



CHALMERS



Sensorer i Chalmers testvindkraftverk

Kalibrering och validering av töjningsgivare i tornet

Kandidatarbete inom mekanik och maritima vetenskaper

Fredrik Angervall
Linn Blom
Oscar Hallberg
Rasmus Kristensen
Lisa Lindenbaum
Klara Mattsson

**INSTITUTIONEN FÖR
MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2021:02

Sensorer i Chalmers testvindkraftverk

Kalibrering och validering av töjningsgivare i tornet

Fredrik Angervall
Linn Blom
Oscar Hallberg
Rasmus Kristensen
Lisa Lindenbaum
Klara Mattsson



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Avdelningen för dynamik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

Sensorer i Chalmers testvindkraftverk

Kalibrering och validering av töjningsgivare i tornet

FREDRIK ANGERVALL, LINN BLOM, OSCAR HALLBERG, RASMUS KRISTENSEN,
LISA LINDENBAUM, KLARA MATTSSON

© Fredrik Angervall, 2021

© Linn Blom, 2021

© Oscar Hallberg, 2021

© Rasmus Kristensen, 2021

© Lisa Lindenbaum, 2021

© Klara Mattsson, 2021

Handledare: Håkan Johansson, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Examinator: Viktor Berbyuk, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2021:02

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Avdelningen för dynamik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon: +46(0) 31 772 1000

Omslag: Chalmers testvindkraftverk på Björkö
Göteborg, Sverige 2021

Sammandrag

I dagsläget är Chalmers testvindkraftverk placerat på Björkö, men har tidigare funnits i flera olika versioner. I början av 2019 började en tornkropp av trä byggas till testvindkraftverket av företaget Modvion AB, Hisingsbacka. Tornet är byggt av trämoduler vilket möjliggör att man kan bygga högre torn som enklare kan transporteras på allmänna vägar.

För att övervaka och undersöka tornets hållfasthet har ett stort antal sensorer av olika slag installerats i testvindkraftverket, där ibland de töjningsgivare arbetet behandlar. Resistansen i töjningsgivarna förändras när tornet utsätts för belastningar, detta eftersom töjningsgivarna antingen dras ut eller trycks ihop. Målet är att kalibrera dessa sensorer, för att kunna övervaka töjningar och böjmoment i tornet med hjälp av förändringar i sensorernas utslag. I tornet är sensorerna placerade på tre olika höjder, två helbryggor i stålfoten, tornets botten, samt fyra stycken kvartsbryggor på två olika nivåer uppe i tornet. För att kalibrera sensorerna genomfördes en provdragning av vindkraftverket, där en rundsling fästes runt torntoppen och belastades med en viss kraft. Utböjningen av tornet mättes med en lasermätare för att ge en ytterligare bild av tornets egenskaper. Utböjningen beräknades även analytiskt samt genom simuleringar av tornet i Ansys med en modell skapad i CATIA V5.

Ekvationer för vardera sensor har tagits fram för att kunna avgöra det böjmoment och de töjningar som tornet utsätts för. Under kalibreringen valdes den mätning med minst påverkan från vind och solljus, däremot har ingen compensation gjorts för att få bort påverkan från dessa faktorer helt. Det bidrar till en osäkerhet i resultatet eftersom väderförhållandena skiljde sig åt mellan vardera mätning som använts för validering. Olika sensorer har haft olika antal felkällor och därför skiljer det sig till vilken grad ekvationerna anses vara korrekta. Sammanfattningsvis är momentekvationerna för sensorerna mer pålitliga än de töjningsekvationer som tagits fram. För att i framtiden fastställa exakta ekvationer krävs ytterligare arbete med att fastställa och kompensera för felkällor i kombination med en provdragning i optimala väderförhållanden.

Ett delmål med arbetet var att undersöka egenfrekvensen för Chalmers testvindkraftverk, vilken lyckades bestämmas och valideras genom olika metoder. Ytterligare ett delmål var att uppdatera den redan befintliga tornmodellen i programvaran Ashes, ett program av Simis AB. Modellen uppdaterades utefter den verkliga geometrin och kalibrerades utefter resultaten från de analytiska beräkningarna.

Nyckelord: Vindkraftverk, Töjningsgivare, Sensorkalibrering, Wheatstonebrygga, Strukturanalys, Ashes

Abstract

Chalmers test wind turbine is currently located at Björkö in Gothenburg, Sweden. There have been several previous versions of the wind turbine, but the latest updates started construction in 2019. The updates included a tower built in wooden modules, a technique which allows taller towers to be built for the turbines, since the wooden modules are easier to transport on public roads.

With the purpose of monitoring and further testing the structural properties of the new tower, several sensors were installed in the wind turbine. These sensors include the strain gauge sensors in the tower structure and steel base that this thesis processes. The resistance in the sensors changes when loads are applied, due to the strain they experience from the material they are mounted on. The primary aim of this thesis is to calibrate the sensors, in order to express and monitor the strain as well as the bending moment in the tower and steel base. Strain gauges are mounted in three levels at different heights, where the lowest is in the steel base which consists of two full-bridges. The other two levels are located in the wooden tower, each consisting of four quarter-bridges. In order to calibrate the sensors, an experiment was carried out where the tower was pulled from the top with controlled loads. A laser meter was also used during the experiment to measure the deflection to gather more data. The deflection was also calculated analytically and simulated with Ansys, based on a model created in CATIA V5.

Equations were obtained for interpreting each sensors voltage to express the strain and bending moment the tower is subjected to. To calibrate the sensors the data set least affected by external factors, such as the wind speed or sunlight heating the steel base, was selected. These factors were however not compensated for, and this contributed to uncertainties in the result since all data sets used for validation were also affected to varying degrees. Different sensors have had a different amount of uncertainties and therefore they are considered correct to different extents. In conclusion, equations describing the bending moment are more reliable than equations describing the strain. In order to determine more accurate equations in the future, uncertainties has to be further investigated and compensated for, in combination with a new experiment being carried out in optimal weather conditions.

A subgoal was to investigate the natural frequency of Chalmers test wind turbine, which was successfully determined and validated through different methods. Another subgoal was to update a model of Chalmers test wind turbine in the program Ashes by Simis AB. The model was changed to represent the geometry of Chalmers test wind turbine and was further tuned to represent the results given by the analytically calculated results.

Keywords: Wind turbine, Strain gauge sensor, Sensor calibration, Wheatstone bridge, Structural analysys, Ashes

Förord

Den här rapporten är frukten av vårt arbete för kandidatexamen vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Arbetet har utförts under vårterminen 2021 av sex studenter på civilingenjörsprogrammet Maskinteknik.

Stort tack till

Vår handledare Håkan Johansson, Biträdande professor vid Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper som varit ett stort stöd och outtröttligt bollplank för idéer och frågor vid möten under arbetets gång. Tack till vår examinerator Viktor Berbyuk, Professor vid Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper, som visat stort engagemang och intresse för vårt arbete under våren. Tack till Magnus Ellsén, Forskningsingenjör vid Elnät och elkraftteknik, som utfört flertalet experiment och tester på vindkraftverket för vår räkning samt varit ovärderlig vid kalibreringen av sensorerna. Tack till våra uppdragsgivare Ola Carlsson, Biträdande professor vid Elnät och Elektroteknik, och Sara Fogelström, SWPTC-föreståndare vid Elektroteknik, för all hjälp vi fick vid provdragningen samt licens till programvaror. Sist men inte minst vill vi tacka Jan Möller, forskningsingenjör vid Mekanik och maritima vetenskaper, för alla långa samtal för att få oss förstå töjningsgivarna.

Författarna, Göteborg, maj 2021

Innehåll

Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.1.1 Tidigare provdragning	3
1.1.2 Ashesmodell	4
1.2 Syfte och mål	4
1.3 Avgränsningar	4
2 Teori	5
2.1 Chalmers testvindkraftverk	5
2.2 Härledning av Naviers spänningsformel	6
2.3 Sensorer	7
2.3.1 Sensorer i stålfoten - Helbryggor	7
2.3.2 Sensorer i träkonstruktionen - Kvartsbryggor med blindgivare	10
2.4 Ashes	12
3 Metod & Genomförande	15
3.1 Provdragning av vindkraftverket	15
3.1.1 Sensorernas placering i tornet	17
3.1.2 Kalibrering av sensorer	19
3.1.2.1 Kalibrering av sensorer i stålfoten	22
3.1.2.2 Kalibrering av sensorer i trätornt	22
3.1.3 Bestämning av utböjning	24
3.1.3.1 Experimentell bestämning av utböjning	24
3.1.3.2 Teoretisk bestämning av utböjning	26
3.1.4 Bestämning av egenfrekvens	26
3.1.5 Analog mätning av utböjning och egensvängning	27
3.2 Modellering av vindkraftverket.	28
3.2.1 Simuleringsmodell i Ashes	28
3.2.1.1 Analys av befintlig Ashes-modell	28
3.2.1.2 Modifierad tornmmmodell i Ashes	28
3.2.2 CAD-modellering i CATIA V5	29
3.2.3 Strukturell analys i Ansys	30

3.2.3.1	Uppsättning av simuleringsmodell	30
3.2.3.2	Användning av simuleringsmodell	31
4	Resultat	33
4.1	Kalibrering av sensorer	33
4.1.1	Sensorer i trätornet	33
4.1.2	Sensorer i stålfoten	34
4.1.3	Validering av kalibreringsresultat	34
4.2	Töjning av trätorn	37
4.3	Utböjning av trätorn	38
4.4	Beräkning av tornets egenfrekvens	40
4.5	Simuleringsmodell i Ashes	40
5	Diskussion	43
5.1	Genomförandet av provdragningen	43
5.1.1	Motsägande information från tidigare dragning	44
5.2	Reglarnas påverkan	44
5.3	Sensorkalibrering	44
5.3.1	Väderförhållanden vid mätningar	44
5.3.2	Analytiskt bestämda töjningar och böjmoment	45
5.3.3	Kalibrering och validering av sensorerna	46
5.4	Den uppdaterade Ashesmodellen	46
5.4.1	Skillnad mellan modell och verklighet	47
5.4.2	Osäkerheter kring pålitlighet	47
5.5	Rekommendationer för framtida studier	47
6	Slutsatser	49
	Referenser	51
A	CAD-modell av tornets delar	I
B	Plottar över valideringen av sensorerna	III

Figurer

1.1	Den invändiga konstruktionen av testvindkraftverket.	2
1.2	Pågående riggning av lyftslingen.	3
2.1	Överskådlig bild över vindkraftverkets delar.	5
2.2	Den elektriska kretsen helbrygga.	8
2.3	Töjningsgivarna placerade på stålfoten.	8
2.4	Illustrationer på töjningsgivarna som är placerade i stålfoten.	9
2.5	Illustrationer av kvartsbryggan med blindgivaren.	11
2.6	Bild på en kvartsbrygga med blindgivare placerad i trätornet.	12
2.7	Skärmdump från en simulering i Ashes.	13
3.1	Övergripande skiss över hur monteringen av komponenterna såg ut vid provdragningen.	16
3.2	Signalernas utdata vid en av provdragningarna.	17
3.3	Dörren i tornet med de numrerade träreglarna ovanför.	18
3.4	Sensorernas kompassriktning i förhållande till tornets centrum.	18
3.5	Beräknad extrahöjd för att kompensera för vertikala moment.	20
3.6	Skiss över dragriktningarna vid provdragningen.	20
3.7	Friläggning av krafterna som påverkar tornet.	23
3.8	Mätning för att finna vinkel till toppen.	25
3.9	Schematisk skiss över egensvängningstestet.	27
3.10	CAD-modell av trädelen för tornet, där tornet visualiseras från botten upp mot toppen.	29
4.1	Kalibreringsekvationen för två olika sensorer med avseende på töjning.	36
4.2	Kalibreringsekvation för de båda helbryggorna i stålfoten.	36
4.3	Jämförelse av analytisk, uppmätt och simulerad utböjning vid en dragkraft på 3000 kg.	39
4.4	Jämförelse av analytisk, uppmätt och simulerad utböjning vid en dragkraft på 2000 kg.	39
4.5	FFT av sydsensorn på nivå 1 vid första egensvängningstestet.	40
A.1	Volymmodeller av hela tornet samt toppadaptorn och stålfoten	I
B.1	Töjningen för sensorerna i nordlig riktning i träkonstruktionen	III
B.2	Töjningen för sensorerna i sydlig riktning i träkonstruktionen	III
B.3	Töjningen för sensorerna i östlig riktning i träkonstruktionen	IV
B.4	Töjningen vid sensorerna i västlig riktning i träkonstruktionen	IV

B.5	Momentet vid sensorerna i nord-sydlig riktning i träkonstruktionen .	IV
B.6	Momentet vid sensorerna i öst-västlig riktning i träkonstruktionen . .	V
B.7	Montet vid sensorerna i både nord-sydlig och öst-västlig riktning i stålfoten	V

Tabeller

3.1	Schema över de olika lastfallen under provdragningen.	16
3.2	De mätningar som analyserades vid kalibrering av sensorerna.	19
4.1	Töjningsekvationerna för sensorerna i trätornet.	33
4.2	Momentekvationerna för sensorerna i trätornet när de tolkas som virtuella helbryggor.	34
4.3	Momentekvationerna för sensorerna i stålfoten.	34
4.4	Valideringstabell för sensorerna i trätornet vars ekvation mäter töjning.	35
4.5	Valideringstabell för sensorerna i trätornet och stålfoten vars ekvation mäter böjmoment.	35
4.6	Töjning vid trätornets sensorer vid nordvästdragning.	37
4.7	Tabell över utböjning [mm] av tornet vid olika belastningar från två olika väderstreck samt analytiska beräkningar.	38
4.8	Tabell över uppmätt utböjning [mm] av tornet vid olika belastningar vid ungefär 19 m höjd, samt analytiska beräkningar för samma höjd.	38

1

Inledning

För att motverka global uppvärmning är förnybara energikällor viktiga tekniker att utveckla. En av de förnybara energikällorna är vindkraft, vilket är något som Sverige länge investerat i och år 2019 stod vindkraft för 12 % av den elenergi som produceras i landet [11]. Rapporter från Energimyndigheten visar att på fem år (2014-2019) har producerad energi från vindkraft ökat med 71 % [10]. En sådan ökning visar att intresset för vindkraft är stort, men för att öka produktionen av antal vindkraftverk är det önskvärt med en billigare och mindre miljöpåverkande tillverkning. I dagsläget består konstruktionen av tornen till vindkraftverken av stål men för att ytterligare stärka miljöargumentet för vindkraft och sänka totalkostnaderna undersöks möjligheten att istället bygga tornen i trä. Till skillnad från stål, som alstrar koldioxidutsläpp vid framställning, agerar trä som en koldioxidsänka då materialet lagrar koldioxid under sin livstid [22]. Ett torn konstruerat av trä har också fördelen att de kan byggas och transporteras i sektioner för att på så sätt kunna konstruera större torn än de som tillverkas idag. De begränsande faktorerna för nuvarande vindkraftverk är att lastbilar inte kan transportera tornkroppar längre än 60 meter, samt att äldre vägar oftast måste byggas om, eller i vissa fall behövs helt nya vägar. Anledningen är främst den tvärsnittsdiаметern som de stora vindkraftverken har, och det är en begränsande faktor då ingen del av transporten får överstiga 4,7 meter på grund av höjdbegränsningen på vanliga broar [17]. Trä har ett liknade pris per kilo som stål, men då trä har en lägre densitet än stål för att uppnå samma hållfasthet medför det att tornet blir lättare att transportera, billigare att tillverka samt att det gynnar Sveriges träindustri [5].

I ett samarbete mellan Chalmers tekniska högskola och Svenskt Vindkraftstekniskt Centrum (SWPTC) har ett testvindkraftverk byggts upp med syftet att bedriva forskning kring vindkraft. En nyhet med vindkraftverket är att tornet är tillverkat i trälaminat. För att kunna utvärdera vindkraftverkets beteende är flertalet olika sensorer installerade, bland annat töjningsgivare för att mäta töjningar och böjmoment i tornet.

1.1 Bakgrund

Chalmers testvindkraftverk har funnits i flera versioner genom åren där det senast stod ute på Hönö, då i form av ett nedskalat vanligt vindkraftverk. I början av 2019 började en tornkropp av trä byggas till testvindkraftverket av företaget

Modvion AB, Hisingsbacka, som bygger och utvecklar komplicerade konstruktioner av laminerat trä. Tornet är byggt av trämoduler vilket möjliggör att man kan bygga högre torn som enklare kan transporteras på allmänna vägar. Redan år 2022 är tanken att Modvion ska färdigställa det första kommersiella trävindkraftverket utanför Varbergs kust [5].

I april 2020 var det aktuella tornet färdigbyggt och transporterades ut till Björkö i Göteborgs norra skärgård för att resas. Med en höjd på 38 meter och en rotordiameter på 16 meter, är vindkraftverket mindre än de kommersiella vindkraftverken [22]. Vindkraftverket är skalenligt, vilket gör att mätdata kan översättas och appliceras på större vindkraftverk. Tornet är av formen stympad kon där diametern minskar med höjden. Tornet är ihåligt hela vägen upp, se figur 1.1, och försett med en dörr vilket möjliggör att man kan vistas inuti tornet.



Figur 1.1: Den invändiga konstruktionen av testvindkraftverket där bland annat de 32 vertikala reglarna tydligt syns.

Träkonstruktionen är inte det enda intressanta med testvindkraftverket, bland annat så sker forskning kring stödtjänster som testas på vindkraftverket. Stödtjänster är en form av frekvensreglering för elnätet när elbehovet stiger eller sjunker. Tidigare har detta reglerats med hjälp av vattenkraft men nu undersöker man om det skulle fungera i Sverige med vindkraftverk. Länder som bland annat Danmark, Kanada och Irland har redan implementerat detta i sina vindkraftsparker [16].

Uppdragsgivare till kandidatarbetet är Ola Carlsson och Sara Fogelström från Svenskt Vindkraftstekniskt Centrum (SWPTC). SWPTC är ett tekniskt centrum med flera akademiska samarbetsparter som skapades för att tillsammans arbeta mot en mer tillförlitlig och kostnadseffektiv vindkraftspark i Sverige. Några av SWPTC:s specifika målsättningar är att ge vindkraftverk en ökad livslängd med hjälp av lastprediktering och förebyggande underhåll [4].

1.1.1 Tidigare provdragning

Strax efter resandet av tornet, den 26 maj 2020, innan maskinhuset tillsammans med bladen monterats, utfördes en provdragning av tornet för att kunna kalibrera de töjningsgivare som installerats i trätornet [13]. Töjningsgivarna installerades kort efter att tornet hade rests för att kunna analysera hur tornet reagerar på de påfrestningar som det kommer att utsättas för av vinden samt under drift. Provdragningen genomfördes med hjälp av att en lyftsling virades runt toppen av tornet, se figur 1.2, och kopplades samman med en lina ned till en draganordning som var infäst i en ögla förankrad i berget. Det gjordes för att kunna jämföra sensorutslagen mellan givarna. Tyvärr var inte alla töjningsgivare i fungerande skick vid den provdragningen, så den data som samlades in var ofullständig.



Figur 1.2: Pågående riggning av lyftslingen.

1.1.2 Ashesmodell

En av uppdragsgivarna, Sara Fogelström från SWPTC, tillsammans med företaget Simis AB och personal på Modvion AB har skapat en simuleringsmodell av vindturbinen i programvaran Ashes. Ashes är ett simuleringsprogram specialiserat för att utföra integrerade analyser av vindturbiner både på land och ute till havs. Programmet inkluderar krafter som bland annat vind, gravitation, vågor och generatormotstånd [2]. Ashes är utvecklat för att snabbt, enkelt och utan att behöva studera manualer komma igång att testa olika vindförhållanden, ändra parametrar i vindkraftverket och kunna studera förändringar på detaljnivå.

1.2 Syfte och mål

Målet med projektet är att bestämma kalibreringsparametrar för töjningsgivarna i tornet. Med de kalibrerade parametrarna är syftet att givarna ska kunna mäta och rapportera töjningar samt böjmoment på de höjder givarna är placerade. Därtill ska projektet experimentellt undersöka egenskaper i form av utböjning och egenfrekvens, samt ge underlag för att uppdatera och validera tornmodellen i Ashes.

1.3 Avgränsningar

De beräkningar som görs i arbetet är baserade på data när trät är nytt och tar inte hänsyn till huruvida fukt och slitage över tid kommer att påverka tornets integritet och hållfasthet. Tornet betraktas dessutom som kontinuerligt istället för att ta hänsyn till de förband som sammankopplar modulerna. Långsiktiga egenskaper i form av utmattning är inte heller något som kommer tas i beaktning.

Prioritet läggs på sensorerna i tornet, men rapporten förklarar inte hur sensorerna fungerar rent mekatroniskt eller hur de är kopplade in i systemet, utan fokuserar på de värden som kan avläsas och kopplas till tornets utböjning och töjning.

Rapporten behandlar inte huruvida tornets konstruktion i trä är mer klimatneutralt än en stålkonstruktion. Ytterligare faktorer som inte behandlas är de politiska aspekterna kring vindkraft, såsom hur det påverkar djurlivet samt huruvida vindkraft är effektivt över flera årstider och vad som händer när vinden avtar om det är kallt ute och energi behövs som mest. Inte heller hur vindkraftverket är kopplat till elnätet behandlas.

Projektet syftar inte till att uppdatera andra delar av Ashesmodellen, exempelvis blad, maskinhus eller frekvensreglering, som inte har betydelse för sensorernas kalibrering eller bestämning av egenfrekvens.

2

Teori

För att tydligare kunna förstå de metoder som använts samt lättare tolka framtagna resultat har ett teorikapitel skrivits. Den innehåller bland annat information om vindkraftverket, sensorerna och programvaran Ashes samt förtydligar delar som använts för analytiska beräkningar.

2.1 Chalmers testvindkraftverk

De delar av Chalmers testvindkraftverk som benämns i rapporten finns markerade i figur 2.1. Längst ner finns betongfundamentet, som är gjutet för att fästa nästa del, stålfoten. Stålfoten kopplar samman fundamentet med det koniska tornet i trä. Ovanpå tornet är en toppadapter i stål monterad för att fästa maskinhuset. Maskinhuset innehåller bland annat huvudaxel, generator, girmotor och växellåda. Framför maskinhuset är rotorbladen monterade. Tornets totala höjd, inklusive toppadapter är 30 meter och rotordiametern är 16 meter [7]. En av nyheterna med denna version av vindkraftverket är att tornkroppen är konstruerad i trä, där kroppen är uppbyggd av fem moduler och varje modul består av fyra segment i laminerad granträfaner [23]. Inuti tornet löper 32 reglar vertikalt, jämnt fördelade i träkonstruktionen. Reglarna har dimensionen 81x42 mm [23] och stärker upp tornkroppen som har en vägg tjocklek på 63 mm [7]. Den andra nyheten är att bladen är tillverkade i kolfiber istället för glasfiber. Valet av kolfiber har medfört att rotorbladen nu inte bara är lättare utan även styvare [22].



Figur 2.1: Överskådlig bild över vindkraftverkets delar.

2.2 Härledning av Naviers spänningsformel

För att analytiskt beräkna de töjningar som vindkraftverket utsätts för används Naviers spänningsformel, ekvation (2.1). Ekvationen härleds då den har en central roll i kalibreringen av sensorerna i trätornet.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{I}z \quad (2.1)$$

Denna ekvation används eftersom den tar hänsyn till både moment som belastar tornet samt de normalkrafter som påverkar, alltså används superpositionsprincipen [14, s.96]. Detta är användbart i arbetet då tornet utsätts för både moment och normalkrafter vid bruk. För att härleda ekvationen krävs följande: definition av böjmoment, Hookes lag, definition av normaltöjning samt ett kinematiskt samband [3]. Definition av moment ser ut enligt

$$M = \int_A \sigma z dA \quad (2.2)$$

där σ är spänningen och z är avståndet till tvärsnittets tyngdpunkt. Hooks lag beskriver sambandet mellan spänning och töjning enligt

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.3)$$

där ε representerar töjningen och E är materialets elasticitetsmodul. För att kunna utveckla töjningen krävs även definitionen av töjning, enligt

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \quad (2.4)$$

Det kinematiska sambandet som i detta fall är av intresse visar samband mellan axiell förskjutning och utböjning, enligt

$$u(x) = -w'z \quad (2.5)$$

där $u(x)$ är förskjutningen och w' är utböjningen. Genom att kombinera ekvation (2.2) och (2.3) kan följande omskrivning genomföras

$$M = \int_A E\varepsilon z dA \quad (2.6)$$

Detta kan förenklas ytterligare genom användning av ekvation (2.4) och (2.5), vilket ger $\varepsilon = \frac{du}{dx} = -w''z$. Här antas även elasticitetsmodulen vara konstant, vilket betyder att den kan flyttas ut från areaintegralen, enligt

$$M = -Ew'' \int_A z^2 dA = -EIw'' \quad (2.7)$$

Areaintegralen av z^2 motsvarar yttröghetsmomentet I och kan därför ersättas mot I . Genom att använda Hookes lag igen fås följande samband

$$\sigma = E\varepsilon = E(-w''z) = E\frac{M}{EI}z = \frac{M}{I}z \quad (2.8)$$

vilket representerar termen för böjmoment i Naviers spänningsformel, ekvation (2.1). När detta böjmoment kombineras med spänningen från normalkraften, $\sigma = \frac{N}{A}$ fås den slutgiltiga formen för spänningsformeln.

När man applicerar Naviers spänningsformel på vindkraftverket tas de yttre krafterna som påverkar tornet i beaktning. I normalkraften N ingår tornets egentygnd samt egentygnden från maskinhuset och i böjmomentet M ingår de yttre horisontella krafter som påverkar tornet, såsom vinden. I böjmomentet ingår även ett moment som maskinhuset bidrar till då dess tyngdpunkt inte ligger i tornets centrumlinje [9].

2.3 Sensorer

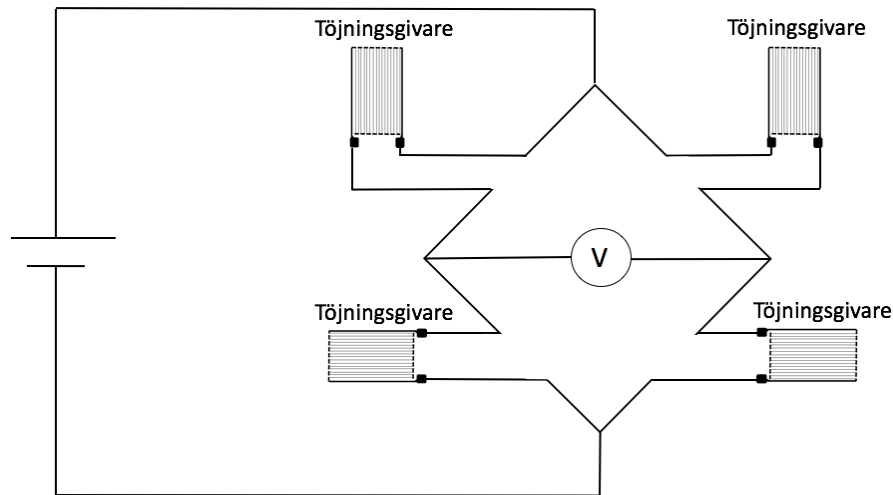
Chalmers testvindkraftverk är utrustat med flera olika sorters sensorer i de olika delarna av konstruktionen. I stålfoten och i trätorntet är töjningsgivare placerade, vilket är de sensorer rapporten kommer att behandla. Dessa är ihopmonterade i elektriska bryggor, kallade wheatstonebryggor [20], som man tillför en ström och en spänning. Wheatstonebryggor används för att detektera resistansförändringar i en elektrisk krets [12]. Det sker genom att töjningsgivaren ändrar resistans när den antingen komprimeras eller töjs ut, därav kommer den elektriska spänningen i kretsen förändras när tornet utsätts för en belastning. Detta ska användas för att få en uppfattning om hur tornet påverkas av olika laster. I trätorntet är varje töjningsgivare ihopkopplad i en kvartsbrygga med blindgivare medan de i stålfoten är kopplade i en helbrygga.

Sensorerna som är relevanta för arbetet är placerade i trätorntet och i stålfoten. De är placerade för att kunna mäta töjningar och böjmoment i exakta väderstreckriktningar. Huruvida de sitter i exakta kompassriktningar är oklart och kommer redogöras tydligare under arbetets gång, men här i teoridelen benämns de som exakta för att förenkla beskrivningen av den bakomliggande teorin.

2.3.1 Sensorer i stålfoten - Helbryggor

I övergången mellan träkonstruktionen och betongfundamentet sitter stålfoten, där det har placerats totalt åtta töjningsgivare som två sensorer, se figur 2.3 för fysisk representation. Dessa är placerade i riktningen nord-syd och öst-väst, och sitter på 0.53 meters höjd, vilket representerar en tredjedel av stålfotens höjd. Sensorerna består av en elektrisk brygga av formen helbrygga, vilket betyder att varje krets består av fyra töjningsgivare, se figur 2.2. Töjningsgivarna i stålfoten är ihopkopplade tvärs över tornet, vilket innebär att två töjningsgivare placerade i nordlig riktning kopplas ihop med två i sydlig riktning. På samma sätt kopplas de i västlig riktning ihop med de i östlig. I varje punkt där det har placerats töjningsgivare sitter det en i vertikal led och en i horisontell led. Temperaturförändringar i tornet kommer inte att ge utslag på signalen, av anledningen att töjningsgivarna har samma temperaturutvidgningskoefficient. Det gör att de utvidgas lika mycket och skillnaden i resistans kommer därför att skilja

lika mycket i töjningsgivarna. Sensorerna i stålfoten har namnen "TMBNS" och "TMBEW", vilket står för "Tower Moment Base North South" och "Tower Moment Base East West".



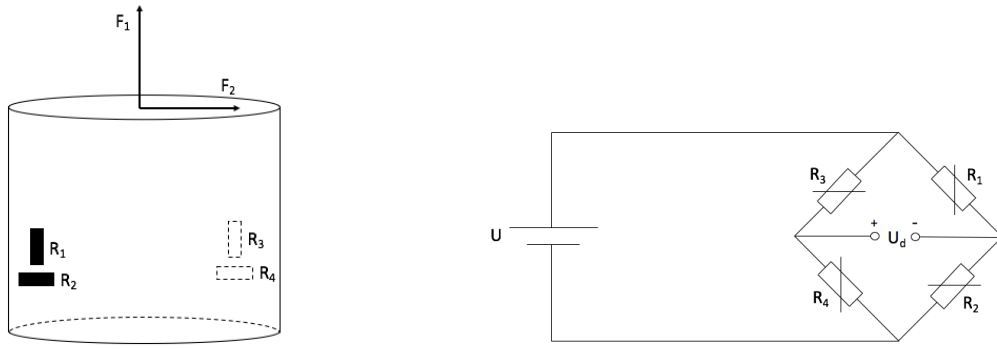
Figur 2.2: Den elektriska kretsen helbrygga.



Figur 2.3: Töjningsgivarna placerade på stålfoten. Under tejpén befinner sig två töjningsgivare, en i vertikal led och en i horisontell led.

Hur töjningsgivarna placeras i bryggan är avgörande för vilken typ av belastning som sensorerna kommer ge utslag på. I tornet på Björkö vill man mäta tornets påverkan från den horisontella kraften F_2 och göra bryggan okänslig för vertikala kraften F_1 , se figur 2.4a och 2.4b. Det sker genom att resistorerna har följande samband innan kraftändringen [21]:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$



(a) Töjningsgivarna monterade i stålfoten. Som figur 2.3 visar sitter R_1 och R_2 i verkligheten placerade under en tejp på insidan av tornet, och mitt emot sitter R_3 och R_4 .

(b) Genom att bryggan är kopplad på följande vis möjliggörs att sensorn inte ger utslag på kraft i vertikal led. Strecket över resistansen indikerar att den är justerbar.

Figure 2.4: Illustrationer på töjningsgivarna som är placerade i stålfoten.

Krafterna F_1 och F_2 i figur 2.4a representerar de belastningar som påverkar tornet. F_1 är den vertikala kraften som i Naviers spänningsformel betecknas som normalkraften N och F_2 är kraften som bidrar till böjmomentet M .

Eftersom resistanserna är lika stora från början kommer det leda till samma spänning över alla resistorer. Det innebär att det inte blir någon skillnad över voltmätaren när tornet är obelastat. Voltmätarens utslag betecknas U_d medan matningsspänningen betecknas U . Sambandet mellan dessa är [6]:

$$U_d = U \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2.9)$$

När tornet däremot utsätts för en belastning, dvs förändring av F_1 och F_2 , kommer det ske en töjning av den yta där töjningsgivaren är placerad. Det innebär att resistorerna istället får värdet:

$$R_i + \Delta R_i$$

Det antas att alla relativa förändringar är mycket små:

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} \ll 1$$

Genom detta fås följande ekvation:

$$\frac{U_d}{U} \approx \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4}{4R} \quad (2.10)$$

Där förändringen av resistansen kan beskrivas som:

$$\Delta R_i = \Delta R_{i,\text{töjning}} + \Delta R_{i,\text{temperatur}} \quad (2.11)$$

Då ΔR_1 och ΔR_3 , likaså ΔR_2 och ΔR_4 , kommer att påverkas likadant av kraften F_1 kan alltså påverkan från denna kraft försummas. Samma sak sker när det kommer till temperaturen, den kompenseras bort genom att givarna som sitter på samma del av tornet utsätts för samma temperatur:

$$\Delta R_{1,\text{temperatur}} = \Delta R_{2,\text{temperatur}} \quad \text{och} \quad \Delta R_{3,\text{temperatur}} = \Delta R_{4,\text{temperatur}} \quad (2.12)$$

Vad som då kvarstår är påverkan från kraften F_2 . När töjningsgivaren i vertikal led antingen komprimeras eller töjs ut kommer den i horisontell led att göra det motsatta. Exempelvis om töjningsgivaren som utgör R_1 töjs ut kommer samtidigt R_2 att komprimeras.

Den slutliga utsignalen från sensorerna i stålfoten ges då av:

$$\frac{U_d}{U} \approx \frac{\Delta R_{1,\text{töjning}} - \Delta R_{2,\text{töjning}} - \Delta R_{3,\text{töjning}} + \Delta R_{4,\text{töjning}}}{4R} \quad (2.13)$$

Sensorerna i stålfoten har alltså en enhetslös utsignal: $\frac{U_d}{U}$ [Volt/Volt], vilket beskriver skillnaden mellan den töjning som sensorerna utsätts för. Genom att ta reda på vilket moment tornet utsätts för samtidigt som utsignalen fås kan en rätlinjig ekvation beräknas, den kan sedan beskrivas på formen:

$$M_b = k \cdot x + m$$

Där x är sensorsignalen och M_b är det resulterade böjmomentet på tornet vid den signalen. Parametrarna k och m är de som ska bestämmas under arbetet för sensorerna i stålfoten.

2.3.2 Sensorer i träkonstruktionen - Kvartsbryggor med blindgivare

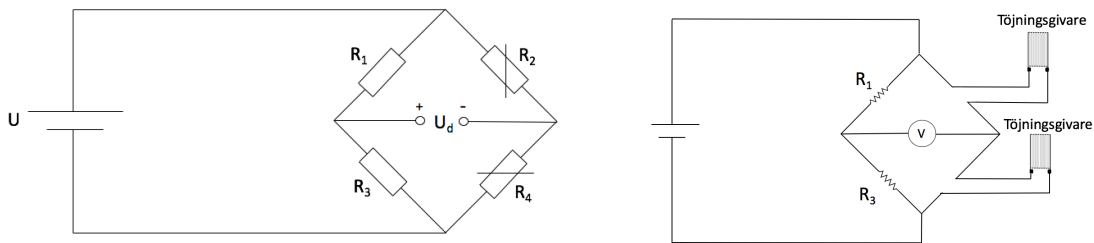
I träkonstruktionen i tornet sitter det åtta sensorer, dessa är placerade på två olika höjder med fyra sensorer på vardera höjd. Sensorerna är i sin tur placerade jämnt fördelade runt omkretsen på tornets insida, i de fyra väderriktningarna. I träornet sitter det alltså exempelvis en sensor i nord och en separat i syd, vilket är skillnad från stålfoten där det är totalt en sensor som utgör nord-sydlig riktning. De fyra sensorer som sitter högst upp är placerade i andra skarven av träkonstruktionen, 11,1 m ovanför fundamentet [7]. Resterande fyra är placerade mellan första och andra skarven, 3,0 m lägre ned, på 8,1 m höjd.

De åtta sensorer som sitter i träkonstruktionen är av modellen "kvartsbrygga med blindgivare" där varje sensor består av två töjningsgivare och två vanliga resistorer, se figur 2.5b. En av töjningsgivarna är placerad direkt på träornets insida medan den andra, blindgivaren, placerats på en träbit bredvid för att på så sätt förbli obelastad, se figur 2.6. Anledningen till att en blindgivare ingår i kretsen är eftersom temperaturförändringar som tornet utsätts för ska kompenseras bort. Detta sker genom att blindgivaren och den andra töjningsgivaren har samma

temperaturutvidgningskoefficient. Den elektriska spänningen kommer därför inte förändras beroende av temperaturen eftersom båda två kommer vidgas eller krympa lika mycket. Sensorerna döps efter vilken höjd och väderriktning de sitter i. "TFL1N" står för "Tower Force Level 1 North", vilket innebär att den sitter på Level 1 (lägsta höjden) och i nordlig riktning. Liknande namn ges till övriga sensorer.

Figur 2.5a beskriver kopplingen kvartsbrygga med blindgivare där R_2 är töjningsgivaren och R_4 är töjningsgivaren som agerar blindgivare. R_1 och R_3 är vanliga resistorer och kommer därför alltid ha samma värde. Resistorerna har följande samband innan bryggan belastas:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$



(a) Kvartsbrygga med blindgivares koppling, som visas i figur 2.5b är R_1 och R_3 vanliga resistorer medan de två resterande är töjningsgivare. (b) Den elektriska kretsen kvartsbrygga med blindgivare.

Figur 2.5: Illustrationer av kvartsbryggan med blindgivaren.

Sambandet mellan resistorerna, matarspänningen U och voltmätarens utslag U_d är följande:

$$U_d = U \cdot \left(\frac{R_2}{R_2 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) \quad (2.14)$$

Uttrycket utvecklas med antagandet om att:

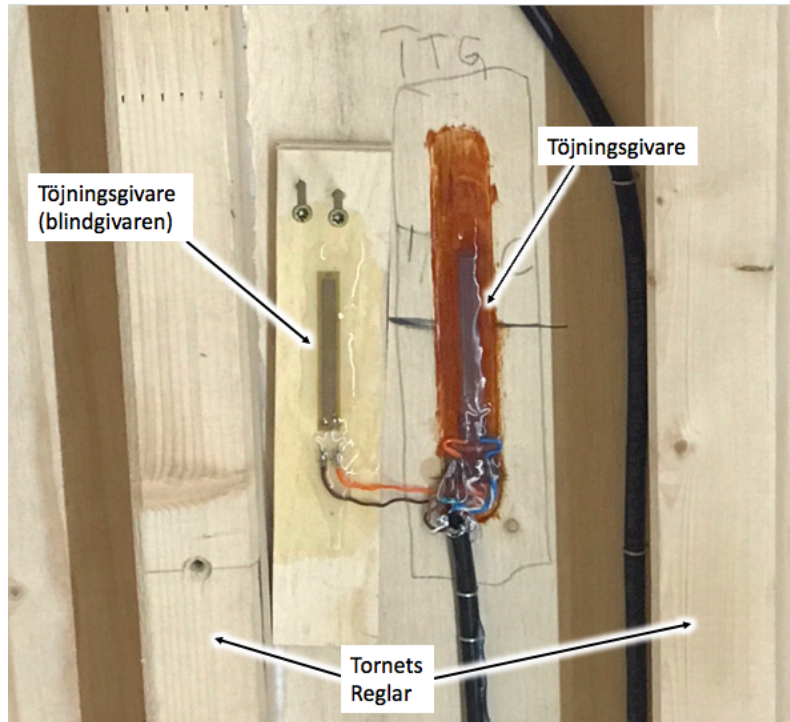
$$\frac{\Delta R_i}{R_i} \ll 1$$

Då fås följande ekvation, vilket är signalen som ges av sensorerna i trät:

$$\frac{U_d}{U} \approx \frac{\Delta R_2 - \Delta R_4}{4R} \quad (2.15)$$

Eftersom R_2 är den töjningsgivare som sitter direkt på trät kan förändringen beskrivas som:

$$\Delta R_2 = \Delta R_{2,töjning} + \Delta R_{2,temperatur} \quad (2.16)$$



Figur 2.6: Bild på en kvartsbrygga med blindgivare placerad i trätoronet. På bilden syns att en töjningsgivare är placerad direkt på trätoronet, placerad mellan två reglar. Den andra (blindgivaren) är placerad på en separat träbit där den inte utsätts för tornets förändringar när det belastas men samtidigt utsätts för samma temperatur.

Då R_4 är den töjningsgivaren som sitter på en separat träbit, och alltså inte utsätts för töjning från mekanisk belastning på tornet kan dess förändring beskrivas som:

$$\Delta R_4 = \Delta R_{4,temperatur}$$

Med tanke på att båda töjningsgivarna utsätts för samma temperatur fås:

$$\frac{U_d}{U} \approx \frac{\Delta R_{2,töjning} + \Delta R_{2,temperatur} - \Delta R_{4,temperatur}}{4R} \approx \frac{\Delta R_{2,töjning}}{4R} \quad (2.17)$$

Signalen från sensorerna i trätoronet kommer alltså beskriva hur resistansen ändras i töjningsgivaren när den töjs ut eller komprimeras. Genom att ta den teoretiska töjningen samtidigt som utsignalen från sensorn fås, kan en rätlinjig ekvation beräknas, vilken kan beskrivas på formen:

$$\varepsilon = k \cdot x + m$$

Där x är sensorsignalen och ε är den resulterande töjningen i tornet vid den signalen. Parametrarna k och m är de som skall bestämmas under arbetet för sensorerna i trätoronet.

2.4 Ashes

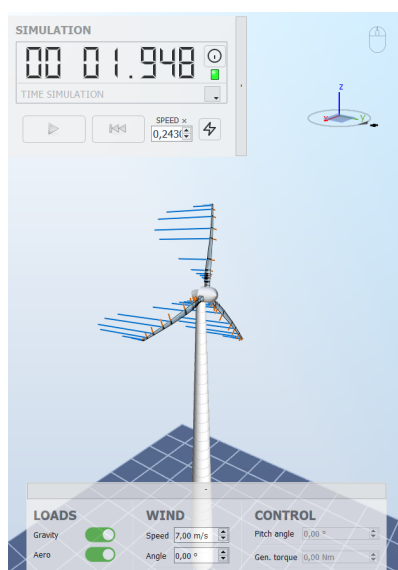
Ashes är en programvara som är utvecklad av företaget Simis AB. Syftet med programvaran är att kunna genomföra avancerade analyser av vindkraftverk under

olika vind- och driftförhållanden. Programvaran möjliggör att man kan anpassa sina olika parametrar för att se hur det påverkar vindkraftverkets egenskaper vid olika vindlaster. I en Ashesmodell ingår en tornkropp, ett maskinhus samt rotorblad som behöver modelleras. Man sätter även upp en modell för sitt regelsystem gällande vridning av maskinhus och bladvinkel för optimering av önskad elproduktion.

Till att börja med så byggs ett torn upp i Ashes. Detta görs i en textfil¹ där tornets olika parametrar bestäms, exempelvis materialegenskaper. Därefter kan man välja om man vill göra en ihålig eller solid struktur. För att bestämma tornets form så behöver tornet delas upp i ett valfritt antal element, där elementlängden och diametern bestäms av modelleraren. Elementen blir automatiskt cylindriska, så i fallet för Chalmers testvindkraftverk som är koniskt krävs det att elementen avtar i diameter med höjden. I textfilen anges även var på tornet man vill ha virtuella sensorer utplacerade, där varianterna *elementsensor*, mitt på ett element, och *nodsensor*, i änden av ett element, kan generera olika sorters data.

När textfilen sedan importeras i Ashes så genereras automatiskt ett torn. Därefter kan man i programvaran ändra storlek på parametrarna i maskinhuset och rotorhuset. Här sätts även villkor på frekvensregleringen, samt att rotorbladen importeras.

När modellen är konstruerad kan simuleringen köras, se figur 2.7. Då kan vindkraftverket simuleras i olika vind- och driftförhållanden. Ashes bidrar då med information om allt ifrån vilka laster som påverkar tornet, till vilken verkningsgrad tornet har gällande elproduktionen. Det går även att generera egenfrekvenser och egenmoder för vindkraftverket, vilket är av intresse för att se att vindkraftverket inte hamnar i resonans.



Figur 2.7: Skärmdump från en simulering i Ashes.

¹.txt-filformat

3

Metod & Genomförande

Följande kapitel har delats upp i två huvuddelar. I den första delen presenteras tillvägagångssättet för provdragningen, hur kalibreringen av sensorerna gick till samt genomförda analytiska beräkningar. Den andra delen behandlar de modelleringar och simuleringar som implementerades.

3.1 Provdragning av vindkraftverket

En provdragning av vindkraftverket genomfördes, vilket innebär att en lina fästs i toppen av tornet för att sedan dras i med en viss kraft. Syftet med provdragningen var att:

- kalibrera sensorer i stålfoten
- kalibrera sensorer i trätornet
- experimentellt bestämma utböjning
- experimentellt bestämma egenfrekvens.

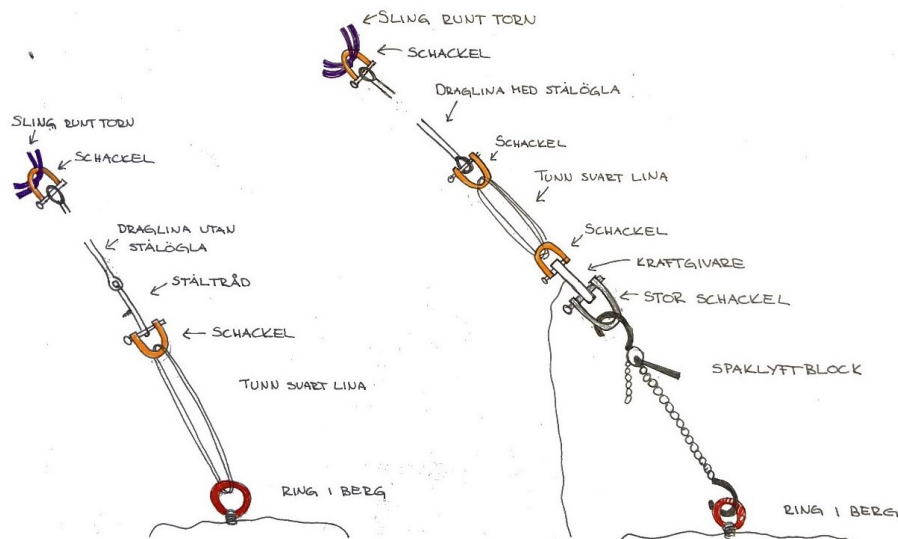
Provdragningen genomfördes torsdagen 8 april 2021, där provdragningar genomfördes i två riktningar. Vid tidigare provdragning hade två dragöglor borrats ned i berget, samma punkter användes vid denna provdragning [13]. Den ena punkten var placerad nordväst om tornet och den andra nordost om tornet. I dragöglan fästes ett spaklyftblock, ett block med kuggmekanism som används vid tyngre lyft och drag. Mellan spaklyftblock och draglina kopplades en kraftgivare och en tunnare lina som användes för att förspänna draglinan. Ett rundsling fästes runt toppen av tornet som sedan kopplades ihop med draglinan. De olika delarna kopplades samman med schacklar. En skiss av hur delarna kopplades ihop ses i figur 3.1.

Vid dragningarna spändes först draglinan upp till maximal last för att låta draglinan töja sig, därefter släpptes belastningen stegvis. Tabell 3.1 visar vilka belastningar som undersöktes. Första dragningen skedde från nordväst. Linan spändes tills att kraftgivaren visade 3000 kg¹. Efter första lastfallet släpptes belastningen på linan stegvis med 500 kg i taget. Vid varje lastfall pausades det en liten stund för att töjningarna i draglinan skulle stabiliseras. Två dragomgångar skedde från nordvästpunkten där utböjningen mättes på två olika höjder. På grund av sprickor i berget runt dragöglan i nordost användes lägre lastfall där max

¹Kraftgivarens display visade kraftens storlek i kilogram och inte i Newton.

3. Metod & Genomförande

var 1750 kg. Sedan släpptes belastningen på linan stegvis med 250 kg i taget. Tre dragomgångar skedde från nordostpunkten där utböjningen mättes på två olika höjder.



Figur 3.1: Övergripande skiss över hur monteringen av komponenterna såg ut vid provdragningen. Till vänster är monteringen för egensvängningstestet och till höger är monteringen för dragprovningen.

Tabell 3.1: Schema över de olika lastfallen under provdragningen.

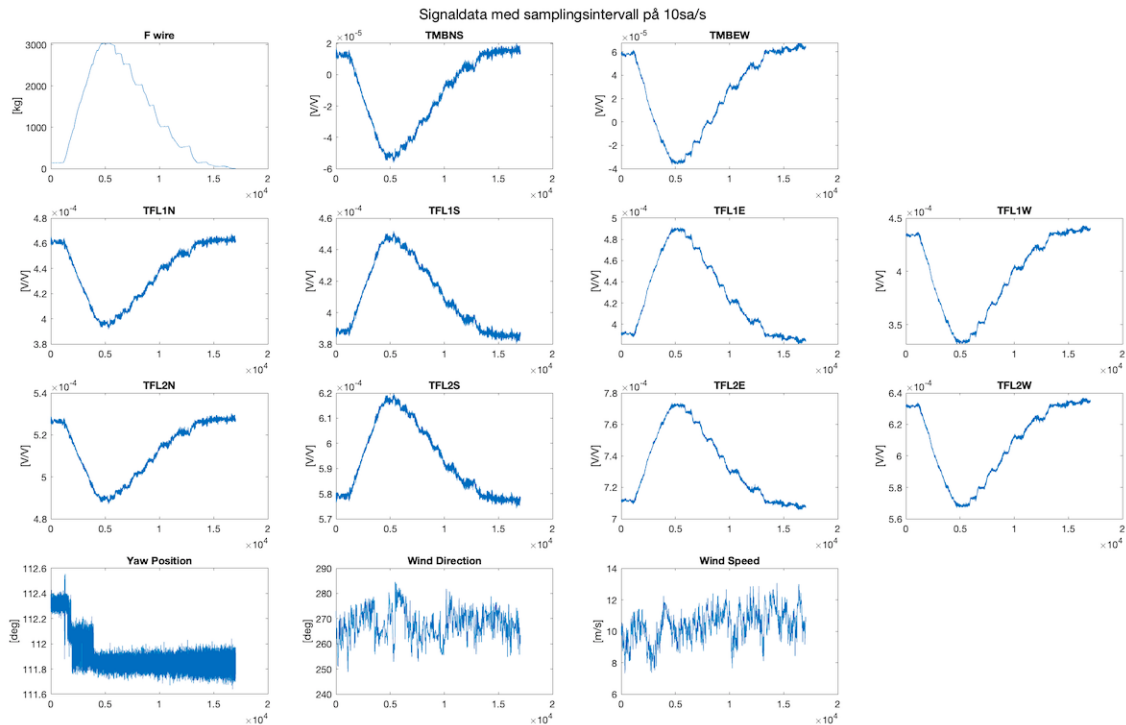
Dragkraft [kg] Nordväst	Dragkraft [kg] Nordost
3000	1750
2500	1500
2000	1250
1500	1000
1000	750
500	500

Väderprognosen inför provdragningen visade endast en lätt vind cirka 2 m/s. Det visade sig dock blåsa betydligt mer, cirka 9 m/s från väst, på morgonen när provdragningen skulle genomföras. Det var flertalet personer utöver kandidatgruppen involverade i genomförandet av provdragningen. Då det var problematiskt att sammanstråla dessa personer med kort varsel på en vindstilla dag bestämdes det att genomföra provdragningen trots vinden.

Från provdragningarna är det följande signaldata med ett samplingsintervall på 10 sa/s som analyserats:

- data från de två sensorerna i stålfoten [V/V]
- data från de åtta sensorerna i trätornet [V/V]
- kompassriktning för maskinhusets position [°]
- dragkraften omvandlad till elektrisk spänning [V]
- vindstyrka [m/s]
- vindriktning [°]

Ett exempel på hur de insamlade signalerna såg ut under en dragning från nordväst visas i figur 3.2. F_{wire} visar dragkraftens storlek. Sensorerna i trätornet betecknas TFL (Tower Force Level), index 1,2 visar vilken nivå i tornet sensorn är placerad och index N,E,S,W (North, East, South, West) visar i vilket väderstreck sensorn är placerad. Sensorerna i stålfoten betecknas TMB (Tower Moment Base), NS och EW visar vilka riktningar töjningsgivarna är placerade i.



Figur 3.2: Signalernas utdata vid en av provdragningarna. Att dragningen skedde från nordväst syns på graferna då spänningen i syd- och östsensornerna ökar vid ökad belastning medan de i nord och väst, vars töjningsgivare komprimeras, minskar.

3.1.1 Sensorernas placering i tornet

För att bestämma vilken kompassriktning sensorerna sitter i fastställdes först torndörrens position i förhållande till fundamentet. Med en lasermätare mättes avståndet till dörrens båda sidor från det nordvästra hörnet av fundamentet. Då skillnaden i avstånd endast var 2 mm fastställde det att dörren är placerad rakt

3. Metod & Genomförande

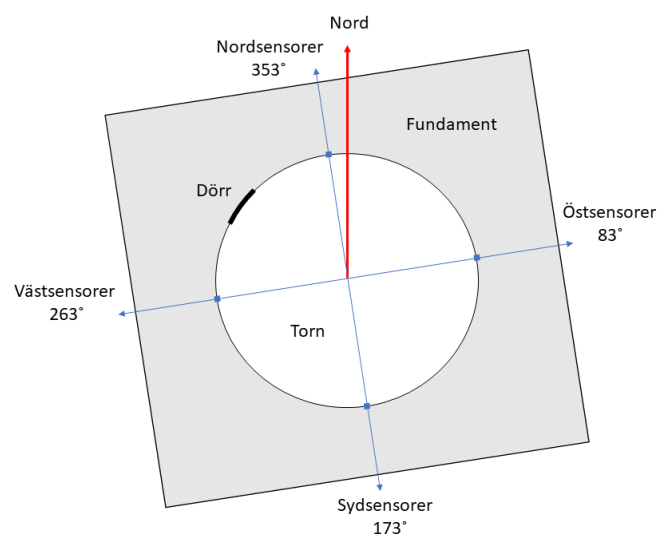
mot det hörnet. Vidare bestämdes fundamentalsidornas riktning med hjälp av en pejlkompass. Fundamentets alla sidor pejlades och det visade att fundamentet är vridet -7° i förhållande till de fyra huvudsakliga väderstrecken, vilket ger att dörren i tornet vetter i riktning 308° .

Inuti tornet löper 32 numrerade träreglar vilket innebär att det är $11,25^\circ$ mellan mittpunkten av två reglar. Efter mätningar på insidan visade det att dörren är placerad rakt nedanför reglarna med nummer 31 och 32, se figur 3.3.



Figur 3.3: Dörren i tornet med de numrerade träreglarna ovanför, här markerade med siffrorna 31 och 32.

Sensorerna är placerade på träornet mittemellan reglarna 2-3, 11-12, 19-20 samt 27-28 vilket innebär att sensorerna sitter 45° från dörren och med 90° mellanrum. Fundamentets vridning i förhållande till nord och sensorernas verkliga kompassriktningar visas i figur 3.4.



Figur 3.4: Sensorernas kompassriktning i förhållande till tornets centrum.

3.1.2 Kalibrering av sensorer

För kalibrering av sensorerna analyserades mätdata från ett flertal olika mätningar som åskådliggörs i tabell 3.2. Detta för att kunna jämföra olika kalibreringar med varandra och på så vis validera resultatet. Vridning av maskinhus innebär att maskinhuset roterar ett varv i horisontalplanet. Detta går att använda som datainsamling eftersom att maskinhusets tyngdpunkt ligger utanför tornets centrumlinje och således bidrar till ett böjande moment.

Tabell 3.2: De mätningar som analyserades vid kalibrering av sensorerna.

Typ av test	Datum	Genomsnittlig vindstyrka [m/s]	Genomsnittlig vindriktning
Provdragning utan maskinhus NV	26 maj 2020	-	-
Provdragning utan maskinhus NO	26 maj 2020	-	-
Provdragning från NV	8 april 2021	8,7	271°
Provdragning från NO	8 april 2021	10,2	264°
Vridning av maskinhus	16 april 2021	3,6	38°
Vridning av maskinhus	6 maj 2021	2,5	22°
Vridning av maskinhus	7 maj 2021	1,2	335 °

Från mätdata erhölls sensorernas utslag i [Volt/Volt] medan data från kraftgivarens utslag erhölls i enheten Volt [V]. Kraftgivarens utslag gjordes om till en dragkraft F_{wire} med enheten Newton [N] enligt ekvation (3.1) som har hämtats från en rapport från provdragningen som gjorts i maj 2020 [8].

$$F_{\text{wire}} = (u_{\text{measured}} \cdot 1238,5845 - 1266,7003)g \quad (3.1)$$

Då F_{wire} har komponenter i både horisontell och vertikal riktning förflyttades kraften längst sin verkningslinje, tills det att den angriper i tornets centrum. Detta gör att böjmomentet som den påverkar tornet med kan beräknas med endast den horisontella komponenten av F_{wire} , tillsammans med höjden på angripsspunkten. Detta åskådliggörs i figur 3.5 där vinkeln α representerar den dragvinkel som draglinan har mot horisontalplanet. Den extra höjden, h_{extra} beräknades enligt ekvation (3.2).

$$h_{\text{extra}} = r_{\text{ytter}}^{\text{topp}} \tan \alpha \quad (3.2)$$

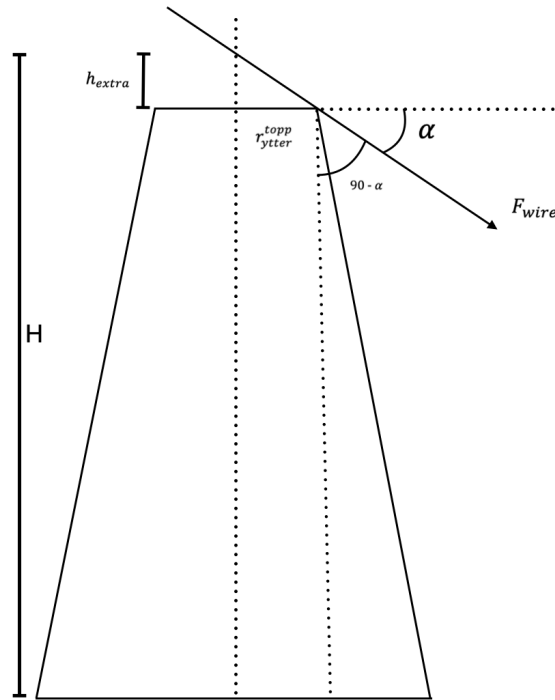
Vidare krävdes även en beräkning kring hur respektive sensor påverkades av kraften F_{wire} . Figur 3.6 visar tornet ovanifrån och de olika dragriktningarna. Eftersom att vinden på Björkö vanligtvis kommer från sydväst [18] valdes positivt böjmoment då tornet böjer åt nordost. Eftersom att sensorerna enbart påverkas av krafter i dess egen riktning kunde aktuellt moment som respektive sensor påverkas av från F_{wire} bestämmas enligt följande:

$$M_{F_{\text{wire}},NS} = F_{\text{wire}} \cdot \cos(\alpha) \cdot H \cdot \cos(\gamma + \theta) \quad (3.3)$$

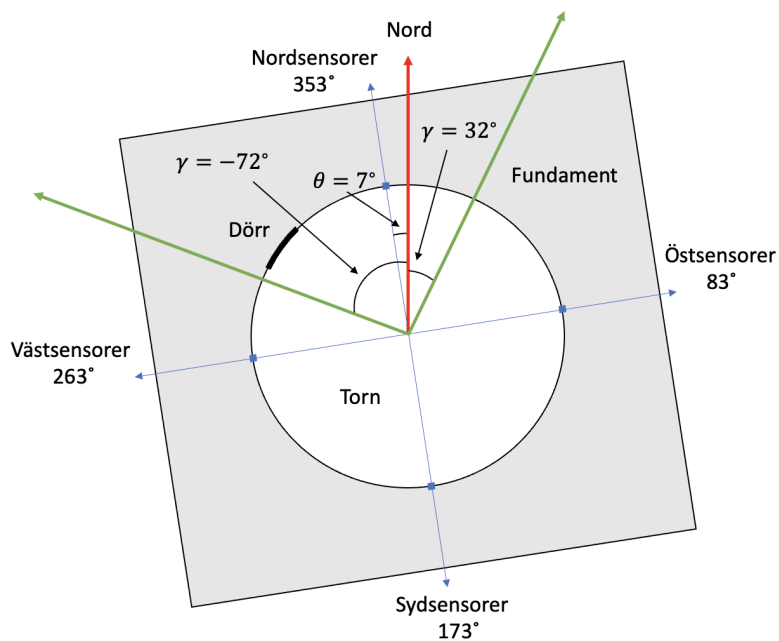
$$M_{F_{\text{wire}},EW} = F_{\text{wire}} \cdot \cos(\alpha) \cdot H \cdot \sin(\gamma + \theta) \quad (3.4)$$

där H representerades av den sträcka som betecknas H i figur 3.5, γ är den kompassriktningen man drar i, θ är differensen mellan sensor och väderstreck.

Vinklarna till dragpunkterna, γ , bestämdes genom att pejla riktningen mellan dragpunkt och mitten av tornet med en pejlkompas.



Figur 3.5: En extra höjd beräknades för att förflytta F_{wire} till centrum av tornet för att inte behöva ta hänsyn till det moment den vertikala komponenten av F_{wire} skulle bidra med.



Figur 3.6: Skiss över dragriktningarna vid provdragningen.

Tornet påverkas inte bara av momentet från F_{wire} utan också momentet som maskinhusets egentygnd bidrar till. Detta eftersom maskinhusets tyngdpunkt ligger 0,563 m från tornets centrumlinje i maskinhusets riktning [9]. Eftersom att kompassriktningen på maskinhuset ingår i den data som samlas in, kunde den vinkeln användas för att bestämma maskinhusets bidragande moment enligt ekvation (3.5).

$$M_{\text{maskinhus}} = m_{\text{maskinhus}} \cdot t_p \cdot g \quad (3.5)$$

där t_p representerar tyngdpunktens läge och $m_{\text{maskinhus}}$ är maskinhusets totala massa på 7606 kg [9]. Momentet från maskinhuset tillsammans med momentet från dragningen ger då ett resulterande moment i respektive riktning enligt

$$M_{NS} = M_{F_{\text{wire}},NS} + M_{\text{maskinhus}} \cdot \cos(YP + \theta) \quad (3.6)$$

$$M_{EW} = M_{F_{\text{wire}},EW} + M_{\text{maskinhus}} \cdot \sin(YP + \theta) \quad (3.7)$$

där YP står för *Yaw Position* och representerar maskinhusets riktning. Till ekvation (3.6) och (3.7) finns även ett okänt bidrag av varierande storlek på grund av vinden. Då riktningen på maskinhuset inte stämde helt överens med sensorernas placeringar beräknades ett medelvärde för fasförskjutningen mellan maskinhusets riktning och sensorernas placeringar. Genom att använda MATLAB-funktionen *Curve Fitting Tool* plottades sensorernas utslag, en åt gången, mot förändringen av maskinhusets riktning. Mätdata som användes var från vridningen av maskinhuset den 6 maj 2021, en dag med låg vindstyrka. Genom att göra en regression anpassades en ekvation i form av en fourierutveckling till vardera sensor, denna ekvation gavs på följande form

$$\bar{f}(x) = a_0 + a_1 \cos(wx) + b_1 \sin(wx) \quad (3.8)$$

där a_0 , a_1 , b_1 och w gavs från MATLAB. Till vardera konstant gavs ett intervall, vilket är anledningen till att ekvationen i (3.8) enbart representerar "medelekvationen" för vardera sensor. Denna ekvation skrevs sedan om på formen

$$\bar{f}(x) = a_0 + a \sin(wx + \varphi) \quad (3.9)$$

där φ är fasförskjutningen. Genom att göra detta för alla sensorer och sedan beräkna medelvärdet framgick fasförskjutningen till $\varphi = 9,15^\circ$. I de här graderna ingår fundamentets vridning på $\theta = 7^\circ$. Resterande grader beror på tolerans i kalibreringen av YP, alternativt att maskinhusets tyngdpunkt inte är placerad i dess centrumlinje. Detta påverkar ekvation (3.6) och (3.7), vilka nu istället ser ut som följande

$$M_{NS} = M_{F_{\text{wire}},NS} + M_{\text{maskinhus}} \cdot \cos(YP + \varphi) \quad (3.10)$$

$$M_{EW} = M_{F_{\text{wire}},EW} + M_{\text{maskinhus}} \cdot \sin(YP + \varphi) \quad (3.11)$$

3.1.2.1 Kalibrering av sensorer i stålfoten

Sensorernas signaler plottades i MATLAB på x-axeln och det resulterade momentet på y-axeln. Signalerna som krävdes för att räkna ut momentet var dragkraften samt maskinhusets riktning, YP. Med hjälp av MATLAB-verktyget "Basic Fitting" kunde en ekvation av en rät linje kalibreras. Olika räta linjer togs fram från olika mätningar. Bland annat togs linjära funktioner fram från provdragningen i maj 2020 (utan maskinhus på plats), provdragningen i april 2021 samt data från när maskinhuset roteras i horisontalplanet vid olika tillfällen med olika vindförhållanden. Dessa ekvationer jämfördes sedan med varandra och olika felkällor identifierades och analyserades. Efter en noga rimlighetsbedömning av de olika ekvationerna valdes vridningen av maskinhuset som genomfördes den 6 maj 2021 att kalibrera sensorerna efter. Resterande räta linjer användes sedan för att validera resultatet.

3.1.2.2 Kalibrering av sensorer i trätornet

Sensorerna som är placerade i trätornet är kvartsbryggor med blindgivare. För att kalibrera varje enskild sensor används töjning genom att först bestämma spänningen med hjälp av Naviers spänningsformel för böjnormalspänningar [14, s.97, ekv 4.23]

$$\sigma_h(h, r) = \frac{N(h)}{A(h)} + \frac{M_b(h)}{I(h)}r, \quad (3.12)$$

där h varierar med höjden på tornet från stålfoten och r beskriver avståndet från centrumlinjen i tvärsnittet. $N(h)$ är normalkraften, $A(h)$ är tvärsnittsarean, $M_b(h)$ är böjmomentet och $I(h)$ är yttröghetsmomentet som alla varierar med höjden. Töjningen i trät räknades därefter ut genom att forma om Hookes lag enligt

$$\varepsilon(h) = \frac{\sigma_h(h, r)}{E} \quad (3.13)$$

där ε är töjningen och E är elasticitetsmodulen för fanerträ [19]. Tvärsnittsarean beräknas genom

$$A(h) = \pi(r_y(h)^2 - r_i(h)^2), \quad (3.14)$$

där $r_y(h)$ och $r_i(h)$ är ytter- och innerradie i tornet. Areatröghetsmomentet för en ihålig cirkel beräknas genom [1, s.344]

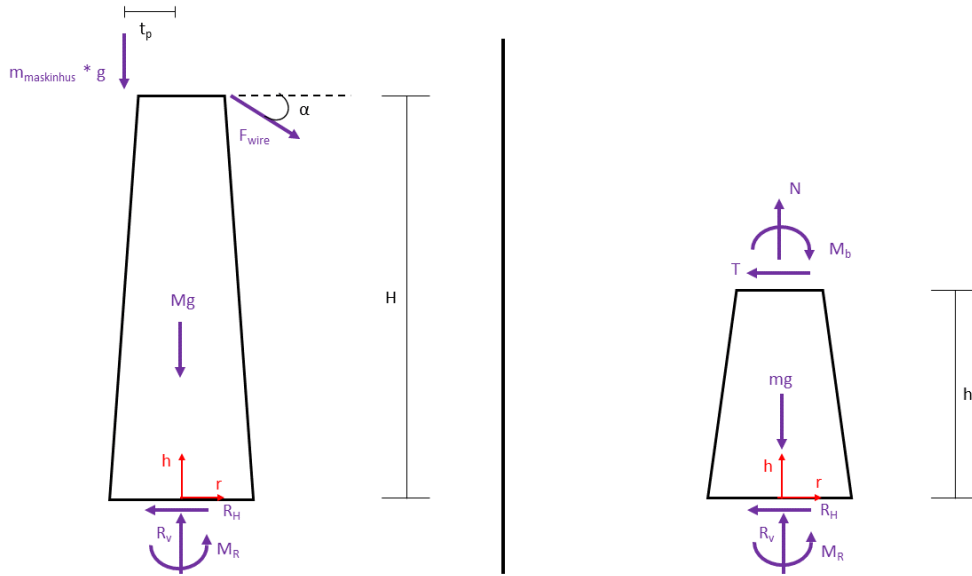
$$I(h) = \frac{\pi}{4} (r_y(h)^4 - r_i(h)^4) \quad (3.15)$$

Inner- och ytterradie beräknas med

$$r_y(h) = r_y(H) + \frac{H - h}{k} \quad (3.16)$$

$$r_i(h) = r_i(H) + \frac{H - h}{k} \quad (3.17)$$

där H är höjden av trätornet och k är lutningen på tornets sidor. För uppställning av normalkraften och böjmomentet frilades först tornet, se figur 3.7.



Figur 3.7: Friläggning av krafterna som påverkar tornet. Till vänster ses krafter som verkar på hela tornet. Till höger ses de krafter som verkar på ett snittat torn.

där $m_{\text{maskinhus}}$ är massan av maskinhuset och rotorblad med mera som verkar som en toppvikt på tornet, t_p är avståndet från tornets centrumlinje till toppvikts tyngdpunkt. F_{wire} är den kraft som draglinan påverkar tornet med vid dragning. R_H , R_v och M_R är stödreaktioner. Den utbredda last som verkar på tornet på grund av vinden togs inte med för att simplificera beräkningen. Utifrån den vänstra bilden av figur 3.7 bestämdes stödreaktionerna enligt

$$R_v = m_{\text{maskinhus}} g + Mg \quad (3.18)$$

$$R_H = F_{\text{wire}} \cos(\alpha) \quad (3.19)$$

$$M_R = -M_{\text{maskinhus}} + F_{\text{wire}} \cos(\alpha) H \quad (3.20)$$

Vidare sattes ekvationen för normalkraft upp med hjälp av det snittade tornet i figur 3.7 enligt

$$\begin{aligned} N(h) &= -R_v + m(h)g + F_{\text{wire}} \sin(\alpha) \\ &= -m_{\text{maskinhus}} g + (M - m(h))g + F_{\text{wire}} \sin(\alpha) \\ &= -m_{\text{maskinhus}} g + (m(H) - m(h))g + F_{\text{wire}} \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (3.21)$$

och ekvationen för böjmomentet som

$$M_b(h) = M_R - R_H h = -M_{\text{maskinhus}} + F_{\text{wire}} \cos(\alpha)(H - h) \quad (3.22)$$

vilket överensstämmer med de framräknade momenten i ekvation (3.6) och (3.7) om man anser att dragriktningen och maskinhusets position är motriktade. Massan av tornet bestämdes genom att beräkna volymen av en ihålig, stympad kon och multiplicera med densiteten för trä. Massan ges då av

$$m(h) = \frac{\pi h}{3} \left(r_y(0)^2 + r_y(0)r_y(h) + r_y(h)^2 - (r_i(0)^2 + r_i(0)r_i(h) + r_i(h)^2) \right) \rho \quad (3.23)$$

Böjmomenten som används för att kalibrera sensorerna i trätornet är de samma som i ekvation (3.6) och (3.7), det enda som skiljer dem åt är höjden för sensorernas placering och ekvationerna för böjmomenten ser nu ut enligt följande

$$M_{b,NS}(h) = F_{\text{wire}} \cos(\alpha) \cos(\gamma)(H - h_{\text{sensor}}) + M_{\text{maskinhus}} \cos(YP + \varphi) \quad (3.24)$$

$$M_{b,EW}(h) = F_{\text{wire}} \cos(\alpha) \sin(\gamma)(H - h_{\text{sensor}}) + M_{\text{maskinhus}} \sin(YP + \varphi) \quad (3.25)$$

där vardera höjd innebär

- H = total höjd av trädelen av tornet + extrahöjden h_{extra}
- h_{sensor} = höjd upp till sensorer från stolfoten, nivå 1 eller nivå 2

och alla vinklar innebär

- α = dragvinkel mellan linan och horisontalplanet
- γ = dragriktning angiven som kompassriktning där nord (N) är 0°
- φ = medelvärde av fasförskjutningen
- YP = Yaw position (maskinhusets riktning), angiven som kompassriktning

Därefter kunde den totala spänningen beräknas med hjälp av ekvation (3.12) och sedan omvandlas till töjning med hjälp av ekvation (3.13). Vid användning av Naviers spänningsformel för att bestämma töjningen används innerradien r_i , detta då sensorerna sitter på tornets insida. Töjningarna för vardera sensor plottades sedan mot sensorutslaget från varje dragning. Dessa plottar approximerades till räta linjer, där den linje som ansågs mest trovärdig användes för att kalibrera sensorerna. Då kan man vid ett givet sensorutslag få fram töjningen i respektive riktning i tornet.

För sensorerna i träkonstruktionen var det inte bara av intresse att studera töjningen, utan även här är böjmomentet relevant. För att mäta tornets böjmoment vid sensorerna behövde istället differensen av utslagen från två, mittemot varandra sittande, sensorer bestämmas. Som tidigare nämnts valdes positivt böjmoment då tornet böjer åt nordost och därför tas sensorsignalen från syd minus signalen från nord, respektive väst minus öst. Denna differens plottades sedan mot böjmomenten i ekvation (3.24) eller (3.25). På samma sätt som för töjningen approximerades sedan resultatet med en linjär ekvation på formen $M_b = kx + m$.

3.1.3 Bestämning av utböjning

Vid provdragningarna mättes utböjningen av tornet experimentellt. För att kontrollera att den uppmätta utböjningen var rimlig beräknades även den teoretiska utböjningen.

3.1.3.1 Experimentell bestämning av utböjning

För att mäta utböjningen av tornet vid olika lastfall användes en lasermätare. Lasermätaren fästes på ett stativ som placerades ett par meter bakom

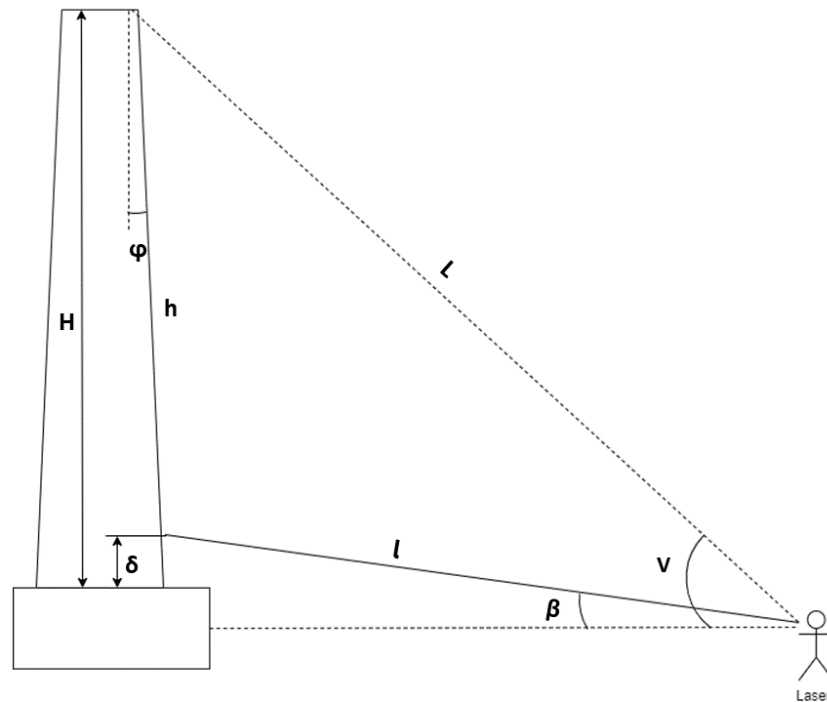
dragpunkten. Då det var svårt att se vart på tornet lasermätaren träffade, räknades det ut vilken vinkel lasermätaren skulle visa för att mätpunkten skulle träffa toppen, eller annan önskad höjd av tornet, vilket beskrivs senare hur det gick till.

Vid provdragningen mättes utböjningen vid två olika höjder vid varje dragpunkt. För att bestämma hur mycket tornet böjdes ut i horisontellt led användes

$$w = (L_{\text{lastfall}} - L_{\text{noll}}) \cos(v) \quad (3.26)$$

där w är utböjningen, L_{noll} är avståndet vilket användes som nollnivå. Det avståndet mättes precis innan draglinan sträcktes. På grund av vinden och tyngden från spaklyftblocket, visade då kraftgivaren en låg kraft och inte noll. L_{lastfall} beskriver det uppmätta avståndet vid de lastfall som ses i tabell 3.1 och v beskriver laservinkeln mellan lasern och horisontalplanet.

Ett MATLAB-program skrevs för att beräkna vilken vinkel lasermätaren skulle ha för att riktas mot korrekt höjd på vindkraftverket. Genom att rikta lasern mot botten av tornet kunde laserpunkten lokaliseras och en sträcka kunde manuellt mätas med måttstock från fundamentkanten till pricken. Figur 3.8 visar en schematisk skiss över denna mätning tillsammans med införda beteckningar.



Figur 3.8: Mätning för att finna vinkel till toppen.

Med hjälp av cosinus- och sinussatsen samt andra trigonometriska samband kunde laservinkeln v bestämmas enligt

$$v = \beta + \arcsin \frac{\sin(90 + \beta + \varphi)(h - \delta)}{L} \quad (3.27)$$

där

$$L = \sqrt{(h - \delta)^2 + l^2 - 2(h - \delta)l \cos(90 + \beta + \varphi)} \quad (3.28)$$

och

$$h = \frac{H}{\cos \varphi} \quad (3.29)$$

Vinkel φ och sträckan H togs från tornritningar [7] medan variablerna l , β och δ mättes upp på plats.

För att bestämma dragvinkeln α användes en liknande metod. Lasermätaren mätte avstånd och vinkeln från laser till den exakta fästpunkten i berget, därifrån utnyttjades kända storheter från figur 3.8 för att med olika trigonometriska samband bestämma dragvinkeln mellan linan och horisontalplanet.

3.1.3.2 Teoretisk bestämning av utböjning

För att beräkna hur mycket tornet skulle böja ut vid olika laster användes elastiska linjens differentialekvation:

$$\begin{aligned} M(h) &= -EI(h)w''(h) \\ \Rightarrow w''(h) &= -\frac{M(h)}{EI(h)} \end{aligned} \quad (3.30)$$

där M är böjmomentet, E är elasticitetsmodulen, I är tvärsnittets areatröghetsmoment och $w''(h)$ är utböjningens andraderivata. Ekvationen för momentet är densamma som i ekvation (3.22). Den nedre delen av tornet ansattes som fast inspänd vilket gav randvillkoren

$$\begin{aligned} w(0) &= 0 \\ w'(0) &= 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

Vidare löstes differentialekvationen med randvillkor i MATLAB för att smidigt kunna ta fram lösningen för olika höjder.

3.1.4 Bestämning av egenfrekvens

För att experimentellt bestämma egenfrekvensen kopplades först utrustningen om enligt vänster skiss i figur 3.1. De större, tyngre delarna togs bort och en ståltråd fästes mellan draglinan och en schackel. Den tunna svarta linan lindades tre varv mellan ringen och schackeln för att få en utväxling. Sedan drog fyra personer i den svarta linan för att få en liten utböjning, därefter klipptes ståltråden av för att

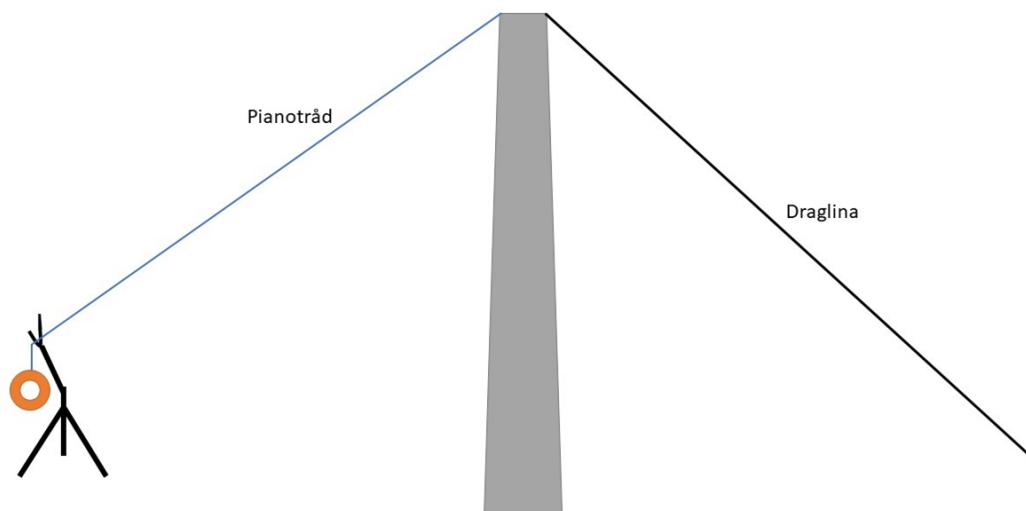
sätta tornet i svängning. Tre dragningar gjordes för att samla in signaldatan från svängningarna.

Den insamlade signaldatan för de tre dragningarna analyserades med FFT (Fast Fourier Transform) i MATLAB. FFT är en beräkningseffektiv metod för att beräkna den diskreta Fouriertransformen och används för att överföra en funktion från tidsplanet till frekvensplanet. Fouriertransformen för ett par olika signaler plottades med frekvensen på x-axeln och amplituden på y-axeln. Frekvensen erhöles genom att ta samplingshastigheten [sa/s] dividerat med det totala antalet mätpunkter.

3.1.5 Analog mätning av utböjning och egensvängning

Då mätningarna med lasern var ett visst osäkerhetsmoment planerades även att mäta utböjning och egenfrekvens med en analog metod. Planen var att fästa en pianotråd i toppen av tornet, i motsatt håll jämfört med dragriktningen. Pianotråden skulle ledas ned till ett stativ, genom en klyka där en fem kilogram tung vikt skulle hängas i änden, se figur 3.9. På stativet skulle en mätskala fästas, när tornet böjde ut skulle förflyttningen av vikten läsas av med hjälp av mätskalan. Vid test av egensvängningen skulle vikten filmas för att på så sätt kunna bestämma egenfrekvens.

Vid montering av pianotråden i torntoppen så uppstod ett så pass stort trassel att det inte gick att genomföra mätningarna som planerat.



Figur 3.9: Schematisk skiss över egensvängningstestet.

3.2 Modellering av vindkraftverket.

Nästa del i metodkapitlet handlar om de modeller av vindkraftverket som har satts upp. För det första har den utdelade Ashesmodellen modifierats för att bättre efterlikna verkligheten. Sedan har även en CAD-modell av tornet konstruerats i CATIA V5 för att kunna simulera tornet i programvaran Ansys. Resultatet från Ansys-simuleringen ska hjälpa till att validera resultaten från sensorkalibreringen samt bestämningen av tornets egenfrekvens.

3.2.1 Simuleringsmodell i Ashes

Ett av målen med arbetet var att uppdatera och modifiera den tornmodell som existerade i programvaran Ashes. Modellen framställdes av Simis AB, företaget som ligger bakom Ashes, i samråd med Sara Fogelström från SWPTC. För att kunna utveckla modellen behövde den analyseras så att förbättringspunkter kunde identifieras. Eftersom arbetet syftar till att analysera laster och påfrestningar i tornet gjordes inga analyser på rotorbladens uppbyggnad. Inte heller parametrarna som styr elproduktionen togs i beaktning då detta arbete behandlar mekaniska fenomen.

3.2.1.1 Analys av befintlig Ashes-modell

Den befintliga Ashes-modellen består av flertalet massiva, cylindriska element som på grund av successivt avtagande diameter antar formen av en stympad kon. Dock är inte vindkraftverket på Björkö massivt utan ihåligt. Detta var första förbättringspotentialen som identifierades. Sedan var även materialdatan tvivelaktig då elasticitetsmodulen var odefinierad. Istället för att ange elasticitetsmodulen var böjstyvheten, EI , definierad. Böjstyvheten är mer användbar än elasticitetsmodulen men ansågs ha tvivelaktiga värden, framförallt eftersom en del mått inte överensstämde med de tornritningar som existerar [7].

3.2.1.2 Modifierad tornmodell i Ashes

Den nya tornmodellen skapades i syfte att förbättra den föregående till att mer efterlikna verkligheten. Till en början skapades ett nytt material i Ashes som döptes till *Limträ LVL*. Materialegenskaperna är tagna från Moelven AB och Metsä Wood som bidrog med trätill vindkraftverket [15] [19]. Modellen gjordes även ihålig och med fler element än den förra. Detta eftersom Ashes endast möjliggör användandet av rent cylindriska element, vilket betyder att fler element med successivt minskande diameter ger ett mer koniskt utseende.

För att få ut lämplig data från Ashes-modellen gjordes två separata modeller. En modell gjordes med sådan elementstorlek att höjden på de verkliga sensorerna i tornet hamnade mitt på ett element och den andra gjordes så att den höjden hamnar på en elementnod. Detta eftersom noder och element ger olika sorters data ur Ashes, och eftersom att utslagen från sensorerna ska jämföras med Ashesmodellen gjordes två modeller för att kunna validera alla möjliga parametrar.

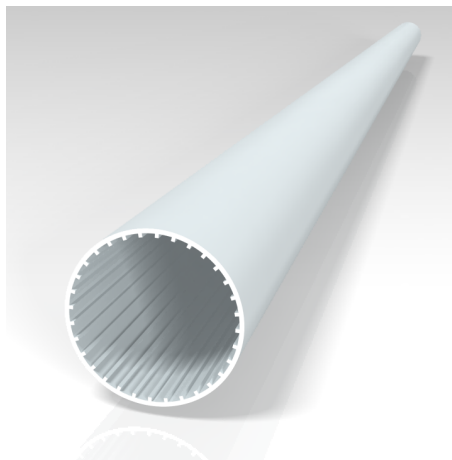
För att kunna få modellen att ha samma beteende som det verkliga vindkraftverket behövde parametrar justeras. Det som justerades var torntjockleken, detta för att försöka kompensera för de 32 regler som sitter på insidan av tornet [23]. Kalibreringen av tornet gjordes systematiskt för att framför allt generera den framtagna egenfrekvensen. Sedan jämfördes även utböjningar på olika höjder i tornet med resultatet från provdragningen för att validera modellen.

3.2.2 CAD-modellering i CATIA V5

Två CAD-modeller av trätornet, stålfoten samt toppadaptorn gjordes för att strukturella analyser skulle kunna genomföras. Programvaran som användes var CATIA V5. Modeller gjordes först som volymsmodeller, det vill säga med en tjocklek, se bilaga A. Även skalmodeller, det vill säga enbart ytor, skapades. Dessa gavs tjocklekar i senare steg vid analys i Ansys.

Vissa förenklingar gjordes av modellen, dels för att begränsad detaljrikedom fanns i de ritningar av delarna som delats ut, dels för att full komplexitet inte var ett krav för att simulera strukturen. Det är tre delar av tornet som modellerades separat för att kunna skilja dem åt. Ritningar tillhandahölls av Sara Fogelström, och de kom ursprungligen från Modvion. Kort beskrivning av de olika delarna följer.

Trätornet har modellerats som en struktur, alltså med antagandet att förbanden mellan sektioner och segment är ideala. Detta innebar smidigare modellering, men främst tillät det analys av tornet som en sammansatt del, och flera delar behövde inte kopplas samman mot varandras ytor. De regler som löper längs insidan av tornet modellerades för att hänsyn skulle tas till deras bidrag i böjstyvhet och massa, se figur 3.10. Det som inte finns i modellen av tornet är den steg som löper längs utsidan, men eftersom den inte bidrar till strukturens hållfasthet och har försumbar vikt exkluderades den från modellen.



Figur 3.10: CAD-modell av trädelen för tornet, där tornet visualiseras från botten upp mot toppen. Här syns också hur de 32 reglarna löper längs konstruktionen.

Stålfoten som kopplar samman tornet med betongfundamentet är den del där den enda skillnaden mellan volymsmodell och skalmodell finns. Volymsmodellen har dörröppningen som finns, medan skalmodellen har modellerats utan den. Detta tillät smidigare simuleringar, och stålfotens struktur var tillräckligt stark för att det inte skulle ge negativa effekter på simuleringarna. De flänsar som finns mellan stålfoten och infästningen behölls dock för att korrekt lastöverföring skulle gälla.

Adaptern i toppen som kopplar samman tornet med maskinhuset på vindkraftverket har modellerats med korrekta yttermått, men uppskattad insida då detta inte gavs tillgång till. Adapterns tyngd kompenserades således för vid simuleringar.

3.2.3 Strukturell analys i Ansys

Lastfallet från nordvästdragningen simulerades med programvaran Ansys för att ge töjning, utböjning samt egenfrekvens. Programmet är FEM-baserat, vilket står för finit elementmetod. Den strukturella analysen gjordes på de skalmodeller som tagits fram i CAD och resultaten jämfördes med resultat från analytiska beräkningar samt provdragningen av vindkraftverket.

3.2.3.1 Uppsättning av simuleringsmodell

Flera simuleringar av tornet gjordes i programvaran Ansys. Efter att skalmodellerna importerats definierades villkor för sammankoppling av de olika delarna så rätt kontakt gällde. Sedan lades vindkraftverkets infästning till, vilken antogs vara fixerad och innebar att betongfundamentet ansågs tillräckligt styvt att inte deformeras av de laster som simulerades. Material applicerades och tjocklekar angavs för de olika delarna av skalmodellen, för att ge rätt materialegenskaper men även rätt vikter. Ett eget material lades till för det limträ som tornet är byggt i, med materialdata för fanerträ av Metsä Wood, hämtat från hemsidan Svenskt Trä [19]. För stålfoten och toppadaptern användes strukturellt stål. Därefter lades punktmassor till, motsvarande hela maskinhuset inklusive blad och rotor. Tyngden placerades i den position där tyngdpunkten verkar, vilken angavs av utdelad data från Magnus Ellsén, forskningsingenjör på Chalmers [9].

Simuleringarna genomfördes som tidigare nämnt baserat på skalmodellering av tornet, på grund av den tunnväggiga strukturen som vindkraftverket har samt storleken på vindkraftverket. Användandet av skalmodell förklaras med att det behövs minst tre element över en strukturs tjocklek, i vissa fall ännu fler, för att ge pålitliga resultat. Skalmodellerna tillät alltså att färre element behövde skapas för strukturerna, vilket minskade komplexiteten och därmed hur beräkningskrävande simuleringarna var. Det gav även en korrekt styvhet, vilket var avgörande för att representativa värden skulle ges samt att resultaten från simuleringarna skulle kunna användas.

3.2.3.2 Användning av simuleringsmodell

För att få ut relevant data att använda för jämförelse genomfördes simuleringar i Ansys med ett lastfall motsvarande nordvästdragningen under provdragningen. Kraften från draglinan räknades om till vektorkomponenter, med hjälp av de tester som utförts för att bestämma vinklar för dragriktning, dragvinkel samt maskinhusets riktning vid provdragning. Dragkraften applicerades på toppadaptorns yta. Därmed gavs rätt kraft i rätt riktning, för att jämförelse med analytiska beräkningar skulle kunna utföras. Utöver dessa statiska simuleringar, utfördes även en modalanalys, det vill säga simulering för att hitta moder och frekvenser för egensvängningar, för att ge värden på egenfrekvenser i tornet.

Töjning och utböjning var intressant för att kunna jämföra med de tester som genomförts på det verkliga vindkraftverket och de analytiska beräkningarna. Dessa statiska simuleringar användes då som en jämförelse mot sensorkalibreringen till töjningsgivarna i trätornet, där värden lästes av punktvis i de punkter sensorer sitter i tornet. Egenfrekvenser simulerades för att jämföra mot det experiment som utfördes samt den modell som skapades i Ashes, för att undersöka de frekvenser som tornet kan sättas i självsvängning med. Modalanalysen utfördes alltså för att hitta de moderna som har störst sannolikhet att påverka tornet vid drift.

Ytterligare en aspekt som undersöktes med hjälp av Ansys var reglarnas påverkan av tornets styvhet och massfördelning i tornet. Detta undersöktes genom att simulera tornet utan reglarna i samma lastfall som med reglar.

4

Resultat

I följande kapitel redovisas de resultat som erhållits under arbetets gång. Kalibreringsekvationerna för sensorerna presenteras samt valideras för att förtydliga pålitligheten. Även experimentella resultat av töjning, utböjning och egenfrekvens redovisas och jämförs med framtagna värden från genomförda simuleringar och analytiska beräkningar.

4.1 Kalibrering av sensorer

För att kalibrera sensorerna användes en av alla mätningar att kalibrera efter. Sedan valideras det resultatet gentemot andra mätningar för att se ifall de överensstämmer. Den mätning som valdes för kalibrering var vridningen av maskinhuset som genomfördes den 6 maj 2021. Under den mätningen blåste det i genomsnitt 2,49 m/s från en kompassriktning på 22,05°. Resultatet från den mätningen validerades sedan mot mätningarna under provdragningen samt en annan vridning av maskinhuset den 7 maj 2021 och går att se i bilaga B.

4.1.1 Sensorer i trätornet

I tabell 4.1 anges ekvationerna för töjningen vid de olika sensorerna i trätornet. Beteckningen TFL i sensornamnen står för *Tower Force Level* och siffran visar vilken sensornivå i tornet som avses, det vill säga nivå 1 eller 2. Sista bokstaven i namnet anger vilket väderstreck sensorn sitter i, nord (N), syd (S), öst (E) eller väst (W). Storheten R^2 anger hur bra den linjära anpassningen är, där 1 betyder att samtliga punkter befinner sig på den rätta linjen.

Tabell 4.1: Töjningsekvationerna för sensorerna i trätornet.

Sensor	Höjd[m]	Kompassriktning[°]	Töjningsekvation $\varepsilon(x)$	R^2
TFL1N	8,146	353	$2,927 \cdot x - 1,446e-3$	0,9972
TFL1S	8,146	173	$2,923 \cdot x - 1,212e-3$	0,9974
TFL1E	8,146	83	$2,957 \cdot x - 1,163e-3$	0,9941
TFL1W	8,146	263	$2,963 \cdot x - 1,333e-3$	0,9976
TFL2N	11,146	353	$5,205 \cdot x - 2,972e-3$	0,9945
TFL2S	11,146	173	$4,580 \cdot x - 2,826e-3$	0,9948
TFL2E	11,146	83	$4,770 \cdot x - 3,574e-3$	0,9875
TFL2W	11,146	263	$4,778 \cdot x - 3,195e-3$	0,9953

I ekvationerna är ε den dimensionslösa töjningen och x är sensorsignalen angiven i [Volt/Volt].

I träkonstruktionen ansattes även ekvationer för böjmomentet. Här krävs det att två sensorsignaler från motstående sensorer subtraheras för att använda i momentekvationen. Denna signalbehandling innebär att kvartsbryggorna parvis kan tolkas som en virtuell helbrygga, liknande hur sensorerna i stålfoten är kopplade. Eftersom vinden på Björkö vanligtvis kommer ifrån sydväst [18] valdes att positivt moment innebär att tornet böjer åt nordost. I tabell 4.2 redovisas dessa ekvationer för böjmomentet.

Tabell 4.2: Momentekvationerna för sensorerna i trätornet när de tolkas som virtuella helbryggor.

Sensor	Höjd[m]	Momentekvation $M_b(x)$	R^2
TML1NS	8,146	$2,375e9 \cdot (x_{S1} - x_{N1}) + 1,894e5$	0,9977
TML1EW	8,146	$2,404e9 \cdot (x_{W1} - x_{E1}) - 1,363e5$	0,9965
TML2NS	11,146	$3,332e9 \cdot (x_{S2} - x_{N2}) - 1,500e5$	0,9972
TML2EW	11,146	$3,263e9 \cdot (x_{W2} - x_{E2}) + 2,630e5$	0,9938

Här står beteckningen TML i sensornamnet för *Tower Moment Level* och syftar till böjmomentet på en given sensorhöjd. Även här betecknar de två sista bokstäverna i namnet huruvida momentet är i nordsydlig eller östvästlig riktning. I ekvationen står M_b för det böjande momentet och x_{ij} är sensorsignalen för givaren i riktning i på respektive höjdnivå j .

4.1.2 Sensorer i stålfoten

För sensorerna i stålfoten beräknas momentekvationer. Då dessa sensorer är helbryggor anger de redan en skillnad mellan sensorerna i motstående kompassriktningar. Därför behöver ingen subtraktion utföras. I tabell 4.3 anges momentekvationerna för sensorerna i stålfoten. Här står TMB i sensornamnet för *Tower Moment Base* och de två sista bokstäverna anger återigen ifall momentet är i nordsydlig eller östvästlig riktning.

Tabell 4.3: Momentekvationerna för sensorerna i stålfoten.

Sensor	Höjd[m]	Momentekvation $M_b(x)$	R^2
TMBNS	0,533	$-6,884e9 \cdot x + 1,032e5$	0,9954
TMBEW	0,533	$6,842e9 \cdot x - 3,416e5$	0,9951

4.1.3 Validering av kalibreringsresultat

Genom att validera de framtagna ekvationerna för sensorerna mot mätdata från andra mätningar kunde tillförlitligheten för ekvationerna avgöras. För vardera sensor valdes ett sensorutslag ut, vilket sedan användes som indata i alla ekvationer från de olika mätningarna. Detta ger en uppfattning kring hur väl den framtagna ekvationen

överensstämmer med annan insamlad data. Sensorutslaget som valdes för vardera sensor hittas i kolumnen *Sensorutslag* i tabell 4.4 och 4.5. Det valda sensorutslaget baserades på det intervall som utslaget från vridningen av maskinhuset rörde sig inom.

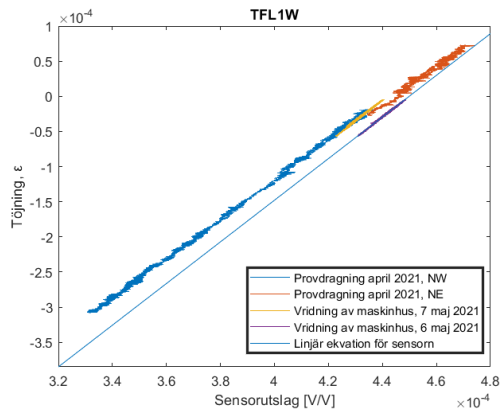
Tabell 4.4: Valideringstabell för sensorerna i trätornet vars ekvation mäter töjning.

Sensor	Sensorutslag (x)	Kalibrerings- ekvation $\varepsilon(x)$	Vridning 7 maj $\varepsilon(x)$	Provdragning NW $\varepsilon(x)$	Provdragning NE $\varepsilon(x)$
TFL1N	4,9e-4	-1,177e-5	-1,275e-5	3,110e-5	4,543e-5
TFL1S	4,05e-4	-2,819e-5	-3,340e-5	0,2100e-5	2,013e-5
TFL1E	3,8e-4	-3,934e-5	-5,952e-5	-6,934e-5	-5,650e-5
TFL1W	4,4e-4	-2,928e-5	-0,5760e-5	-0,5080e-5	-1,288e-5
TFL2N	5,7e-4	-0,5150e-5	0,3700e-5	13,24e-5	16,66e-5
TFL2S	6,1e-4	-3,220e-5	-3,672e-5	2,596e-5	9,305e-5
TFL2E	7,45e-4	-2,035e-5	-7,212e-5	11,54e-5	10,46e-5
TFL2W	6,65e-4	-1,763e-5	1,733e-5	11,38e-5	13,08e-5

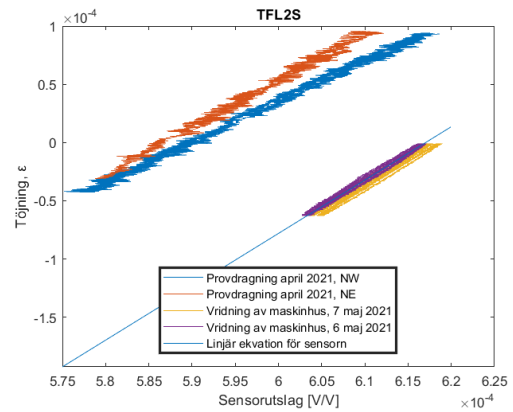
Tabell 4.5: Valideringstabell för sensorerna i trätornet och stålfoten vars ekvation mäter böjmoment.

Sensor	Sensorutslag (x)	Kalibrerings- ekvation $M_b(x)[Nm]$	Vridning 7 maj $M_b(x)[Nm]$	Provdragning NV $M_b(x)[Nm]$	Provdragning NO $M_b(x)[Nm]$
TML1NS	-6e-5	4,69e4	4,306e4	1,612e4	3,00e4
TML1EW	8e-5	5,60e4	9,198e4	10,02e4	7,844e4
TML2NS	6e-5	4,992e4	4,066e4	0,9540e4	1,978e4
TML2EW	-10e-5	-6,330e4	-0,390e4	-4,890e4	-5,130e4
TMBEW	6e-5	6,892e4	6,344e4	2,416e4	0,6580e4
TMBNS	1e-5	3,436e4	5,668e4	0,8790e4	3,266e4

De ekvationer från mätningarna som användes vid validering av kalibreringsresultatet plottades upp och finns redovisade i bilaga B. För att få en uppskattning över hur bra mätningarna överensstämmer med varandra kan man i figur 4.1 se två olika sensorer, där den ena har bättre överensstämmande data än den andra. Figuren visualiserar töjningen plottad mot mätdata för maskinhusvridningen den 7 maj, provdragningen den 8 april samt den fastställda ekvationen baserad på data från maskinhusvridningen den 6 maj.



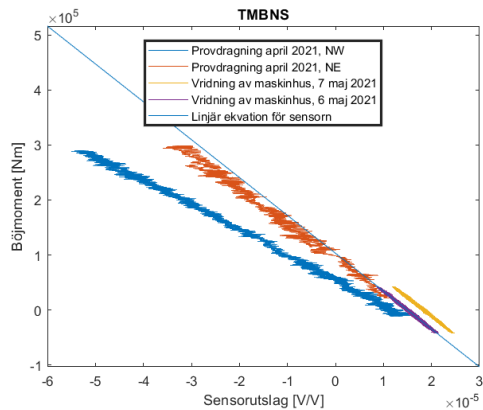
(a) TFL1W



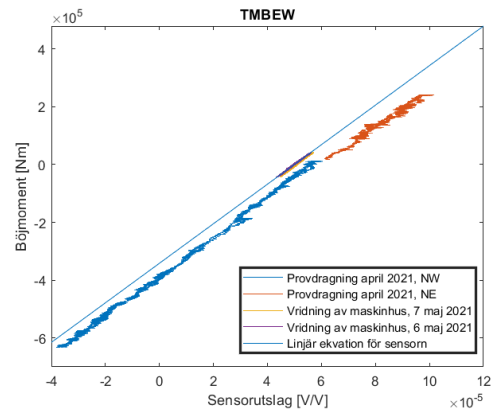
(b) TFL2S

Figur 4.1: Kalibreringsekvationen för två olika sensorer med avseende på töjning. Bilden åskådliggör variationen i hur väl ekvationen kunde bestämmas för olika sensorer.

Om man istället undersöker valideringen från samma mätningar med avseende på moment istället för töjning kan ett urval av resultatet ses i figur 4.2. I figuren visas hur väl momentet i stålfoten stämmer överens med varandra från olika mätningar. Generellt sätt kan man se i bilaga B att valideringen för momentekvationerna stämmer bättre överens med sina kalibreringsekvationer än vad töjningsekvationerna för kvartsbryggorna i trätornet gör.



(a) TMBNS



(b) TMBEW

Figur 4.2: Kalibreringsekvation för de båda helbryggorna i stålfoten.

4.2 Töjning av trätorn

Töjningen i trätornet presenteras då den är av vikt för validering av kalibreringen. Den strukturella analysen i Ansys använder sig av lasterna från provdragningen och töjningen beräknas under simuleringar på hela tornet. Eftersom simuleringarna används för att just validera kalibreringen plockas endast värden ut för särskilda töjningar och vid sensorernas positioner.

Värden i tabell 4.6 är givna som medelvärde mellan två elementnoder, då sensorernas positioner ligger mellan två noder, för alla sensorer. Observera att värden för töjning från Ansys ges som positiva och syftar där av enbart till töjningens amplitud, effektivtöjning. För att avgöra tecken behövs en bedömning av vilka sensorer som är i drag och vilka som är i tryck. För nordvästdragningen, vilken är den som är använd vid strukturanalysen, är nord- och västsensorer i tryck (negativ töjning), medan syd- och östsensorer är i drag (positiv töjning).

Tabellen innehåller töjningar för simuleringar med regler samt utan regler, för dragning från nordväst med en kraft motsvarande 2000 kg. I syfte för direkt jämförelse, är även motsvarande töjning från den valda sensorkalibreringen vid lastfallet angiven. Sensorutslagen sätts in i kalibreringsekvationerna så töjningen ges.

Tabell 4.6: Töjning vid trätornets sensorer vid nordvästdragning, från strukturanalys i Ansys samt enligt kalibreringsekvationen.

Sensor	Töjning ε (med regler)	Töjning ε (utan regler)	Töjning ε (enligt kalibreringsekvation)
TFL1N	-0,665e-4	-0,952e-4	-2,165e-4
TFL1S	0,626e-4	0,894e-4	0,340e-4
TFL1E	1,327e-4	1,899e-4	1,778e-4
TFL1W	-1,366e-4	-1,957e-4	-2,359e-4
TFL2N	-0,651e-4	-0,953e-4	-3,545e-4
TFL2S	0,633e-4	0,924e-4	-0,063e-4
TFL2E	1,325e-4	1,973e-4	0,003e-4
TFL2W	-1,385e-4	-2,033e-4	-3,683e-4

4.3 Utböjning av trätorn

I tabell 4.7 jämförs värdena av utböjningen från de analytiska beräkningarna med de erhållna värdena från provdragningen. Utböjningen är listad för ett höjdivtervall i vardera mätning eftersom den uppmätta dragvinkeln från provdragningen anses vara osäker. Då vinkeln lasermätaren angav varierade mellan två olika värden vid vardera mätning har dessa värden ansatts som ändpunkter i de intressanta intervallen. Nämnade höjder i tabell 4.7 motsvarar höjder för dessa ändpunkter.

Tabell 4.7: Tabell över utböjning [mm] av tornet vid olika belastningar från två olika väderstreck samt analytiska beräkningar.

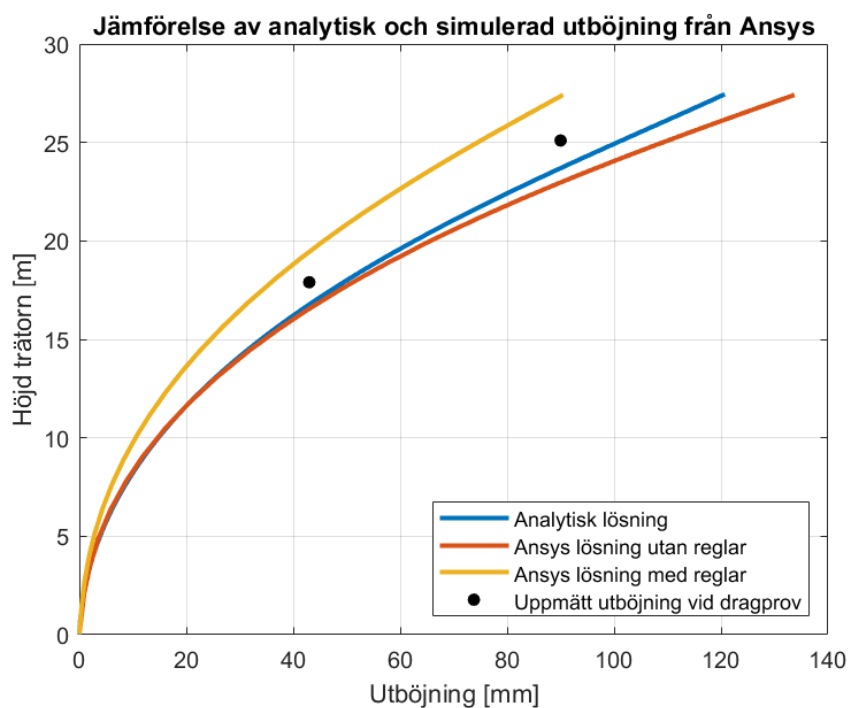
Dragkraft [kg]	Nordvästlig [mm] Mäthöjd: 25,7 - 27,1 m	Analytisk [mm] Mäthöjd: 25,7 - 27,1 m	Nordostlig [mm] Mäthöjd: 26,1 - 27,4 m	Analytisk [mm] Mäthöjd: 26,1 - 27,4 m
3000	90	102 - 114	Data saknas	105 - 115
2500	73	83 - 92	Data saknas	85 - 93
2000	61	64 - 70	Data saknas	65 - 71
1500	44	45 - 49	44	45 - 49
1000	23	25 - 27	27	26 - 27
500	15	6 - 5	12	6 - 5

I tabell 4.8 listas liknande utböjningar fast på en punkt längre ned på tornet för att få en uppfattning om formen tornet böjer ut med.

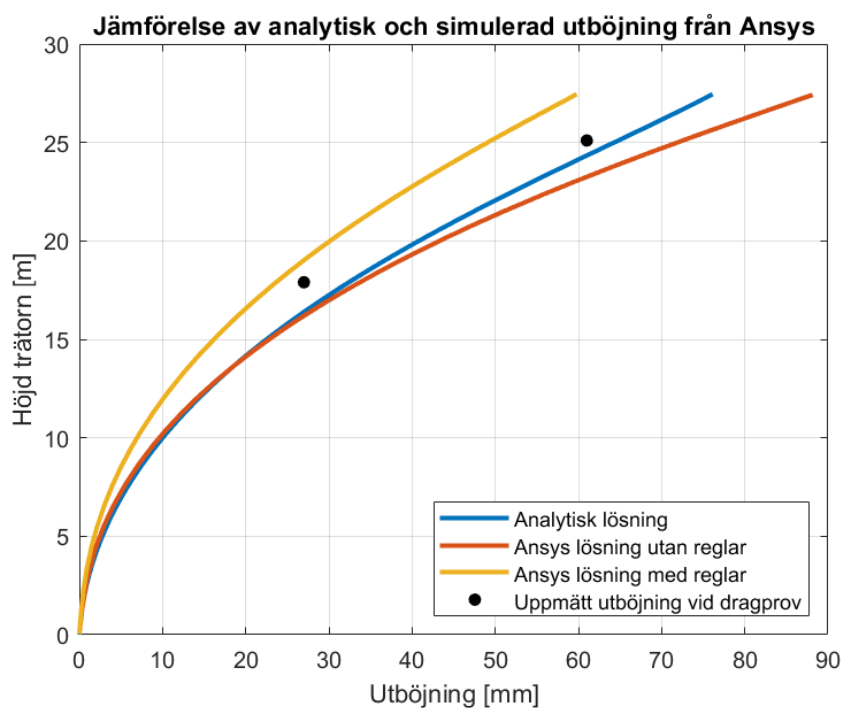
Tabell 4.8: Tabell över uppmätt utböjning [mm] av tornet vid olika belastningar vid ungefär 19 m höjd, samt analytiska beräkningar för samma höjd.

Dragkraft [kg]	Nordvästlig [mm] Mäthöjd: 18,6 - 19,8 m	Analytisk [mm] Mäthöjd: 18,6 - 19,8 m
3000	43	43 - 50
2500	36	35 - 41
2000	27	28 - 32
1500	19	20 - 23
1000	13	12 - 14
500	5	4

Utböjning som ges från simuleringar i Ansys används för att jämföra mot den uppmätta utböjningen under provdragning och analytiskt beräknad utböjning, men även för att få en uppskattning av reglarnas påverkan. En visuell bild av de olika utböjningar vid 3000 kg last ses i figur 4.3. I figur 4.4 visas olika utböjningar vid 2000 kg last.



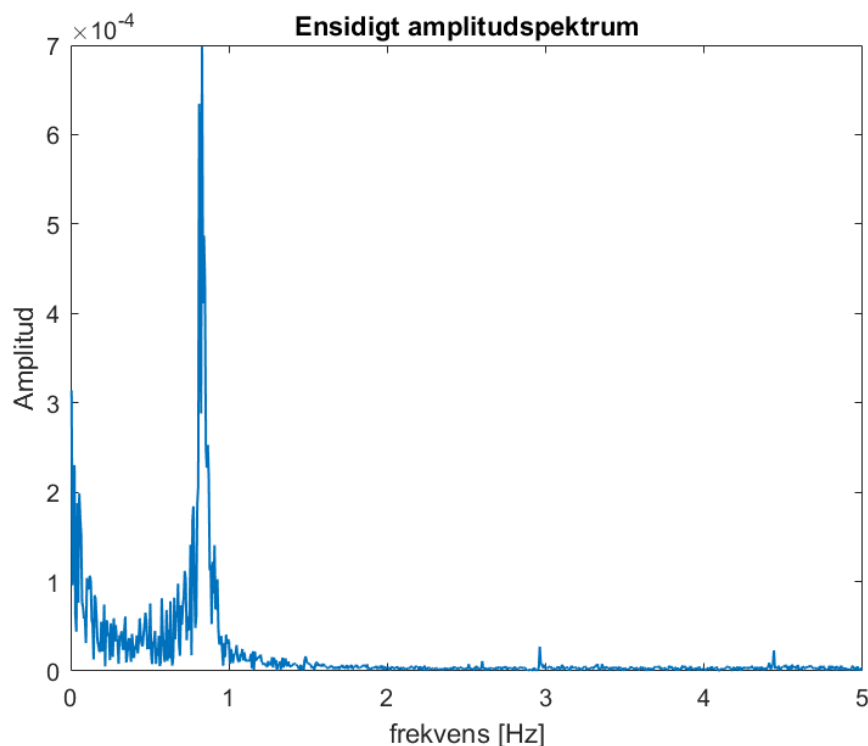
Figur 4.3: Jämförelse av analytisk, uppmätt och simulerad utböjning vid en dragkraft på 3000 kg.



Figur 4.4: Jämförelse av analytisk, uppmätt och simulerad utböjning vid en dragkraft på 2000 kg.

4.4 Beräkning av tornets egenfrekvens

I figur 4.5 visas ett exempel på hur det ensidiga amplitudspektrumet såg ut för en sensor vid ett av egensvängningstesten. Analys av signalerna från de andra sensorerna ger liknande amplitudspektrum. I figur 4.5 syns en tydlig topp vid 0,83 Hz. Det syns även två mindre toppar vid 2,7 Hz och 4,4 Hz. FFT av alla testen visar att egenfrekvensen ligger mellan 0,82-0,84 Hz.



Figur 4.5: FFT av sydsensorn på nivå 1 vid första egensvängningstestet.

Modalanalysen i Ansys ger värden på egenfrekvensen till 0,83 Hz. Även högre moder ges på tornet, och frekvenserna för dessa är 6,77 Hz, 16,08 Hz och 18,16 Hz. Därefter ges inga fler, då begränsning på antalet moder att simulera sattes. Det ges inga moder för bladens beteende då de inte är med som strukturer vid simuleringar i Ansys utan sammanställda i en punktmassa.

4.5 Simuleringsmodell i Ashes

Simuleringsmodellen i Ashes gjordes som en ihålig stympad kon. Den består av 30 st cirkulära element med successivt minskande radie. Alla variabelvärden på elektronikkomponenterna i maskinhuset och rotorhuset är de samma som i den utdelade modellen från SWPTC. Modellen modifierades för att efterlikna utböjningen och egenfrekvensen som beräknats. För att efterlikna de 32 regler som löper längs insidan på tornet ansattes en grövre tjocklek i botten av tornet än från ritningarna. Istället för att vara 63 mm som på ritningarna [7] ansattes den som 75

mm tjock. Därefter ökar den i tjocklek med höjden för att i toppen anta en tjocklek på 129 mm. Denna geometri resulterade till slut i en egenfrekvens på 0,81 Hz. Nästa mod som inte behandlar bladen hamnar på 6,68 Hz.

Två olika simuleringsmodeller togs fram, där skillnaden mellan dem är fördelningen av element i tornet. Den första modellen har små *element*, där mitten av elementet är på samma höjd som sensorerna. Detta medför att Ashes kan ge information om bland annat huvudspänningar och moment. Den andra modellen har en *elementnod* på samma höjd som sensorerna. Detta medför att information om bland annat nodförskjutningar kan genereras från Ashes.

5

Diskussion

I kapitlet diskuteras de resultat som tagits fram under arbetets gång samt felkällor och osäkerheter som uppmärksammats. De har uppmärksammats för att undersöka hur mycket de har påverkat resultatet och på vilket sätt. Även rekommendationer för framtida studier presenteras.

5.1 Genomförandet av provdragningen

Provdragningen genomfördes inte under optimala förhållanden då det blåste mer än förväntat samt att vindstyrkan tilltog under provdragningarna. Under provdragningens olika lastfall syntes en liten variation av den uppmätta kraften i draglinan, vilket troligtvis berodde på fluktuationer i vindstyrka. Variationen var dock såpass liten att den troligen inte påverkade utböjningen men däremot visar sig likt brus på sensorutslagen. Den ihållande vindstyrkan påverkar däremot kalibreringen av sensorerna och diskuteras vidare senare.

Något som uppmärksammades var att vid ändring av belastning gav kraftmätaren svårtolkade utslag. Dessa utslag syntes under både spänning och avlastning av draglinan. När linan spändes upp betraktades ett sjunkande värde, vilket rimligtvis förklaras av att linan har viskoelastiska egenskaper, med andra ord töjer linan sig när den belastas, men agerar även med viss seghet. Detta kompenseras med små justeringar av spaklyftblocket tills dess att kraften blev stabil. Vid avlastning av linan skedde det motsatta, att kraftgivarens utslag ökade när ett lägre lastfall hade nåtts. Detta förklaras också med att linan har viskoelastiska egenskaper. Då signalen från kraftgivaren samlas in kontinuerligt och jämförs med sensorsignalen från samma sampling borde inte detta fenomen påverka kalibreringen av sensorn.

Gradtalet som anger vilken vinkel lasermätaren mäter i anger bara hela grader och inte med decimaler. Då vinkeln varierade mellan två olika gradtal under mätningarna finns det en osäkerhet kring vilken höjd utböjningen mättes på. Lasermätaren användes även för att bestämma dragvinkeln α . Detta innebär att osäkerheter kring lasermätaren även påverkar dragvinkeln, vilket i sin tur påverkar de analytiskt beräknade töjningarna och böjmomenten i tornet.

5.1.1 Motsägande information från tidigare dragning

Under genomförandet av provdragningen antecknades flertalet viktiga vinklar, vilka användes för att beräkna dragvinkeln α , vinkeln i det vertikala planet mellan mark och draglina. Under efterarbetet upptäcktes däremot att resultatet från beräkningarna inte stämde överens med de dragvinklar som beräknats vid föregående provdragning [13]. Skillnaden visade sig vara huruvida höjdskillnaden mellan vindkraftsverkets fundament och dragpunkten togs i beaktning eller försumrades. Arbetet som fortsatte utgick därför från den dragvinkel som beräknades under kandidatarbetets utförda provdragning, eftersom den tog hänsyn till höjdskillnaden och därför ansågs mer exakt.

Vidare visade sig de tidigare angivna kompassriktningarna mellan torn och dragpunkter inte vara de samma som mättes upp under kandidatarbetet [13]. Tidigare angivna kompassriktningar var 38° för dragpunkten i nordost och 310° för dragpunkten i nordväst. De nya som mättes upp och användes under kandidatarbetet var 32° för dragpunkten i nordost och 288° för dragpunkten i nordväst. Detta insågs sent i arbetet och vid användningen av de nya vinklarna påverkades resultatet för både töjningen och momentet. Eftersom gruppens vinklar ansågs vara noggrant uppmätta togs beslutet att ändra till de nya vinklarna.

5.2 Reglarnas påverkan

Det som går att tyda från figur 4.3 och figur 4.4, utböjningsjämförelserna mellan olika tester, är att den analytiska utböjningen stämmer väl överens med den utböjning som simulerades utan regler. Det syns även att utböjningen som simulerats med regler är mindre, vilket tyder på att reglarna gör konstruktionen styvare. Detta stärks även av tabell 4.6, jämförelsen av töjning med och utan regler i Ansys, där det syns att töjningen påverkas av reglarna. I figur 4.3 syns även att den uppmätta utböjningen från dragprovet är något större än den simulerade utböjningen med regler. Det kan förklaras av att reglarnas materialdata uppskattades till att vara samma som resten av trätornet och att böjstyvheten inte med säkerhet stämmer.

5.3 Sensorkalibrering

Kalibreringen av sensorerna visade sig vara mer utmanande och tidskrävande än vad både kandidatgruppen och handledaren trodde från början. Flertalet yttre faktorer och osäkerheter påverkar tillförlitligheten på de framtagna ekvationerna. I följande delavsnitt diskuteras dessa faktorer djupare kring hur stor påverkan de har på resultatet, samt vad som hade kunnat göras för att undvika problemen.

5.3.1 Väderförhållanden vid mätningar

Som tidigare nämnts var vindförhållandena inte optimala under provdragningen av tornet. Eftersom vinden inte togs med i beräkningarna kommer den verkliga

belastningen av tornet inte överensstämmer med den analytiskt framtagna belastningen. Anledningen till att vinden inte räknades med var för att det är väldigt komplext och svårt att optimera till en funktion.

En ytterligare faktor som framgick i slutet av arbetet var att starkt solljus eventuellt kan påverka sensorernas utslag. Detta är något som inte borde ske då alla sensorer kompenserar för temperaturskillnader i materialet. Detta uppdagades på grund av skillnader på sensorutslag vid vridning av maskinhuset den 6 respektive 7 maj 2021. Dessa mätningar skedde i liknande vindförhållanden, men i olika solförhållanden, vilket resulterade i olika sensorutslag. En potentiell orsak till detta skulle kunna vara att blindgivaren i kvartsbryggorna är placerad på en träbit på tornets insida, och inte direkt på trät. Det innebär att temperaturkompensationen kan påverkas då temperaturen skulle kunna skilja sig eftersom det rör sig om två olika ytor. Då detta uppdagades sent i arbetet valdes det att inte ta hänsyn till detta vid kalibrering av ekvationerna.

5.3.2 Analytiskt bestämda töjningar och böjmoment

För att ta reda på hur tornet belastades krävdes noggrann uppfattning kring vilken riktning lasten kom från och hur stor den var. Det var viktigt eftersom kalibreringen kräver information om hur tornet påverkas vid exakt den punkten som sensorerna mäter töjning i. Således är också sensorernas placering i förhållande till de verkliga kompassriktningarna en viktig faktor vid framtagningen av ekvationerna för sensorerna. Genom att undersöka fasförskjutningen mellan sensorernas utslag och maskinhusets riktning erhöles en vinkel, som visade sig skilja 2° jämfört med den uppmätta kompassriktningen på fundamentet. Vad skillnaden kan bero på har diskuterats, och en förklaring kan vara att maskinhuset inte är helt symmetriskt, vilket skulle innebära att tyngdpunkten är förskjuten från maskinhusets riktning som används för att få fram fasförskjutningen.

Momentet som tornet utsätts för påverkas av flera olika faktorer. Vilken kompassvinkel man drar från, dragvinkel och kraftgivarens mätnoggrannhet innehåller alla en oklarhet som skulle kunna påverka det moment som tornet beräknades utsättas för under dragningen. Vidare är maskinhusets bidragande moment beroende av att massan och tyngdpunkten som angivits stämmer. Även vinden skulle påverka detta moment. Då alla dessa faktorer påverkar de slutgiltiga ekvationerna för sensorerna har mycket arbete fokuserat på att säkerställa att de är korrekta, men en viss oklarhet går inte att undvika.

För att kalibrera ekvationerna i trätornet beräknades töjningen. Vid denna uträkning togs inte reglarna i tornet i beaktning. Som resultaten visar var reglarnas påverkan på töjningen större än vad som först antogs. Det innebär att den töjning som använts för att kalibrera sensorerna har haft ett större värde än vad den rimligtvis har i verkligheten. Det får följden att töjningsekvationerna för sensorerna i trätornet har en lite lägre trovärdighet.

5.3.3 Kalibrering och validering av sensorerna

För att bestämma ekvationen för varje sensor valdes en mätning för kalibrering och resterande mätningar användes för validering av resultatet. Mycket tid lades på att finna en tillräckligt bra mätning att kalibrera efter då de flesta mätningar ansågs ha flera felkällor som skulle påverka resultatet. I jakten på den ultimata mätningen försvann tiden och valideringsprocessen blev således kortare än nödvändigt. Mycket tid lades på att kompensera för felkällor, flera vinklar som varit oklara fastställdes och även fasförskjutningen mellan sensorer och maskinhusets riktning bestämdes. Men exakt hur solljuset, vinden och reglarna påverkar sensorernas utslag kunde inte fastställas. Detta innebär att de framtagna sensorekvationerna kräver viss vidare bearbetning innan de kan användas för fortsatt forskning av testvindkraftverket. En analys man dock kan dra är att momentekvationerna generellt sätt ger bättre valideringsresultat än vad töjningsekvationerna gör. Detta kan till stor del bero på att töjningen påverkas mer av osäkerheter i geometrin gällande reglarnas påverkan och elasticitetsmodulen för trä.

Mätningarna som användes för validering var maskinhusvridningen från 7 maj 2021 och två mätningar från provdragningen den 8 april 2021. I bilaga B finns plottar på alla sensorutslag för dessa mätningar tillsammans med mätningen från 6 maj 2021. Graferna för de två maskinhusvridningarna ligger intill varandra för alla sensorer i trätornet i nord och syd, medan de skiljer sig åt för sensorerna i väst och öst. Skillnaden i medelvindstyrka mellan de två mätningarna var endast 1,3 m/s men riktningarna skilde sig åt, nordost ena dagen och nordväst andra. Detta kan förklara att graferna ligger ihop för nord och syd då de kände av en nordlig kraft under båda mätningarna. Gällande väst- och östsensorerna påverkades de av krafter från olika håll vilket kan förklara varför de graferna skiljer sig åt. Detta visar på att även en liten vind kan ge stora skillnader vid kalibrering. En annan förklaring kan vara att det var mulet den 6 maj och soligt den 7 maj och som tidigare nämnt verkar även temperaturen ge vissa skillnader. Vindens påverkan förklarar även varför graferna för provdragningarna är förskjutna då det blåste cirka 9 m/s vid det tillfället. Vidare visar graferna att k-värdet för den linjära kalibreringsekvationen och k-värdet för dragningen från nordost stämmer bra överens, medan k-värdet för dragningen i nordväst skiljer sig. Detta tyder på att det är någon parameter vid dessa beräkningar som kan vara fel.

5.4 Den uppdaterade Ashesmodellen

Efter mycket bearbetning och modifiering kunde en tornmodell i programvaran Ashes sättas upp. I och med de begränsningar som programmet har så kunde inte de 32 reglarna som är på insidan av tornet läggas till i modellen och därför fick vissa friheter tas med tornets proportioner för att efterlikna de resultat som registrerats efter provdragningen. Detta gjordes genom att göra hela konstruktionen gradvis grövre. Till en början försökte detta genomföras genom att addera volymen av reglarna på olika nivåer till tornets tjocklek. Detta gjordes utan framgång, istället fick systematisk testning av olika värden generera ett resultat.

5.4.1 Skillnad mellan modell och verklighet

Efter en stor del experimenterande kunde tornmodellen konstrueras och efterlikna resultaten från provdragningen med liten felmarginal. Dock på bekostnad av att tjockleken för tornväggarna inte överensstämmer med verkligheten. Detta gör att modellen begränsas till att enbart efterlikna egensvängning och utböjning av tornet om man ser till mekaniska och dynamiska egenskaper. Annan data ifrån modellen kommer vara felaktig, såsom deformationslängd och töjningar i materialet. Modellen är dock fortfarande användbar gällande analys kring elproduktion och frekvensreglering, vilket är det huvudsakliga användningsområdet för vidare forskning.

Andra skillnader mellan modell och verklighet är att modellen inte är helt konisk utan består av 30 cirkulära element. Då den består av fler element än den tidigare versionen av modellen anses den vara mer konisk nu. Modellen har inte heller med andra detaljer så som servicedörren på sidan och stegen på insidan. Dessa kommer påverka modellens egenskaper, men troligtvis inte såpass mycket att det behöver tas i beaktning.

5.4.2 Osäkerheter kring pålitlighet

Programvaran Ashes är utvecklad för att vara en vindkraftssimulator som snabbt ska kunna testa vindturbinmodeller i form av inställningar för elproduktionen. Ashes är inte primärt avsett för att studera mekaniska och dynamiska egenskaper, vilket har försvårat processen i att uppdatera tornmodellen. Detta bidrog till att en del friheter togs i modellerandet av tornkroppen för att få jämförbara resultat med provdragningen. Detta påverkar övrig data som kan produceras av Ashes och gör data såsom töjningar opålitlig.

5.5 Rekommendationer för framtida studier

Under arbetets gång framkom det att väderförhållandena var en viktigare aspekt än vad som antagits vid arbetets start. Genom att studera vindens påverkan grundligare samt undersöka vilken inverkan den har på tornet och rotorblad skulle både analytiskt beräknade töjningar och böjmoment förändras. Utöver vinden är även solljuset på tornet en yttre faktor som kan påverka tornets uppträdande. Således är en rekommendation att mäta om det uppstår temperaturskillnader på trätornet jämfört med träbiten som blindgivaren är monterad på. Det är även av intresse att mäta om temperaturen på in- och utsida av tornet skiljer sig åt då även detta kan påverka sensorsignalerna.

Som tidigare nämnts togs inte reglarna i tornet i beaktning när ekvationerna för att beräkna töjning ställdes upp. Analys av utböjningen visar att reglarna har så pass stor inverkan att de behöver tas med i beräkningen av töjningen. Vidare undersökning av reglarnas påverkan av böjstyvheten behöver undersökas för att förbättra töjningsekvationerna.

Det rekommenderas även att genomföra en ny provdragning med bättre väderförhållanden. Optimala förhållanden hade varit en vindstilla mulen dag, med prioritet på låg vindstyrka då den visat sig påverka mycket. Nuvarande kalibreringsekvationer är framtagna utifrån en maskinhusvridning, på grund av stark vind vid provdragningen, men då det finns viss oklarhet angående tyngdpunktens placering hade det troligen gett säkrare resultat att kalibrera efter en provdragning vid optimala förhållanden.

6

Slutsatser

Ett av målen med projektet var att framställa kalibreringsekvationer för sensorerna i stålfoten och trätornet för att kunna mäta vilka belastningar tornet utsätts för. Efter att mätdata från flertalet olika mätningar analyserats framkom det många faktorer som påverkade resultaten. Mycket arbete lades på att minimera dessa felkällor, genom att exempelvis kontrollmäta vinklar och kalibrera sensorernas placering i förhållande till de verkliga kompassriktningarna. För att fastställa exakta ekvationer skulle fortsatt arbete behöva fokuseras på att beräkna hur vind och temperatur kan kompenseras bort.

De förenklingar som gjorts i de analytiska beräkningarna innebär att det finns förbättringspotential för töjningsekvationerna. Slutsatsen är att de ekvationer som beskriver böjande moment generellt sett ger ett bättre resultat än ekvationerna för töjning på grund av förenklingen i de analytiska beräkningarna. I övrigt har båda formerna av ekvationer samma felkällor i form av vind och temperatur som tidigare nämnts. Genom fortsatt arbete med redan nyttjade metoder i kombination med de rekommendationer som givits för framtida studier anses ekvationerna vara på god väg att kunna beskriva tornets belastning.

Vidare var ett mål att fastställa egenfrekvensen för vindkraftverket då det fanns motsägande data sedan tidigare. Då både den simulerade egenfrekvensen från Ansys och egenfrekvensen som uppmättes och analyserades med FFT från provdragningen visar på samma resultat, kan slutsatsen dras att egenfrekvensen är 0,83 Hz.

Den experimentellt bestämda utböjningen visade sig vara ungefär 85% av den analytiska. Utböjningarna är i samma storleksordning och skillnaden tros bero på den extra styvheten som reglarna i tornet tillför, vilka bortsågs från vid den analytiska lösningen. Reglarna påverkade således styvheten mer än vad som antogs.

Det sista målet med arbetet var att modifiera tornmodellen i programvaran Ashes. Den uppdaterade modellen innehåller geometriförändringar som mer överensstämmer med verkligheten än tidigare. Den är även kalibrerad för att ha rätt egenfrekvens. Det är dock inga stora skillnader som gjorts och det är således svårt att avgöra huruvida resultatet är en förbättring eller ej.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att resultat har nåtts på alla målen, dock

med varierande kvalitet. För kalibreringen av töjningssensorerna finns fortfarande vissa tvivelaktigheter som bidrar till opålitlighet hos de framtagna ekvationerna. Däremot är momentekvationerna bättre kalibrerade och mer användbara. Förhoppningen är ändå att metodiken och tankegången genom arbetet ska kunna utnyttjas i framtiden för att ta fram ännu mer pålitliga ekvationer.

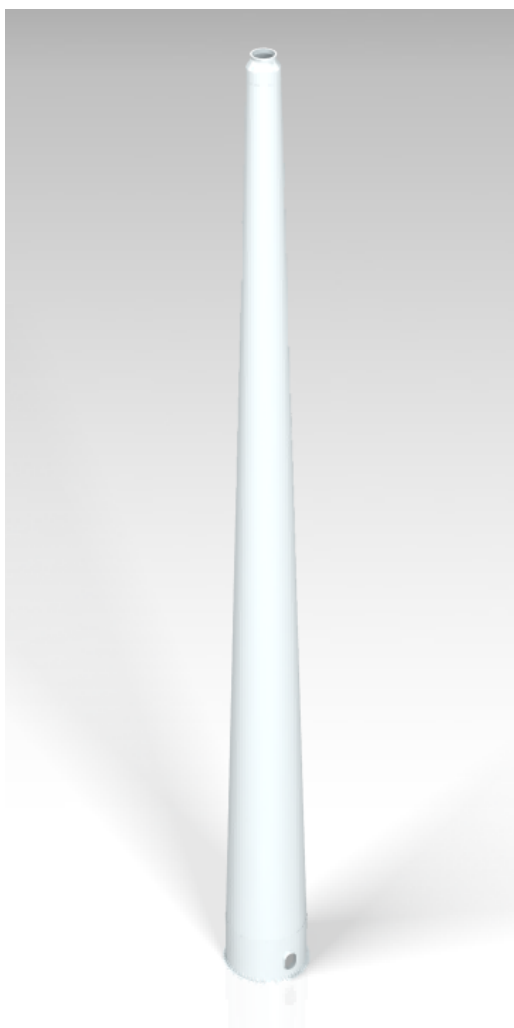
Referenser

- [1] B. Alfredsson, utg. *Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära*. Stockholm, Sverige: Instant Book AB, 2014. Kap. Tvärsnitt, s. 344.
- [2] Ashes. *What is Ashes?* 2020. URL: https://www.simis.io/#Products_Ashes_Features (hämtad 2021-02-06).
- [3] J. Brouzoulis. *Böjnormalspänningar — Naviers formel*. 2021. URL: <https://demechanica.com/sv/hallfasthetslara/kapitel/balken/bojnormalspanningar-naviers-formel/> (hämtad 2021-05-13).
- [4] Chalmers. *Ett forskningscentrum för konstruktion av vindkraftverk*. 22 jan. 2019. URL: <https://www.chalmers.se/sv/centrum/SWPTC/om-oss/Sidor/default.aspx> (hämtad 2021-03-28).
- [5] Chalmers Ventures. *Det första vindkraftstornet i trä har rests utanför Göteborg*. 29 april 2020. URL: <https://www.mynewsdesk.com/se/chalmers-ventures/pressreleases/det-foersta-vindkraftstornet-i-trae-har-rests-utanfoer-goeteborg-2995201> (hämtad 2021-02-04).
- [6] M.B. Histan D.G. Alciatore. *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*. New York, USA: Mc-Graw Hill, 2007. Kap. Sensors, s. 358–362.
- [7] E. Dölerud. ”Ritningar över vindkraftverket”. Opublicerad.
- [8] M. Ellsén. ”Description of measurement files from wooden tower load test at Björkö”. Opublicerad.
- [9] M. Ellsén. ”Vikt och Tyngdpunkt”. Opublicerad.
- [10] Energimyndigheten. *Antal verk, installerad effekt och elproduktion, hela landet, 1982-*. 2021. URL: https://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/Vindkraftsstatistik/Vindkraftsstatistik/EN0105_1.px/table/tableViewLayout2/?loadedQueryId=e1241c10-f730-4531-8b74-8b9b91e8b02c&timeType=from&timeValue=0 (hämtad 2021-04-14).
- [11] Energimyndigheten. *Elproduktion (nettoproduktion) per kraftslag fr.o.m. 1970*. URL: <http://pxexternal.energimyndigheten.se/sq/5eeb587a-e21a-4ede-a504-b6ccc4ee7846> (hämtad 2021-04-12).
- [12] K. Hoffman. *An introduction to Measurements using Strain Gauges*. Alsbach, Germany: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989. Kap. Wheatstone bridge circuit, s. 126–129.
- [13] Institutionen för elektroteknik. ”Rapport statistiska laster”. Opublicerad.

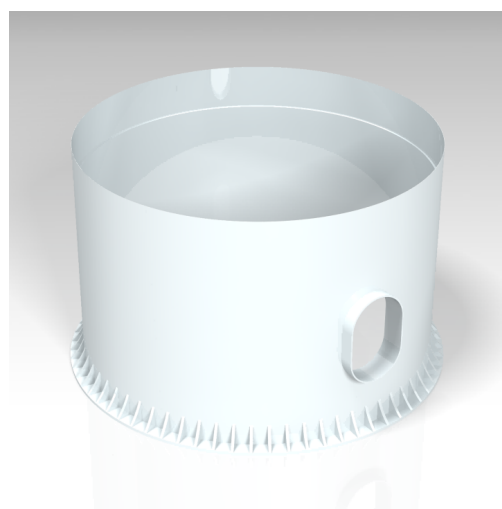
- [14] C. Ljung M. Ristinmaa N. Saabye Ottosen. *Introduktion till hållfasthetslära, Enaxliga tillstånd*. Lund, Sverige: Studentlittertur, 2007. Kap. Balkböjning, s. 96–97.
- [15] Moelven. *LVL-skivor*. 22 mars 2021. URL: <https://www.moelven.com/se/se/limtra-massivtra-och-lvl/lvl-skivor/> (hämtad 2021-02-04).
- [16] L. Nohrstedt. "Vindkraft riggas för att hålla takten i elnätet". I: *Ny Teknik* nr.8 (29 april 2021), s. 20–21.
- [17] U. Sehlberg Samuelsson. 14 febr. 2014. URL: <https://www.vindkraftsnyheter.se/20190804/1512/vindkraftverken-bliir-storre-men-hur-stora-kan-de-bli> (hämtad 2021-04-29).
- [18] SMHI. *Vind i Sverige*. 17 april 2021. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/sveriges-klimat/vind-i-sverige-1.31309> (hämtad 2021-05-04).
- [19] Svenskt Trä. *Fanerträ (LVL)*. 1 okt. 2019. URL: <https://www.traguiden.se/konstruktion/dimensionering/hallfasthet-och-barformaga/karakteristisk-hallfasthet-fanertra-lvl/> (hämtad 2021-02-08).
- [20] tradtojningsgivare.se. *Wheatstonebrygga*. 2021. URL: https://tradtojningsgivare.se/funktion/wheatstonebrygga/?fbclid=IwAR37FBZvNKeP_Xot-_d7ZvB04ik530jBTjMn1fMcyqxs8aM9dwn-vFi9ftI (hämtad 2021-05-12).
- [21] "Utdelat material: "Övningar Kapitel G: Givare"". Opublicerad.
- [22] A. Wallin. *Chalmers har ett nytt vindkraftverk för forskning*. 29 juni 2020. URL: <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/e2/nyheter/Sidor/Chalmers-har-ett-nytt-vindkraftverk-for-forskning.aspx> (hämtad 2021-02-04).
- [23] C.J. Åkerström. "Manufacturing and installation". Opublicerad.

A

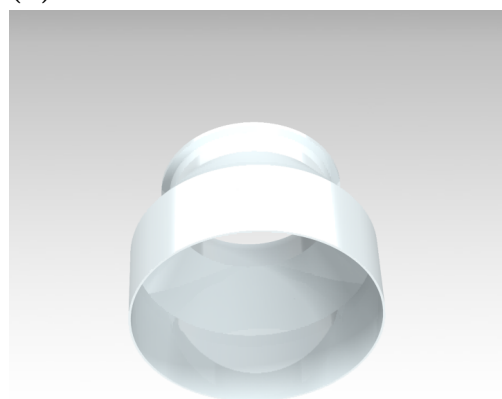
CAD-modell av tornets delar



(a) Modell av hela tornkonstruktionen



(b) Modell av stålfoten

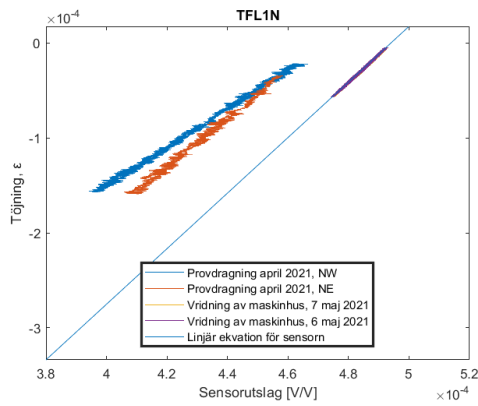


(c) Modell av toppadaptern

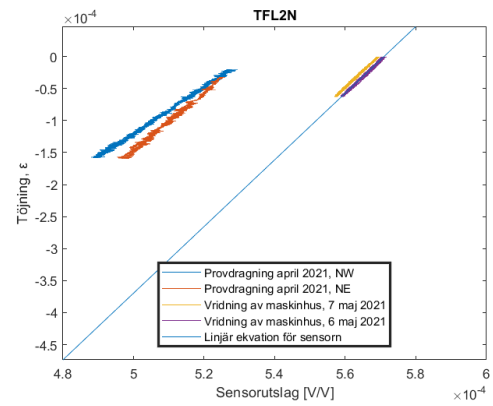
Figur A.1: Volymmodeller av hela tornet samt toppadaptern och stålfoten

B

Plottar över valideringen av sensorerna

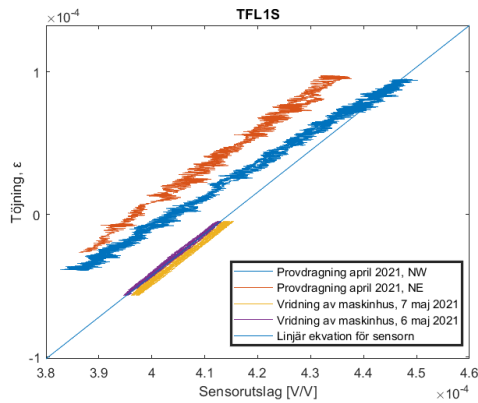


(a) TFL1N

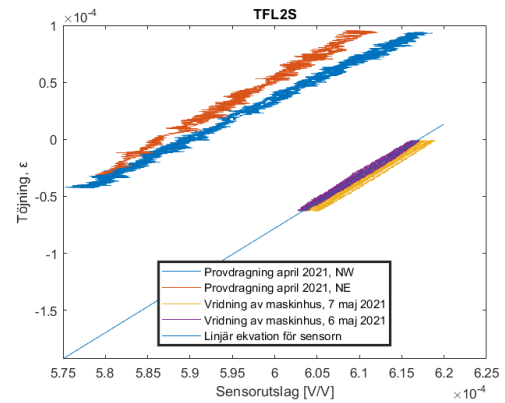


(b) TFL2N

Figur B.1: Töjningen för sensorerna i nordlig riktning i träkonstruktionen



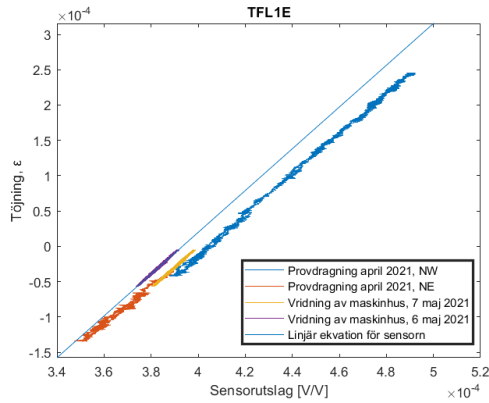
(a) TFL1S



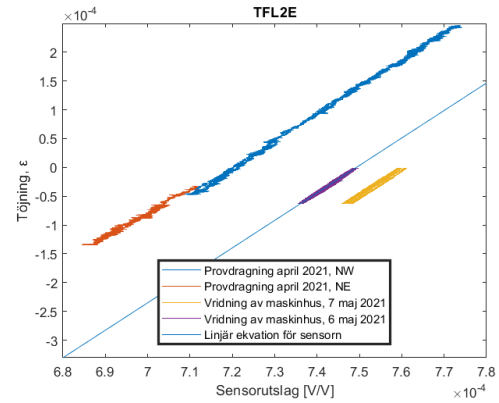
(b) TFL2S

Figur B.2: Töjningen för sensorerna i sydlig riktning i träkonstruktionen

B. Plottar över valideringen av sensorerna

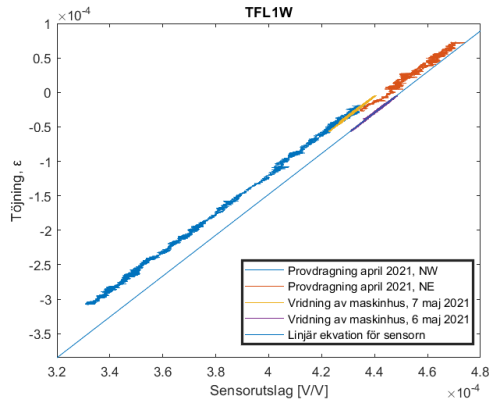


(a) TFL1E

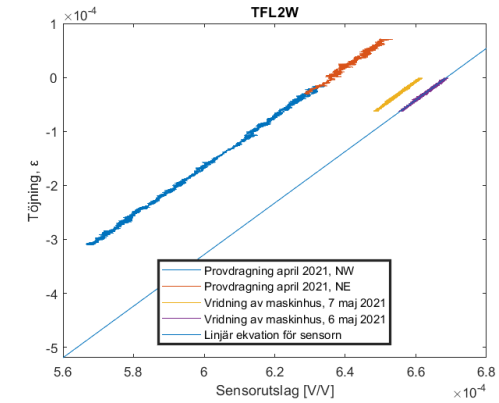


(b) TFL2E

Figur B.3: Töjningen för sensorerna i östlig riktning i träkonstruktionen

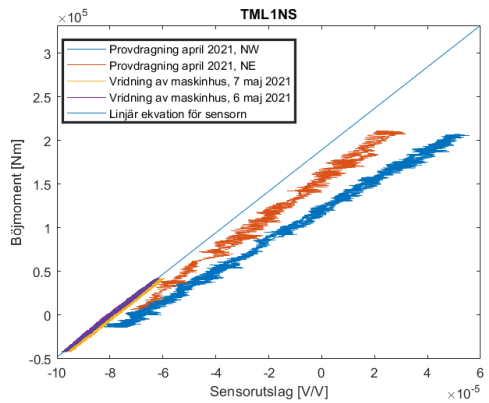


(a) TFL1W

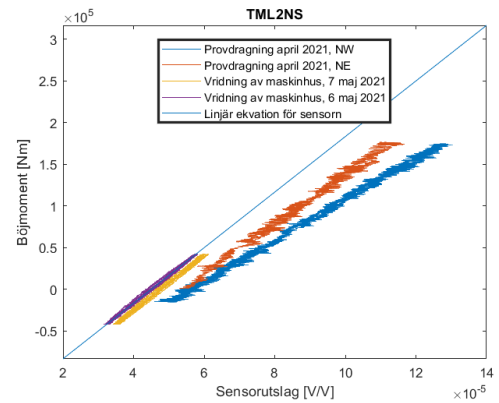


(b) TFL2W

Figur B.4: Töjningen vid sensorerna i västlig riktning i träkonstruktionen

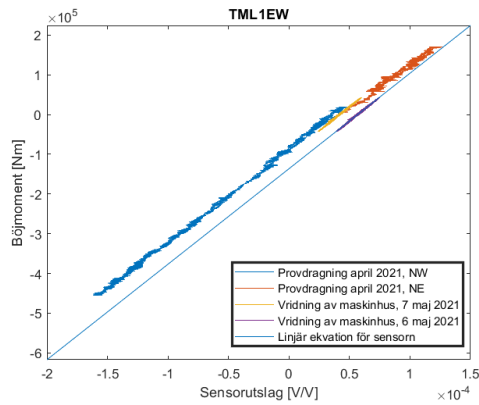


(a) TML1NS

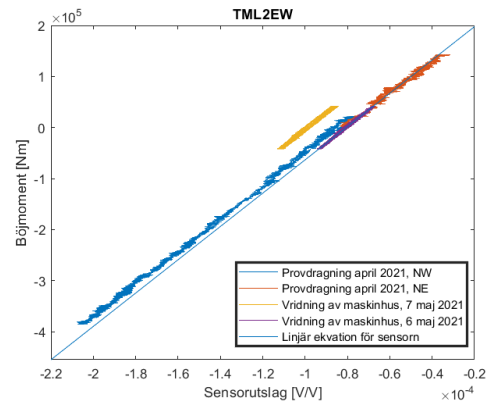


(b) TML2NS

Figur B.5: Momentet vid sensorerna i nord-sydlig riktning i träkonstruktionen

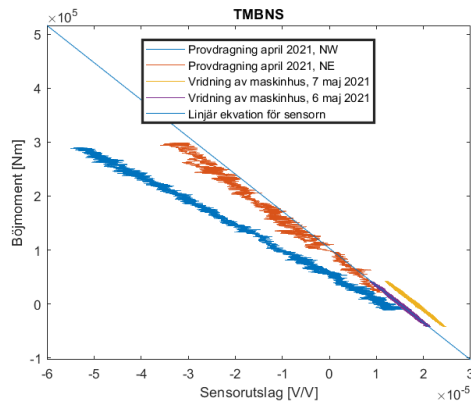


(a) TML1EW

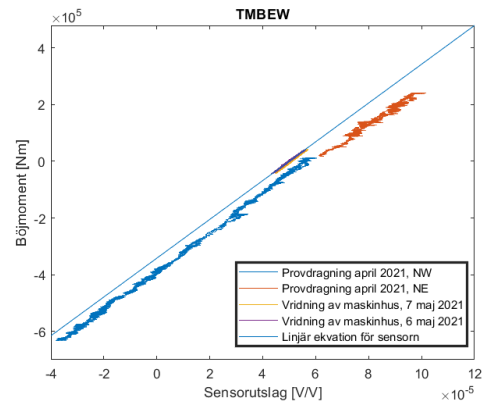


(b) TML2EW

Figur B.6: Momentet vid sensorerna i öst-västlig riktning i träkonstruktionen



(a) TMBNS



(b) TMBEW

Figur B.7: Montet vid sensorerna i både nord-sydlig och öst-västlig riktning i stålfooten



CHALMERS