

UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS 24046
Examensarbete 30 hp
September 2024

Kan Slussen bli självförsörjande på lokalt producerad vattenkraft

Fredrik Gannedahl

Civilingenjörsprogrammet i System i teknik och samhälle

UPPSALA UNIVERSITET

Can Slussen become self-suffcient on locally produced hydropower

Fredrik Gannedahl

Abstract

Through emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases, humans have been a contributing factor to the increase in the average temperature on earth. The Swedish government has set a national climate target to reduce the emissions of greenhouse gases and have zero net emissions by 2045 in order to live up to the requirements state in the Paris Agreement. To be able to reach these goals, more renewable energy is needed to meet the power needs that exists in society as well as reduced emissions in connection with the construction sector. Right now Slussen in Stockholm is currently undergoing reconstruction to ensure above all else two major things. That no salt water seeps into the fresh water in Mälaren in order to secure drinking water for approximately two million people and to be able to drain larger amounts of water from Mälaren to minimize the risk of flooding the surroundings of Mälaren. This means that the flow of water from Mälaren to Saltsjön will occasionally be very high.

This thesis examines the possibilities of installing hydropower at Slussen, from both a technical perspective as well as an economic perspective where two different types of turbines are considered. One is a StraFlo-turbine, a sort of Kaplan turbine, and the other is a vertical axis water turbine. Based on the water flow from the past five years, calculations have been made on how much power the two different turbines could generate under the given circumstances.

The result shows that the StraFlo-turbine can potentially generate significantly more power than the vertical axis water turbine at a medium flow rate. The StraFlo-turbine would more than cover the facility's power needs for the hatches and the draw bridges during the majority of the year, something the vertical axis turbine would have problems with. Although the investment cost of the StraFlo-turbine is significantly higher, the payback period is shorter.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Ann Blixt Ämnesgranskare: Mikael Bergqvist

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

Sammanfattning

Under 2021 stod vattenkraft, kärnkraft och vindkraft för över 90 procent av Sveriges elmix. Vattenkraften stod för 43 av de 90 procenten. Majoriteten av vattenkraften är lokaliserad till de norra delarna av landet. I Sverige kan skillnaden i elpris vara rätt stor beroende på var i landet man bor. I norr är det billigare än i söder mycket på grund av flaskhalsar i elnätet när elen ska överföras från produktionen i norr till konsumenterna i söder.

Ett sätt att minska effektbristen är mindre, lokala elproducenter i de södra delarna av Sverige. Det kan till exempel handla om mindre vattenkraftverk som täcker upp delar av effektbehovet som finns.

Sedan 2016 har en ombyggnation av Slussen i Stockholm pågått. Anledningen till detta är att den gamla slussanläggningen var gammal och sliten. Dessutom handlar det om att minimera översvämningsrisken i Mälaren samt att säkerställa dricksvattnet till två miljoner människor genom att hålla saltvattnet i Saltsjön borta från Mälaren. Slussanläggningen består av tre kanaler, två så kallade avbördningskanaler med varsin avbördningslucka i mitten av kanalerna som används för att tappa Mälaren på vatten, samt en slusskanal där båtar slussas mellan Mälaren och Saltsjön. Då väldigt mycket vatten kommer flöda genom den nya slussanläggningen och dess avbördningskanaler är det intressant att se ifall det är möjligt att installera vattenkraft för täcka lokala effektbehov.

I den här rapporten undersöks två olika typer av vattenkraftsturbiner som skulle passa vid Nya Slussen. Den ena turbintypen är ett strömkraftverk som liknar ett vertikalt vindkraftverk och den andra är en typ av kaplanturbin och ser mer ut som en båtpropeller. Effektbehoven som undersöks vid Slussen inkluderar effekten som krävs för att driva avbördningsluckornas maskineri samt slussluckorna och två stycken öppningsbara lågbroar.

I rapporten utreds det vilken av de två typerna av turbin som lämpar sig bäst vid Nya Slussen. Dels ur ett produktionsperspektiv men även ur en ekonomisk synvinkel. Hur mycket producerad effekt respektive turbin kan uppnå samt hur lång tid tar det innan investeringen är återbetald är frågor som tas upp.

Den vattenflödesdata som ligger till grund för rapporten är hämtad från Stockholms Hamnar och är uppdelad på medelflöde per månad under åren 2017-2021. Något som är väldigt tydlig utifrån den data som är tillgänglig är att vattenflödet är som störst under vintermånaderna och avtar kraftigt under sommaren. Det innebär att även effektproduktion följer samma mönster då den är beroende på mängden vatten som flödar.

Resultatet visar att den bäst lämpade turbinen är kaplanturbinen. Vid vattenmedelflöde kan den producera mer än 200 gånger så mycket effekt som den vertikalt stående strömkraftturbinen samt att återbetalningstiden är betydligt lägre. Dock är den betydligt dyrare i investeringskostnad.

Ordlista

- **Avbördningskanal** – Kanal som vatten tappas ur
- **Avbördningslucka** – Lucka i avbördningskanal som reglerar hur mycket vatten som tappas ur
- **LCOE** – Kostnad per producerad kWh under kraftverkets hela livstid
- **Livscykelperspektiv** – Hur mycket en produkt påverkan miljön under sin livstid, från det att naturresurser utvinns till dess att produkten slutar användas och återvinns
- **Off-shore vindkraftverk** – Ett vindkraftverk till havs
- **Strömkraftverk** – Vattenkraftverk som saknar vattenmagasin

Förord

Jag vill inleda med att tacka Skanska och alla medarbetare därför möjligheten att genomföra ett spännande examensarbete. Ett extra stort tack vill jag rikta till min handledare Ann Blixt för all stöttning, handledning och tålamod under arbetets gång som bidragit till att detta examensarbete blivit färdigt.

Jag vill även rikta ett tack till min ämnesgranskare Mikael Bergkvist för all hjälp under detta examensarbete.

Fredrik Gannedahl
Uppsala Universitet, 2024

Innehållsförteckning

1. Inledning 7

1.1 Problemformulering 8

1.2 Syfte och frågeställning 8

1.3 Avgränsningar och begränsningar 8

1.4 Disposition 9

2. Bakgrund 10

2.1 Slussen 10

2.1.1 Historia 10

2.1.2 Nya Slussen 11

2.2 Vattenkraft 13

2.2.1 Vattenkraftens historia 13

2.2.2 Grundläggande om vattenkraft 13

2.2.3 Strömkraft 17

2.3 Vattenkraftens roll i energisystemet 19

2.3.1 Elmarknaden 19

2.4 Vattenkraftens nackdelar och miljöpåverkan 21

2.5 Juridiska krav 21

2.6 Kostnadsanalys 21

2.6.1 Livscykelperspektiv 22

3. Förutsättningar vid Slussen 23

3.1 Avbördningsluckor 23

3.2 Slussluckor 25

3.3 Erosionsskydd 26

4. Metod 28

4.1 Litteraturstudie 28

4.2 Inhämtning av information 28

4.2.1 Platsbesök Nya Slussen 28

4.3 Beräkningar 28

4.3.1 Effekt och energiberäkningar 28

4.3.2 Kostnadsanalys 29

4.4 Dimensionering av turbin 29

5. Data 31

5.1 Kostnader 31

5.2 Elpriser 31

5.3 Data från Slussen för beräkningar 32

5.3.1 Vattenflöde Slussen 32

5.3.2 Vattenhastighet Slussen 34
5.3.3 Effektbehov Nya Slussen 37
6. Resultat 39
6.1 Beräkningar 39
6.1.1 Effekt 39
6.1.2 Energi 41
6.1.3 Effektbehov 43
6.2 Kostnadsanalys 45
6.2.1 Återbetalningsperiod 45
6.2.2 LCOE 45
7. Diskussion 47
7.1 Vidare forskning 51
8. Slutsatser 52
Referenser 53
Appendix A 56

1. Inledning

Under en lång tid har nu medeltemperaturen på jorden ökat avsevärt och på ett icke-naturligt sätt. Den största påverkan har människan haft genom utsläpp av koldioxid och andra växthusgaser. Utsläppen av växthusgaser har globalt sett ökat kraftigt sedan 1950-talet och för att minska den globala uppvärmningen och nå det temperaturmål som sattes i och med Parisavtalet 2015, måste utsläppen globalt minska [1]. För att Sverige ska leva upp till de krav som Parisavtalet ställer finns ett nationellt klimatmål. Enligt det klimatmålet ska Sveriges utsläpp av växthusgaser vara netto-noll senast 2045. Efter det ska Sverige, enligt det nationella klimatmålet, ha negativa utsläpp av växthusgaser [2].

För att Parisavtalet och de klimatmål som är uppsatt ska nås behöver en förändring i samhället ske och omställningen till mer förnybar energi behöver accelereras för att få ner koldioxidutsläppen. Ungefär en fjärdedel av de globala utsläppen kommer från värme- och elproduktion. I och med att tekniken går framåt blir det enklare att producera utsläppsfri el och värme. Globalt sett står kol och olja för över 50 procent av energitillförseln. Där kolkraften motsvarar ungefär 40 procent av elproduktionen i världen, men representerar upp emot 70 procent av de globala utsläppen från elproduktionen [3]. Sett till elproduktionen i Sverige under 2021 är vattenkraften dominant med 43 procent av produktionen, följt av kärnkraft och vindkraft på 31 procent respektive 17 procent [4].

För att möta det effektbehov som finns i samhället där fler och fler funktioner blir beroende av elektricitet samt för att försöka sänka priset på el, behöver man ta till vara på de outnyttjade möjligheterna att utvinna energi på som finns i samhället. Framförallt i de södra delarna av Sverige där elproduktionen inte är i närheten lika stor som i de norra delarna. Det kan till exempel handla om att energieffektivisera byggnader, införa smarta laddningssystem eller sätta upp solceller på hus. En sådan outnyttjad möjlighet kan potentiellt finnas vid Slussen i Stockholm, där det finns ett naturligt vattenflöde till följd av den naturliga nivåskillnaden mellan Mälaren och Saltsjön, som potentiellt skulle kunna leda till utvinning av effekt genom vattenturbiner.

Sedan 2016 genomgår Slussen en ombyggnation där Skanska är ett av företagen som, på uppdrag av Stockholms stad Exploateringskontoret, bygger om Slussen. Denna ombyggnation förväntas pågå fram till och med år 2025. Anledningarna till att Slussen byggs om är: Slussen var i väldigt dåligt skick, kunna möjliggöra en ökad tappning av Mälarens vatten för att förhindra översvämningar samt förhindra saltvattnet i Saltsjön från att tränga in i Mälaren och då kunna säkerställa rent dricksvatten till två miljoner människor. Det är därför intressant att, i och med denna ombyggnad, undersöka ifall det är tekniskt och fysiskt möjligt samt ekonomiskt försvarbart att installera vattenkraft vid

Slussen för att kunna driva Nya Slussen på lokalt producerad förnybar el. Detta arbete har initierats av Skanska.

1.1 Problemformulering

Slussen är knutpunkt i Stockholm som nu genomgår en omfattande renovering. Där finns en naturlig skillnad i nivå på vattnet mellan Mälaren och Saltsjön, vilket gör att det finns ett naturligt flöde av vatten. Detta gör det intressant att undersöka ifall det är tekniskt och fysiskt möjligt att installera vattenkraft vid Slussen för att driva till exempel slussluckor och avbördningsluckor. Om så är fallet, är det ekonomiskt försvarbart, sett ur ett livscykelperspektiv, att göra det? Med dagens höga elpriser och rådande effektbrist i åtanke, gör det än mer intressant att undersöka ifall det är möjligt att installera vattenkraft vid Slussen.

1.2 Syfte och frågeställning

Det här examensarbetet ämnar att undersöka ifall Slussen i Stockholm kan bli självförsörjande på lokalt producerad grön el. Syftet är att utreda om vattenkraft kan installeras i samband med att Slussen nu byggs om för att kunna driva slussluckor och avbördningsluckor. Det leder till följande frågeställningar ska besvaras för att studera detta:

- Är det tekniskt och fysiskt möjligt att installera tillräckligt mycket vattenkraft för att göra sluss- och avbördningsanläggningen självförsörjande på lokalt producerad el?
- Är det, utifrån ett livscykelperspektiv, ekonomiskt försvarbart att göra det?

1.3 Avgränsningar och begränsningar

Till följd av den begränsade tidsramen har en del avgränsningar behövts göras i denna rapport. I arbetet kommer enbart effektbehovet för själva sluss- och avbördningsanläggningen räknas med. I verkligenheten är effektbehovet större för hela Nya Slussen om man räknar med övriga delar av anläggningen samt kontors- och affärslokaler som kommer ingå i byggandet. Därav kommer till exempel inte ventilation och belysning för dessa fastigheter ingå.

I skrivande stund är Nya Slussen under byggnation och är således inte helt och hållet i drift än, vilket innebär att det inte finns exakta siffror på allt utan det är uppskattningar och beräkningar som ligger till grund för underlaget. Vattenflödet är baserat på tidigare år, men nu kommer nya luckor att finnas på plats som skulle kunna ändra det vattenflöde som varit under tidigare år. Vattenflödet kommer även bero på hur mycket vatten som finns i Mälaren och Saltsjön. Om till exempel vattennivån i Saltsjön är hög kommer avtappningsluckorna vara stängda för att förhindra saltvatteninträngning i Mälaren.

Den typ av strömkraftverk som liknar ett vertikalt stående vindkraftverk finns än så länge inte i någon form av massproduktion, vilket gör det svårt att uppskatta ett marknadsmässigt pris. Därför har priset som används i rapporten tagits från vanliga off-shore vindkraftverk. Detta då materialtillgången blir ungefär densamma samt att den extra kostnaden för att installera något i vatten på så sätt tas med i beräkningen av priset även i rapporten. Senare i rapporten utvecklas detta resonemang.

I rapporten görs antagandet att turbinerna kommer vara igång under dygnets alla timmar. I verkligheten kommer det inte vara så då exempelvis vattenflödet kan vara för lågt för att turbinerna ska kunna vara igång eller att de behöver ställas av på grund av underhåll.

Kostnaden för generator och kablar tas inte upp i rapporten vilket bidrar till att de ekonomiska beräkningar blir mer fördelaktiga än hur verkligheten ser ut. Hade dessa kostnaderna räknats med hade både LCOE och återbetalningstiden blivit sämre.

1.4 Disposition

Det här arbetet inleds med att ge bakgrundsinformation och en redogörelse för vilka förutsättningar som finns kring Slussen i Stockholm samt hur vattenkraft fungerar. Detta genom en kortare genomgång av vad Slussen är för något, en historisk bakgrund kring hur Slussen sett ut genom tiderna samt hur Nya Slussen ska se ut. En kortare historisk bakgrund till vattenkraft ges, hur vattenkraften ser ut idag samt en teoretisk bakgrund till hur vattenkraftverk fungerar. Rapporten fortsätter sedan med att beskriva arbetets tillvägagångssätt och den data som används i arbetet presenteras. Därefter följer resultat och diskussion, där resultatet av beräkningarna redovisas respektive diskuteras.

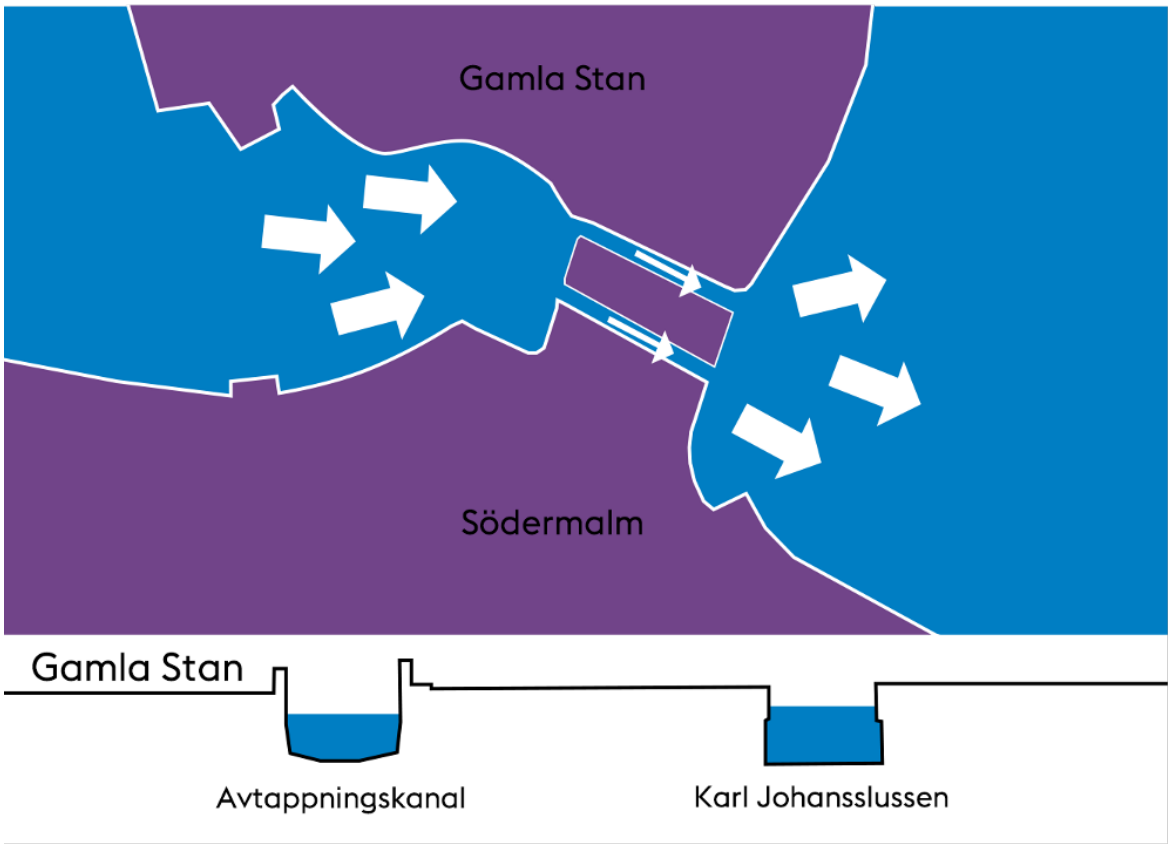
2. Bakgrund

2.1 Slussen

Slussen är ett område på Södermalm som gränsar till Gamla stan, mitt i Stockholm, som är en knutpunkt för många olika trafikslag. Härifrån avgår både båtar, bussar, tunnelbana och Saltsjöbanan samt att bilar, cyklister och gångtrafikanter kan röra sig på området samtidigt. Eftersom Slussen är en av punkterna som skiljer Saltsjön och Mälaren fyller sluss- och avbördningsanläggningen en viktig funktion i att vara med och reglera vattennivån i Mälaren genom att man kan tappa ut vatten ifrån Mälaren och minska översvämningsrisken. Samtidigt ser anläggningen till att hålla saltvatten borta ifrån Mälarens sötvatten och på så sätt säkerställa dricksvattnet för ungefär 2 miljoner människor runtomkring Mälaren som får sitt dricksvatten därifrån. Dessutom möjliggör slusskanalen för båttrafik att kunna ta sig mellan Mälaren och Saltsjön trots nivåskillnaderna mellan de två vattnen [5].

2.1.1 Historia

Slussen har byggts om fem gånger för att bättre passa behoven som fanns vid den tiden. Ombyggnationerna har inträffat ungefär med 70-100 års mellanrum. Drottning Kristinas sluss invigdes 1642, var den första slussen och byggdes för att underlätta både sjöfarten och handeln till Mälardalen. 1755 byggde Christopher Polhem en andra sluss som var både djupare och bredare då den gamla slussen ansågs vara för liten och för dåligt byggd då det krävdes mycket reparationer. När ångbåtstrafiken under 1800-talet tog över behövdes återigen en bredare och djupare sluss. Den här gången var det Nils Ericsson som konstruerade den nya slussen som stod klar 1850. Under tidigt 1900-tal orsakade den ökade biltrafiken stora problem vid Slussen. Därför stod den fjärde slussen, Karl Johanslussen färdig 1935. Vid det här laget hade Hammarbyslussen öppnat, vilken större fartyg använde sig av, varför Slussens broar inte längre behövde vara öppningsbara. Samtidigt gjordes Nils Ericssonslussen om till att fungera som avtappningskanal och Polhemslussen fylldes igen. Syftet med varje ombyggnad var att bättre passa den tidens behov [6]. I figur 1 visas hur den senaste slussanläggningen, färdigställt under 1930-talet, såg ut både ovanifrån och i profil.



Figur 1. Hur slussanläggningen såg ut innan den pågående ombyggnationen började, både ovanifrån och genomskärning [6]

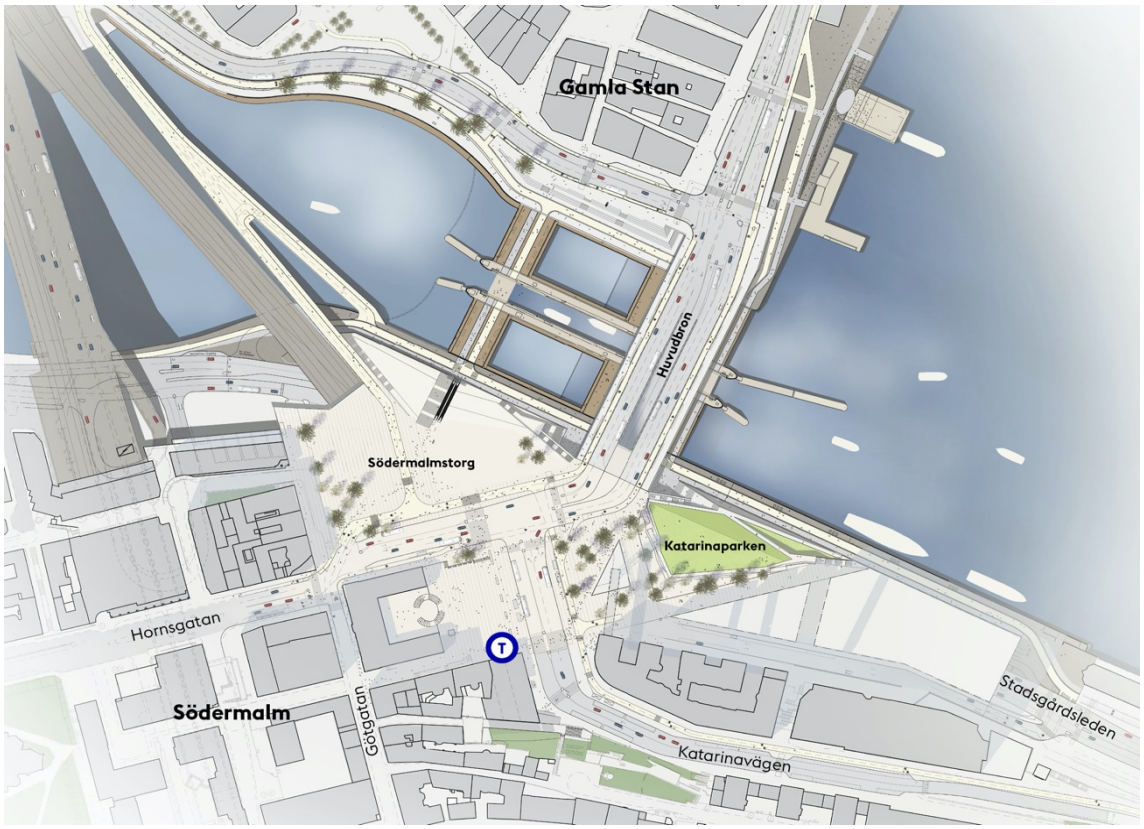
2.1.2 Nya Slussen

Slussen är för tillfället under ombyggnad och har varit det sedan 2016 och ska fortsätta vara det till och med 2025. Som ovan nämnt är anledningen till ombyggnationen dels att bättre passa de behov som Stockholm och människorna där har idag. Detta i kombination med att Slussen började bli nedgånget med bland annat söndervittrande betong och dålig grund, gjorde att beslut om att riva och bygga upp Slussen på nytt togs [6].

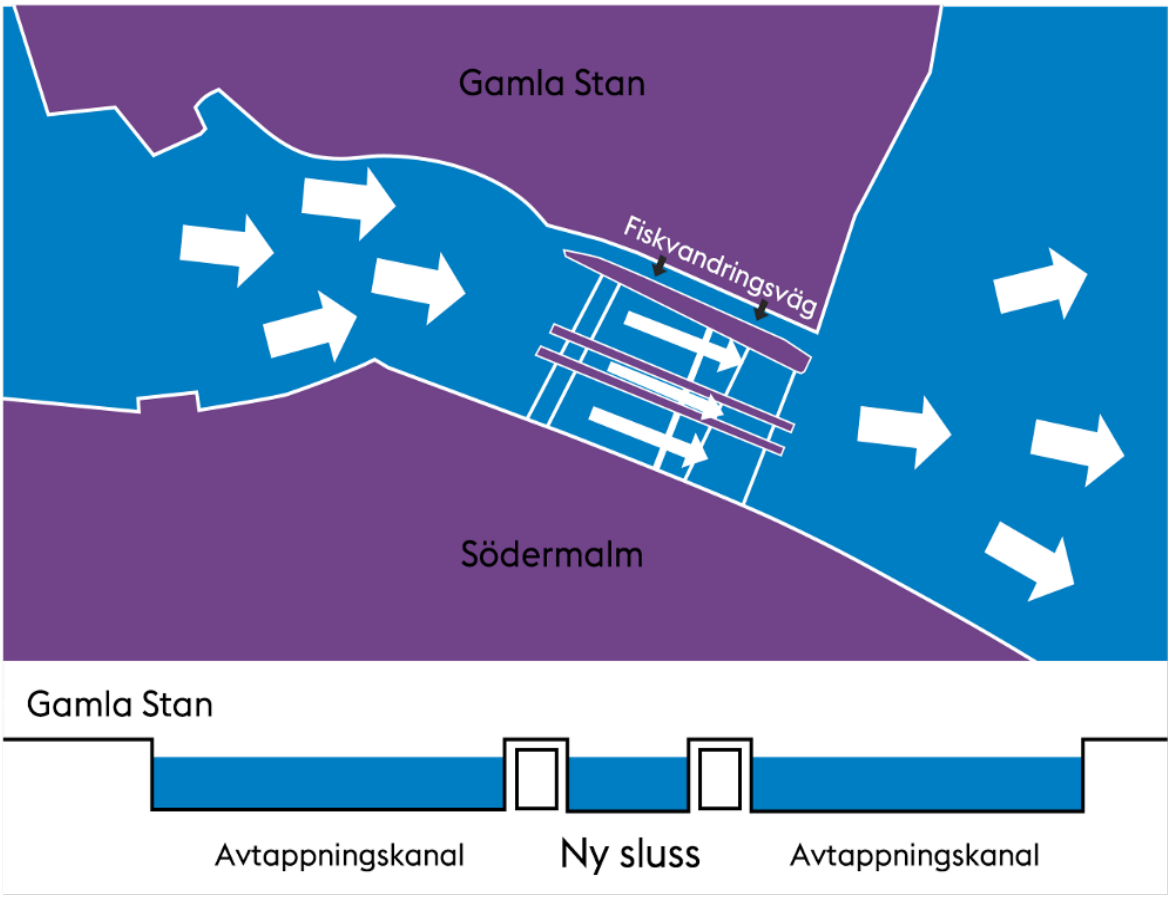
Efter ombyggnaden ska trafiken vara mer anpassad till dagens behov. Gångtrafikanter och cyklister ska få större plats, likaså ska kollektivtrafiken få större utrymme än tidigare [6].

Ytterligare en viktig anledning till ombyggnationen är på grund av klimatförändringarna som har skett och som väntas ske under de kommande 100 åren med framför allt höjda vattennivåer. I och med ombyggnationen fås möjligheten att kunna tappa ut fem gånger så mycket vatten ur Mälaren än tidigare. Detta bidrar till en minskad översvämningsrisk runtomkring Mälaren. I kombination med att slussen även håller Saltsjöns saltvatten borta från sötvattnet Mälaren gör att dricksvattnet till människor runtom i Mälardalen säkras [6].

Bland annat byggs en ny gång- och cykelbro mellan Södermalm och Gamla stan, en ny huvudbro med åtta körfält, en ny slusskanal och två nya avbördningsluckor på varsin sida om slusskanalen för att kunna tappa vatten från Mälaren. Den gamla Nils Ericsson-slussen används under bygget som avtappningskanal och ska, när Nya Slussen är färdig, byggas om till fiskvandringsväg för att möjliggöra för fiskar att ta sig från Saltsjön till Mälaren för fortplantning. Figur 2 och 3 ger en översiktsbild över hur nya Slussen kommer se ut [6].



Figur 2. Översiktsbild av nya Slussen. Slusskanalen syns i mitten med två avbördningskanaler på var sida [7]



Figur 3. Översiktsbild över Slussen, inklusive genomskärning [6]

2.2 Vattenkraft

2.2.1 Vattenkraftens historia

Att utnyttja energin som finns i flödande eller fallande vatten är inget nytt. Vattenhjulet har funnits länge och man har kunnat omvandla energin i vatten till mekanisk energi för att driva diverse föremål. Under 1800-talet kom den mycket mer effektiva vattenturbinen. Den påminner om vattenhjulet men är tillverkad av metall och kan snurra med en betydligt högre hastighet. Turbinen driver en generator som alstrar elektricitet, vilket började användas framåt slutet av 1800-talet. Vattenkraften började byggas ut i Sverige under början av 1900-talet då man kommit underfund med hur man kan transportera elektriciteten över längre sträckor. Idag står vattenkraften i Sverige för nästan hälften av landets elproduktion [8].

2.2.2 Grundläggande om vattenkraft

I Sverige finns det cirka 2100 vattenkraftverk totalt sett. Cirka 250 av de är större vattenkraftverk och står för 98 procent av totala elproduktionen från vattenkraftverk. Den största andelen energi utvinns från de norra delarna av Sverige där de största älvarna och höjdskillnaderna finns [9].

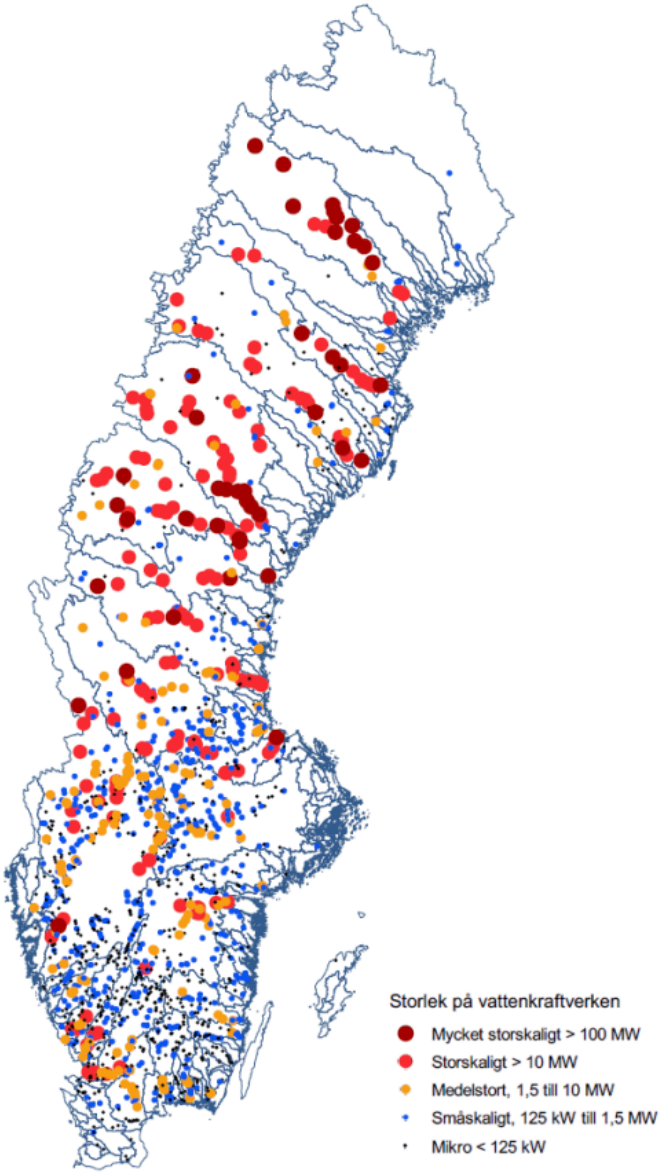
I världen producerades 4150 TWh 2019 från vattenkraft, vilket är nästan 17 procent av den totala elproduktionen i världen [9]. Samma siffra i Sverige är under ett normalår 68 TWh el, vilket motsvarar ungefär 45 procent av den totala elproduktionen i Sverige. I nuläget sker ingen större utbyggnad av vattenkraften i Sverige. Istället uppgraderas redan existerande kraftverk för att dessa ska bli både effektivare och mer anpassade till de miljökrav som finns [10].

Det går att dela in och kategorisera vattenkraftverk baserat på olika sätt. Ett sätt att kategorisera vattenkraftverk på illustreras i tabell 1. Den kategoriseringen görs utifrån vilken kapacitet kraftverket har. Ett annat sätt att dela in vattenkraftverk på är hur de är uppbyggda. Ofta delas vattenkraftverk då upp i två grupper:

- Anläggningar med vattenmagasin som finns i reglerade vattendrag och älvar. Majoriteten av all storskalig vattenkraft i Sverige kommer från denna typ av vattenkraft.
- Anläggningar utan något magasin uppströms där produktionen flöjer vattendragets naturliga flöde. Dessa anläggningar kallas strömkraftverk. I Sverige är de flesta strömkraftverk småskaliga [11].

Tabell 1. Kategorisering av vattenkraftverk baserat på kapacitet [12]

Micro	1 kW till 100 kW
Mini	100 kW till 1 MW
Small	1 MW till 10 – 30 MW
Large	Över 30 MW



Figur 4. Översiktsbild på var vattenkraftverk i Sverige finns [13]

Idén med ett vattenkraftverk, oavsett vilken av ovan nämnd typ av kraftverk det handlar om, är densamma. Ett vattenkraftverk omvandlar energin som finns i ett strömmande vatten till elektricitet. Detta görs genom att det strömmande vattnet passerar genom en turbin som då får turbinaxeln att rotera och omvandlar vattnets energi till mekanisk energi. Genom att ha en generator kopplad till turbinen kan man då omvandla vattnets rörelseenergi till elektricitet [14].

Ett storskaligt vattenkraftverk är beroende av bland annat hur hög fallhöjden är, vilken typ av vattenflöde som finns och kraftverkets totala verkningsgrad. Effekten som kan genereras från dessa vattenkraftverk ges av följande

$$P = \eta \rho Q g h, \tag{1}$$

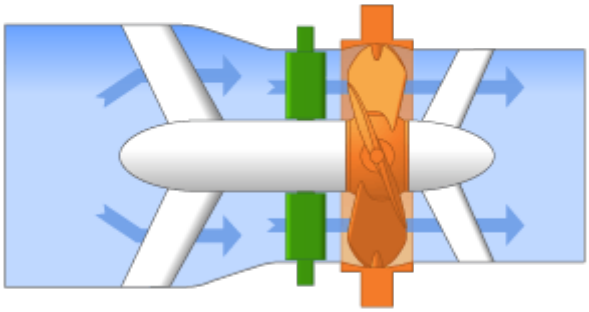
där η är totala verkningsgraden för vattenkraftverket, ρ [kg/m^3] är vattnets densitet, Q [m^3/s] är vattenflödet, g [m/s^2] är tyngdaccelerationen och h [m] är fallhöjden. Kraftverkets totala verkningsgrad är produkten av verkningsgraden för turbinen och generatorn. Verkningsgraden för turbinen är ofta mellan 85-95 procent och för generatorn cirka 98 procent [14].

Turbinens roll i ett vattenkraftverk är att, via rotation, omvandla rörelseenergin i vattnet till mekanisk energi. Hur turbinen ser ut och hur den roterar beror på vilken typ av turbinen som används. För att ett vattenkraftverk ska fungera optimalt är det viktigt att välja rätt turbin. Det finns ett antal olika typer av turbiner som passar olika bra i olika miljöer och under olika förutsättningar. Francis-, Pelton- och Kaplanturbiner är några av de vanligare turbintyperna [14].

Francisturbinen är en reaktionsturbin. Oftast används den vid fallhöjder mellan 15 och 500 meter och med ett vattenflöde på upp till 500 m^3/s. Vattnet leds in till turbinen via en spiralformad ingång och för att vattnet ska kunna bibehålla sin hastighet genom turbinen minskar trycket i vattnet. Peltonturbinen är en impulsturbin som passar vid fallhöjder på 200-2000 meter och vattenflöde på upp till 40 m^3/s. Till utseendet är den ganska lik ett vattenhjul. Turbinaxeln är kopplad till en rund skiva som har skålformade blad monterade runtomkring. Beroende på hur mycket vatten som finns tillgängligt, finns ett eller flera munstycken runt hjulet som sprutar vatten i en riktning som är tangentiell till hjulets omkrets vilket innebär att vattnet träffar de skålformade bladen direkt. Kaplanturbinens rotor ser ut som en båtpropeller och passar bra till fallhöjder på under 25 meter och med vattenflöden på allt från 1 m^3/s till 500 m^3/s. Likt Francisturbinen klassas även Kaplanturbinen som en reaktionsturbin och därav är de inte helt olika varandra i hur de fungerar. Rotorbladen på en Kaplanturbin är reglerbara vilket gör att spannet för vilket vattenflöde som passar är så pass brett. På grund av dess lämplighet vid låga fallhöjder och förmågan att kunna hantera höga vattenflöden kan en typ av Kaplanturbin, då ofta Bulbturbin eller StraFlo-turbin, användas vid strömkraftverk, det vill säga vattenkraftverk som saknar ett vattenmagasin. Själva turbinen kan även placeras med axeln i horisontellt eller vertikalt läge [14].

Tabell 2. Sammanfattande tabell över de vanliga turbintyperna.

	Fallhöjd [m]	Vattenflöde [m^3/s]
Francisturbin	15-500	<500
Peltonturbin	200-2000	<40
Kaplanturbin	<25	1-500



Figur 5. StraFlo-trubin [15]

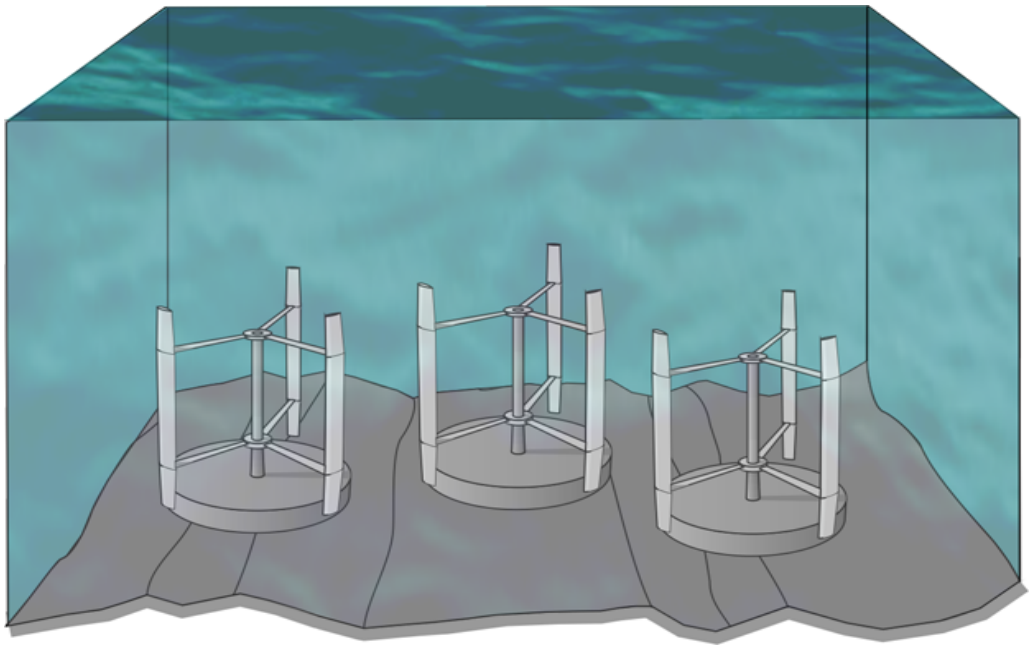
För att kunna ta tillvara på rotationen som skapas i turbinen när vattnet passerar krävs en generator. Generatorns främsta uppgift är att omvandla rotationen i turbinaxeln till elektrisk energi. Detta görs genom att låta en serie av spolar rotera inuti ett magnetfält eller tvärtom. På så sätt börjar elektroner röra sig inuti ledare vilket leder till att elektrisk ström produceras. Rotationshastigheten hos en synkrongenerator hålls konstant och bestäms av frekvensen i nätet som generatorn är kopplad till. För att få ett stabilt elnät hålls även nätfrekvensen konstant. I Sverige hålls nätfrekvensen på 50 Hz [14].

Då elektriciteten ofta produceras på en plats långt från där den ska användas måste den transporteras en viss sträcka. Då behövs en transformator som kan transformera upp spänningen vid transport och transformera ner spänningen när elektricitet ska användas. Detta görs för att få en hög spänning när elektriciteten ska överföras över långa sträckor då förlusterna i transmissionledningarna blir mindre samt att överföringskapaciteten blir högre [14].

2.2.3 Strömkraft

Istället för att, som mer traditionell storskalig vattenkraft, använda den potentiella energin från ett fall använder sig strömkraftverk av den kinetiska energin i ett strömmande vatten. På så sätt undviker ett strömkraftverk några av de negativa effekterna som annars kommer med ett vattenkraftverk. Det krävs till exempel ingen hög investeringskostnad då det inte behöver byggas en stor infrastruktur runt omkring, som ett magasin eller en uppdämning. Genom att inte behöva bygga en uppdämning i ett vattendrag minskas således miljöpåverkan kraftverket har på omgivningen. Strömkraftverk har ofta en ganska enkel design och är relativt enkla att både installera och underhålla. Då ett strömkraftverk utnyttjar den kinetiska energi i vattnet och inte använder sig av vattnets potentiella energi krävs ingen större fallhöjd, som annars krävs för att ett traditionellt vattenkraftverk ska ha så optimala förutsättningar som möjligt. Däremot krävs det ett högt vattenflöde för att ett strömkraftverk ska kunna producera så mycket energi som möjligt.

Turbinerna till ett strömkraftverk kan se olika ut. Till exempel kan strömkraftverkets turbin se ut som vertikalaxlade vindkraftturbiner, som i figur 6.



Figur 6. Strömkraftverk vertikalturbin [16]

Då dessa turbinerna liknar ett vindkraftverk med vertikalaxlad turbin liknar även formeln för att räkna ut kraften från kraftverket formeln för vindkraftverk. Kraften som kan utvinnas av ett strömkraftverk med vertikalt stående turbin ges därför av

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_p, \tag{2}$$

där A [m^2] är tvärsnittsarean, ρ [kg/m^3] är vattnets densitet, v [m/s] är vattnets hastighet och C_p är effektkoefficienten [17].

Enligt Betz lag kan effektkoefficienten, C_p, max vara 0.592. Betz lag är ett teoretiskt maximum för en vindkraftturbins effektivitet. Således gäller detta maximum även för strömkraftverkets turbin då den är utformad som en vindkraftturbin. Detta innebär att som mest kan enbart 59 procent av den kinetiska energin i vattnet utnyttjas för att sätta turbinen i rörelse [18].

För att få fram vattnets hastighet från vattenflödet använder man

$$v = \frac{Q}{A}, \tag{3}$$

där v [m/s] är vattnets hastighet, Q [m^3/s] är vattenflödet och A [m^2] är arean vattnet passerar.

2.3 Vattenkraftens roll i energisystemet

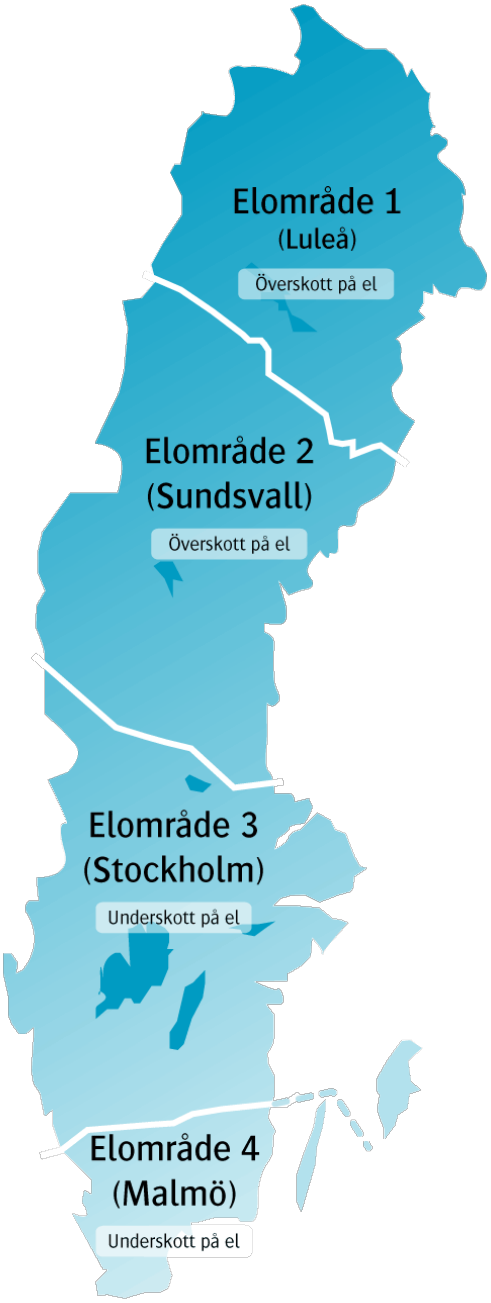
För att elsystemet ska fungera behöver det hela tiden vara i balans mellan hur mycket el som produceras och hur mycket el som används. För att den balansen ska upprätthållas, även när avvikelser från prognoser för både produktion och användning uppkommer, regleras elbalansen främst genom vattenkraft. Detta på grund av att det är väldigt enkelt och det går snabbt att både öka och minska mängden el som matas in på elnätet från vattenkraftverk. Vattenkraften används inte bara som reglerkraft utan används även som baskraft.

Balansering av elsystemet sker utifrån ett par olika tidsperspektiv, där alla perspektiven har ett samband och är betydelsefulla. Det finns årsreglering, veckoreglering och dygnsreglering i vattenmagasinen. Regleringen utförs genom att vattnet flyttas till de perioder då vi behöver elen som mest. Vid årsregleringen så flyttas vattnet i vattenmagasinen från sommaren till vintern, via veckoregleringen från helg till vardag och via dygnsregleringen natt till dag. Det är den sista, dygnsregleringen, som vattenkraften kan ha störst inverkan som reglerkälla då det på bara några timmar kan hantera skillnader på flera tusen megawatt [19].

2.3.1 Elmarknaden

Det svenska elnätet är ihopkopplat med andra europeiska länders elnät och elmarknaden i såväl Sverige som i Europa är avreglerade. På så sätt kan el handlas över nationsgränser och efterfrågan hos de som förbrukar elen kan mötas. För att elsystemet ska fungera måste det hela tiden vara en balans mellan produktion och förbrukning. Skulle det bli obalans i elnätet finns risk för störningar och skador på elnätet och elen kan inte levereras [20].

Vad som påverkar priset på el är flera saker. Bland annat påverkas elpriset av vilken efterfråga som finns på el och hur stor mängd el som produceras. Om det plötsligt skulle bli väldigt kallt så skulle efterfrågan på el stiga och med det även elpriset. På samma sätt om tillgången till el skulle minska, till exempel om ett kärnkraftverk är avstängt eller om vattennivån i magasinen är lägre än normalt, stiger elpriset på grund av minskad produktion. Ytterligare en faktor som spelar in i elpriset är var i Sverige elen ska konsumeras. Sverige är indelat i fyra stycken elområden, se figur 7.



Figur 7. Karta över Sverige uppdelat i de olika elområdena [21]

Majoriteten av elen i Sverige produceras i de norra delarna av landet medan den största delen av konsumtionen sker i de mellersta och södra delarna. Samtidigt är kapaciteten i elnätet inte tillräcklig och det finns överföringsbegränsningar, vilket skapar problem då elen inte kan transporteras från producenten i norr till användare i framför allt de södra delarna av Sverige. Detta gör att det finns ett överskott på el i norra delen av Sverige och ett underskott på i el i södra delen av Sverige. Därför skiljer sig priset på el beroende på var i Sverige elen används [21]. Till exempel så låg det genomsnittliga börspriset på el under 2022 på 58.5 öre/kWh i elområde 1 och 66.3 öre/kWh i elområde 2 medan det för elområde 3 och elområde 4 kostade 137.4 öre/kWh respektive 149.9

öre/kWh under samma period. Priserna är exklusive moms och avgifter från elhandelsbolag [22].

2.4 Vattenkraftens nackdelar och miljöpåverkan

För att ett vattenkraftverk ska fungera bra krävs vissa naturliga förutsättningar, det vill säga långt ifrån alla vattendrag är lämpade för ett vattenkraftverk. Den kanske viktigaste faktorn är tillgången till flödande vatten, men även fallhöjden är viktig. Detta gör att den geografiska platsen för var ett vattenkraftverk ska placeras spelar stor roll. Oftast ligger kanske de platser som är bäst lämpade för vattenkraftverk en bit ifrån städerna som använder elen. Därför behövs det långa transmissionsledningar och förlusterna ökar på så sätt [14].

Vattenkraften är i sig ren då inga giftiga utsläpp är förenade med själva elproduktionen. Påverkan på naturen är däremot större, åtminstone vid byggnationen av större vattenkraftverk som kräver en damm. Vattenkraften påverkar ekosystemet i vattnet på ett negativ sätt samt att den biologiska mångfalden minskar då vattenflödet förändras och vandringsvägarna för fiskar blockeras. Även vattenbotten förändras, vilket försvårar för fiskar att lägga rom [23]. Då det naturliga vattenflödet störs har vattenkraftverk en negativ påverkan på fiskar och ålar som vandrar mellan olika vattendrag. Av de cirka 2100 vattenkraftverk i Sverige finns det enbart ett fåtal som har en fiskvandringsled, så att fiskar kan ta sig förbi själva kraftverket. Där det inte finns en vandringsled hindras fiskar från att vandra. Detta har fått stora konsekvenser, framför allt för de fiskar som är beroende av att vandra mellan sötvatten och saltvatten, så som lax och ål [24].

2.5 Juridiska krav

För att få bedriva en verksamhet som kan påverka miljön måste man söka och få ett miljötillstånd. När verksamheten i fråga handlar om vattenkraftverk kallas tillståndet för vattendom och det är Mark- och Miljödomstolen som beslutar, utifrån gällande lagar, ifall ett företag ska få tillstånd och vad exakt den vattendomen innehåller. Innehållet i en vattendom förklarar både vilka rättigheter och skyldigheter vattenkraftverkets ägare har. En vattendom kan till exempel ange vilka vattennivåer som är tillåtna eller hur mycket vatten som får eller ska tappas ut. Om den ansvariga för verksamheten skulle bryta mot det som står i vattendomen riskerar man att begå miljöbrott [25].

2.6 Kostnadsanalys

Det finns ett antal olika metoder för att undersöka hur bra ett projekt är utifrån en ekonomisk synvinkel. Payback-metoden, eller återbetalningsmetoden, visar på hur lång tid det tar för en investering att återbetalas. En kortare tidsperiod att föredra då det betyder att det investerade kapitalet för ett projekt är återbetalt snabbare. Återbetalningstiden, utan att räkna med kalkylränta, fås genom att dela grundinvesteringen med det årliga inbetalningsöverskottet [26].

En annan metod är Levelized cost of energy (LCOE), som mäter alla förväntade kostnader för en investering över dess livstid fördelat på den elproduktion som förväntas över anläggningens livstid. LCOE är ett bra verktyg om man vill jämföra olika liknande investeringar med varandra för att se vilken som är mest lönsam. På så sätt kan man jämföra olika energislag med varandra [27].

$$LCOE = \frac{Totala\ livstidskostnader}{Total\ energiproduktion\ över\ en\ livstid} \quad (4)$$

2.6.1 Livscykelperspektiv

En livscykelanalys används för att undersöka hur mycket en produkt påverkar miljön, under hela sin livscykel. Från det att de naturresurser som behövs utvinns till dess att produkten slutar användas och ska återvinnas eller på annat sätt tas hand om. Syftet med en livscykelanalys är att ge en helhetsbedömning av vilken miljöpåverkan produkten kan ha. Med hjälp av resultatet från en livscykelanalys går det att göra val som minskar miljöpåverkan [28].

3. Förutsättningar vid Slussen

3.1 Avbördningsluckor

Vid nya Slussen kommer två stycken avbördningsluckor finnas, en på var sida om själva slusskanalen. Dessa luckor används för att hålla saltvattnet i Saltsjön från att ta sig in i Mälaren och därigenom riskera att förstöra dricksvattnet för två miljoner människor runtomkring Mälardalen [29]. De ska också kunna hjälpa till att tappa Mälaren på vatten för att minska risken för översvämning. På grund av att de nya avbördningsluckorna som installeras har en mycket högre avbördningskapacitet kan Mälaren tappas på nästan fem gånger mer vatten än vad som tidigare varit möjligt vid Slussen. Detta innebär att vattennivån i Mälaren skulle kunna tillåtas stiga mer än vad som varit möjligt tidigare. Till exempel skulle vattennivåerna under våren kunna tillåtas vara högre än vanligt för att fiskar ska få större möjligheter att leka och lägga rom i vass. På grund av risken för översvämning var detta inte möjligt med den tidigare avtappningskapaciteten. De två avbördningsluckorna vid Slussen, A1 och A2, kommer stå för huvudavtappningen av Mälaren när ombyggnaden är färdigställd [30]. Tappningen av Mälaren sker även vid Norrström, Hammarbyslussen, Maren i Södertälje samt Södertäljeslussen [31]. Avbördningsluckorna kommer vara i drift under hela året. Därför finns det ett värmesystem för att luckorna inte skall frysa fast samt för att hålla avbördningskanalen isfri under vinterhalvåret [29].

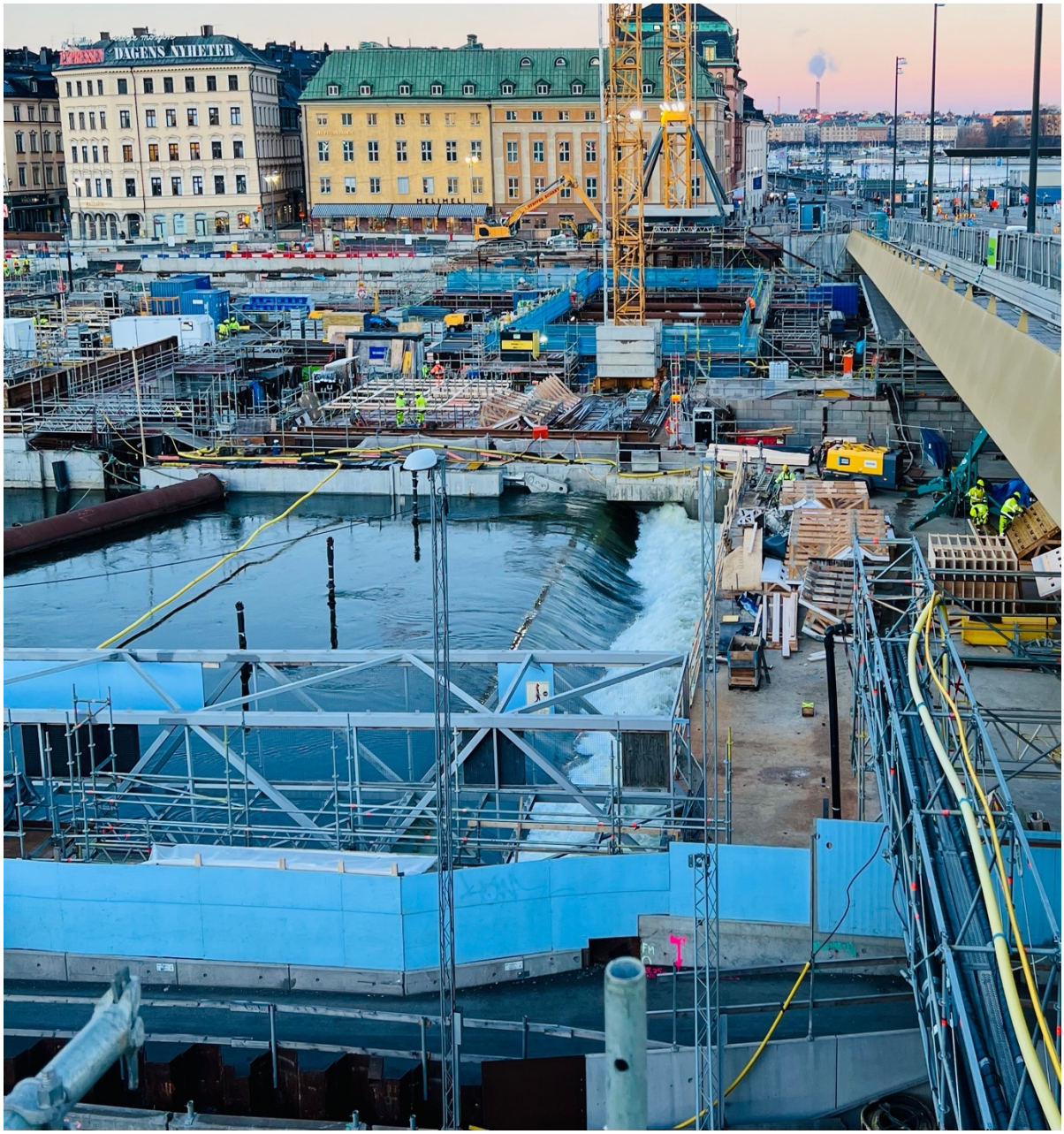
Den ena luckan sitter på den norra sidan (A1) av Slusskanalen, det vill säga mot Gamla Stan, och den andra luckan sitter på södra sidan (A2), mot Södermalm. Det är klaffluckor som öppnas medströms och är överströmmade vilket innebär att vattnet kommer flöda över luckorna. Den norra luckan är 35 meter bred och den södra 33 meter bred med en höjd på ungefär 5.8 meter. Avbördningskanalen mot Saltsjön, det vill säga utrymmet efter själva avbördningsluckan, är ungefär 68 meter. Från erosionsskyddet, som ligger på sjöbotten upp till kanalens överkant är det 7.21 meter högt. Att, från öppet läge, stänga avbördningsluckan tar ungefär 6 minuter i torrhet och cirka 30 minuter i vatten. Avbördningsluckorna är automatiserade och är byggda för att ha en livslängd på 100 år [29].



Figur 8. Den södra avbördningsluckan i ett något nedfällt läge, så kallat spegeldammstappning

För att veta hur stora avbördningsluckorna skall vara har vattenståndet i både Mälaren och i Saltsjön använts. Hänsyn har tagits till olika framtida scenarion där vattenståndet under de närmsta 100 åren kommer att höjas. Det är en av anledningarna till att

avbördningsluckorna är höj- och sänkbara. När vattennivån i Saltsjön blir högre kommer en påbyggnad av avbördningsluckorna att sättas på. På så sätt hindras saltvattnet ifrån Saltsjön att tränga in i Mälaren även när vattennivån blir så pass mycket högre än vad den är idag [29].



Figur 9. Första avbördningen i den södra avbördningskanalen.

3.2 Slussluckor

I slusskanalen, som ligger mellan de bägge avbördningskanalerna, kommer själva slussning av båtar ske. För att möjliggöra detta behövs slussluckor för att släppa fram båtarna men samtidigt hålla saltvattnet i Saltsjön ute från Mälaren. Själva slusskanalen i sig är 12 meter bred och det finns två stycken slussluckor, en mot Mälaren och en mot

Saltsjön, som är både under- och överströmmande. Slussluckan mot Mälaren är en tryckande segmentlucka medan den mot Saltsjön är en dragande segmentlucka. Det tar cirka 3 minuter att öppna en slusslucka och cirka 2 och en halv minut att stänga. Luckorna är elhydrauliskt drivna och manövreras lokalt. Vid slussning kommer luckorna köras växelvis då enbart en lucka åt gången ska vara öppen. Dock kommer, vid behov, även slusskanalen användas för avbördning av Mälaren. Då öppnas först luckan mot Mälaren (US) snabbt, som vid normal slussning. Sedan öppnas luckan mot Saltsjön (NS) långsamt. Under själva avbördningsdriften är båda luckorna helt öppna. När avbördningsdriften i slusskanalen ska avslutas stängs först slussluckan mot Saltsjön långsamt och sedan stängs luckan mot Mälaren. Det är framför allt under fritidsbåtssäsongen, det vill säga under sommarmånaderna, som slussluckorna kommer vara i drift och slusskanalen öppen. Slussluckorna är byggda och konstruerade för en livslängd på 100 år [3].

3.3 Erosionsskydd

När strömmande vatten för med sig sand eller andra finare material kallas det för erosion. Trots att erosion är en naturlig process kan det innebära problem och skada för omkringliggande bebyggelse. På botten, runt sluss- och avbördningsanläggningen, ligger därför ett erosionsskydd, för att skydda sjöbotten vid eventuell erosion. Då den nya anläggningen vid Slussen ska kunna avbörda mer vatten än tidigare kommer vattenflödet öka och således även risken för erosion. Det erosionsskydd som kommer ligga vid Slussen består av betongmadrasser. Totalt kommer sjöbotten runt Slussen täckas av 45000 kvadratmeter betongmadrass och de väger mellan 280 till 570 kilo per kvadratmeter, beroende på vart de placeras och hur strömt det är just där [32].



Figur 10. Erosionsskydd i form av betongmadrass på land [32]

4. Metod

4.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien består av publikationer inom vattenkraft och strömkraft, vilka olika typer det finns, hur dessa fungerar samt vilken roll vattenkraften spelar i samhället. Även litteratur som behandlar det juridiska ramverket rörande vattenkraft har undersökts. Dessutom har bygghandlingar och dokument från Skanska och Stockholm Stad legat till grund för beskrivningen av hur Nya Slussen ska se ut och hur olika komponenter, till exempel sluss- och avbördningsluckorna, ser ut och fungerar. Resultatet av litteraturstudien presenteras i bakgrundskapitlet samt i kapitel tre.

4.2 Inhämtning av information

Datainsamlingen består delvis av inhämtning av statistik från Skanska och Stockholms hamnar. Informationen som hämtats in rör vattenflöde, vattenstånd och effektbehov vid Slussen. Data över vattenflödet har hämtats från Stockholms hamnar. Data från Stockholms hamnar gäller hur vattenflödet sett ut vid Norrström de senaste fem åren och hur mycket vatten som tappats ut ur Mälaren vid olika uttappningsplatser. Eftersom Slussen är under ombyggnad tappas inget vatten där under själva ombyggnationen med undantag från när särskilt behov uppstår, utan data baseras på hur mycket vatten som tappats vid Riksbron och Stallkanalen. Detta flöde motsvarar ungefär hur det vattenflöde som kommer tappas från Mälaren vid Nya Slussen när ombyggnationen är färdig.

4.2.1 Platsbesök Nya Slussen

Den här studien initierades av Skanska och ämnar utreda ifall det är möjligt att implementera resultatet i verkligheten. Därav har mycket tid spenderats på Skanskas kontor vid Slussen. På så sätt har samtal kunnat föras med relevanta människor för att få en bättre uppfattning om hur den nya anläggningen ska fungera.

4.3 Beräkningar

4.3.1 Effekt och energiberäkningar

Beräkningarna har delats upp i två delar, en för en kaplanliknande turbin och en för ett vertikalt stående strömkraftverk. För en kaplanturbin har ekvation (1) använts. Höjden som används är skillnaden mellan vattennivåerna på var sida om avbördningsluckan. Den höjden kommer skilja sig beroende på vilken vinkel avbördningsluckan har. Vid ett tillfälle då spegeldammstappning pågick uppmättes höjde till ungefär 0.75 meter vilket är måttet som kommer användas vid beräkningarna. Denna höjden är densamma i bägge avbördningskanalerna. Effektiviteten har satts till 86 procent [33].

Vad gäller den vertikalt stående turbinen har två olika fall satts upp. Detta på grund av att avbördningskanalerna är olika breda och därmed skiljer sig arean på kanalerna vilket ger två olika hastigheter. Skillnaden i bredd är två meter. Då den data som är tillgänglig ej innehåller hastigheten på vattnet räknas den fram från vattenflödet med hjälp av ekvation (3). Höjden 5.8 meter har använts för bägge avbördningskanalerna men bredden för den norra kanalen har satts till 35 meter medan för den södra avbördningskanalen har 33 meter använts som bredd. För att få fram vilken effekt denna typ av turbin kan generera har ekvation (2) använts. Då den ekvationen är beroende av hastigheten har även här två olika resultat tagits fram, en per avbördningskanal. I den ekvationen används effektkoefficienten, C_p. Den koefficienten har ett teoretiskt maximum på 0.59, vilket har använts i uträkningarna.

För att få fram hur mycket energi de båda turbinerna kan generera har utgångspunkten varit att de är aktiva konstant, det vill säga under alla timmar under ett dygn, alla dygn under en månad.

4.3.2 Kostnadsanalys

Den data som ligger till grund för kostnadsanalysen redovisas i kapitel fem.

Vid uträkningar med återbetalningsmetoden har tre olika typer av vattenflöden undersökts, lågt, medel och högt flöde. Dessa flöden har använts för att få fram elproduktionen för ett helt år med det flödet. Den årliga produktion har sedan använts tillsammans med 2022 års medelpris för el för att få fram hur mycket pengar ett kraftverk hade sparat in i elkostnader under ett år. Grundinvesteringskostnaden divideras sedan med denna summa för att få fram hur många år det tar för grundinvesteringen att betala tillbaka sig, det vill säga återbetalningstiden. Detta görs för både vertikalt stående strömkraftverk och för kaplanturbinen, med alla tre olika typer av vattenflöden.

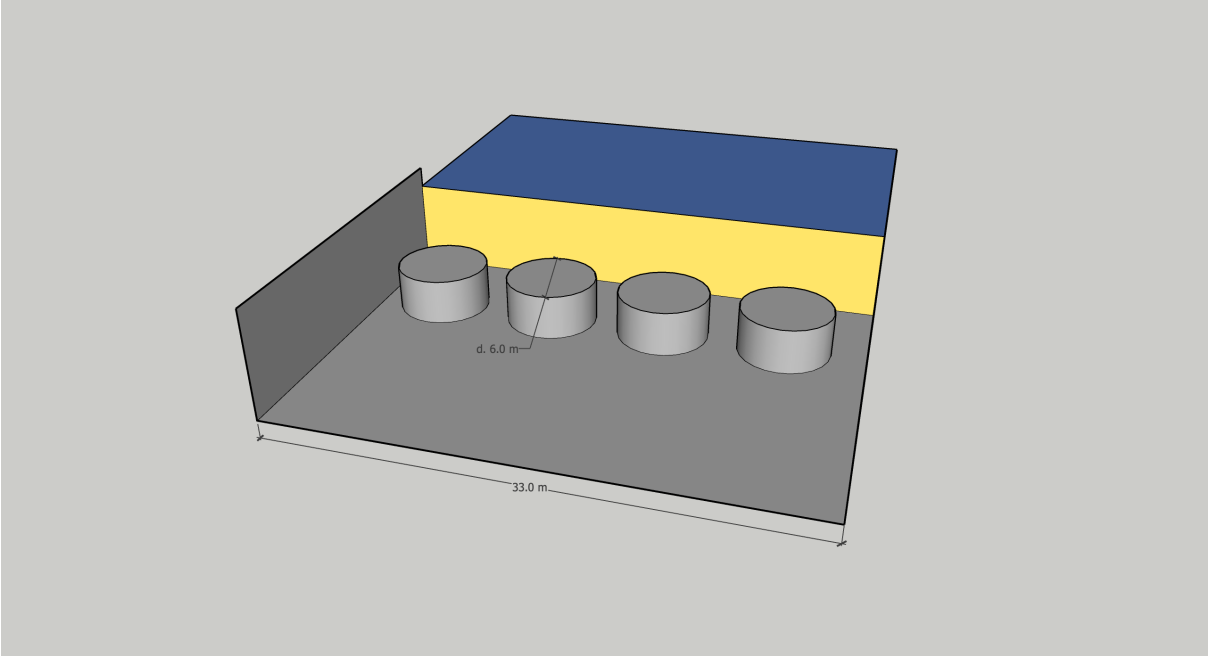
För att räkna fram LCOE har även här tre olika vattenflöden undersökts, lågt, medel och högt flöde. Dessa används för att först få fram den årliga energiproduktion för att sedan få ut kraftverkets totala energiproduktion under hela dess livstid. För uträkningarna av LCOE har ekvation (4) använts, där livstidskostnaderna för kraftverket delas med den totala elproduktionen för kraftverket under hela dess livstid. Svaret anges i kr/kWh. Samma uträkningar görs för både vertikalt stående strömkraftverk och för kaplanturbiner.

4.4 Dimensionering av turbin

Eftersom det är låg fallhöjd och ett högt vattenflöde innebär det att både Pelton- och Francisturbinerna skulle vara dåliga val då ingen av dem passar för de förutsättningar som finns vid Nya Slussen. Däremot skulle både en typ av Kaplanturbin och vertikalt stående strömkraftverk fungera med den aktuella fallhöjden och vattenflöde samt att det inte kommer vara någon form av uppdämning utan det är det naturliga vattenflödet som

avgör hur mycket vatten som kommer passera turbinen. I och med detta kommer denna rapport undersöka både vertikalt stående strömkraftverk och StraFlo-turbin för att se vad som skulle kunna passa bäst vid Slussen.

Då de vertikala strömkraftverken inte är kommersiellt producerade ännu anpassas dessa till den plats som de ska användas vid. Generellt kan man tänka att turbinerna ska täcka så stor del av tvärsnittet som möjligt. I denna rapport kommer måtten tas från en existerande turbin i Söderfors. Den är tre meter hög och sex meter bred och skulle täcka en stor del av avbördningskanalernas tvärsnitt. Kraftverket kommer vara dimensionerat till ungefär 125 kW. Det innebär att vattenflöden på upp till 500 m^3/s, eller vattenhastigheter på upp till 2.9 m/s, kan tas tillvara på. På så sätt tas höjd för de nuvarande flöden, i kombination med att mindre kraftverk oftast är dyrare att installera per kW än större tas i beaktning.



Figur 11. Illustration på hur det skulle kunna se ut i den södra avbördningskanalen med 4 stycken vertikalt stående strömkraftverk bredvid varandra.

Figur 11 är en illustration på hur det skulle kunna se ut i en av avbördningskanalerna med de mått som finns där. Turbinstorleken är baserad på en verklig vertikalt stående strömkraftsturbin.

5. Data

5.1 Kostnader

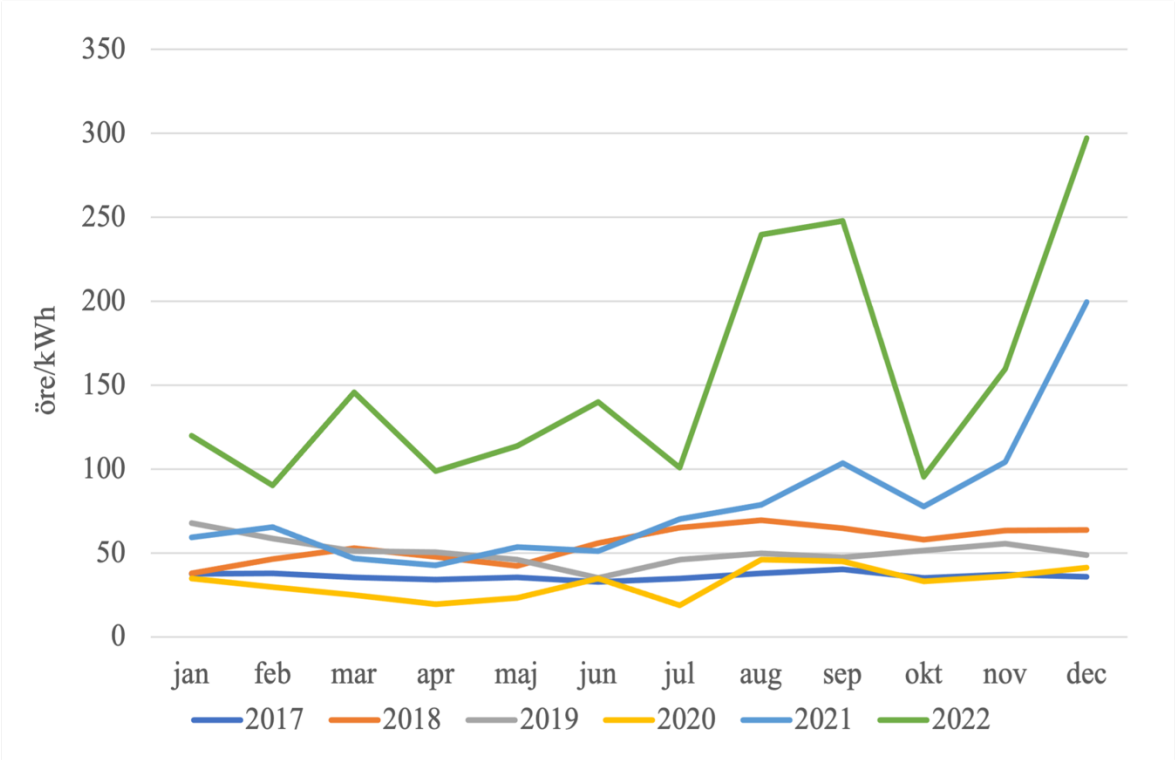
Då produktionen av vertikala strömkraftverk inte finns på någon stor skala kommer kostnadsuppgifterna tas från hur kostnaden för ett havsbaserat vindkraftverk ser ut. Detta eftersom materialtillgången kan liknas med varandra samt att installationen sker i vatten till skillnad från på land. Att installera vindkraft till havs är betydligt dyrare än att installera vindkraften på land. Dock är det fortfarande den initiala investeringskostnaden, precis som för vattenkraft, som motsvarar den största delen av den totala livstidskostnaden. För ett havsbaserat vindkraftverk kan man räkna med ungefär 17440 kr/kW, vilket kommer användas i rapporten för att få en uppfattning om hur mycket ett vertikalt stående strömkraftverk skulle kunna kosta [34]. Det innebär i detta fall att ett vertikalt stående strömkraftverk på 125 kW skulle kosta 2180000 kronor i investeringskostnad.

Kostnaden för underhåll och drift av havsbaserad vindkraft är svårare att uppskatta. Detta då det kan vara väderberoende och långa avstånd ut till själva kraftverken. Baserat på data från vindkraftsfarmer som är havsbaserade har kostnaden för drift och underhåll haft ett brett spann på 140 kr/MWh till 456 kr/MWh [34]. Då projektet vid Slussen inte ligger långt ut till havs är inte vädret lika avgörande för när underhåll kan ske samt att avståndet från land inte behöver tas i beaktning är det rimligare att anta att kostnaden för drift och underhåll hamnar i de lägre regionerna av ovannämnda spann.

Att installera StraFlo-turbiner är kostnadsmässigt jämförbart med vad det kostar, per kW att installera gaskraftverk [33]. Att installera gaskraftverk kostar ungefär 7200 kr/kW [35]. För småskaliga vattenkraftverk räknas ofta kostnaden för drift och underhåll i en procentsats gentemot investeringskostnaden på ett spann mellan 1 till 6 procent per år. I denna rapport kommer en procent att användas vid beräkningarna för drift och underhåll [36].

5.2 Elpriser

Vattenfall har statistik för hur det rörliga elpriset förändrats senaste åren i respektive elområde. I figur 12 visas hur det rörliga elpriset har förändrats per månad mellan 2017 till 2022. Det man tydligt kan se är att elpriset stigit rejält under samtliga månader under 2022 jämfört med tidigare år. Detta till följd av bland annat kriget i Ukraina och dyrare bränslepriser samt att elpriset i Europa ökat då till exempel Tyskland avvecklat flera kärnkraftverk.



Figur 12. Utvecklingen av Vattenfalls rörliga elpris från 2017 till och med maj 2022 i elområde 3 [37].

5.3 Data från Slussen för beräkningar

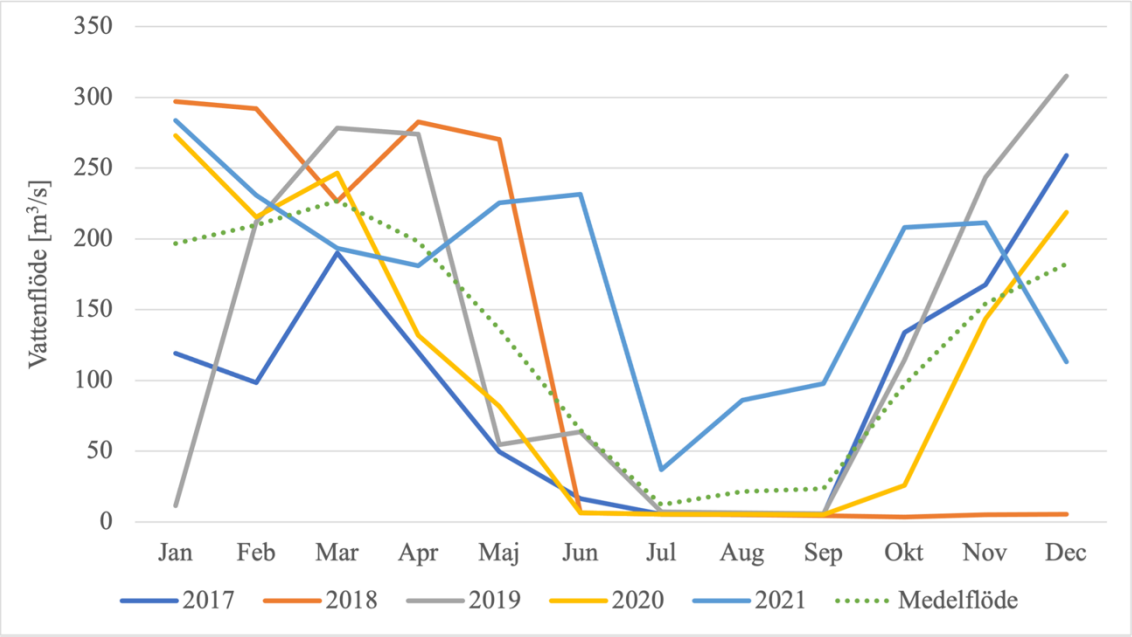
5.3.1 Vattenflöde Slussen

Det nuvarande vattenflödet vid Slussen, innan avbördningsluckor och sluss är färdigbyggt, har hämtats från Stockholms Hamnar. Där finns data kring vattenflöde per år, månad och dag sedan 2010 fram tills idag. I tabell 3 presenteras värdena för 2021 med motsvarande hastighet på vattnet som fås genom att dividera vattenflödet Q med arean på avbördningsluckan. I tabell 3 representerar v_1 vattnets hastighet vid den norra avbördningsluckan, A1, och v_2 vattnets hastighet vid den södra avbördningsluckan, A2.

Tabell 3. Genomsnittligt dagsvattenflöde, Q, samt vattenhastighet, v_1 och v_2, per månad under året 2021 för både den norra och södra avbördningskanalen respektive [30].

Datum	Q [m^3/s]	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]
2021-01	323	1.85	1.97
2021-02	258	1.48	1.57
2021-03	263	1.50	1.60
2021-04	177	1.01	1.08
2021-05	201	1.15	1.22
2021-06	189	1.08	1.15
2021-07	13.7	0.09	0.08
2021-08	80.5	0.46	0.49
2021-09	93.5	0.54	0.57
2021-10	167	0.96	1.02
2021-11	183	1.05	1.11
2021-12	136	0.78	0.83
Medelvärde 2021	174	0.99	1.06

Det genomsnittliga dagsvattenflödet för åren 2017 till 2021 presenteras i figur 13. Det medelvärdiga vattenflödet över ett helt år under den perioden varierar mellan 97 m^3/s, vilket var medelvattenflödet under 2017, till det högsta medelvärdet under femårsperioden som inträffade under 2021, varpå medelflödet var 174 m^3/s sett över hela året. Som figur 13 visar är dock toppnoteringen, sett till vattenflöde per månad under perioden 2017 till 2021, under december 2019 då det genomsnittliga vattenflödet vid Slussen låg på 315 m^3/s.

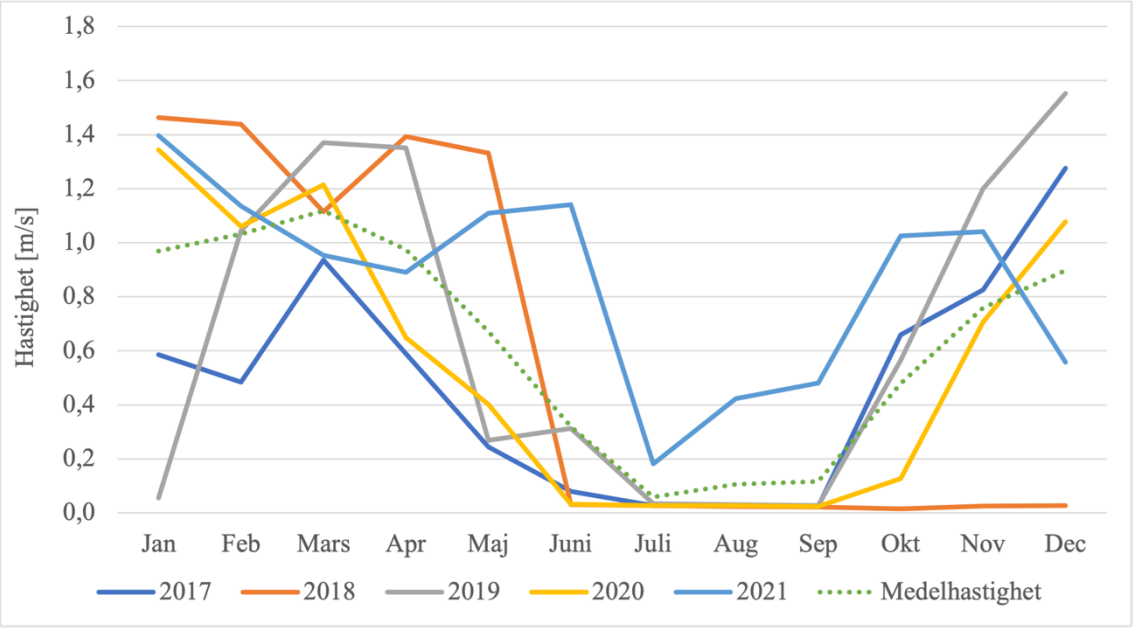


Figur 13. Vattenflöden vid Slussen för åren 2017-2021 [30]

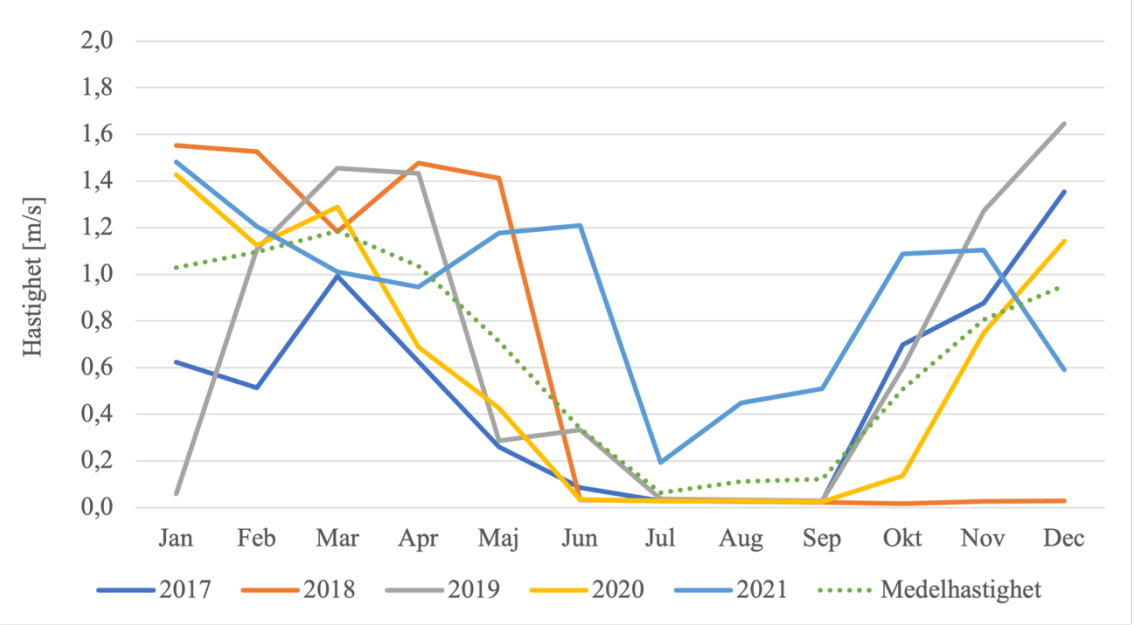
När väl allt är installerat och Slussen står färdig kommer medelflödet av vattnet var mellan 150 m^3/s till 220 m^3/s över ett dygn sett över ett helt år. Det kommer dock finnas en maxkapacitet för att avbörda 1400 m^3/s när båda avbördningsluckorna samt slussluckorna är helt öppna. Detta är dock ett extremfall och sannolikheten för att man kommer behöva avbörda så mycket är väldigt liten [38].

5.3.2 Vattenhastighet Slussen

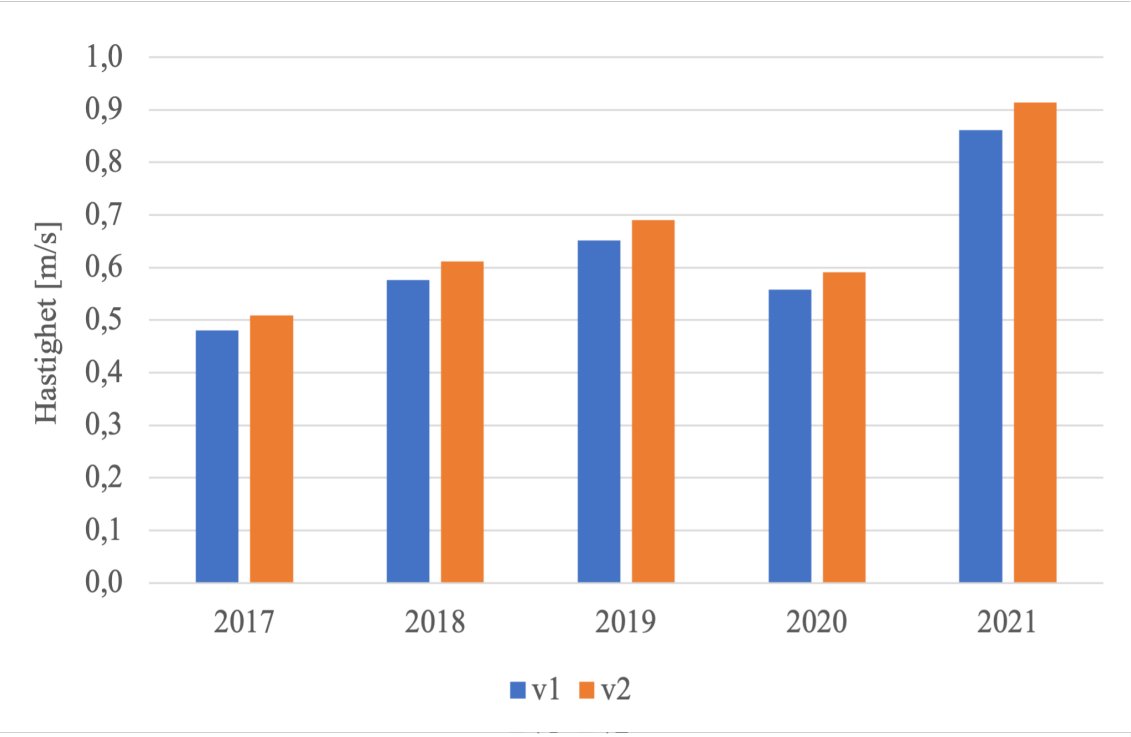
Då bredden på avbördningskanalerna skiljer sig med två meter blir hastigheten på vattnet olika beroende på vilken kanal det handlar om. Baserat på vattenflödet vid Slussen har vattnets hastighet beräknats för A1 och A2 och presenteras i figur 14 respektive figur 15.



Figur 14. Vattnets hastighet, v_1, vid den södra avbördningsluckan A1 [30]



Figur 15. Vattnets hastighet, v_2, vid den södra avbördningsluckan A2 [30]



Figur 16. Medelhastigheten för vattnet som passerar avbördningsluckorna A1 och A2 per år där v_1 är hastigheten vid A1 och v_2 vid A2. [30]

Fortsättningsvis i rapporten kommer enbart värdena för den södra avbördningskanalen och dess avbördningslucka, A1 att redovisas medan värden för den norra avbördningskanalen ligger i appendix. Detta då skillnaden mellan dessa två är så pass liten.

För att tydligare visa på hur vattenflödet vid Slussen sett ut under de olika månader åren 2017 till 2021, redovisas i tabell 4 därför medelflödet för varje respektive månad under de fem åren.

Tabell 4. Medelflödet under respektive månad för åren 2017 till 2021

Månad	Medelflöde [m3/s]
Jan	197
Feb	210
Mar	227
Apr	198
Maj	136
Jun	65
Jul	12
Aug	22
Sep	24
Okt	97
Nov	154
Dec	182

Det är tydligt att flödet är som minst under sommarmånaderna och högst under vintermånaderna.

5.3.3 Effektbehov Nya Slussen

Effektbehovet för avbördningsluckornas maskineri och hjälpsystem för att resa och stänga luckan är ungefär 100 kW per avbördningslucka. Majoriteten av det går till uppvärmning för att luckan inte ska frysa fast samt för att hålla vattnet runtomkring avbördningsluckorna isfritt vintertid. Under sommaren är effektbehovet för avbördningsluckorna mycket lägre, ungefär runt 33 kW per avbördningslucka. Vid slussning kommer en slusslucka och en bro köras samtidigt. Effektbehov för det är ungefär 250 kW vintertid och 210 kW sommartid [38].

Den tidigare slusskanalen har normalt sett varit isfri, mycket på grund av det läckage som funnits vid de gamla slussluckorna. I och med den nya slussen och dess slussluckor ska detta läckage minska till små flöden och därmed kommer risken för isbeläggning runt luckorna öka. För att förhindra att isbildningen runt luckorna blir skadlig, installeras ett luftbubbelsystem upp- och nedströms varje lucka. Även de två sidofalsarna vid varje lucka är elektroniskt uppvärmda för att själva luckfunktionen ska fungera även under kalla vintrar. Om det skulle vara så att det ordinarie

isfrihållningssystemet inte skulle vara tillräckligt ska möjlighet finnas att placera två mobila vattenomrörare i slusskanalen för att hålla vattnet kring varje lucka isfritt.

Tabell 5. Effektbehovet för delar av den nya sluss- och avbördningsanläggningen

Förklaring	Effektbehov vintertid	Effektbehov sommartid
Avbördning	200 kW	66 kW
Sluss & Bro	250 kW	210 kW
Totalt	450 kW	276 kW

6. Resultat

6.1 Beräkningar

Vattenflödet vid Slussen kommer skilja sig dag till dag beroende exempelvis på vilken årstid det är. Därför är det intressant att se hur olika flöden påverkar den producerade effekten. I tabell 6 visas effekten vid lågt flöde 10 m^3/s, medelflöde 220 m^3/s samt vid maxflödet 1400 m^3/s. Energin i tabellerna 6 och 7 är baserad på att kraftverket är igång alla timmar under ett helt år.

Tabell 6. Hur olika flöden påverkar producerad effekt och energi vid användning av en StraFlo-turbin.

Flöde	10 m^3/s	220 m^3/s	1400 m^3/s
Effekt	63.27 kW	1382 kW	8858 kW
Energi	0.554 GWh	12.1 GWh	77.6 GWh

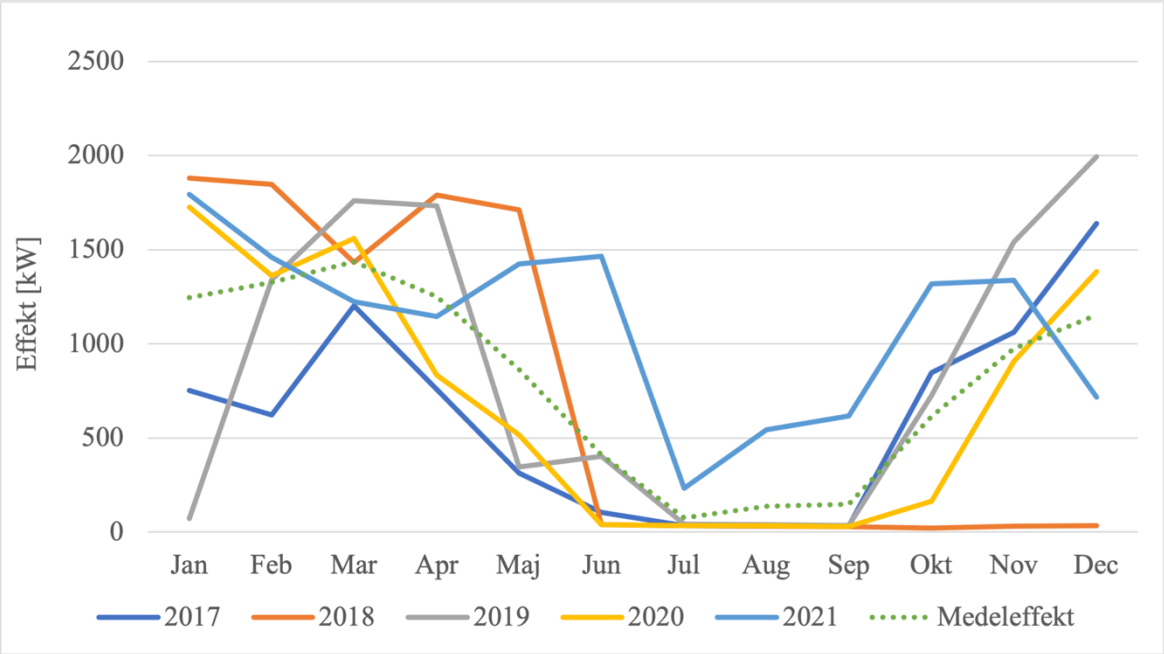
Tabell 7. Hur olika flöden påverkar effekten och energi vid användning av ett vertikalt stående strömkraftverk.

Flöde	10 m^3/s	220 m^3/s	1400 m^3/s
Effekt	0.635 kW	6.76 kW	1741.8 kW
Energi	5.56 MWh	59.22 MWh	15.26 GWh

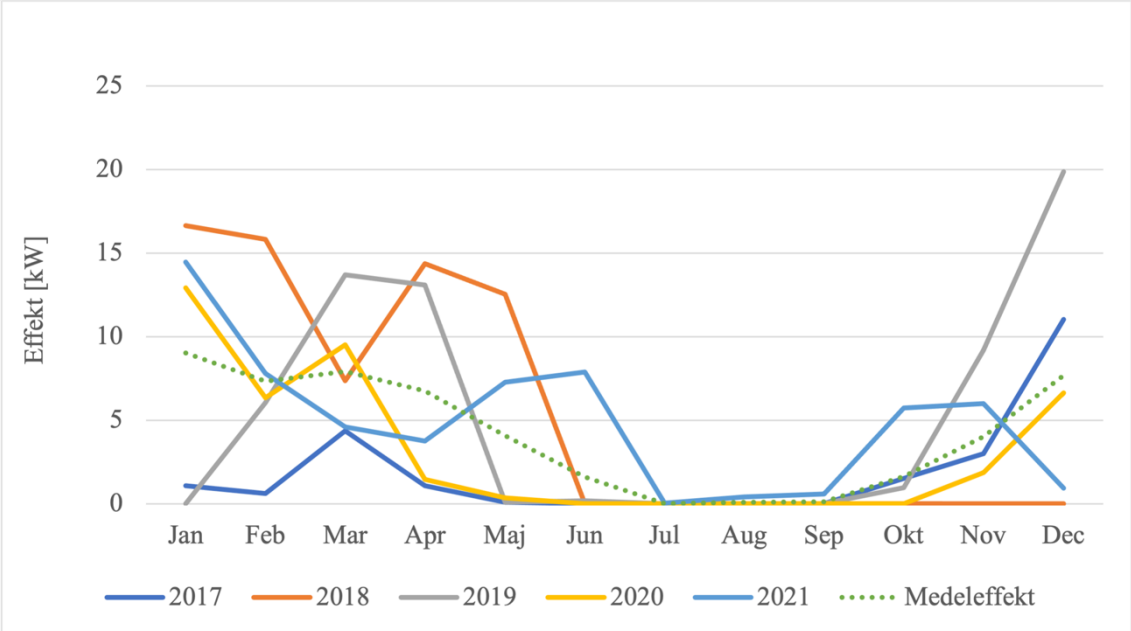
6.1.1 Effekt

Som tidigare nämnt skiljer sig bredden i de två avbördningskanalerna vilket resulterar i två grafer för det vertikala strömkraftverket och en för StraFlo-turbin. Detta då vattenhastigheten används vid uträkningar för vertikala strömkraftverk men inte för StraFlo-turbin. Vattenhastigheten fås fram genom att dela vattenflödet med arean på kanalen, det vill säga att vattenhastigheten blir olika i de två avbördningskanalerna eftersom bredden och således även arean skiljer sig. Nedan kommer resultatet för södra avbördningskanalen redovisas medan resultatet för den norra avbördningskanalen går att hitta i appendix då skillnaden mellan de två kanalerna är väldigt liten.

Effekten en StraFlo-turbin och ett vertikalt stående strömkraftverk skulle ha producerat i avbördningskanalerna under åren 2017 till 2021, givet de vattenflöden som var under samma period, presenteras i figur 17 och figur 18.



Figur 17. Effekten för en StraFlo-turbin för åren mellan 2017 till 2021

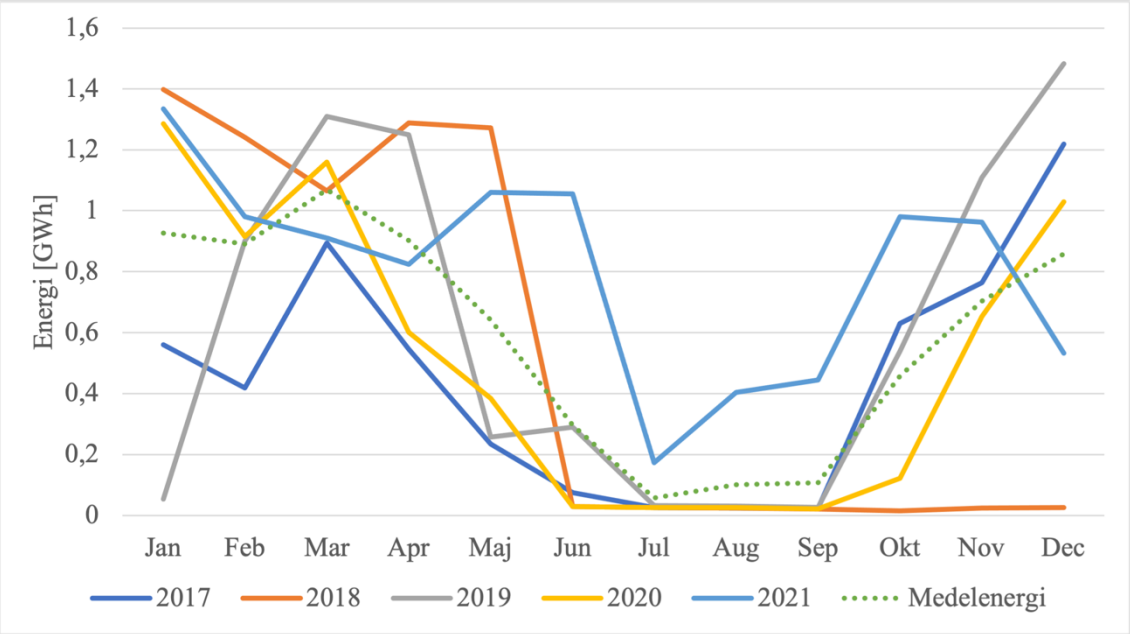


Figur 18. Effekten för ett vertikalt strömkraftverk vid avbördningslucka A1 under åren 2017-2021

Då vattenflödet är betydligt lägre under sommarmånaderna går det tydligt att se i figurerna att effekten påverkas av vattenflödet under årets gång då även effekten är lägre under sommaren än under resterande del av året. Noterbart är även att effektuttaget från StraFlo-turbinen är betydligt högre, med effekttopp på över 2000 kW medan för ett vertikalt strömkraftverk är effekttoppen precis över 30 kW.

6.1.2 Energi

I figur 19 samt tabell 8 redovisas elproduktionen för en StraFlo-turbin under åren 2017 till 2021, givet förutsättningen att den hade varit i konstant drift under året i en av avbördningskanalerna.

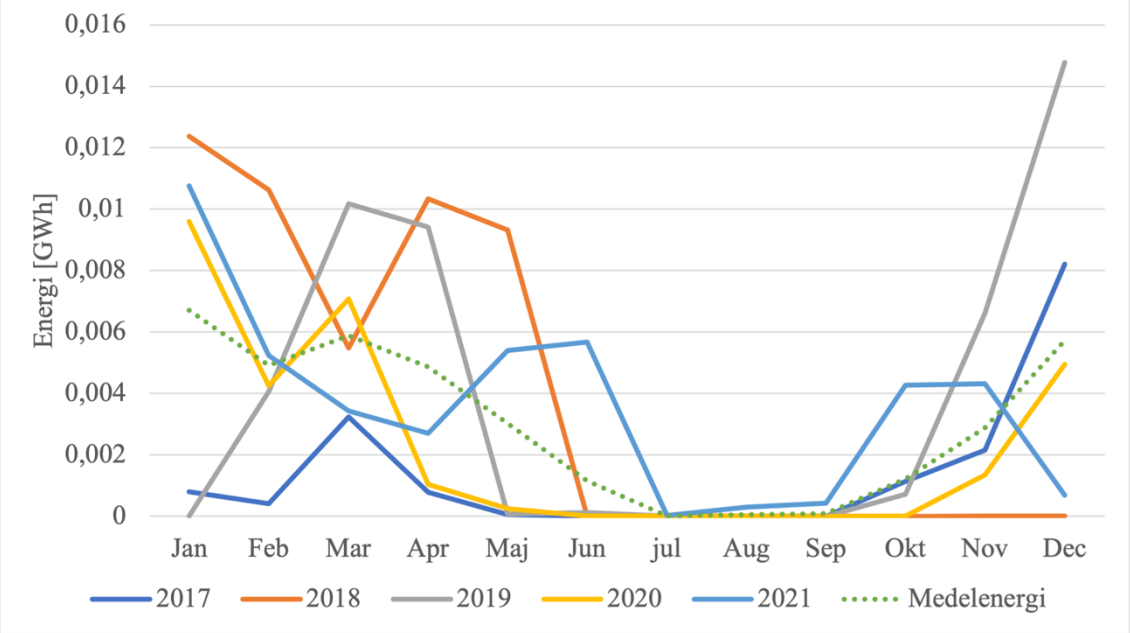


Figur 19. Elproduktion för en StraFlo-turbin för åren 2017-2021

Tabell 8. Ackumulerad elprodukton, per år i GWh, för en StraFlo-turbin för åren 2017 till 2021

Månad	2017	2018	2019	2020	2021
Jan	0.56	1.40	0.05	1.28	1.33
Feb	0.98	2.64	0.95	2.20	2.32
Mar	1.87	3.71	2.26	3.36	3.23
Apr	2.42	4.99	3.51	3.96	4.05
Maj	2.65	6.27	3.77	4.34	5.11
Jun	2.73	6.30	4.06	4.37	6.17
Jul	2.75	6.32	4.09	4.40	6.34
Aug	2.78	6.34	4.12	4.43	6.74
Sep	2.80	6.36	4.15	4.45	7.19
Okt	3.43	6.38	4.69	4.57	8.17
Nov	4.19	6.40	5.80	5.22	9.13
Dec	5.41	6.43	7.28	6.25	9.66

Elproduktion för ett vertikalt strömkraftverk i den södra avbördningskanalen, A1, visas i figur 20.



Figur 20. Energiutvinning för ett vertikalt stående strömkraftverk i avbördningskanal A1 för åren 2017-2021

Skillnaden i energi mellan ett vertikalt stående strömkraftverk och StraFlo-turbinen är stora. Det vertikalt stående strömkraftverket har en energitopp på strax under 0.025 GWh medan StraFlo-turbinens topp ligger mellan 3 GWh och 3.5 GWh, vilket är 120 gånger större än det vertikalt stående strömkraftverket.

Den ackumulerade elproduktionen för ett vertikalt stående strömkraftverk i den södra avbördningskanalen under åren 2017 till 2021 visas i tabell 9.

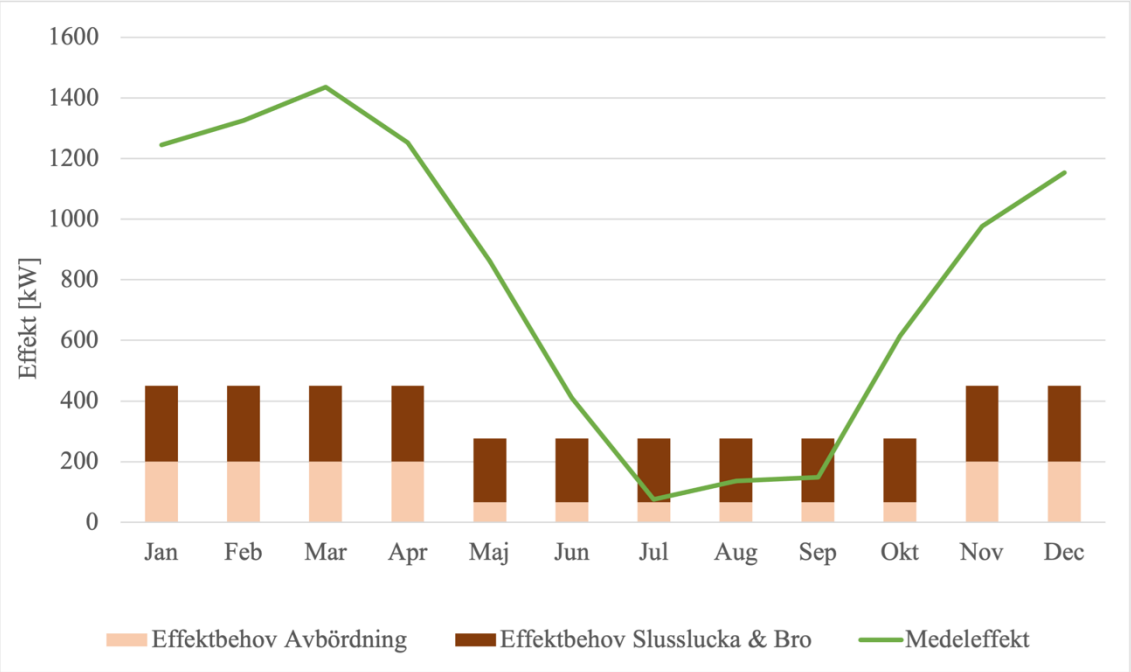
Tabell 9. Ackumulerade elproduktion, per år i GWh, för ett vertikalt stående strömkraftverk i avbördningskanal A1 för åren 2017-2021

Månad	2017	2018	2019	2020	2021
Jan	0.0008	0.0124	0.0000	0.0096	0.0108
Feb	0.0012	0.0230	0.0041	0.0139	0.0160
Mar	0.0044	0.0285	0.0142	0.0209	0.0194
Apr	0.0052	0.0388	0.0237	0.0220	0.0221
Maj	0.0053	0.0481	0.0237	0.0222	0.0275
Jun	0.0053	0.0481	0.0239	0.0222	0.0332
Jul	0.0053	0.0481	0.0239	0.0222	0.0332
Aug	0.0053	0.0481	0.0239	0.0222	0.0335
Sep	0.0053	0.0481	0.0239	0.0222	0.0339
Okt	0.0064	0.0481	0.0246	0.0222	0.0382
Nov	0.0086	0.0481	0.0312	0.0236	0.0425
Dec	0.0168	0.0481	0.0459	0.0285	0.0432

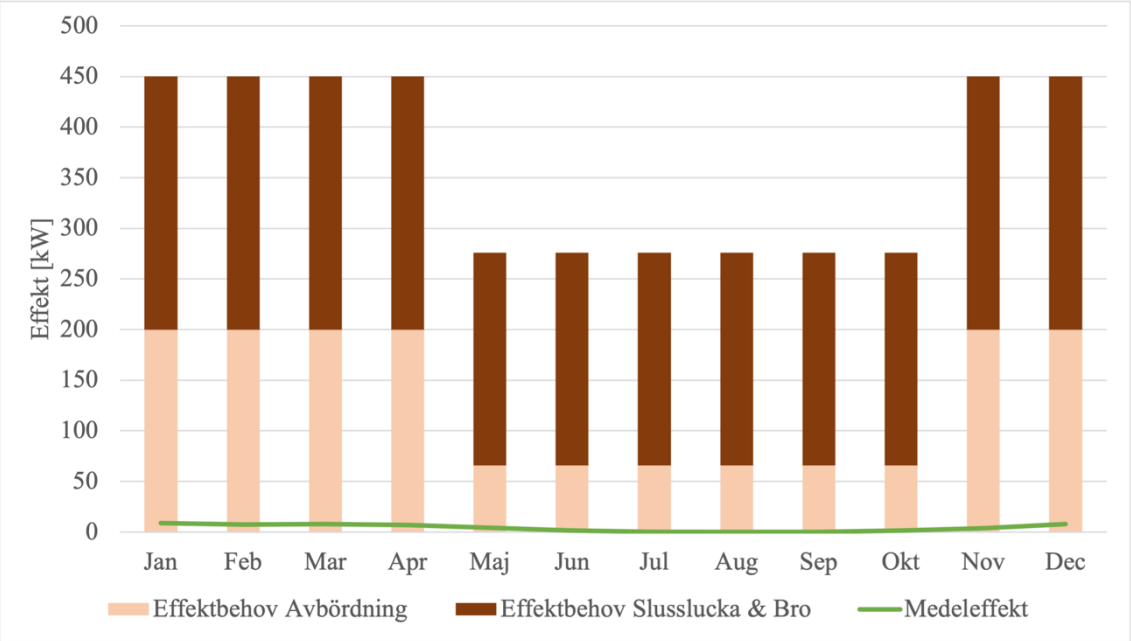
Resultatet mellan ett vertikalt stående strömkraftverk och en StraFlo-turbin skiljer sig väldigt mycket. Till exempel under 2021, där den totala elproduktionen över året är 223 gånger större för StraFlo-turbinen än för det vertikalt stående strömkraftverket vid samma vattenflöde.

6.1.3 Effektbehov

För att få en bättre överblick över hur mycket effekt turbinerna skulle kunna producera i relation till vilket effektbehov som kommer finnas vid den nya sluss- och avbördningsanläggningen illustreras detta i figur 21 och figur 22. Effektbehovet delas upp i avbördning samt sluss och bro. Uppdelningen görs för att se vilka delar av effektbehovet som eventuellt kan fyllas av en vattenkraftsinstallation vid Slussen under vilka månader. Effektbehovet för uppvärmning av maskinrum till avbördningsluckorna samt fastigheter och kontor runt Slussen är inte med i beräkningarna. Den producerade effekten i figurerna är ifall en turbin skulle placeras i avbördningskanalen.



Figur 21. Producerad medeleffekt av en StraFlo-turbin under åren 2017 till 2021 tillsammans med effektbehov för avbördning samt sluss- & bro.



Figur 22. Producerad medeleffekt av en vertikalaxlad strömkraftsturbin under åren 2017 till 2021 tillsammans med effektbehov för avbördning samt sluss- & bro.

En tydlig skillnad mellan StraFlo-turbin och ett vertikalt stående strömkraftverk kan ses i dessa figurer. En StraFlo-turbin kan under de flesta månaderna på året täcka effektbehovet för både avbördning och slussning till den nya sluss- och avbördningsanläggningen. Medan ett vertikalt stående strömkraftverk inte täcker något av effektbehoven under någon månad.

6.2 Kostnadsanalys

6.2.1 Återbetalningsperiod

Om ett vertikalt strömkraftverk placerades vid Slussen skulle man vid ett medelvattenflöde på 220 m^3/s få ut 59220 kWh, givet att kraftverk är igång under samtliga timmar under ett år. Under 2022 var medelpriset för el cirka 154 öre/kWh. Det innebär att ett kraftverk under dessa omständigheter skulle spara in ungefär 91198 kr under ett år i elkostnader. Vilket betyder att återbetalningstiden för ett strömkraftverk, som kostar 2.18 miljoner, blir 23.9 år.

Hade det istället varit maxvattenflöde, det vill säga 1400 m^3/s, under ett helt år med 2022 års medelpris för el hade återbetalningstiden varit 0.093 år, vilket motsvarar ungefär en månad. Detta vattenflöde är dock, som tidigare nämnt, något som inte kommer inträffa särskilt ofta och således är det högst osannolikt att ett kraftverk skulle betala tillbaka sig på enbart en månad.

Tabell 10. Återbetalningstiden för de två typerna av kraftverk vid tre olika flödeshastigheter.

	Vertikalt strömkraftverk	StraFlo-turbin
Lågt flöde (10 m^3/s)	254.5 år	25 år
Medelflöde (220 m^3/s)	23.9 år	1.15 år
Högt flöde (1400 m^3/s)	0.093 år	0.18 år

6.2.2 LCOE

Skulle ett vertikalt strömkraftverk installeras i avbördningskanalen vid Slussen hade LCOE vid lågt, medel och högt vattenflöde varit väldigt olika. Ett lågt vattenflöde på 10 m^3/s hade gett en LCOE på 47.2 kr/kWh medan medelflöde på 220 m^3/s och ett högt vattenflöde på 1400 m^3/s hade resulterat i en LCOE på 4.43 kr/kWh och 0.017 kr/kWh respektive. LCOE-värdena för StraFlo-turbinen är betydligt lägre vid lågt och medelflöde än för det vertikalt stående strömkraftverket vid samma flöden.

Tabell 11. LCOE för de två olika typerna av kraftverk vid tre olika flödeshastigheter.

	Vertikalt strömkraftverk	StraFlo-turbin
Lågt flöde (10 m^3/s)	47.2 kr/kWh	1.95 kr/kWh
Medelflöde (220 m^3/s)	4.43 kr/kWh	0.089 kr/kWh
Högt flöde (1400 m^3/s)	0.017 kr/kWh	0.014 kr/kWh

För att kortfattat sammanfatta resultatet presenteras den producerade effekten, effektbehovet samt kostnaderna för att installera de båda alternativen med StraFlo-turbin och vertikalt stående strömkraftverk. Dessa ställs tillsammans med nollalternativet som skulle innebära att ingen installation av vattenkraftverk görs i någon avbördningskanal vid Slussen.

Tabell 12. Sammanfattande tabell över resultat där nollalternativet är ifall ingen installation av vattenkraft sker samt att kostnaden är beräknat över ett kraftverks totala livslängd. Effekten är beräknat på medelvattenflöde 220 m^3/s.

	Effektbehov vintertid Avbördning/Sluss/ totalt	Effektbehov sommartid Avbördning/Sluss/totalt	Producerad effekt	Kostnad Investering/D&U/Totalt
Nollalternativet	200 / 250 / 450 kW	66 / 210 / 276 kW	0 kW	0 / 0 / 0 kr
StraFlo-turbin	200 / 250 / 450 kW	66 / 210 / 276 kW	1382 kW	21.6 / 5.4 / 27 miljoner kr
Strömkraftverk	200 / 250 / 450 kW	66 / 210 / 276 kW	6.76 kW	2.18 / 3.06 / 5.25 miljoner kr

Skulle investeringskostnaden samt kostnaden för drift och underhåll för en StraFlo-turbin slås ut per år under dess livstid blir det 1.08 miljoner kronor per år. Samma sak för ett vertikalt stående strömkraftverk per år under dess livstid på 20 år skulle kostnaden bli ungefär 262500 kr/år.

7. Diskussion

Att det just nu råder en brist på el i samhället är det ingen tvekan om. Fler saker i samhället kräver och drivs av el. Samtidigt vill man ha mer el producerad på ett förnybart sätt, genom till exempel vindkraft och vattenkraft, för att minska utsläpp och den globala uppvärmningen. Att använda sig av förnybart producerad el är positivt på många sätt. Utsläppen från själva produktionen är obefintliga samt att vatten och vind inte kommer ta slut så som till exempel fossila bränslen kommer göra. Dessutom kostar det inget att driva dessa kraftverk i bränslekostnader, till skillnad från till exempel ett kolkraftverk där det krävs köp av bränsle för att hålla igång elproduktionen.

Däremot kan fossilfria kraftverk ha påverkan på miljön på andra sätt än bara utsläpp. Ett vattenkraftverk har till exempel en inverkan på det lokala ekosystem genom att de naturliga förutsättningarna som finns i vattendraget och dess omgivning ändras på ett negativt sätt. Detta gäller framför allt större vattenkraftverk som har en damm eller uppdämning, som räknas som en av de allvarligare störningarna på vattenmiljön. Detta är dock inget argument som är applicerbart eller påverkar en eventuell vattenkraftinstallation vid Slussen då tanken inte är att bygga någon ny eller separat uppdämning. Det som kommer påverka flödet vid Slussen är vattennivåerna i Mälaren och Saltsjön och på så sätt även avbördningsluckorna då det är dessa som sköter regleringen av vattennivåerna och således även vattenflödet ut från Mälaren. På ett sätt kan man då hävda att avbördningsluckorna och vattnet uppströms dessa liknar en uppdämning. Detta är dock inget argument, ur miljösynpunkt, mot eventuell vattenkraft vid Slussen då dessa luckor och det sätt de fungerar på kommer vara där oavsett om vattenkraft installeras eller ej vid Slussen. Egentligen är detta förhållande positivt utifrån aspekten att ifall vattenkraft skulle installeras kan man styra vattenflödet för att få ut så mycket elproduktion som möjligt från kraftverken. Detta förutsatt att de grundläggande syften med byggandet av den nya slussanläggningen och avbördningsluckorna uppfylls i att hålla saltvattnet i Saltsjön från Mälaren samt minska risken för översvämning. Detsamma går att säga om fisktrappan som kommer finnas. Oavsett om vattenkraft skulle finnas på plats vid Slussen eller inte, kommer fisktrappan i gamla Nils Ericssonslussen byggas. Även erosion kommer, i största möjliga mån, undvikas tack vare de betongsäckar som är utplacerad som erosionsskydd upp- och nedströms slussanläggningen.

Vattenkraftverk har en påverkan på miljön och ekosystemet, oavsett om kraftverken är stora eller små. Däremot skiljer det sig mellan stora och små kraftverk i hur miljön påverkas samt vilka lokala förutsättningar som råder. Andelen vatten där strömkraftverk förekommer uppnår i högre grad ett bättre ekologisk tillstånd än där större vattenkraftverk finns. Oftast är det dammarna som är det största problemet då de utgör ett hinder för vandring och förökning.

Det finns alltså många miljömässiga hinder, som i vanliga fall, skulle kunna utgöra problem för en vattenkraftsinstallation som i nuvarande fall med Nya Slussen inte är

aktuella. Med andra ord borde alltså de flesta negativa konsekvenser som vanligtvis följer med en installation av ett vattenkraftverk, med relativ lätthet, kunna undvikas om någon form av vattenkraftverk skulle installeras lokalt vid Nya Slussen.

Något som blivit väldigt tydligt under det senaste året är att elpriset har kommit att fluktuera ordentligt från en månad till en annan. Då effektbristen tros bli värre i framtiden lär elpriset fortsatt fluktuera mellan relativt höga priser. Framför allt i kombination med samhällets övergång från fossila alternativ mot grönare alternativ i flertalet olika områden och industrier vilket leder till en större efterfrågan på el. Samtidigt är vi på väg mot en förändring i hur elen vi använder produceras. Allt mer av den el vi konsumerar ska vara producerad på ett fossilfritt sätt och från förnybara källor så som vindkraft, solceller och vattenkraft. Eftersom det inte går att styra hur mycket och när det till exempel blåser eller när solen skiner kan det komma att ställa högre krav på att den reglerbara kraften har en större kapacitet, för att balansen på elnätet ska upprätthållas.

En fördel som vattenkraftverk med en damm eller ett magasin uppströms har är att dessa kraftverk kan lagra vatten till dess att behovet är större. Detta då det är enklare att lagra vatten än el. En installation av vattenkraft vid Slussen kommer inte ha något separat magasin med vatten, utan det är vattennivån i Mälaren som kommer avgöra hur mycket vatten som behöver avbördas som dikterar vattenflödet över avbördningsluckan och i avbördningskanalen. Det är möjligt att dessa två intressen går att kombineras. Det vill säga att man, i största möjliga mån, väljer att avbörda mindre när behovet av el är mindre för att sedan öka avbördningen vid högre elbehov. Detta skulle i så fall regleras via vattendomen. Eftersom huvudsyftet med ombyggnationen av Slussen är att minimera översvämningsriskerna samt att säkra dricksvatten till drygt två miljoner människor kommer alltid dessa två ändamål uppfylls först. En eventuell förbättring och optimering av vattenflödet utifrån ett vattenkraftsperspektiv kommer med största sannolikhet alltid komma i andra hand. Lönsamheten i att göra på detta sätt är att när efterfrågan på el är som högst är även priset på el är som högst. Skulle produktionen från kraftverken istället vara som högst under dessa tider skulle såklart kostnaderna för att driva sluss- och avbördningsanläggningen minska i form av att återbetalningen av kraftverken sker snabbare då inköp av el under perioder med höga kostnader kan undvikas mer frekvent.

Ytterligare en fördel i att försöka uppnå maxproduktion av el under de tider behovet är som störst är att Slussen skulle bidra till att plana ut effekttopparna som existerar i elkraftsystemet. Den elproduktionen som skulle ske vid Slussen skulle såklart inte på egen hand kunna försörja större områden i Stockholm med el men är det möjligt att driva hela, eller vissa delar av Slussen med den lokalt producerade elen skulle det bidra till att den effektbrist som finns minskar eller att elnätet kan stabiliseras med frekvensreglering, något som skulle gynna samhällsnyttan.

Denna typ av lösningar, med lokala elproducenter, är förmodligen något som kommer bli både vanligare och populärare i framtiden. Dels med tanke på effektbristen och elpriserna, men även ur miljösynpunkt. Att kunna utnyttja en sådan här typ av möjlighet, där det kommer finnas ett naturligt vattenflöde för att installera och ta tillvara på förnybar energi, kan bli viktig för att klara av de miljömål som är uppsatta samt att minska elkostnaderna. Framför allt när fler och fler delar av samhället drivs av el som kommer bidra till att efterfrågan på el även i fortsättningen kommer vara relativt hög. Det här är självklart inte något som enbart gäller en plats som Slussen utan kan tillämpas på fler områden i samhället, till exempel genom att hushåll blir mer självförsörjande till följd av solkraft. Vad gäller just installationer kring vattenkraftverk blir det en balansgång mellan att värna om djur och natur, samtidigt som den förnybara energi behöver växa för att kunna möjliggöra att de uppsatta miljömålen uppnås.

Något som skulle kunna bli ett problem med en vattenkraftsinstallation vid Slussen är ur energisäkerhetssynpunkt. Vad skulle hända och vem bär ansvaret om exempelvis en allvarlig olycka skulle inträffa? Detta är ett problem med att ha en kraftstation nära eller i en stad och är något som måste tas i beaktning. Även risken för att obehöriga kan ta sig in och skada, antingen kraftverket eller sig själva, ökar. Potentiellt skulle risken att området Slussen utsätts för något form av attentat i och med att en vattenkraftanläggning finns lättillgänglig där.

Om man jämför tabellerna 6 och 7, där producerad effekt och energi presenteras för StraFlo-turbin och vertikalt stående strömkraftverk respektive, ser man rätt tydligt att produktionen för en StraFlo-turbin är betydligt högre än för ett vertikalt strömkraftverk för samtliga tre vattenflöden. I fallet med medelflöde, 220 m^3/s, kan StraFlo-turbinen producera så mycket som 204 gånger mer effekt än det vertikala strömkraftverket, medan det vid den högre flödesmängden, 1400 m^3/s, inte skiljer lika mycket men ändå levererar StraFlo-turbinen ungefär fem gånger så mycket effekt.

Att den vertikala strömkraftverket producerar bättre vid högre vattenflöden, och på så sätt även vid högre vattenhastighet, är inte särskilt konstigt. Detta då ett vertikalt strömkraftverk är väldigt beroende av vattnets hastighet, något som går att se i ekvation (2) där hastigheten är upphöjd till tre. Det man bör ha i åtanke är att det är väldigt sällan maxflödet på 1400 m^3/s kommer inträffa, men det är fortfarande intressant att eventuellt se hur produktionen skulle se ut vid så pass högt flöde eftersom potentialen att faktiskt ha ett sådant flöde vid Slussen kommer finnas.

Att StraFlo-turbinen kan producera mer effekt under dessa omständigheter är något som även understryks i figur 17 och figur 18. Där kan man tydligt se att StraFlo-turbinen levererar betydligt högre effekt även när historiska flöden från tidigare år används i beräkningarna. Något som de bägge typerna av kraftverk har gemensamt är att under sommarmånaderna, framför allt under juli och augusti, sjunker produktionen kraftigt. Detta är på grund av att vattenflödena är betydligt lägre under denna period än under

vintermånaderna, då även effektproduktionen blir betydligt högre för de bägge kraftverken.

När man ställer de bägge kraftverken mot det effektbehov som kommer finnas vid Nya Slussen, i figur 21 och figur 22, ser man även där stor skillnad i produktion. I figur 22 syns det att ett vertikalt strömkraftverks effektproduktion knappt visar utslag i jämförelse med det effektbehov som finns till avbördningsluckor samt till slussluckor och broar. Till skillnad mot figur 21 där en StraFlo-turbin under stora delar av året lyckas, med god marginal, täcka effektbehovet för både avbördning och slussluckor och bro. Något att ha i åtanke är att samtliga figurer och tabeller visar effekt och elproduktion för enbart en turbin. Skulle flera turbiner installeras i avbördningskanalerna skulle såklart både effekt och elproduktionen öka. Exempelvis hade flera StraFlo-turbiner täckt Nya Slussens totala effektbehov under stora delar av året till den grad att den effekten skulle kunna täcka även andra behov i närområdet. Som tidigare nämnt skulle fyra stycken vertikalt stående strömkraftverk få plats i en avbördningskanal. Skulle man installera fyra kraftverk där skulle även effekten fyrdubblas, per avbördningskanal. Det hade i så fall inneburit en effektökning vid medelflöde till 54 kW.

Då de vertikalt stående strömkraftverken inte finns tillgängliga i någon form av industriproduktion ännu anpassas de efter lokala förutsättningar, som till exempel vattenhastigheten. Om vattenhastigheten är under 1 m/s kan det vara svårt att få ut någon lönsamhet i kraftverket. Baserat på 2021 års flöde är vattenhastigheten under 1 m/s fem av tolv månader och sett över hela året är medelvärdet precis runt 1 m/s. Detta betyder alltså att det är precis på gränsen att de vertikala strömkraftverken blir lönsamma vid Slussen. Självklart kommer vattenhastigheten variera år till år och den skulle kunna vara både högre och lägre än under 2021.

Även de ekonomiska beräkningarna visar på tydlig fördel till StraFlo-turbinen gentemot det vertikalt stående strömkraftverket. Både återbetalningstiden och LCOE för det vertikalt stående strömkraftverket är betydligt högre än för StraFlo-turbinen vid lågt och medelflöde. Dock bättre vid högt flöde, däremot är sannolikheten att detta höga flöde kommer inträffa eller hållas under en längre period väldigt låg. Därav blir det mer intressant att titta på värdena vid lågt och medelflöde.

Den initiala investeringskostnaden samt kostnaden för drift och underhåll är betydligt högre för en StraFlo-turbin. På grund av den betydligt bättre effekt utvinningen hos en StraFlo-turbin är återbetalningstiden även den kortare. Vid medelflöde vid Slussen skulle återbetalningstiden bli strax över ett år vilket är tretton gånger mindre än för ett vertikalt stående strömkraftverk. Detsamma gäller LCOE-värdena. De är betydligt bättre för StraFlo-turbinen än för det vertikalt stående strömkraftverket vid låga och medelflöden. LCOE-värdena för det vertikalt stående strömkraftverket visar på att vid låga och medelhöga flöden är mer lönsamt att köpa el från nätet, givet att medelelpriset är som det var under 2022. Det är mycket möjligt att elpriset kommer gå upp mer i

framtiden och skulle de potentiella uppgångarna sammanfalla med höga vattenflöden vid Slussen skulle det kunna innebära att det vertikala strömkraftverket blir en mer lönsam investering.

Även om återbetalningstiden för ett vertikalt stående strömkraftverk vid medelflöde är högre än för StraFlo-turbinen är den fortfarande under den förväntade livslängden av kraftverket vilket indikerar att investeringen skulle vara lönsam, sett över kraftverkets totala livslängden, om än inte lika lönsam som StraFlo-turbinen. De ekonomiska beräkningarna visar alltså på en klar fördel för StraFlo-turbinen, förutsatt att dess högre initiala investeringskostnad går att hantera.

Något som kan tas i beaktning vid beslut gällande eventuell installation av vattenkraft vid Slussen är hur stor plats i beslutet allmänheten och medias bild av miljöarbetet som görs ska få ta. Alltså, om investeringen av vattenkraft vid Slussen är på gränsen att vara lönsam, ska den ändå göras utifrån perspektivet att det ser bra ut med investeringar inom förnybar energi. I slutändan skulle en investering av vattenkraft vid Slussen hjälpa till att minska effektbehovet som finns i samhället.

7.1 Vidare forskning

Eftersom Söderström, där sluss- och avbördningsanläggningen är placerad, är avstängd har samtliga flödessiffror som rapporten är baserade på tagits från tidigare års vattenflöde vid Norrström. Det kan därför vara klokt att, när den nya slussanläggningen öppnar, undersöka hur vattenflödet skiljer sig från tidigare år i Norrström innan beslut om en eventuell installation av vattenkraft tas. Detta då det nya flödet mycket väl kan se annorlunda ut från idag i och med den nya anläggningens utformning och avbördningskapacitet. Detsamma gäller mer exakta kostnader för kraftverken då nuvarande beräkningar är baserade på mer generella prisbilder som eventuellt kan se annorlunda ut i verkligheten.

För att möjliggöra en installation av vattenkraft vid Slussen behöver en ny vattendom sökas och gå igenom. Genom den skulle man möjligtvis även se till att avbördningen ändras för att gynna effektuttaget i största möjliga mån.

8. Slutsatser

Det är möjligt att installera upp till fyra stycken vertikalt stående strömkraftverk eller StraFlo-turbiner i varje avbördningskanal. Dessa kan täcka hela eller delar av den nya sluss- och broanläggningens effektbehov. Ju fler turbiner som installeras desto större effektbehov täcks samt att eventuellt överskott av effekt kan bidra till andra lokalt energikrävande delar av samhället.

En installation av vattenkraft vid Slussen borde inte åsamka någon större skada på den lokala miljön. Detta eftersom vattenflödena vid Slussen kommer vara detsamma oavsett om vattenkraft installeras eller inte. För dessa vattenflöden är åtgärder redan vidtagna genom att det ligger erosionsskydd över sjöbotten både uppströms och nedströms anläggningen. Dessutom kommer en fisktrappa byggas i den gamla slusskanalen för att på så sätt hjälpa och underlätta för djurlivet att ta sig mellan Mälaren och Saltsjön oskadda.

Då återbetalningstiden är så pass låg för de båda turbinerna är det ekonomiskt försvarbart, utifrån de flöden och kostnader som använts i rapporten, att installera båda. StraFlo är en dyrare grundinvestering men under flödena som räknats med i rapporten betalas den av snabbare än det vertikala strömkraftverket. StraFlo-turbinen producerar även betydande mer effekt, och således även mer energi, än det vertikala strömkraftverket. Även om båda typer av turbiner är ekonomiskt försvarbara är StraFlo-turbinens resultat betydande bättre i samtliga kategorier.

Referenser

[1] Naturvårdsverket, ” Det globala klimatarbetet”, Tillgänglig online: https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/det-globala-klimatarbetet/ [2022-09-20]

[2] Naturvårdverket, ”Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk”, Tillgänglig online: https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/ [2022-09-20]

[3] Skanska, Tekniska beskrivningen Slussluckor

[4] SCB (2023), ”Elproduktion och förbrukning i Sverige”, Tillgänglig online: https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/elektricitet-i-sverige/ [2022-10-03]

[5] Stockholms Stad (2023), ”Slussen”, Tillgänglig online: https://vaxer.stockholm/slussen [2022-05-03]

[6] Stockholm Stad (2017), ”Nya Slussen”, Tillgänglig online: https://vaxer.stockholm/globalassets/projekt/sodermalm-sdo/sodermalm/slussen/nyheter/arkiv/2017/slussen_broschyr2017_web.pdf [2022-05-04]

[7] Stockholm Stad, Översiktsbild Slussen, Tillgänglig online: https://vaxer.stockholm/globalassets/projekt/sodermalm-sdo/sodermalm/slussen/webbplats/bild_oversiktsbild_slussen_20170216.jpg [2022-05-17]

[8] Tekniska Museet (2021), ”Vattenkraft, Tillgänglig online: https://www.tekniskamuseet.se/lar-dig-mer/100-innovationer/vattenkraft/ [2022-05-13]

[9] Naturskyddsföreningen (2021), ”Hur fungerar vattenkraft?” Tillgänglig online: https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-vattenkraft/ [2022-06-08]

[10] Energimyndigheten (2020), ”Vattenkraft”, Tillgänglig online: https://www.energimyndigheten.se/fornybart/vattenkraft/ [2022-06-09]

[11] Energiforsk (2021), ”El från nya anläggningar”, ISBN 978-91-7673-715-6

[12] Breeze, P. (2019), ”Power Generation Technologies” 3rd Edition, Kapitel 8 “Hydropower”, Newnes

[13] Havs- och vattenmyndigheten, Energimyndigheten, Svenska Kraftnät, ”Nationell plan för omprövning av vattenkraften”

[14] Wagner, H-J., Mathur, J. (2011), ”Introduction to Hydro Energy Systems. Basics, Technology and Operation”, Springer Berlin, Heidelberg

[15] U.S Department on Energy, “Types of Hydropower Turbines”

[16] Uppsala Universitet, ”Marin Strömkraft”, Tillgänglig online: https://elektroteknik.uu.se/forskning/elektricitetslara/forskningsomraden/marin-stromkraft/ [2022-06-29]

[17] Kusakana, K., Vermaak, H. J., (2013) ”Hydrokinetic power generation for rural electricity supply: Case of South Africa”, Renewable Energy, Vol. 55, pages 467-473

[18] Blackwood, M. (2016), ”Maximum efficiency of a wind turbine”, Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two: Vol. 6: Issue 2, article 2

[19] Energimyndigheten (2014), ”Vad avgör ett vattenkraftverks betydelse för elsystemet”, ISSN 1403-1892

[20] Svenska Kraftnät (2023), ”Om elmarknaden”, Tillgänglig online: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-elmarknaden/ [2022-07-11]

[21] Energimarknadsinspektionen (2021), ”Elmarknaden”, Tillgänglig online: https://ei.se/konsument/el/sa-har-fungerar-elmarknaden#h-Handelmedel [2022-07-13]

[22] Energimarknadsbyrån (2023), ”Månadspriser på elbörsen”, Tillgänglig online: https://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elpriser-statistik/manadspriser-pa-elborsen/ [2022-08-01]

[23] WWF (2023), ”Vattenkraft och miljö”, Tillgänglig online: https://www.wwf.se/sotvatten/vattenkraft/ [2022-10-13]

[24] Naturskyddsföreningen (2021), ”Framtidens vattenkraft släpper fiskarna fria” Tillgänglig online: https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/framtidens-vattenkraft-slapper-fiskarna-fria/ [2022-06-09]

[25] Havs- och vattenmyndigheten, ”Vattenkraftverk och dammar”, Tillgänglig online: https://www.havochvatten.se/arbete-i-vatten-och-energiproduktion/vattenkraftverk-och-dammar.html [2022-06-09]

[26] Upphandlingsmyndigheten, ”Olika typer av investeringskalkyler”, Tillgänglig online: https://www.upphandlingsmyndigheten.se/om-hallbar-upphandling/ekonomiskt-hallbar-upphandling/lcc-for-langsiktigt-hallbara-inkop/olika-typer-av-investeringskalkyler/#nuvardesmetoden [Hämtad 28/9-22]

[27] Ragheb, M. (2017), “Wind Energy Engineering”, Kapitel 25 “Economics of Wind Power Generation”, Academic Press

[28] Boverket (2019), ”Introduktion till livscykelanalys”, Tillgänglig online: https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/ [2022-09-13]

[29] Skanska, ”Tekniska Beskrivningen för avbördningsluckor”

[30] Jonas Andersson, Stockholms Hamnar

[31] Stockholms hamnar, ”Vattenflöde, vattennivå och vindar”, Tillgänglig online: https://www.stockholmshamnar.se/stockholm/vattenniva--floden--vindar/ [2022-09-26]

[32] Skanska (2022), ”Gröna madrasser skyddar sjöbotten”, Tillgänglig online: https://www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/grona-madrasser-skyddar-sjobotten/ [2022-12-02]

[33] Schlemmer, E., Ramsauer, F., Cui, X., Binder, A. (2007), ”Hydromatrix and StrafloMatrix, electric energy from low head hydro potential”, IEEE

[34] Morthorst, P.E., Kitzing, L. (2016), “Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation”, Kapitel 2 “Economics of building and operating offshore wind farms”, Woodhead Publishing

[35] EIA (2017), “Construction cost for most power plant types have fallen in recent year”, Tillgänglig online: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=31912 [2023-03-27]

[36] IRENA (2012), ”Renewable energy technologies: Cost analysis series”, Volume 1: Power Sector Hydropower, Issue 3/5

[37] Vattenfall, ”Prishistorik över Rörligt elpris”, Tillgänglig online: https://www.vattenfall.se/elavtal/elpriser/rorligt-elpris/ [Hämtad 30/6-22]

[38] Skanska, Martin Blohm [2022-08-08]

Appendix A

Effekt och energi för lucka A2 under åren 2017-2021.

