från 0,6 m till 1,5 m. De har då en maxeffekt på 18 kW respektive 100 kW [34].

### 4.3 Miljö

Det ekologiska avtrycket av mikrovattenkraft är mycket viktigt för projektet då det medför en hållbar framtid som är essentiellt för klimatet. Det som undersökts är hur olika former av mikrovattenkraft påverkar miljön på olika sätt. Det aspekter man undersökt är utsläpp på grund av mikrovattenkraftverk och de olika teknikernas påverkan på livet i olika vattendrag.

#### 4.3.1 Utsläpp

Det har utförts en livscykelanalysstudie i Storbritannien där man kollat på elva olika mikrovattenkraftverk som har effekter från 70–100 kW. Det resultatet som är mest jämförbart med andra energikällor är *Global Warming Potential (GWP)* vilket resulterade ett medelvärde och standardavvikelse på  $7.19 \pm 3.09$  [gCO<sub>2</sub> eq. / kWh] för de mikrovattenkraftverken som testats. Slutsatserna som gjordes var att huvudsakliga utsläppskällorna var av produktionen av materialen. Man kunde se att om man skulle gjort andra materialval kunde miljöpåverkan bli

betydligt mindre. Exempel på detta är att turbinhusen där turbinen och elektronik skyddas från omgivningen skulle byggas med trä istället för betong skulle GWP minskas med 6,3–12,2%. Placering av mikro-vattenkraftverket visade sig vara viktig då transporten av el kan leda till negativa ekologiska effekter. Det som visade detta var att *Abiotic Resource Depletion Potential* och *Human Toxicity Potential* var högre då elledning i detta fallet behövdes läggas ut över tre kilometer för att koppla upp mikrovattenkraftverket på nätet [35].

### **Fotovoltaiska celler (solceller) + Vindkraft:**

Solcellers utsläpp är väldigt spridda i flesta rapporter men 2 rapporter har valts ut. Den ena rapporten är en livscykelanalys för en för en specifik sorts solcell från kina och den visade att solcellerna hade en global uppvärmning påverkan på 50,1 gCO<sub>2</sub> eq./kWh vid en livslängd på 25 år [36]. Den andra rapporten som är en sammanfattning av många rapporter uppger att solcellerna har global uppvärmning påverkan har ett medelvärde på 85 gCO<sub>2</sub> eq./kWh med minsta och högsta från 13 respektive 731 gCO<sub>2</sub> eq./kWh [#16]. Vindkraft har enligt en godtycklig rapport 15 gCO<sub>2</sub> eq./kWh för landbaserad och 12 gCO<sub>2</sub> eq./kWh för havsbaserad vindkraft [37].

#### 4.3.2 Ekologi

Det största problemet som uppkommer på grund av vattenkraftverk är att vandringsvägar för fiskar blockeras vilket medför att de har en begränsad möjlighet att sprida sig. Detta är ett problem i de flesta vattendrag då det finns levande organismer i alla naturliga vattendrag [38]. Dock finns det även naturliga vandringshinder såsom vattenfall vilket då inte skulle medföra en förändring i hydrologin vid byggnation i dessa platser, däremot finns det stora sociala begränsningar här. De tekniker som utgör ett vandringshinder är rörtekniken när hela flödet används och vid dammbyggning då fiskar inte kan passera turbinen och inte heller komma upp för dammväggarna. De tekniker som inte utgör ett vandringshinder är ”run-of-river” och hydrokinematiska turbiner då de inte tvingar hela flödet att gå igenom turbinen. Vid ”run-of-river” får man dock inte använda för stor del av flödet så att resterande är för lite för fisk att kunna vandra i. Arkimedes skruv tillåter dock fisk att vandra nedåt vilket gör den mer fördelaktigt jämfört med resterande system. För att åtgärda dessa vandringsvägar byggs ofta fisktrappor som har som funktion att låta fisk simma upp för en liten långsam ström tills de kommer förbi hindret [39]. En teknik som utnyttjar detta behov men ändå inte missbrukar vatten är ”hydroconnects Arkimedes skruv” som bygger på grundprincipen av en Arkimedes skruv. Skillnaden är att längst in i centrum på skruven finns ytterligare en skruv som roterar i motsatt riktning mot vad den yttre. Detta gör att vandrigen nedåt sker i den yttre skruven och vandringar uppåt sker i den inre skruven. Detta gör även att denna skruv producerar el och fortfarande utnyttjar hela flödet [40].

Vid mindre dammbyggnationer, som mikrovattenkraft skulle medföra, är effekterna inte lika stora som vid storskalig vattenkraftproduktion. En effekt som fortfarande kvarstår är att vattnet blir mer stillastående vilket gör att sediment, organiska material och fröer som naturligt förekommer i flödet sjunker till botten av dammen. Dessa material är gödning för livet nedanför i vattendraget vilket betyder att, om man tar bort dessa ur flödet blir vattnet efter dammen näringsfattigt, vilket är dåligt för ekologin nedanför dammen [41].

#### 4.4 Juridik

Alla byggnationer måste följa lagarna som ingår i miljöbalken. För att detta ska ske på bästa sätt så behövs tillstånd innan man börjar uppföra sin vattenverksamhet. Tillstånd för att bedriva vattenverksamhet utföras efter ansökan av mark- och miljödomstolen som prövar fallet. Dock prövas tillstånd i vissa fall av markavvattning av länsstyrelsen. För att detta skall prövas behövs en miljöbedömning innehållande en miljökonsekvensbeskrivning vilket väger mycket tungt hurvida det blir avslag eller inte. Alla kostnader som uppkommer på grund av ansökan skall bekostas av den sökande, även omkringliggande kostnader och kompensationer av markägare till exempel skall bekostas av den sökande. I miljöbalken finns även med specifika älvar och områden där det inte tillåtet att utföra vattenverksamhet enligt 4 kap. 6§. Andra specifika områden som rör till exempel turism eller renskötsel behöver också tas särskild hänsyn till enligt 4 kap. Enligt 11 kap. finns det även undantag som underlättar ansökningen av byggnationen, dessa innefattar 11§ och 12§.

#### 4.5 Ekonomi

Mikrovattenkraft har en stor variation på kostnad då det finns många olika sorters system som går att tillämpa och alla platser ser olika ut. Det finns även olika sätt att mäta den ekonomiska aspekten på. Antingen mäter man kostnaden per installerad kW eller så mäter man kostnad per producerad kWh. Då kostnad per producerad kWh är helt beroende på utnyttjandegraden och livslängden av mikrokraftverket anses detta vara mindre lämpligt för att jämföra mikrovattenkraft olika system. Uppskattningsvis brukar då mikrovattenkraft kosta från 4000–6000 dollar/kW [42]. Vilket den 20e maj 2019 motsvarar cirka 38 586–57 878 kr/kW. Turbulent är ett företag som anser sig vara det mest lönsamma mikrovattenkraftverket och de utlovar en återbetalningstid på under 5 år och då anses livslängden på systemet uppgå till 15–30 år. De påstår att deras system kan beroende på omständigheter få en kostnad så låg som 2500 euro/kW [43]. Vilket den 20e maj 2019 motsvarar cirka 26 925 kr/kW. Dock är kr/kWh mer lämpligt vid jämförelse mellan olika energikällor. Detta har kollats på två olika ställen, ett i Tajikistan där en studie visade sig kosta 3 cent/kWh och ett i Pakistan som även inkluderade ett batterisystem vilket visade sig kosta 10 cent/kWh [44]. Vilket den 20e maj 2019 motsvarar cirka 28,9–96,5 öre/kWh.

#### Fotovoltaiska celler (solceller) + Vindkraft:

Ekonomiskt sett delar man upp solkraft mellan solcellsparker, solceller som installeras på industrier och solceller som installeras för privat bruk på villor. De olika kostnaderna är 93, 126 respektive 170 öre per kWh. Vindkraftverkens kostnad delas även upp i de 2 olika teknikerna som är väldigt platsberoende. De olika kostnaderna för respektive teknik uppgår till 51 öre per kWh för landbaserat och 75 öre per kWh för havsbaserade vindkraftverk [45].

## 5. Smart Grid – Det smarta elnätet

Med pågående klimatförändringar som motiv, strävar stora delar av teknikutvecklingen mot mer klimatvänliga lösningar. Ett tydligt exempel på en sådan utveckling är den inom transportsektorn som genom elbilar syftar till att minska koldioxidutsläppen. Den tekniska utvecklingen i samhället kommer därpå ge upphov till nya utmaningar genom en förhöjd belastning på elnätet. Samtidigt pågår ett skifte till förnybara energikällor i form av vindkraft och solenergi. Något som kännetecknar dessa energikällor är att de är intermittenta då dess kraftproduktion är direkt kopplade till aktuell väderlek, med andra ord är dess kraftproduktion oförsägbara. Ökningen av den decentraliserade kraftproduktionen har i sin tur även gett liv åt en ny energimarknad där konsumenterna nu även har möjlighet att producera energi. I figur 15 sammanställs de fundamentala bakgrunderna till behovet av utveckling inom elkraftnät.

Genom denna samhällsutveckling har ett behov av att kunna följa och uppmäta elens vägar skapats. Det moderniserade elnätet som benämns som *det smarta elnätet*<sup>7</sup>, kännetecknas av mätning, kontrollering och behandling av data. Principen går ut på att alltid hålla koll på aktuell konsumtion och produktion för att vid en central kontrollstation bättre kunna hantera hela elkraftnätet. Här ingår hela kraftnätsystemet från högspänningsledningar med energi från centraliserade kraftanläggningar, till lågspänningar med lokalt producerad energi.



Figur 15. De fundamentala bakgrunderna till nya smarta elnät.

<sup>7</sup> På engelska, "Smart Grid" alternativt "Intelligent Electric System".

När man diskuterar smarta elnät uppkommer vanligtvis idén om små isolerade elnät vilket innefattar lokala lågspänningsledningar. I dessa system förekommer i första hand el producerat från lokala förnybara energikällor i form av vindkraft och fotovoltaiska celler. För att hantera höga konsumtionsperioder använder man vanligtvis batteribankar samt reglerbara källor för att under dessa perioder hålla god effektbalans. Denna lösning tillämpas i första hand då systemet är under ö-drift, det vill säga helt fränkopplat ifrån regionalnätet. Dessa typer av system är relativt nya och är ett tidigt skede i dess utveckling. Vid vanlig drift är dessa system även uppkopplade till regionala elnätet vilket ska agera som reservkraft och en energirecipient vid höga produktionsperioder.

Centralt för att dessa system ska fungera är *smarta mätare* som har till uppgift att uppmäta den aktuella aktiviteten vid placerade punkter i systemet och sedan skicka vidare den samlade data till kontrollstationen. På så vis är det möjligt att vid låg konsumtion relativt till produktionen, lagra överproducerad energi i batteribankar som har till uppgift att hålla en effektbalans i systemet. Den lagrade energin kan i sin tur användas vid konsumtionstoppar. Genom denna mätning kan man alltså förbättra den reaktiva effekten vid perioder då konsumtionen överstiger den aktuella produktionen. Vidare kan mätningen ge konsumenten en bättre kännedom om sin energiförbrukning och därpå ge möjligheten att minska<sup>8</sup> denna.

För att systemet ska fungera korrekt är det essentiellt att batteribanken aldrig är fulladdat eller tomt. Vid konsumtionstoppar är det viktigt att det finns lagrad energi för att effektbalansen ska kunna hållas. Med samma utgångspunkt är möjligheten till att lagra överproducerad energi vid låga konsumtionsperioder viktigt. Vidare har batteribanken till uppgift att reglera effekten till den önskade<sup>9</sup> frekvensen på 50Hz. Detta är nödvändigt då energin är producerad från intermittenta energikällor. I nuläget är denna lösning inte konstandseffektivt men det finns sedan 2016 möjligheten att ansöka om statligt stöd för batteribankar enligt förordningen (2016:899). Detta stöd gäller batterier som har till syfte att lagra egenproducerad el från förnybara källor. Stödet gäller enbart för system som påbörjats efter 1 januari 2016 och slutförts innan 31 december 2019. Ytterligare kan batterier i elbilar användas för detta ändamål när de är uppkopplade i någon av laddstolparna i det lokala elnätet.

Genom denna utveckling kan man underlätta integrationen och uppkopplingen av förnybara energikällor. Därutöver minskar man behovet för vidare expansion samt underhåll av stamnätet i områden med begränsad tillgänglighet.

---

<sup>8</sup> Görs primärt genom att följa och notera onödig energikonsumtion.

<sup>9</sup> I Sverige

## 5.2 Fallstudie – Simris

Genom att begränsa sig geografiskt till ett område, kan man genomföra tester i bland annat näthantering. Vanligt för dessa typer av demonstrationer är att man under bestämda perioder låter systemet gå i ö-drift. Man öppnar även möjligheten att undersöka olika teknikers samverkan i en bestämd miljö. Genom att studera denna samverkan kan man ta lärdom för vidareutveckling av tekniken, eventuellt implementering i en verklig miljö. Som en del av europasamarbetet *Interflex*, har man i den lilla byn Simris, med lite drygt 150 invånare, genomfört en demonstration inom små lokala elnät.

Med precis rätt förutsättningar, med mycket vind och sol, för förnybar energiproduktion, består energiproduktionen här av totalt tre olika källor: vindkraft, fotovoltaiska celler och reservgenerator vilket ska agera som systemets reglerbara källa.

### Vindkraft:

Den installerade effekten på vindkraftverket i Simris ligger på 500 kW. I moderna anläggningar kan man förvänta sig en tillgänglighet  $\kappa_{vind}$  [%] under ett år på omkring 95%, det vill säga att kraftverket har lite drygt 8300 tillgängliga elproducerande timmar per år [46]. Då vindkraftverket i Simris sattes i bruk 1996 kommer dess tillgänglighet vara aningen sämre. På grund av att vindkraft i grunden beror på aktuell vindnivå kommer den nominella elkraftproduktionen att minska ytterligare. Här spelar kapacitetsfaktorn  $\varepsilon_{vind}$  [%] in som säger hur stor del av den installerade effekten som i praktiken producerar energi. För landbaserade vindkraft ligger denna siffran på 28–40% [46]. För att få ut den årliga produktionen kan man multiplicera ihop dessa storheter med antalet timmar per år för att få ut den nominella kraftproduktionen  $P_{nom}$  för systemet, se ekvation (11).

$$P_{nom} = [Installerad\ effekt] \cdot 8760 \cdot \varepsilon \cdot \kappa \quad \left[ \frac{kWh}{\text{år}} \right] \quad (11)$$

Antar man kapacitetsfaktorn och tillgängligheten för kraftverket i Simris utifrån dess geografiska position med goda vindförhållanden, samt tar hänsyn till dess ålder kan dess nominella produktion beräknas. Här antas  $\varepsilon_{vind} = 0,40$  och  $\kappa_{vind} = 0,85$ . Ekvation (11) ger då

$$P_{nom,vind} = 500 \cdot 8760 \cdot 0,40 \cdot 0,85 = 1\,489\,200 \quad \left[ \frac{kWh}{\text{år}} \right] \approx 1,5 \quad \left[ \frac{GWh}{\text{år}} \right]$$

Skulle vindkraftverket vara relativt modernt kan man anta en tillgänglighet på 95% vilket skulle medföra att den nominella kraftproduktionen skulle hamna på lite drygt 1,7 [GWh/år]

### Fotovoltaiska celler (solceller):

Med samma bas, kommer solceller att bero på det aktuella vädret. Här kommer solcellernas kapacitetsfaktor  $\varepsilon_{sol}$  istället bero på andel soltimmar. Vidare kan man här förvänta sig en lägre tillgänglighet  $\kappa_{sol}$  då förutom underhållsarbeten även kan förvänta sig viss skymdhet från solens strålning under vissa perioder. Detta innefattar allt såsom snö, löv och annat som kan samla sig ovanpå anläggningen. Vidare kommer antal soltimmar per dag variera under året; fler soltimmar under sommarhalvåret och färre under vinterhalvåret.

Andelen soltimmar per år kan beräknas genom  $\frac{\text{Soltimmar per år}}{8760 \text{ (antal timmar per år)}} = \varepsilon_{sol}$ . Med en installerad effekt på 400 kW och en genomsnittlig solskenstid på 1 800 timmar per år i Simris [47]. Antagandet  $\kappa_{sol} = 0,60$  ger ekvation (11) då

$$P_{nom,sol} = 440 \cdot 1800 \cdot 0,60 = 475\,200 \left[ \frac{kWh}{\text{år}} \right] \approx 0,48 \left[ \frac{GWh}{\text{år}} \right]$$

På grund av Sveriges geografiska position samt det tempererade klimat kommer solskenstiden och tillgängligheten påverkas starkt. Om samma system skulle vara positionerad nära ekvatorn med uppskattningsvis 4000 solskenstimmar, samt en mer passande miljö det vill säga en bättre tillgänglighet, antagningsvis 75%, skulle kraftproduktionen ligga på 1,3 [GWh/år]. Förutom en högre totala kraftproduktion kommer den här även ha en jämnare produktion över hela året.

#### 5.2.1 Intervjuformulär

För att få en bättre inblick i hur mikro-vattenkraft skulle förhålla sig som ett lämpligt tillskott kontaktades Peder Kjellen på E.ON som är väl insatta i området och är verksam i studien inom smarta elnät i Simris. Då Kjellen inte hade möjlighet att träffas för ett personligt möte inom projektets tidsram, bestämdes det att samtalet skulle genomföras genom ett frågeformulär. Kontentan av Kjellens svar redovisas nedan (Peder Kjellen, 2019).

#### **Under planeringens gång undersöktes möjligheten att tillämpa mikro-vattenkraft som en eventuell energikälla, om nej varför?**

*”Nej:*

- 1) Vi hade en traditionell bild av vad nybyggd förnyelsebar energi skulle vara*
- 2) Vi har mer kompetens kring sol och vind*
- 3) Sol och vind är inte en kontroversiell fråga så som vattenkraft är”*

#### **Projektet i Simris kan ses som ett lyckat projekt inom en rad olika områden - Finns det planer att utföra liknande projekt med andra meteorologiska förhållanden?**

*”Vi har inga planer på att bygga ett nytt innovationsprojekt inom ramen för Lokala Energisystem däremot letar vi nu efter kommersiella projekt. Vi tror på konceptet men det kommer inte att vara det meteorologiska förutsättningarna som avgör utan vart behov och önskemål finns. Det kommer att vara helt kundstyrt.”*

**Om de hydrologiska förutsättningarna finns för implementering, så finns det många fördelar med att använda mikro-vattenkraft som ett komplement för det system som idag prövas i Simris, skulle det vara intressant med mikro-vattenkraft förutsatt att det finns lämpliga flöden och är möjligt med avseende på tillstånds- och miljöfrågor?**

*”Jag upplever att mikro-vattenkraft är ett mycket bra alternativ på grund av intermittensen i sol och vind och möjligheten att använda mikro-vattenkraft som reglerkraft. Det skulle minska beroendet av energi lager så som litium jon batterier eller dylikt. Det skulle också vara bra där sol och vindtimmar är mycket mer begränsade än på Österlen (Sveriges soligaste och blåsigaste plats). Den största blocken anser jag är tillstånds- och miljöfrågan, men det är jag övertygad om att ni vet mycket mer om än jag.”*

**Projektet i Simris är främst utformad för att förse en samling hushåll med förnyelsebar energi, skulle samma system fungera lika väl inom industrin?**

*”Ja absolut, det är redan en ”produkt” som till exempel sjukhus använder sig av för att vara operativa även vid ett nationellt strömavbrott. I Tyskland där prisbildningen för energi, el och överföring är annorlunda finns det redan industrier som tittar på liknande lösningar för kostnadsoptimering.”*

**Utifrån resultatet från Simris, tror ni att ett liknande system skulle kunna tillämpas i en större utsträckning för större städer?**

*”Ja, vi tror att det kommer att vara en viktig komponent i det urbana energisamhället. Ett system som Simris har möjlighet att effektoptimera, något som är väldigt viktigt redan idag där vi ser att vi har kapacitetsbrist i storstadsområdena. Lokala Energisystem ökar anslutningskapaciteten på befintlig infrastruktur. Däremot ser vi det inte som att vi önskar att alla bygger helt självförsörjande ”öar”, utan att de blir en del av det större nätet för synergier och sammanlagringseffekter.”*

**För att kunna leverera den överproducerade energin, från intermittenta källor, till elnätet använder man idag batterier i bland annat Simris. Kommer man fortsätta med denna lösningen eller finns det visioner om att i framtida projekt / system använda sig av andra lösningar?**

*”Vi tittar på alla lösningar som ger en effektiv kostnadsbild. Därför undersöker vi kundutrustningens roll i flexibiliteten genom värmepumpar och varmvattenberedare (samt hushållsbatterier). Vi tror att en kombination av olika energi lager kommer att vara optimalt och bero på de lokala förutsättningarna.”*

**Vilka har varit de största utmaningarna hittills för lokala elnät och vilka förväntas bli det i framtiden?**

*”Tillgänglig kapacitet i storstadsområdena har klivit upp som en av de största utmaningarna och kommer att vara det minst 10 år framåt. Den andra sidan av myntet är att glesbygden blir ännu glesare och därmed går priset för underhåll och nya kablar upp i relation till antalet invånare. Lokala energisystem kan vara en lösning även på det problemet.”*

**Vad är nästa steg i utvecklande av lokala energisystem; hur långt in i utvecklingen är lokala-nätverk.**

*”Vårt nästa steg är att kommersialisera produkten framförallt för storstadsområden.”*

**Vad anser ni skulle vara tillräckligt goda resultat för att kunna utveckla mikro-nätverk i större utsträckning (till antal och storlek)**

*”Vi tror på detta som koncept och lägger redan tid och pengar på att vidareutveckla vår kompetens och vårt erbjudande och ser redan en positiv framtid för Lokala Energisystem.”*

## 6. Slutledning och diskussion

Klimatförändringar är nu näst intill oundvikliga och samhällsutvecklingen behöver således revolutionerande innovationer som tillförlitligt och effektivt kan motarbeta dess påverkan samtidigt som dom behöver vara tekniskt och ekonomiskt hållbara. Mikro-vattenkraft (*mvk*) är en förnybar energikälla och är därmed ett attraktivt alternativ för energiomväxlingen. Samtidigt ökar trycket på världens storstäder med en allt växande global medelklass. För att hantera denna populationsförflyttningen gäller det att kunna hantera en stigande population bland städer, och samtidigt hantera den minskande i landsbygden. Små lokala elnät kan lösa båda dessa problem gällande energidistribution. Med en kostnadseffektiv uppbyggnad i följd av ett oberoende av expansion av stamnätet kan man förse samhällen med en svår framkomlighet. På andra sidan myntet kan man genom dessa elnät förflytta energiproduktionen närmre konsumenten.

Projektet startades under vecka 13, och avslutades vecka 23. En del av arbetet kunde däremot påbörjas en kort tid innan den officiella starten, vilket främst innefattar planering. På grund av att projektet begränsades till en kort period var det svårt att komma i kontakt med rätt personer i god tid. Tanken var att intervjuer och samtal skulle ske kontinuerligt över hela arbetsperiodens gång, men för att det skulle vara av nytta behövdes en förstudie inom respektive område för att vara väl förberedda. Detta medförde att dessa i praktiken sköts upp och samlades mot slutet. Vidare blev ett par av personmötena inställda så pass sent att ett nytt möte inte kunde bokas in inom projektets tidsramar. Detta löstes genom att intervjuformuläret skickades ut till respektive kontaktperson och svaret mottogs via mejl. Generellt sätt fungerade denna lösningen men på grund av att svaren utgick ifrån ett frågeformulär, kunde ingen strukturell dialog inom området formas vilket skulle vara önskvärt.

Området var mer omfattande än den inledningsvisa bedömningen. Trots detta kunde tillräckligt mycket information införskaffas för att besvara på de ställda frågeställningarna. En överskådlig bild över respektive område har kunnat skapats, man bör däremot vid vidare analys behandla varje lösning enskilt då dessa har flera betydande skillnader.

## 7. Slutsats

För att säkerställa systemets – små lokala elnät – tillförlitlighet är en bred kollektion av energikällor viktiga, inte minst gällande förnybara källor på grund av osäkra meteorologiska fluktuationer och en säsongsvarierande produktion. Man strävar mot att minimera påverkan av den intermittenta energin som dagens förnybara energikällor producerar, samt den *volatila energikonsumtionen*. Här definieras en volatil energikonsumtion som en varierande och oförsägbar användning av tillgänglig effekt i nätet, oberoende på aktuell produktionsmängd. Genom att kartlägga konsumtionsmönstren med hjälp av det smarta elnätet, kan konsumenten identifiera och notera onödig användning och därpå minska den totala energiförbrukningen. Vidare kan man genom en ökad vetskap över detta mönster uppmuntra till en smartare och effektivare energianvändning. Resultatet av detta skulle kunna ge upphov till en mer jämn energikonsumtion och i sin tur öka möjligheten till en god effektbalans och driftsäkerhet i nätet.

Den typen av energi som mikro-vattenkraft skulle producera kommer behöva frekvens omvandlas innan den går ut i elnätet då den inte kan antas verka synkront. Den typ av lösning som idag används, i bland annat Simris, för fotovoltaiska celler och vindkraft har samma karaktäristik som den man använder sig av för *mvk*, nämligen batteribanker. Samtidigt är det essentiellt för att systemet i överhuvudtaget ska fungera korrekt. Ur teknisk synpunkt erhåller ett *mvk* system samma karaktäristik som det system som innehåller vindkraft och fotovoltaiska celler. Därmed skulle ett sådant tillskott vara ett lämpligt, ty de faller under samma problemkomplex. Man skulle därmed gemensamt kunna utveckla och eventuellt använda sig av samma system för att hantera denna problematiken. En demonstration bör däremot genomföras för att med högre säkerhet avgöra om mikro-vattenkraft är ett lämpligt tillskott i små lokala elnät och studerar dess samverkan med resten av systemet.

Enligt Kjellen från E.ON har utvecklingen inom lokala elnät kommit tillräckligt långt för att tillämpas i mer varierande miljöer. Lokala elnät som koncept är väldigt flexibel och kommer vid kommersiell användning utformas utifrån kundens förutsättningar och behov. Mikro-vattenkraft kan därmed vara ett realistiskt tillskott om de hydrologiska grunderna tillåter en kostnadseffektiv användning. Idén med lokala elnät är inte skapa isolerade system som helt oberoende av varandra ska drivas i ö-drift. Man vill genom en smartare hantering av tillgänglig effekt kunna skapa ett landskap inom energimarknaden som möjliggör alternativet att sälja egenproducerad energi vid höga produktionsperioder och göra det enklare att överföra effekt från regionalnätet då ett energibehov skulle uppstå. Ett system som både kan ge och ta från regionalnätet skulle alltså skapas och den reaktiva förmågan att hantera konsumtionstoppar skulle öka.

En sammanställning av *mvk* tekniken har gjorts utifrån nuvarande utbud på dess marknad. Tanken är att förflytta delar av den centraliserade kraftproduktionen närmare konsumenten. Då lösningarna som idag existerar på marknaden för *mvk* kan tillämpas för lokala flöden skulle detta målet uppfyllas. Kollar man på möjliga flöden som kan tillämpas bland existerande lösningar kan man dela upp dessa i två kategorier utifrån deras fundamentala grund. Dessa är rörintegrerad konstruktion i ledningsnät och naturliga flöden med kanalutformning. Då systemens förutsättningar skiljer sig åt så pass mycket behöver man behandla dessa system enskilt från varandra vid analys.

Större delen av dagens *mvk* inom denna gruppen använder sig av en integrerad konstruktion som är anpassad för den specifika platsen. Modulära konstruktioner är däremot mer sällsynt. Det finns fall där man har försökt med en mer modulär konstruktion genom att skapa flera iterationer av samma lösning genom att skala och dimensionera om systemet. För att enklare kunna applicera systemen och öka möjligheterna till installation skulle det vara önskvärt med en modulär konstruktion.

*Mvk* med interna flöden är ett gömt system i den mån att den i sin grundfunktion inte påverkar prestationen vid omkringliggande system. Kommer därav inte behöva några större underhållsarbeten eller manuella regleringar efter installation. Den stora kostnaden för systemet kommer därmed, utöver materialkostnaderna, att vara installation.

Dagens *va-system* är ett åldrande system som är starkt underdimensionerat och kommer behöva förnyas för att klara av klimatförändringarna. Mest aktuellt är detta vid riskområden<sup>10</sup> vid kusten och andra stora vattensamlingar. Utöver aspirationen till att motarbeta klimatförändringarnas påverkan på samhället, vill man genom denna utveckling introducera sensorer och mätinstrument. Syftet är att identifiera abnormiteter i flödet för att upptäcka sprickor och defekter i ledningsnätet. Med hjälp av dessa mätinstrument kan man följa storheter i flödet, såsom tryck och hastighet. För *mvk* kan denna data sedan användas för att kartlägga och notera systemets prestanda. Vid en avvikande prestanda från det nominella kan man indirekt upptäcka eventuella fel hos *mvk* systemet och därmed minska behovet av manuella kvalitetskontroller.

I dag sker mycket av planering och utveckling av vattenhanteringen på lokal nivå, det förekommer bland annat inget nationellt styrdokument för val av material. För att driva utvecklingen av framtida *va-system* framåt skulle en gemensam sammanställning av informationen och kunskap medföra att man kan standardisera systemet på en nationell nivå, eller åtminstone över en större region. Genom att konstruera ledningsintegrerad *mvk* utifrån ett standardiserat system skulle installationsmöjligheterna öka. Det skulle således även minska installationskostnaderna ifall man följer denna utveckling och i samspel med denna utveckling designar systemet efter denna.

---

<sup>10</sup> Områden som har en högre risk att drabbas av översvämningar

## 7.1 Rekommendationer

Vid evaluering av olika energikällor vid utformning av små lokala elnät kommer *mvk* jämföras med vindkraft och solenergi. I Sverige finns det goda hydrologiska förutsättningar för vattenkraften i sin helhet. Genom att etablera tekniken på marknaden och sprida kompetensen vidare kan *mvk* ses som ett realistiskt alternativ. Här gäller det att kartlägga och identifiera systemets många fördelar och samtidigt notera hur systemet på bästa sätt kompletterar resterande delar i systemet. Viktigt att notera är att *mvk* kan i dess utformning variera och tillämpas olika. Dessa olika system kommer därav besitta olika fördelar. Med olika system med respektive fördelar, ökas möjligheten till att ett av systemen inom *mvk* gruppen anses vara ett lämpligt alternativ för givet projekt.

Ett område där, framförallt, solenergin är mer fördelaktigt jämfört med *mvk* är möjligheten till installation. Dagens *mvk* system har alla en integrerad konstruktion vilket är situationsspecifikt utformat. Studerar man solcellernas utformning kan man konstatera att dessa är i stor utsträckning modulära och därav enklare att behandla.

- Man bör för *mvk* inom ”naturliga flöden med kanalutformning” gruppen eftersträva mot att utforma systemet på sådant sätt att den enkelt kan appliceras och justeras utifrån kundens förutsättningar då detta kommer styra evaluering av det lokala elnätets utformning.
- För ledningsintegrerade *mvk* i drickvattenledningar bör man däremot driva utvecklingen mot ett standardiserat system för framtida ledningsnät då detta i en fullständig omfattning inte existerar. Därpå kan man konstruera ett *mvk* system som kan tillämpas på ett stort geografiskt område som sträcker sig mellan flera kommuner. I ett sådant fall skulle *mvk* alltid vara ett lämpligt alternativ förutsatt att de hydrologiska förutsättningarna finns och att systemet är tillräckligt kostnadseffektivt. Utmaningen här skulle således vara att studera områdets olika tryckzoner för att avgöra dess lämplighet och produktionsförmåga.
- Samma princip gäller även för dagvattenhantering. Något som kommer driva utvecklingen inom hantering av dagvatten är de globala klimatförändringarna och arbetet med att klimatanpassa samhället mot bland annat ökad nederbörd och en högre översvämningsrisk. En del av arbetet inom detta området handlar om riskzoner för översvämmning vid städer och samhällen nära kuster och andra stora vattensamlingar. Vidare försöker man utforma metoder för att identifiera naturliga dagvattenrecipenter. Detta är ett område som kommer bli mer aktuellt med tiden. För *mvk* är detta ett potentiellt tillämpningsområde, men på grund av begränsad tillgång till information inom denna utveckling och arbetets omfattning beaktades det inte djupgående.

Vid okontrollerad användning av *mvk* i naturliga flöden kan den lokala ekologin påverkas. Främst gäller det vid användning där man ändrar flödets hydrologiska karaktäristik för att uppnå bästa möjliga kraftproduktion. Här gäller det att begränsa sig och inte utnyttja hela flödet samtidigt som man tillåter djurliv att förflytta sig fritt inom flödet. För rörintegrerad *mvk* i ledningsnät kommer däremot inget djur- /växtliv komma i kontakt med systemet och därav är dessa system neutrala i den frågan.

Ett av de största problemen med dagens förnybara energiproduktion är att de i stor grad är intermittenta och säsongsvarierande. Vattenkraft i allmänhet har en reglerbar förmåga att öka produktionen vid höga konsumtionsperioder vilket är möjligt på grund av vattenreservoarer. Samtidigt kan man använda sig av de roterande massorna som en tröghet mot en förändring i systemets frekvens ty de roterar synkront med nätet. *Mvk* gruppen saknar dessa egenskaper, men genom att utveckla ett system som använder sig av lagrad energi i form av konstgjorda vattenreservoarer, kan man ändå vid detta fallet använda *mvk* som en reglerbar källa vid konsumtionstoppar. Ytterligare kan dessa konstgjorda vattenreservoarer användas vid dagvattenhantering som en del av klimatanpassningen. Ett sådant system kan således vara ett lämpligt tillskott för energilagring ibland annat små lokala elnät, vilket idag sker i första hand genom batteribanker.

Vid vidareutveckling bör man behandla respektive *mvk* system separat då de utanför dom tekniska aspekterna inte har en gemensam grund; deras tillämpbara områden är olika och kommer därav inneha olika förutsättningar. Dessa förutsättningar innefattar områden såsom juridik, ekonomi och ekologi. En djupgående ekonomisk analys bör därav genomföras för att få en allmän översikt på den ekonomiska hållbarheten. Likartat bör man se över juridiken specifik för det systemet man jobbar med.

### **Slutkommentar:**

Att tillämpa *mvk* i större utsträckning inom ledningsnät är i nuläget inte möjligt. För att detta ska vara ett realistiskt alternativ behöver ledningsnätet bli mer standardiserat samtidigt som *mvk* systemet blir mer kostnadsvänlig. Man bör istället inom denna gruppen fokusera mot industrier som vill kostnadsoptimera dess verksamhet för att både sprida kännedomen, samt öka erfarenheten inom *mvk* tekniken.

För system som baseras på "run-off-river" kommer den ekologiska påverkan ha en betydande roll. Genom okontrollerad användning kommer den lokala ekologin att påverkas starkt vilket i Sverige skulle vara helt avgörande. Inom denna gruppen bör man därmed rikta in sig på andra potentiella flöden som inte skulle medföra denna problematiken. Ett lämpligt alternativ är att man kollar på hantering av dagvatten genom arbetet för att klimatanpassa samhället. Här skulle flödet härstamma från konstgjorda vattenreservoarer. Vidare skulle man även i ett sådant system kunna använda *mvk* som en reglerbar energikälla. Både i den form att dagvattnet används för energiproduktion men även att man under produktionstoppar använder den intermittenta energin och pumpar vatten till vattenreservoaren som sedan används vid konsumtionstoppar.

## Referenser

- [1] Konsumenternas Energimarknadsbyrå. (2019). *Elområden: Begränsad överföring av el*. Hämtad från <https://www.energimarknadsbyran.se/el/elmarknaden/elomraden/>
- [2] Energimyndigheten. (2018). *Energiläget 2018*. Hämtad från <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2018/en-oversikt-over-energilaget-i-sverige/>
- [3] Arvizu, D., T. Bruckner, H. Chum, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M., ... T. Zwickel, (2011). *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [4] Södra Hallands kraft. (2019). *Elanvändning i Sverige*. Hämtad från <https://www.sodrahallandskraft.se/produkter-och-priser/elnaet/sveriges-elnaet-lite-fakta/elanvaendning-i-sverige/>
- [5] Energimyndigheten. (2019). *Här sker elproduktionen och elanvändningen i Sverige*. Hämtad från <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/om-oss/lagesrapporter/elmarknaden/2019/mars/har-sker-elproduktion-och-elanvandning-i-sverige.pdf>
- [6] Nord Pool. (2019). *Historical Market Data*. Hämtad från <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>
- [7] Björkström, A., (2019). *Nationalencyklopedin*, klimat. Hämtad från <http://www.ne.se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/klimat>
- [8] Boverket. (2010). *Mångfunktionella ytor: klimatanpassning av befintlig bebyggda miljö i städer och tätorter genom grönstruktur*. ISBN 978-91-86559-01-4
- [9] Persson, G., Strandberg, G., Berg, P., (2015). *Vägledning för användning av klimatscenarier*. Hämtad från [https://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.85315!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/klimatologi\\_11.pdf](https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.85315!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/klimatologi_11.pdf)
- [10] SMHI. (2019). *Sveriges Klimat*. Hämtad från <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/sveriges-klimat-1.6867>
- [11] Västra Götalands och Värmlands län. (2011). *Stigande vatten – en handbok för fysisk planering i översvämningshotade områden*.
- [12] Svensk Energi. (2015). *Potential att utveckla vattenkraft – från energi till energi och effekt*. Hämtad från [https://svenergi52iskprod.dxcloud.episerver.net/globalassets/energiforetagen/bilder/potential-att-utveckla-vattenkraften.pdf?v=yT3B3GaCu9E\\_DpTjoYB6rwivmV0](https://svenergi52iskprod.dxcloud.episerver.net/globalassets/energiforetagen/bilder/potential-att-utveckla-vattenkraften.pdf?v=yT3B3GaCu9E_DpTjoYB6rwivmV0)
- [13] Svenska kraftnät. (2017). *Elens vägar*. Hämtad från <https://www.svk.se/drift-av-stamnatet/drift-och-marknad/elens-vagar/>
- [14] Stenborg, B., Norhammar, U., (2019). *Nationalencyklopedin*, starkströmsnät. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/starkstr%C3%B6msn%C3%A4t>
- [15] Svenska kraftnät. (2019). *Kontrollrummet: balans*. Hämtad från <https://www.svk.se/drift-av-stamnatet/kontrollrummet/>
- [16] Karlsson, D., Nordling, A., (2016). *Svängmassa i elsystemet: en underlagsstudie*. Hämtad från <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-el/201606-iva-vagvalel-svangmassa-c.pdf>
- [17] Svenska Kraftnät. (2015). *Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnybar elproduktion*. Hämtad från <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/anpassning-av-elsystemet-fornybar-elproduktion-delrapport.pdf>

- [18] Lindholm, K., (2018). *Vattenkraftsproduktion*. Hämtad från <https://svenergi52iskprod.dxccloud.episerver.net/sa-fungerar-det/elsystemet/produktion/vattenkraft/vattenkraftsproduktion/>
- [19] Energimyndigheten. (2018). *Nära toppnotering för elproduktionen och nettoexporten av el under 2017*. Hämtad från <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2018/nara-toppnotering-for-elproduktionen-och-nettoexporten-av-el-under-2017/>
- [20] Wikipedia. (2019). *Vattenkraft*. Hämtad från [https://sv.wikipedia.org/wiki/Vattenkraft#/media/File:Hydroelectric\\_dam\\_without\\_text.jpg](https://sv.wikipedia.org/wiki/Vattenkraft#/media/File:Hydroelectric_dam_without_text.jpg)
- [21] Y.A. Cengel, J. Cimbala and R.H. Turner, “Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences”, 5<sup>th</sup> Ed., Mc Graw Hill Education, New York, 2017.
- [22] Mårtensson, H., Malm, A., Sederholm, B., Sällström, J. H., Trägårdh, J., (2018). *Framtidens hållbara VA-ledningssystem*. Hämtad från [http://www.svensktvatten.se/contentassets/0dfc8061928d4757a8f816f66486b31e/svur\\_18-10a.pdf](http://www.svensktvatten.se/contentassets/0dfc8061928d4757a8f816f66486b31e/svur_18-10a.pdf)
- [23] Johansson, L., Rod, O., Römhild, S., (2012). *Framtida lösningar för distribution av dricksvatten – slutrapport fas A*. Hämtad från [http://www.svensktvatten.se/globalassets/rapporter-och-publikationer/externa-rapporter/rapport-fas-a\\_material-i-kontakt-med-dricksvatten.pdf](http://www.svensktvatten.se/globalassets/rapporter-och-publikationer/externa-rapporter/rapport-fas-a_material-i-kontakt-med-dricksvatten.pdf)
- [24] Göteborgs stad. (2019). *Forsknings- och utvecklingsagenda i korthet 2019*. Hämtad från <https://goteborg.se/wps/wcm/connect/4f8c655b-38b2-4715-a415-e29f2d5b4c97/FoU-agenda+Kretslopp+och+vatten+2019.pdf?MOD=AJPERES>
- [25] St.John’s Department of public works water & wastewater division. (2018). *Pressure Management*. Hämtad från [https://www.mae.gov.nl.ca/waterres/training/adww/2018/04\\_JasonPhillips.pdf](https://www.mae.gov.nl.ca/waterres/training/adww/2018/04_JasonPhillips.pdf)
- [26] Beisler, M.W., (2010). *Modelling of input data uncertainty based on random set theory for evaluation of the financial feasibility for hydropower projects*. Freiberg, Tyskland
- [27] Vaishnavi, V., Kuechler, W., and Petter, S. (2017). *Design Science Research in Information Systems*. Hämtad från <http://www.desrist.org/design-research-in-information-systems/>
- [28] Energypedia. (2014). *Micro Hydro Power (MHP) Plants*. Hämtad från [https://energypedia.info/wiki/Micro\\_Hydro\\_Power\\_\(MHP\)\\_Plants](https://energypedia.info/wiki/Micro_Hydro_Power_(MHP)_Plants)
- [29] Johnson, K., George, L., Panter, J., (2013). *The Small Hydropower Handbook*. PDF hämtad från <http://www.colorado.gov/energyoffice/atom/32666>
- [30] Kaunda, C.S., Kimambo, C.Z., Nielsen, T.K., (2012). *Potential of small-scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa*.
- [31] Renewables First. (2019). *Archimedean screw hydro turbine*. Hämtad från <https://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/archimedean-screw-hydro-turbine/>
- [32] Hydrovolts. (2012). *Case Study: West Sound Utility District*. Hämtad från <http://hydrovolts.com/wp-content/uploads/2012/04/WSUD-Case-Study-Updated1.pdf>
- [33] Soar hydro. (2019). *Inline Hydro Turbine*. Hämtad från <https://soarhydro.com/ilt-turbine/>
- [34] Lucid Energy. (2019). *The lucidpipe power system*. Hämtad från <https://soarhydro.com/ilt-turbine/>
- [35] Ueda, T., Roberts, E. S., Norton, A., Styles, D., Williams, A. P., Ramos, H. M., Gallagher, J., (2019). *A life cycle assessment of the construction phase of eleven micro-hydropower installations in the UK*.
- [36] Fu, Y., Liu, X., Yuan, Z., (2014). *Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China*.
- [37] Thomson, R.C., Harrison, G.P. (2015). *Life cycle costs and carbon emissions of wind power*. Hämtad från [https://www.climatechange.org.uk/media/1463/main\\_report\\_-\\_life\\_cycle\\_costs\\_and\\_carbon\\_emissions\\_of\\_onshore\\_wind\\_power.pdf](https://www.climatechange.org.uk/media/1463/main_report_-_life_cycle_costs_and_carbon_emissions_of_onshore_wind_power.pdf)

- [38] WWF. (2011). *Den levande skogsbäcken*. Hämtad från: <https://www.wwf.se/cdn.triggerfish.cloud/uploads/2019/01/den-levande-skogsbacken-2011.pdf>
- [39] Calles, O., Degerman, E., Wickström, H., Christiansson, J., Gustafsson, S., Näslund, I., (2013). *Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar: Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft*.
- [40] Hydroconnect. (2019). *The technical components*. Hämtad från <http://www.hydroconnect.at/en/technology/>
- [41] Lindblom, E., Holmgren, K., (2016). *Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta: En syntesstudie*.
- [42] National Hydropower Association. (2019). *Affordable*. Hämtad från <https://www.hydro.org/waterpower/why-hydro/affordable/>
- [43] Turbulent. (2019). *Four steps to get a turbulent plant going*. Hämtad från <https://www.turbulent.be/>
- [44] Karimov, K.S., Abid, M., Al-grafi, M.W., Islomov, S.I., Karimov, N.H. (2014). *The economics of microhydro power plants*.
- [45] Energikommissionen. (2015). *Promemoria om kostnaderna för nya elproduktionsanläggningar i Sverige*.
- [46] Västra Götalandsregionen. (2017). *Energi & Teknik*. Hämtad från <https://www.vgregion.se/regional-utveckling/verksamhetsomraden/miljo/power-vast/fakta-om-vindkraft/energi--teknik/>
- [47] SMHI. (2009). *Normal solskenstid för ett år*. Hämtad från <https://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/stralning/normal-solskenstid-for-ett-ar-1.3052>

## Bilagor

Bilaga 1: Ingående data för energikonsumtion i Sverige under 2018

Bilaga 2: Ingående data för energikonsumtion i Sverige under vecka 10, år 2018

Bilaga 3: Ingående data för energikonsumtion i Sverige under vecka 36, år 2018

Bilaga 4: Verkningsgraden för vanliga turbiner

Bilaga 5: Ingående data för tryckförlust på grund av friktion i rörsystem

# Bilaga 1

Konsumtion [MWh]	Data: NordPool					
	Energiregion	SE1 Luleå	SE2 Sundsvall	SE3 Stockholm	SE4 Malmö	SE Sverige
<b>vecka/årtal</b>						
01 - 18	219733	385442	1968883	537980	3112012	
02 - 18	226513	412285	2114150	590772	3343685	
03 - 18	233577	402255	2136143	598513	3370450	
04 - 18	241050	382772	2018927	560953	3203677	
05 - 18	234468	395090	2102427	577438	3309386	
06 - 18	237489	398834	2226045	636059	3498396	
07 - 18	219966	366028	2072458	588426	3246878	
08 - 18	246721	409011	2213835	606635	3476167	
09 - 18	219824	414572	2388799	677053	3700223	
10 - 18	218933	389570	2122833	586062	3317364	
11 - 18	217719	380425	2131573	597239	3326930	
12 - 18	205175	329891	1947308	562120	3044466	
13 - 18	201533	344664	1951792	562115	3060085	
14 - 18	189922	324045	1789348	488517	2791812	
15 - 18	182078	290659	1677402	444033	2594155	
16 - 18	204781	335961	1548901	423103	2512746	
17 - 18	179351	290888	1612602	442192	2524624	
18 - 18	178682	289670	1531872	404323	2404547	
19 - 18	166601	269310	1392585	375558	2203513	
20 - 18	153784	274998	1386098	377252	2191764	
21 - 18	149012	256092	1379375	371952	2156062	
22 - 18	154276	236210	1364364	382193	2138065	
23 - 18	166081	256596	1351801	369174	2145474	
24 - 18	160696	245180	1359531	375931	2141784	
25 - 18	160418	259704	1320844	357974	2098940	
26 - 18	156593	256100	1350722	372761	2136176	
27 - 18	156403	260957	1316048	371216	2104624	
28 - 18	151807	246050	1254143	355239	2007239	
29 - 18	150958	236457	1196228	329504	1913147	
30 - 18	149172	234153	1197977	333992	1915294	
31 - 18	147778	242054	1191545	340229	1921606	
32 - 18	155354	254517	1279236	360972	2050079	
33 - 18	165267	248407	1325196	376323	2115193	
34 - 18	164754	261766	1378211	368500	2173231	
35 - 18	173621	262361	1395927	382099	2214008	
36 - 18	171496	270827	1393001	377431	2212755	
37 - 18	175740	271552	1402792	390760	2245892	
38 - 18	171514	275390	1403880	401498	2252282	
39 - 18	179959	288302	1535058	427242	2430561	
40 - 18	184553	312905	1599257	441576	2538291	
41 - 18	173000	286927	1514686	423306	2397919	
42 - 18	171455	299207	1517340	431888	2419890	
43 - 18	194065	338958	1750348	491589	2774960	
44 - 18	195423	320178	1742211	483656	2741468	
45 - 18	193753	316285	1686835	474788	2671661	
46 - 18	183062	312564	1701890	484639	2682155	
47 - 18	204193	359337	2020667	537407	3121604	
48 - 18	213443	370867	2108165	593766	3286241	
49 - 18	218124	383807	1943176	523153	3068260	
50 - 18	233675	395752	2083620	581040	3294087	
51 - 18	232798	391914	2122851	571810	3319373	
52 - 18	219469	327314	1841863	476514	2865160	

## Bilaga 2

Konsumtion [MWh]	Data: NordPool					SE Sverige
	Datum + Dag	Energiregion	SE1 Luleå	SE2 Sundsvall	SE3 Stockholm	
<b>Måndag</b>	<b>Tidsintervall</b>					
05-03-2018	00-01	1158	2092	11787	3173	18209
05-03-2018	01 - 02	1214	2118	11720	3110	18162
05-03-2018	02 - 03	1204	2069	11741	3033	18047
05-03-2018	03 - 04	1154	2079	11804	3028	18065
05-03-2018	04 - 05	1130	2094	11977	3102	18303
05-03-2018	05 - 06	1308	2329	12626	3249	19512
05-03-2018	06 - 07	1385	2604	13680	3623	21291
05-03-2018	07 - 08	1393	2555	14450	3946	22344
05-03-2018	08 - 09	1372	2580	14617	4062	22630
05-03-2018	09 - 10	1365	2587	14446	4123	22521
05-03-2018	10 - 11	1360	2640	14292	4212	22504
05-03-2018	11 - 12	1367	2532	14365	4277	22540
05-03-2018	12 - 13	1279	2474	14360	4261	22373
05-03-2018	13 - 14	1268	2484	14165	4229	22147
05-03-2018	14 - 15	1350	2396	14082	4128	21955
05-03-2018	15 - 16	1333	2405	14079	4062	21879
05-03-2018	16 - 17	1370	2399	14203	4045	22016
05-03-2018	17 - 18	1506	2391	14580	4071	22548
05-03-2018	18 - 19	1468	2401	14876	4109	22854
05-03-2018	19 - 20	1521	2425	14528	4085	22559
05-03-2018	20 - 21	1306	2382	14040	3954	21682
05-03-2018	21 - 22	1295	2308	13326	3707	20635
05-03-2018	22 - 23	1405	2291	12585	3464	19745
05-03-2018	23 - 00	1321	2182	11984	3209	18696
<b>Tisdag</b>						
06-03-2018	00 - 01	1292	2026	11516	3005	17839
06-03-2018	01 - 02	1308	2063	11350	2977	17698
06-03-2018	02 - 03	1235	2029	11302	2921	17486
06-03-2018	03 - 04	1181	2010	11316	2934	17440
06-03-2018	04 - 05	1296	2038	11447	3022	17804
06-03-2018	05 - 06	1334	2206	11884	3254	18678
06-03-2018	06 - 07	1390	2527	13096	3709	20722
06-03-2018	07 - 08	1506	2708	13854	4010	22078
06-03-2018	08 - 09	1381	2641	13990	4060	22071
06-03-2018	09 - 10	1355	2629	13885	3977	21847
06-03-2018	10 - 11	1248	2546	13925	3911	21630
06-03-2018	11 - 12	1343	2561	13850	3838	21591
06-03-2018	12 - 13	1373	2559	13787	3714	21432
06-03-2018	13 - 14	1339	2554	13660	3596	21150
06-03-2018	14 - 15	1348	2513	13539	3541	20941
06-03-2018	15 - 16	1353	2448	13676	3560	21037
06-03-2018	16 - 17	1353	2412	13614	3533	20912
06-03-2018	17 - 18	1524	2443	14037	3656	21659
06-03-2018	18 - 19	1415	2514	14292	3822	22042
06-03-2018	19 - 20	1451	2510	14100	3870	21931
06-03-2018	20 - 21	1327	2353	13676	3732	21088
06-03-2018	21 - 22	1213	2242	13052	3521	20028
06-03-2018	22 - 23	1230	2108	12381	3311	19030
06-03-2018	23 - 00	1304	2040	11756	3077	18176

<b>Onsdag</b>						
07-03-2018	00 - 01	1247	2052	11321	2949	17568
07-03-2018	01 - 02	1358	2046	11148	2942	17493
07-03-2018	02 - 03	1252	1964	11146	2939	17301
07-03-2018	03 - 04	1211	2011	11152	2935	17309
07-03-2018	04 - 05	1262	2180	11360	3012	17814
07-03-2018	05 - 06	1429	2277	11984	3215	18904
07-03-2018	06 - 07	1288	2513	13206	3660	20666
07-03-2018	07 - 08	1437	2487	14013	3964	21901
07-03-2018	08 - 09	1446	2423	14212	4076	22156
07-03-2018	09 - 10	1443	2375	14094	4040	21952
07-03-2018	10 - 11	1446	2456	13923	3986	21811
07-03-2018	11 - 12	1305	2430	13666	3967	21367
07-03-2018	12 - 13	1312	2417	13468	3869	21065
07-03-2018	13 - 14	1387	2483	13263	3850	20983
07-03-2018	14 - 15	1316	2557	13289	3924	21086
07-03-2018	15 - 16	1443	2526	13326	3939	21233
07-03-2018	16 - 17	1360	2548	13357	3886	21151
07-03-2018	17 - 18	1378	2564	13836	3979	21756
07-03-2018	18 - 19	1364	2577	14090	4103	22134
07-03-2018	19 - 20	1476	2642	13872	4051	22041
07-03-2018	20 - 21	1336	2600	13456	3957	21349
07-03-2018	21 - 22	1367	2488	12801	3710	20366
07-03-2018	22 - 23	1211	2408	12078	3458	19155
07-03-2018	23 - 00	1427	2333	11450	3210	18421
<b>Torsdag</b>						
08-03-2018	00 - 01	1212	2181	11122	3148	17663
08-03-2018	01 - 02	1178	2279	10991	3098	17546
08-03-2018	02 - 03	1204	2264	10965	3052	17484
08-03-2018	03 - 04	1219	2293	11002	3047	17561
08-03-2018	04 - 05	1231	2239	11109	3067	17647
08-03-2018	05 - 06	1359	2367	11677	3204	18607
08-03-2018	06 - 07	1282	2565	12640	3612	20099
08-03-2018	07 - 08	1387	2615	13639	3916	21556
08-03-2018	08 - 09	1344	2579	13879	4022	21825
08-03-2018	09 - 10	1378	2519	13964	4024	21885
08-03-2018	10 - 11	1376	2527	14038	3993	21933
08-03-2018	11 - 12	1351	2504	13955	3942	21752
08-03-2018	12 - 13	1367	2407	13885	3885	21544
08-03-2018	13 - 14	1404	2453	13713	3887	21456
08-03-2018	14 - 15	1401	2426	13626	3866	21319
08-03-2018	15 - 16	1395	2440	13652	3864	21351
08-03-2018	16 - 17	1376	2491	13704	3870	21441
08-03-2018	17 - 18	1383	2444	13955	3922	21703
08-03-2018	18 - 19	1340	2331	14150	3991	21811
08-03-2018	19 - 20	1451	2425	14056	3916	21848
08-03-2018	20 - 21	1487	2227	13582	3774	21070
08-03-2018	21 - 22	1374	2250	12904	3611	20139
08-03-2018	22 - 23	1330	2123	12150	3375	18978
08-03-2018	23 - 00	1261	2137	11549	3143	18091
<b>Fredag</b>						
09-03-2018	00 - 01	1106	2103	11146	2980	17336
09-03-2018	01 - 02	1215	2146	10872	2931	17163
09-03-2018	02 - 03	1217	2124	10707	2875	16922
09-03-2018	03 - 04	1202	2066	10755	2863	16886
09-03-2018	04 - 05	1229	2096	10861	2974	17159
09-03-2018	05 - 06	1316	2193	11392	3136	18037
09-03-2018	06 - 07	1425	2353	12604	3470	19852
09-03-2018	07 - 08	1405	2490	13480	3758	21133
09-03-2018	08 - 09	1435	2558	13713	3823	21529
09-03-2018	09 - 10	1388	2587	13729	3794	21498
09-03-2018	10 - 11	1405	2501	13618	3820	21343
09-03-2018	11 - 12	1403	2542	13473	3832	21251
09-03-2018	12 - 13	1432	2509	13288	3760	20989
09-03-2018	13 - 14	1443	2485	13189	3696	20813
09-03-2018	14 - 15	1361	2446	13043	3573	20423
09-03-2018	15 - 16	1321	2479	13017	3587	20404
09-03-2018	16 - 17	1302	2499	13103	3641	20544
09-03-2018	17 - 18	1439	2574	13357	3754	21125
09-03-2018	18 - 19	1475	2616	13666	3859	21615
09-03-2018	19 - 20	1361	2547	13401	3841	21150
09-03-2018	20 - 21	1365	2540	12820	3624	20349
09-03-2018	21 - 22	1484	2316	12355	3434	19588
09-03-2018	22 - 23	1295	2265	11764	3262	18585
09-03-2018	23 - 00	1387	2210	11271	3091	17959

<b>Lördag</b>						
10-03-2018	00 - 01	1100	2113	11007	2969	17189
10-03-2018	01 - 02	1208	2183	10827	2909	17127
10-03-2018	02 - 03	1198	2196	10647	2881	16921
10-03-2018	03 - 04	1213	2221	10597	2863	16894
10-03-2018	04 - 05	1209	2207	10691	2888	16995
10-03-2018	05 - 06	1197	2300	10894	2984	17375
10-03-2018	06 - 07	1160	2295	11210	3074	17739
10-03-2018	07 - 08	1202	2335	11603	3218	18358
10-03-2018	08 - 09	1322	2394	12081	3364	19162
10-03-2018	09 - 10	1263	2388	12505	3472	19627
10-03-2018	10 - 11	1260	2304	12561	3476	19601
10-03-2018	11 - 12	1251	2278	12562	3443	19534
10-03-2018	12 - 13	1122	2209	12410	3354	19094
10-03-2018	13 - 14	1198	2192	12218	3270	18878
10-03-2018	14 - 15	1195	2229	12151	3185	18760
10-03-2018	15 - 16	1210	2236	12110	3151	18707
10-03-2018	16 - 17	1219	2235	12230	3246	18931
10-03-2018	17 - 18	1306	2324	12663	3386	19679
10-03-2018	18 - 19	1314	2336	13023	3555	20228
10-03-2018	19 - 20	1307	2330	12916	3518	20071
10-03-2018	20 - 21	1208	2218	12422	3336	19185
10-03-2018	21 - 22	1217	2094	11921	3212	18443
10-03-2018	22 - 23	1057	2146	11563	3115	17881
10-03-2018	23 - 00	1121	2028	11218	3043	17410
<b>Söndag</b>						
11-03-2018	00 - 01	1117	1817	10888	2957	16778
11-03-2018	01 - 02	1160	2024	10815	2896	16894
11-03-2018	02 - 03	1188	2046	10749	2878	16861
11-03-2018	03 - 04	1191	2030	10789	2909	16919
11-03-2018	04 - 05	1183	2058	10806	2920	16966
11-03-2018	05 - 06	1184	2073	10779	2903	16939
11-03-2018	06 - 07	1190	2142	10867	2949	17148
11-03-2018	07 - 08	1183	2099	11131	2990	17402
11-03-2018	08 - 09	1175	2102	11564	3189	18030
11-03-2018	09 - 10	1205	2159	11910	3330	18605
11-03-2018	10 - 11	1244	2183	12066	3354	18847
11-03-2018	11 - 12	1176	2156	12178	3389	18898
11-03-2018	12 - 13	1163	2101	12225	3308	18797
11-03-2018	13 - 14	1195	2109	12129	3341	18772
11-03-2018	14 - 15	1183	2099	12089	3244	18615
11-03-2018	15 - 16	1186	2100	12164	3200	18649
11-03-2018	16 - 17	1229	2172	12246	3313	18959
11-03-2018	17 - 18	1246	2189	12717	3439	19592
11-03-2018	18 - 19	1308	2226	13140	3563	20238
11-03-2018	19 - 20	1269	2241	12940	3510	19960
11-03-2018	20 - 21	1274	2167	12548	3360	19351
11-03-2018	21 - 22	1277	2133	12135	3193	18737
11-03-2018	22 - 23	1167	2116	11554	3041	17878
11-03-2018	23 - 00	1250	2052	11034	2933	17269

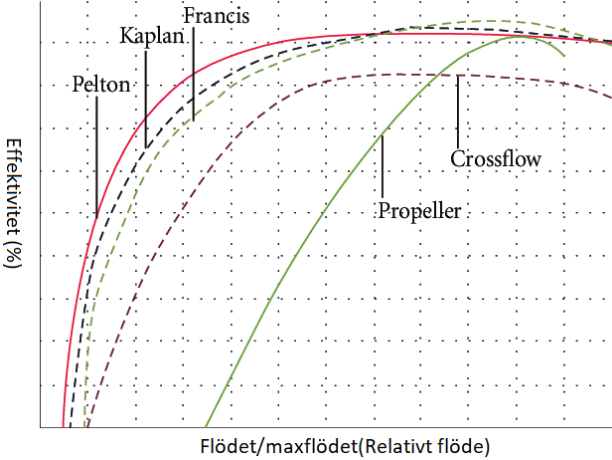
## Bilaga 3

Konsumtion [MWh]	Data: NordPool					
	Energiregion	SE1 Luleå	SE2 Sundsvall	SE3 Stockhol m	SE4 Malmö	SE Sverige
<b>Måndag</b>	<b>Tidsintervall</b>					
03-09-2018	00 - 01	936	1402	6920	1760	11018
03-09-2018	01 - 02	933	1372	6773	1674	10752
03-09-2018	02 - 03	936	1358	6732	1620	10646
03-09-2018	03 - 04	960	1395	6836	1666	10857
03-09-2018	04 - 05	940	1388	6992	1663	10983
03-09-2018	05 - 06	952	1372	7317	1824	11465
03-09-2018	06 - 07	1129	1657	8299	2131	13216
03-09-2018	07 - 08	981	1695	9288	2496	14460
03-09-2018	08 - 09	1082	1733	9576	2696	15087
03-09-2018	09 - 10	1085	1741	9689	2700	15215
03-09-2018	10 - 11	1093	1741	9671	2709	15214
03-09-2018	11 - 12	1060	1712	9774	2660	15206
03-09-2018	12 - 13	1113	1749	9724	2637	15223
03-09-2018	13 - 14	1115	1748	9735	2666	15264
03-09-2018	14 - 15	1160	1738	9747	2662	15307
03-09-2018	15 - 16	1091	1750	9662	2632	15135
03-09-2018	16 - 17	1107	1871	9488	2565	15031
03-09-2018	17 - 18	1148	1906	9524	2548	15126
03-09-2018	18 - 19	1070	1744	9268	2459	14541
03-09-2018	19 - 20	990	1640	9213	2444	14287
03-09-2018	20 - 21	961	1651	9225	2518	14355
03-09-2018	21 - 22	1009	1649	8722	2371	13751
03-09-2018	22 - 23	1052	1654	8038	2136	12880
03-09-2018	23 - 00	1066	1544	7457	1930	11997
<b>Tisdag</b>						
04-09-2018	00 - 01	977	1509	7026	1838	11350
04-09-2018	01 - 02	979	1499	6916	1795	11189
04-09-2018	02 - 03	920	1446	6854	1791	11011
04-09-2018	03 - 04	995	1411	6892	1793	11091
04-09-2018	04 - 05	951	1497	6981	1807	11236
04-09-2018	05 - 06	966	1459	7399	1993	11817
04-09-2018	06 - 07	988	1678	8485	2325	13476
04-09-2018	07 - 08	1061	1760	9343	2650	14814
04-09-2018	08 - 09	1041	1778	9475	2788	15082
04-09-2018	09 - 10	1046	1948	9613	2774	15381
04-09-2018	10 - 11	1132	1998	9649	2818	15597
04-09-2018	11 - 12	1110	1888	9650	2822	15470
04-09-2018	12 - 13	1127	1872	9585	2812	15396
04-09-2018	13 - 14	1097	1836	9580	2770	15283
04-09-2018	14 - 15	1101	1800	9516	2760	15177
04-09-2018	15 - 16	1082	1804	9532	2719	15137
04-09-2018	16 - 17	1103	1818	9478	2654	15053
04-09-2018	17 - 18	1095	1810	9502	2669	15076
04-09-2018	18 - 19	1097	1733	9342	2634	14806
04-09-2018	19 - 20	1126	1753	9299	2627	14805
04-09-2018	20 - 21	1128	1809	9404	2698	15039
04-09-2018	21 - 22	1120	1727	8906	2542	14295
04-09-2018	22 - 23	1088	1634	8211	2329	13262
04-09-2018	23 - 00	1025	1624	7628	2114	12391

<b>Onsdag</b>						
05-09-2018	00 - 01	996	1532	7172	1951	11651
05-09-2018	01 - 02	949	1523	6954	1877	11303
05-09-2018	02 - 03	942	1497	6921	1822	11182
05-09-2018	03 - 04	937	1463	6866	1825	11091
05-09-2018	04 - 05	917	1537	7050	1859	11363
05-09-2018	05 - 06	924	1482	7449	1998	11853
05-09-2018	06 - 07	943	1653	8428	2302	13326
05-09-2018	07 - 08	1006	1727	9369	2616	14718
05-09-2018	08 - 09	1030	1766	9650	2705	15151
05-09-2018	09 - 10	1031	1786	9727	2737	15281
05-09-2018	10 - 11	1013	1774	9872	2778	15437
05-09-2018	11 - 12	1004	1816	9829	2782	15431
05-09-2018	12 - 13	984	1757	9800	2723	15264
05-09-2018	13 - 14	997	1715	9728	2709	15149
05-09-2018	14 - 15	973	1759	9670	2700	15102
05-09-2018	15 - 16	996	1740	9721	2667	15124
05-09-2018	16 - 17	1059	1811	9511	2593	14974
05-09-2018	17 - 18	1023	1771	9646	2612	15052
05-09-2018	18 - 19	956	1730	9436	2574	14696
05-09-2018	19 - 20	975	1796	9402	2595	14768
05-09-2018	20 - 21	964	1771	9460	2634	14829
05-09-2018	21 - 22	973	1696	8844	2460	13973
05-09-2018	22 - 23	939	1637	8160	2234	12970
05-09-2018	23 - 00	934	1612	7495	2037	12078
<b>Torsdag</b>						
06-09-2018	00 - 01	868	1585	7111	1911	11475
06-09-2018	01 - 02	901	1485	6984	1849	11219
06-09-2018	02 - 03	918	1421	6906	1837	11082
06-09-2018	03 - 04	996	1416	6905	1841	11158
06-09-2018	04 - 05	1022	1435	6934	1880	11271
06-09-2018	05 - 06	1069	1529	7272	2021	11891
06-09-2018	06 - 07	1016	1657	8200	2350	13223
06-09-2018	07 - 08	1063	1843	9162	2681	14749
06-09-2018	08 - 09	1042	1767	9461	2798	15068
06-09-2018	09 - 10	1017	1808	9537	2825	15187
06-09-2018	10 - 11	1017	1802	9537	2860	15216
06-09-2018	11 - 12	1033	1783	9534	2841	15191
06-09-2018	12 - 13	1087	1757	9517	2774	15135
06-09-2018	13 - 14	1037	1728	9489	2720	14974
06-09-2018	14 - 15	912	1773	9478	2677	14840
06-09-2018	15 - 16	1067	1785	9460	2681	14993
06-09-2018	16 - 17	1092	1774	9283	2614	14763
06-09-2018	17 - 18	1109	1817	9432	2600	14958
06-09-2018	18 - 19	1106	1779	9281	2502	14668
06-09-2018	19 - 20	1160	1697	9259	2466	14582
06-09-2018	20 - 21	1129	1718	9347	2496	14690
06-09-2018	21 - 22	1041	1647	8861	2381	13930
06-09-2018	22 - 23	1038	1586	8163	2179	12966
06-09-2018	23 - 00	969	1491	7564	1943	11967
<b>Fredag</b>						
07-09-2018	00 - 01	937	1483	7105	1906	11431
07-09-2018	01 - 02	921	1484	6895	1820	11120
07-09-2018	02 - 03	965	1502	6813	1763	11043
07-09-2018	03 - 04	979	1475	6810	1786	11050
07-09-2018	04 - 05	927	1464	6911	1841	11143
07-09-2018	05 - 06	922	1511	7321	1919	11673
07-09-2018	06 - 07	1021	1576	8354	2257	13208
07-09-2018	07 - 08	1117	1785	9316	2598	14816
07-09-2018	08 - 09	1082	1838	9558	2725	15203
07-09-2018	09 - 10	1075	1854	9687	2741	15357
07-09-2018	10 - 11	1073	1902	9845	2759	15579
07-09-2018	11 - 12	1031	1865	9792	2724	15412
07-09-2018	12 - 13	1047	1850	9713	2690	15300
07-09-2018	13 - 14	967	1809	9490	2632	14898
07-09-2018	14 - 15	945	1733	9311	2546	14535
07-09-2018	15 - 16	988	1774	9177	2500	14439
07-09-2018	16 - 17	1028	1713	8978	2457	14176
07-09-2018	17 - 18	1027	1698	8928	2473	14126
07-09-2018	18 - 19	1114	1700	8789	2377	13980
07-09-2018	19 - 20	1125	1724	8730	2376	13955
07-09-2018	20 - 21	1033	1746	8649	2317	13745
07-09-2018	21 - 22	1015	1654	8155	2162	12986
07-09-2018	22 - 23	1001	1540	7608	2037	12186
07-09-2018	23 - 00	998	1409	7026	1886	11319

Lördag						
08-09-2018	00 - 01	972	1364	6670	1811	10817
08-09-2018	01 - 02	905	1449	6512	1750	10616
08-09-2018	02 - 03	897	1370	6404	1761	10432
08-09-2018	03 - 04	910	1374	6330	1748	10362
08-09-2018	04 - 05	868	1347	6404	1737	10356
08-09-2018	05 - 06	876	1335	6586	1710	10507
08-09-2018	06 - 07	949	1302	6751	1726	10728
08-09-2018	07 - 08	1034	1303	7162	1851	11350
08-09-2018	08 - 09	1038	1388	7608	2026	12060
08-09-2018	09 - 10	1078	1541	8047	2131	12797
08-09-2018	10 - 11	1046	1681	8213	2122	13062
08-09-2018	11 - 12	947	1644	8240	2098	12929
08-09-2018	12 - 13	1020	1536	8128	2065	12749
08-09-2018	13 - 14	1057	1479	8001	1970	12507
08-09-2018	14 - 15	943	1569	7855	1885	12252
08-09-2018	15 - 16	1026	1549	7696	1893	12164
08-09-2018	16 - 17	1033	1446	7553	1966	11998
08-09-2018	17 - 18	1049	1381	7742	2067	12239
08-09-2018	18 - 19	1045	1480	7959	2151	12635
08-09-2018	19 - 20	1114	1482	8038	2183	12817
08-09-2018	20 - 21	1071	1499	8059	2152	12781
08-09-2018	21 - 22	999	1386	7611	2036	12032
08-09-2018	22 - 23	975	1356	7296	1913	11540
08-09-2018	23 - 00	1014	1274	7068	1806	11162
Söndag						
09-09-2018	00 - 01	1005	1303	6651	1728	10687
09-09-2018	01 - 02	988	1354	6450	1596	10388
09-09-2018	02 - 03	1006	1435	6348	1509	10298
09-09-2018	03 - 04	996	1443	6407	1489	10335
09-09-2018	04 - 05	1018	1368	6514	1522	10422
09-09-2018	05 - 06	964	1366	6546	1568	10444
09-09-2018	06 - 07	988	1389	6539	1569	10485
09-09-2018	07 - 08	1014	1392	6675	1664	10745
09-09-2018	08 - 09	1006	1467	7201	1829	11503
09-09-2018	09 - 10	1035	1540	7713	2015	12303
09-09-2018	10 - 11	1064	1593	8112	2072	12841
09-09-2018	11 - 12	1035	1608	8088	2111	12842
09-09-2018	12 - 13	1062	1633	8160	2090	12945
09-09-2018	13 - 14	1060	1579	8009	2110	12758
09-09-2018	14 - 15	1101	1529	7897	2108	12635
09-09-2018	15 - 16	1098	1527	7905	2081	12611
09-09-2018	16 - 17	1062	1551	7957	2102	12672
09-09-2018	17 - 18	1072	1630	8209	2188	13099
09-09-2018	18 - 19	1018	1651	8376	2273	13318
09-09-2018	19 - 20	1052	1517	8498	2300	13367
09-09-2018	20 - 21	1063	1572	8512	2298	13445
09-09-2018	21 - 22	968	1470	8012	2180	12630
09-09-2018	22 - 23	1010	1308	7557	2053	11928
09-09-2018	23 - 00	1109	1243	6998	1920	11270

Bilaga 4



## Bilaga 5

Antaganden	Densitet: 999,1 kg/m <sup>3</sup>		Dynamisk viskositet (15°C): 0,001138 [Pa*s]							
Volymflöde [l/s]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rördiameter [m]										
1	11179	22357	33536	44715	55893	67072	78251	89429	100608	111787
0,9	12421	24841	37262	49683	62104	74524	86945	99366	111787	124207
0,8	13973	27947	41920	55893	69867	83840	97813	111787	125760	139733
0,7	15970	31939	47909	63878	79848	95817	111787	127756	143726	159695
0,6	18631	37262	55893	74524	93155	111787	130418	149049	167680	186311
0,5	22357	44715	67072	89429	111787	134144	156501	178859	201216	223573
0,4	27947	55893	83840	111787	139733	167680	195626	223573	251520	279466
0,3	37262	74524	111787	149049	186311	223573	260835	298098	335360	372622
0,2	55893	111787	167680	223573	279466	335360	391253	447146	503040	558933
0,1	111787	223573	335360	447146	558933	670719	782506	894293	1006079	1117866
Volymflöde [l/s]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rördiameter [m]										
1	0,000023	0,000079	0,000163	0,000273	0,000408	0,000567	0,000749	0,000953	0,001179	0,001426
0,9	0,000038	0,000130	0,000270	0,000453	0,000677	0,000941	0,001243	0,001581	0,001956	0,002367
0,8	0,000066	0,000229	0,000475	0,000798	0,001192	0,001657	0,002188	0,002785	0,003446	0,004169
0,7	0,000125	0,000435	0,000902	0,001514	0,002265	0,003147	0,004158	0,005293	0,006549	0,007925
0,6	0,000262	0,000911	0,001891	0,003175	0,004750	0,006602	0,008724	0,011107	0,013746	0,016636
0,5	0,000629	0,002186	0,004538	0,007624	0,011408	0,015862	0,020965	0,026698	0,033048	0,040003
0,4	0,001834	0,006381	0,013254	0,022282	0,033355	0,046393	0,061335	0,078130	0,096737	0,117120
0,3	0,007290	0,025403	0,052817	0,088856	0,133087	0,185197	0,244944	0,312130	0,386591	0,468186
0,2	0,0251046	0,078257	0,1571145	0,2525040	0,3696960	0,5304743	0,726717	0,95201522	1,228024	1,595251
0,1	0,1426059	0,5000322	1,0437948	1,7612175	2,6442008	3,6868804	4,8847083	6,2339977	7,7316667	9,3750789