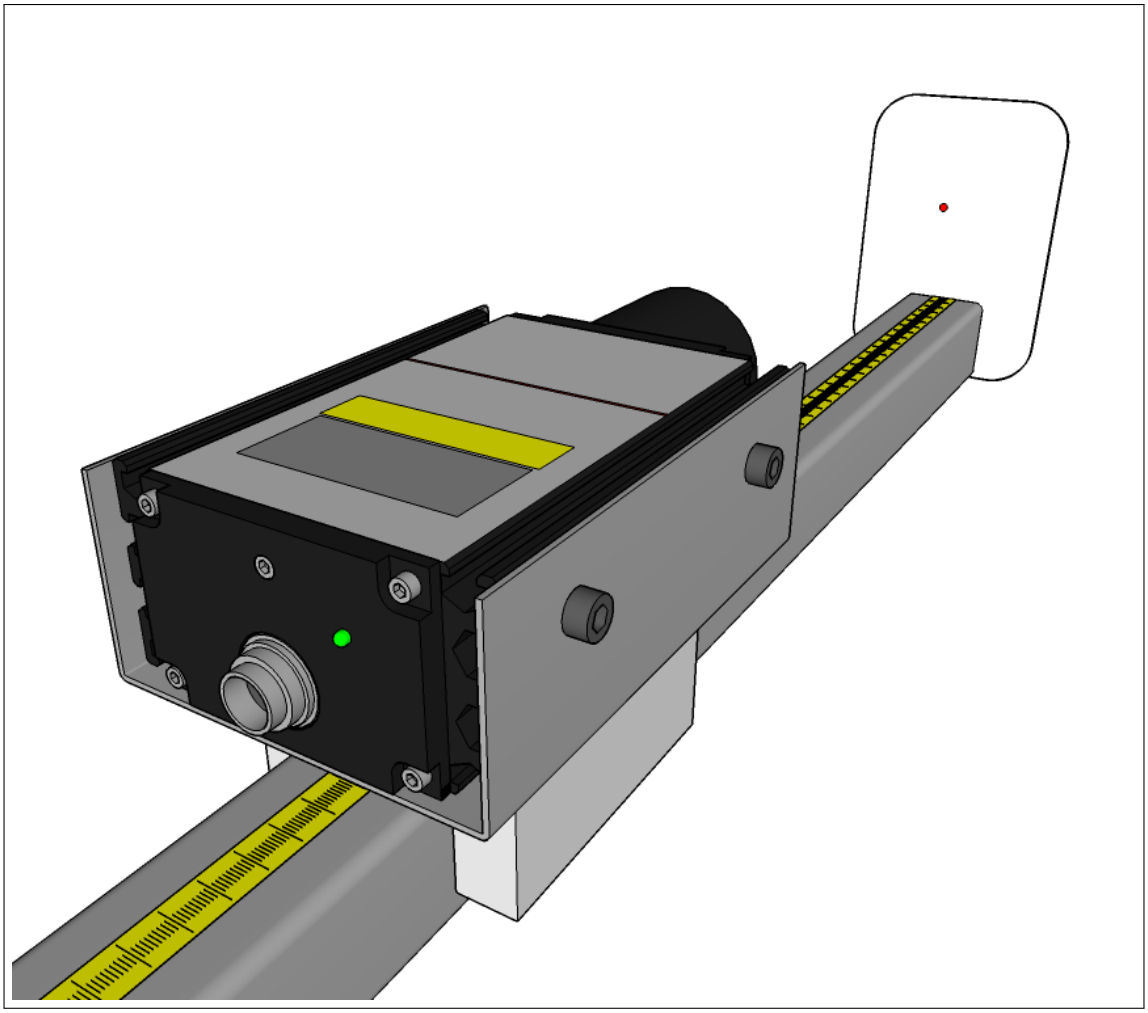
CHALMERS



Test och implementering av en laserbaserad havsnivåmätare

Kandidatarbete i Elektroteknik

ERIK BÖRJESON
JULIA JANSSON
CARL VON ROSEN JOHANSSON

Institutionen för rymd- och geovetenskap
CHALMERS
Göteborg, Sverige 2016

Kandidatarbete RRYX02-16-01

Test och implementering av en laserbaserad havsnivåmätare

ERIK BÖRJESON
JULIA JANSSON
CARL VON ROSEN JOHANSSON

Institutionen för rymd- och geovetenskap
Chalmers
Göteborg, Sverige 2016

Test och implementering av en laserbaserad havsnivåmätare
ERIK BÖRJESON
JULIA JANSSON
CARL VON ROSEN JOHANSSON

© ERIK BÖRJESON, 2016.
© JULIA JANSSON, 2016.
© CARL VON ROSEN JOHANSSON, 2016.

Handledare: Gunnar Elgered, Institutionen för rymd- och geovetenskap
Examinatorer: Magnus Thomasson & Vincent Desmaris, Institutionen för rymd- och geovetenskap

Kandidatarbete RRYX02-16-01
Institutionen för rymd- och geovetenskap
Chalmers
412 96 Göteborg
Telefon 031-772 10 00

Omslag: Ritning av mätuppställning med mätrigg och laser.

Skrivet i LaTeX
Göteborg, Sverige 2016

Test och implementering av en laserbaserad havsnivåmätare

ERIK BÖRJESON
JULIA JANSSON
CARL VON ROSEN JOHANSSON
Institutionen för rymd- och geovetenskap
Chalmers

Sammanfattning

Att mäta havets nivå har varit av intresse i Sverige sedan landhöjningens upptäckt och idag finns anledning att mäta havsnivån på grund av de klimatförändringar vi står inför. Genom noggranna mätningar kan utsatta kustlinjer upptäckas tidigt och insatser sättas in. De två typer av sensorer, radar och bubblare, som är monterade i mareografbrunnen vid Onsala rymdobservatorium har båda i bästa fall en mätosäkerhet på 3 mm. Denna rapport undersöker ytterligare en typ av sensorer baserad på optisk avståndsmätning, en laser, som ska komplementera dessa. Innan en eventuell implementering av en optisk avståndsmätare måste en sådan sensors mätosäkerheter undersökas. För de specifikationer som gäller för mareografbrunnens dimensioner behandlas därför mätosäkerheter gällande reperterbarhet, linjäritet samt temperaturberoende. Rapportens resultat visar att en laserbaserad optisk avståndsmätare har den minsta mätosäkerheten av de tre sensorerna under ett experiment som varade drygt ett dygn, samt att inget tydligt temperaturberoende kunnat påvisas. Den reflektor som flyter på havsytan och som krävs för reflektion av laserns ljus har efter beräkningar påvisats inte ha någon större betydelse för mätningarnas osäkerheter. Således är en optisk avståndsmätare i form av en lasermätare ett bra komplement till befintliga sensorer vid Onsala rymdobservatorium, förutsatt att den fungerar även över lång tid. Långtidsmätningar krävs bland annat för att undersöka systematiska effekter relaterade till den flytande reflektorns vikt och reflektionsförmåga.

Nyckelord: Optisk avståndsmätare, laser, havsnivå, mareograf, mätosäkerhet.

Abstract

Measuring sea level has been of interest in Sweden since the discovery of the land uplift and today one reason for measurements is the current climate change. By accurately measuring the sea level, vulnerable coastlines can be detected at an early stage and appropriate measures can be taken. The two types of sensors, radar and pneumatic bubbler gauge, that are mounted at the tide gauge well at Onsala Space Observatory both have a best case measurement uncertainty of 3 mm. This report will study another method based on an optical distance sensor, a laser, that will be a complement to the other two. Before an implementation of such an optical distance sensor the devices accuracy have to be examined. Given the specifications of the wells dimensions measurements related to repeatability, linearity and temperature depence will be carried out. The report conclude that an optical distance sensor has the smallest standard deviation of the three sensors, based on an experiment lasting slighly longer than one day, and that no significant temperature dependence can be found. The laser will sample the reflected light from a reflector that floats on the water surface. Calculations show that this reflector has insignificant impact on the total measurement accuracy. Therefore an optical distance sensor is a useful alternative to the already mounted sensors at Onsala Space Observatory for measuring the sea level.

Keywords: Optical distance sensor, laser, sea level, tide gauge, mareograph, measurment uncertainty.

Förord

Detta är ett kandidatarbete på Chalmers tekniska högskola och vi vill främst tacka vår handledare Gunnar Elgered för all hjälp. Utan denna mätteknikmästares stöd hade inte projektet varit en standardavvikelse så roligt och gått en mareograf så bra. Sedan vill vi ge ett minst lika stort tack till mekaniska verkstaden på observatoriet för alla mätriggar, reflektorer, installationer och alla hjälpmedel vi någonsin behövt. Alla dessa smarta och tekniska lösningar från er sida har gjort våra mätningar enklare, roligare och snyggare. Ett stort tack! Vi vill även tacka Sten Bergstrand på SP Sveriges tekniska forskningsinstitut för lånet av lasern. Vi hoppas att mjukvaran är lagom krånglig att förstå och den kan fungera tillfredställande vid framtida mätningar. Vi vill också tacka Linda Bradley från Fackspråk som guidat oss genom den snåriga rapportskrivningsskogen. Avslutningsvis vill vi tacka Elektroteknologsektionens sexmästeri för lånet av värmeskåp under temperaturtesterna.

Erik Börjeson, Julia Jansson, Carl von Rosen Johansson, Göteborg, 17 maj 2016

Innehåll

Figurer **xiii**

Tabeller **xv**

1 Introduktion **1**
1.1 Mareografen vid Onsala rymdobservatorium 2
1.2 Syfte 2
1.3 Avgränsningar 3
1.4 Precisering av frågeställningen 3
1.5 Rapportens struktur 3

2 Optisk avståndsmätning **5**
2.1 Kravspecifikation 5
2.2 Varianter av optisk avståndsmätning 5
2.2.1 Time-of-Flight 5
2.2.2 Mätningar baserat på fasskillnad 6
2.3 Modeller för utvärdering av mätutrustning 6
2.3.1 Repeterbarhet 7
2.3.2 Linjäritet 7
2.3.3 Temperaturberoende 7
2.4 Reflektor 8
2.5 Analyser av flera oberoende mätserier 9

3 Utveckling av mätutrustning **11**
3.1 Omvandlare mellan RS-232 och RS-422 11
3.2 Mjukvara för insamling av mätdata 13

4 Metod och resultat av experiment **15**
4.1 Repeterbarhet 15
4.1.1 Metod 15
4.1.2 Resultat 16
4.2 Linjäritet 17
4.2.1 Metod 17
4.2.2 Resultat 17
4.3 Temperaturberoende 18
4.3.1 Metod 18
4.3.2 Resultat 19

4.4 Reflektor 20
4.4.1 Metod 20
4.4.2 Resultat 20
4.5 Utvärdering i mareografbrunn 21
4.5.1 Metod 21
4.5.2 Resultat 21

5 Diskussion och slutsats **27**

Referenser **29**

Figurer

2.1 Schematisk bild över Time-of-Flight- och Phase-Shift-metoden, där blå linje symboliserar utsänd signal och orange linje mottagen. 6

3.1 Kretsschema för omvandlare mellan RS-232 (TTL) och RS-422. . . . 12
3.2 Blockschema över dataöverföringen från laser och multimeter till dator. 12
3.3 Skärmdump på den utvecklade laserstyrningen i Excel. 13

4.1 Fördelningen av mätdata för att studera repeterbarheten. 16
4.2 Foto på mätuppställning. 17
4.3 Mätserie för linjäritetstest grupperade efter talmeterns referensvärde. 18
4.4 Mätning av temperaturberoende på ca 15,5 m avstånd. 19
4.5 Mätning av temperaturberoende på ca 36,0 m avstånd. 19
4.6 Korskorrelation mellan radar, bubblare och laser. 22
4.7 Mätvärden från respektive medelvärde över tid i mareografen. 22
4.8 Skillnaden i havsnivå mätt med bubblare och radar. 24
4.9 Skillnaden i havsnivå mätt med bubblare och laser. 24
4.10 Skillnaden i havsnivå mätt med radar och laser. 25
4.11 Fördelningsdiagram av skillnaderna mellan radar, bubblare och laser. 25

Tabeller

2.1 Mätningar av vattnets salthalt och temperatur vid KA2 Fladen samt lufttrycksmätningar vid Vinga A. 8
2.2 Havsvattnets densitet för tre olika mätningar. 8

4.1 Mätseriernas repeterbarheter. 16
4.2 Reflektionstester på olika material. 20
4.3 Korrelationskoefficienten mellan de olika sensorerna. 21
4.4 Standardavvikelser för varje enskild sensor. 23

1
Introduktion

Havsnivån är både historiskt och idag intressant ur flera perspektiv. Mätningar av havsnivåns läge har i Stockholm genomförts sedan 1700-talet. Ett halvt sekel senare bedrevs mätningar i fler delar av landet för att undersöka den sjunkande kustlinjen, ett fenomen som pågick i hela landet men tydligast syntes längs Norrlandskusten. Förklaringen troddes till en början vara att volymen vatten minskade i de svenska haven, men forskning och mätdata på havsnivån skulle visa att det istället rörde sig om en landhöjning som ett resultat från den tid då Sverige var täckt av inlandsis [Sandegren, 1946] [Hammarklint, 2009].

För att bestämma havsnivåns läge behöver denna refereras till en punkt. Vid de tidiga undersökningarna av havsnivån var referenspunken tidigare uppmätta värden [Sandegren, 1946] men med dagens satellitnavigering, GNSS, används en matematisk version av jordens dimensioner och karaktär, en geoid, samt en referensellipsoid [Hofmann-Wellenhof m.fl., 2007]. Geoiden är fallet då allt vatten är jämnt fördelat över jorden och tyngdkraften alltid är vinkelrät mot ytan. Den höjd som brukar beskrivs som *höjden över havet* är i själva verket höjden över geoiden. På grund av skillnader i gravitationen i olika delar av världen så är inte geoiden en perfekt geometrisk struktur. Referensellipsen är i sin tur en approximation av geoiden. Denna framställs genom att låta en för geoiden anpassad ellips rotera kring sin kortaste axel. Tillsammans med jordens yta används geoiden och referensellipsen till att bestämma noggranna höjder och lägen med GNSS. För noggrannare bestämningar finns referensstationer placerade på jorden och på grund av jordskorpans rörelse kommer dessa och referenssystemen att förändras med tiden. Därför skapas matematiska system baserade på ett visst geografiskt läge under en viss tid, en epok, och efterkommande positionerningar görs refererade till denna. Olika referenssystem använder olika epoker och dessutom olika beräknade geoider och referensellipser [Hofmann-Wellenhof m.fl., 2007]. I Sverige används referenssystemet SWEREF99 [Jivall & Lidberg, 2000] med RH2000 som höjdreferens [Ågren, 2009]. Detta kan jämföras med det amerikanska Global Positioning System (GPS) som använder referenssystemet World Geodetic System 1984 och geoidmodellen EGM96 [Kaplan & Hegarty, 2005].

Höjden över en referensmodell är intressant för att ge kunskap om vattennivåns förändring i haven och landhöjningen i relation till den klimatförändring vi står inför [Stocker m.fl., 2013]. Detta är en anledning till havsnivånmätningars relevans idag. Med glaciärisar som smälter som resultat av ökande utsläpp av växthusgaser i atmosfären, ökar i sin tur havsnivån och med ett varmare klimat och ökande havstemperaturer ökar även vattnets volym [Stocker m.fl., 2013]. Dessa faktorer leder till att delar av världens kustlinjer i framtiden kan komma att stå under vatten.

Politiker och samhällen behöver noggrann information om utsatta områden för att kunna vidta de åtgärder som krävs redan innan problem uppstår i större skala. För att kunna göra korrekta prognoser och på så sätt ge så tydliga riktlinjer som möjligt, krävs noggranna mätningar på millimeternivå.

1.1 Mareografen vid Onsala rymdobservatorium

Mareografen, det instrument som mäter havsnivån, finns i ett antal utformningar. Olika typer av tryckmätare, flottörer, akustiska system och radar används exempelvis för att utföra mätningarna [IOC, 2006]. Dessa har alla sina olika för- och nackdelar, men gemensamt är att alla har svårt att utföra mätningar med millimeterprecision.

Mareografen i Onsala består av radar och tryckmätare i en isolerad brunn. Värmeslingor i brunnens väggar ser till att temperaturen inte sjunker under 0 °C för att förhindra isbildning på vattenytan och skydda utrustningen från att frysa sönder. Tre rör ansluter brunnens insida till havet utanför och på så vis återspeglas havets nivå inuti brunnen för att mätningar ska kunna ske i en kontrollerad miljö.

Tryckmätarna i Onsala är av typen *pneumatic bubbler gauge*, hädanefter kallad bubblare. Två av dessa finns monterade inuti mareografbrunnen och en tredje sitter utanför [Wahlbom, 2015]. En bubblare utnyttjar skillnaden mellan lufttrycket vid vattenytan, P, och det tryck, P_A, som krävs för att en luftbubbla ska kunna pumpas ned i ett rör och vid en viss bestämd nivå under vattenytan släppas från denna. Tillsammans med kännedom om vattnets densitet ρ samt gravitationen g kan höjden h av vattennivån beräknas med hjälp av Ekvation (1.1).

$$h = \frac{P_A - P}{\rho \cdot g} \tag{1.1}$$

Bubblare har länge varit en väl fungerande sensor för att mäta vattennivåer runt om i världen då den är noggrann och har en stabil konstruktion [IOC, 2006]. Dock kräver den att vattnets densitet mäts kontinuerligt nära bubblaren eller att densiteten vid mätningar längre bort inte förändras beroende på läge och på så vis kan antas vara känd.

I mareografbrunnen finns även en radar för att mäta avståndet från radarns fixerade position ovan vattnet och havets varierande nivå. Tiden det tar en puls att skickas från radarn, reflekteras mot vattenytan och sedan återvända till radarn används för att beräkna avståndet [Campbell Scientific, 2015]. En fördel med radarn är att omgivningens karaktär, som exempelvis temperatur och lufttryck, inte påverkar mätningarna. Dock kan störande reflektioner förekomma vid exempelvis en för snäv brunn och dessa kan påverka mätresultatet [IOC, 2006].

1.2 Syfte

Syftet med kandidatarbetet är att skapa en kravspecifikation för en optisk avståndsmätare, införskaffa en sådan och att utvärdera mätosäkerheterna hos denna. Dessa resultat ska jämföras med dagens sensorer vid Onsala rymdobservatorium som i

bästa fall har en mätosäkerhet på 3 mm [Wahlbom, 2015], för att avgöra om den valda avståndsmätaren med gott resultat kan implementeras i mareografbrunnen.

1.3 Avgränsningar

Rapporten kommer att analysera en befintlig optisk avståndsmätare som finns tillgänglig på marknaden. Design av en helt ny modell eller justering av befintlig hårdvara kommer inte att behandlas. Instrumentets position i ett geodesiskt referenssystem kommer inte tas i beaktande. Resultaten av mätningarna kommer enbart att jämföras med observationerna från den befintlig utrustningen i mareografbrunnen.

1.4 Precisering av frågeställningen

Som en första del behöver frågan om vilken typ av optiska avståndsmätare som kan användas besvaras. Det finns ett antal faktorer att ta hänsyn till vid val av instrument. Sådana är exempelvis instrumentets noggrannhet, gränssnitt mot dator/logger samt tålighet mot utomhusmiljö. En kravspecifikation skall upprättas och potentiella alternativ utvärderas mot denna.

Den optiska avståndsmätaren kommer placeras ovanför vattnet i en fix position, detta då lasern inte bör komma i kontakt med vattnet och för att senare kunna ha en fast referensposition. För att mäta avståndet till vattenytan kommer en reflektor att behöva placeras på denna, då ljuset inte kan reflekteras direkt mot vattenytan. Material och konstruktion av denna är en del av projektet och den ska vara av en design som gör mätosäkerheterna så låga som möjligt. Det kommer även att behöva skapas en lösning för inhämtning och lagring av mätdata samt hur denna skall föras över till en dator för analys.

Avslutningsvis ska den färdiga prototypen utvärderas med avseende på repeterbarhet, linjäritet och temperaturberoende. Resultatet av denna utvärdering ska då också jämföras med Wahlboms resultat [Wahlbom, 2015] för de andra sensorerna i rymdobservatoriets mareograf.

1.5 Rapportens struktur

Rapporten börjar med att i Kapitel 2 presentera en kravspecifikation, olika typer av optiska avståndsmätare samt teorin bakom de olika modeller för utvärdering av avståndsmätaren som använts. Här beskrivs också hur havets fysikaliska egenskaper kan påverka den optiska avståndsmätaren. Detta följs av Kapitel 3 som behandlar valet av mätutrustning och design av hård- och mjukvara. I Kapitel 4 redogörs för hur de olika mätningarna genomförts och resultatet av dessa. I detta kapitel presenteras även resultaten av de mätningar som utförts med avståndsmätaren monterad i mareografbrunnen vid Onsala rymdobservatorium. Kapitel 5 redovisar de slutsatser som kan dras av mätningarna och här presenteras förbättringsmöjligheter och rekommendationer för framtiden.

2
Optisk avståndsmätning

I detta kapitel behandlas först kravspecifikation samt bakgrund inför val av hårdvara för en passande optisk avståndsmätare. Detta följs av de matematiska teorier som ligger bakom utvärderingen av de olika mätserierna.

2.1 Kravspecifikation

Den optiska avståndsmätaren som ska beställas och utvärderas måste uppnå vissa krav för att prestandamässigt klara de mätosäkerheter som övriga sensorer i mareografbrunnen klarar och helst vara bättre. Detta innebär att avståndsmätaren måste ha en mätosäkerhet gällande reperterbarhet i storleksordningen 1 mm och en olinjäritet som är mindre än 3 mm. Totalt måste mätaren ha en osäkerhet som är mindre än 3 mm. Med implementeringen i mareografbrunnen ska även lasern klara ett avstånd på 0,4 – 4,0 m, fungera inom temperaturspannet 0 – 20 °C samt vara tålig mot fukt och damm.

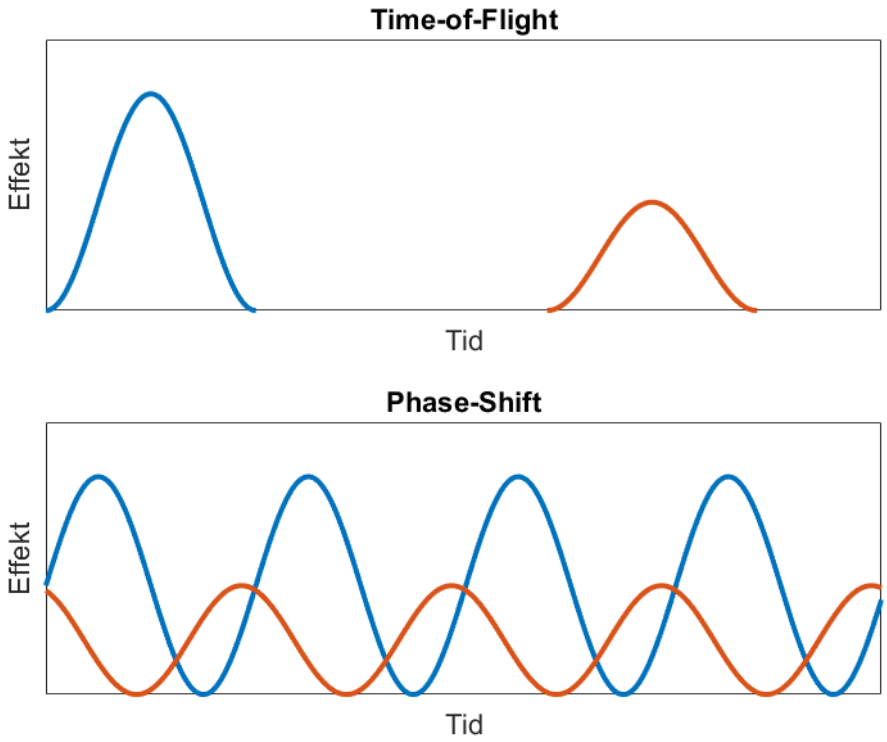
2.2 Varianter av optisk avståndsmätning

Det finns ett flertal olika mätmetoder som används i kommersiella mätsystem för optisk avståndsmätning. Sådana kan vara baserade på intensitetsförlust, triangulering, interferometri, fasförskjutning och Time-of-Flight [Amann m.fl., 2001]. De två sistnämnda är vanligast vid de aktuella avstånden och förklaras översiktligt nedan.

2.2.1 Time-of-Flight

Ett mätsystem baserat på Time-of-Flight bygger på mätningar av den tid det tar för en laserpuls att färdas från en sändare till en mottagare via någon form av reflekterande yta [Amann m.fl., 2001]. Sändaren och mottagaren är oftast placerade i samma enhet och då ljusets hastighet är känd kan avståndet till mätobjektet beräknas. En avgörande faktor för hur noggranna avståndsmätningar med denna metod kan bli är därmed hur hög upplösning som mätutrustningen har på tidsmätningen, för en noggrannhet på 1 mm krävs till exempel en noggrannhet på 6,7 ps [Amann m.fl., 2001]. Då en väldigt liten del av den utsända strålningen reflekteras tillbaka till detektorn, särskilt om mätobjektet har en grov yta, måste detektorn vara väldigt känslig för infallande strålning [Berkovic & Shafir, 2012]. Denna metod passar bättre för avstånd större än 50 m. Vid kortare avstånd krävs mer avancerad

elektronik då laserpulsens form och det faktum att den inkommande pulsen kan överlappa den utgående komplicerar mätningen [Berkovic & Shafir, 2012].



Figur 2.1: Schematisk bild över Time-of-Flight- och Phase-Shift-metoden, där blå linje symboliserar utsänd signal och orange linje mottagen.

2.2.2 Mätningar baserat på fasskillnad

En underkategori till Time-of-Flight är fasskillnadsbaserade mätningar (Phase-Shift), där avståndsmätningen baseras på amplitudmodulation istället för på pulser. I detta fall används en kontinuerlig laserstråle vars amplitud moduleras med en känd frekvens. Utrustningen mäter sedan fasförskjutningen mellan utsänt och mottaget ljus [Berkovic & Shafir, 2012]. Denna fasförskjutning kan användas för att beräkna avståndet till mätobjektet. Ett problem med metoden är att den egentliga förskjutningen är den uppmätta plus en okänd multipel av 2π. För att ta reda på vid vilken multipel reflektionen befinner sig kan en parallell mätning med laser av en annan, oharmonisk, frekvens göras [Amann m.fl., 2001]. Om detta behövs eller ej beror hur stort avstånd som behöver täckas och vilken frekvens av laserljus som används.

2.3 Modeller för utvärdering av mätutrustning

För att utvärdera hur bra en specifik mätutrustning är bör flera parametrar testas. I fallet med en optisk avståndsmätare för havsnivåmätningar är dessa: repeterbarhet,

linjäritet och temperaturberoende. Nedan följer en beskrivning av dessa egenskaper samt hur de kan beräknas.

2.3.1 Repeterbarhet

Repeterbarhet beskriver hur mycket resultatet av en mätning varierar då mätningen upprepas ett flertal gånger. Resultatet av en sådan mätning visar hur stor en eventuell avvikelse blir mellan de olika mätningarna och påvisar om det finns vitt brus och andra faktorer som påverkar resultatet. Då N antal mätningar $(x_1, x_2,..., x_{N-1}, x_N)$, med medelvärdet $(\bar{x})$ görs, kan den här rapporten beskriva standardavvikelsen (σ) enligt Ekvation (2.1).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \tag{2.1}$$

2.3.2 Linjäritet

Linjäriteten beskriver hur väl två variabler är proportionella mot varandra. Ett sådant samband kan beskrivas med räta linjens Ekvation (2.2). Gällande den optiska avståndsmätaren är dessa variabler det med avståndsmätare uppmätta avståndet (P_m) och ett referensvärde från en talmeter (m).

$$P_m = c_0 m + c_1 \tag{2.2}$$

En vanlig metod för att specificera en mätanordnings linjäritet är att beräkna det procentuella värdet av den största skillnaden från den uppskattade modellen. Modellen fås genom minsta kvadratmetoden och Ekvation (2.2), för mätvärden $(x_1, x_2,..., x_{N-1}, x_N)$ och området definierat av högsta repektive lägsta uppmätta värde enligt Ekvation (2.3). Linjäritetens procentuella värde beräknas sedan med hjälp av Ekvation (2.4).

$$x_{diff} = x_{max} - x_{min} \tag{2.3}$$

$$linjäritet_{\%} = \frac{max(x - P_m)}{x_{diff}} \tag{2.4}$$

2.3.3 Temperaturberoende

Om en avståndsmätare får mäta ett konstant avstånd under en längre tidsperiod med en varierande temperatur kan ett eventuellt temperaturberoende studeras. Om temperaturen plottas på x-axel i ett diagram och de uppmätta avståndet på y-axeln kan en linjär anpassning göras som visar hur ett sådant beroende ser ut. För att avgöra om även avståndet till målet spelar in kan samma mätning upprepas vid ett annat avstånd för att se om ett samband kan hittas även där. I båda dessa fall kan teorin från avsnitt 2.3.2 appliceras förutsatt att sambandet är linjärt.

2.4 Reflektor

En reflektor måste användas vid vattenytan för att reflektera det ljus den optiska avståndsmätaren skickar ut. Olika material och färger reflekterar dessutom ljuset olika bra. Reflektorn flyter på vattnet och ska ha minsta möjliga påverkan på mätningen.

Densiteten hos vattnet beror på tryck, salthalt och temperatur. SMHIs marina miljöövervakningssida Sharkweb lägger varje månad upp data från olika marina mätstationer i Sverige och strax utanför landets gränser. KA2 Fladen är den mätstation som ligger närmast Onsala rymdobservatorium (57°24' N, 11°55' E) på position 57°11' N, 11°40' E. Data i Tabell 2.1 är hämtad från de tre mätningar som gjorts mellan januari och mars 2016. Uppgifter om lufttrycket är hämtade från väderstationen Vinga A på position 57°38' N, 11°36' E och är ett medelvärde från de 24 mätningar som utförs på ett dygn.

Tabell 2.1: Mätningar av vattnets salthalt och temperatur vid KA2 Fladen samt lufttrycksmätningar vid Vinga A.

Datum	Salthalt [‰]	Temperatur [°C]	Lufttryck [hPa]
2016-01-12	20,693	3,17	994,7
2016-02-19	25,404	3,00	1003,3
2016-03-18	13,166	4,51	1018,6

Havsvattnets densitet kan med dessa värden beräknas med uttryck hämtade från artikeln *A new high pressure equation of state for seawater* [Millero m.fl., 1980] och resultatet presenteras i Tabell 2.2.

Tabell 2.2: Havsvattnets densitet för tre olika mätningar.

Datum	Densitet [kg/m^3]
2016-01-12	1016,523
2016-02-19	1020,290
2016-03-18	1010,484

Då reflektion sker mot en platta vars ovansida befinner sig ovanför vattenytan kommer dennas höjd h att behöva läggas till den av lasern uppmätta höjden för att få ett korrekt värde. Reflektorns fysikaliska egenskaper kan beskrivas med Ekvation (2.5) och vattnets densitet enligt Ekvation (2.6), där V det undanträngda vattnets volym, A reflektorns bottenarea och m reflektorns massa. Dessa två ekvationer kan kombineras till Ekvation (2.7) som beskriver reflektorn höjdläge som funktion av flytkroppens egenskaper och vattnets densitet. Denna gäller förutsatt att flytkroppens tvärsnittsarea är konstant.

$$V = h \cdot A \tag{2.5}$$

$$V = \frac{m}{\rho} \tag{2.6}$$

$$h = \frac{m}{\rho \cdot A} \tag{2.7}$$

2.5 Analyser av flera oberoende mätserier

En linjärkombination (L) av ett antal oberoende, normalfördelade mätserier (x_1,x_2,..., x_{N-1},x_N) kan beskrivas enligt Ekvation (2.8). Kvadraten av standardavvikelsen för denna linjärkombination (σ_y) kan då beskrivas som en summa av kvadraterna av de enskilda standardavvikelserna (σ_1,σ_2,...,σ_{N-1},σ_N) enligt Ekvation (2.9) [Rydén, 2014].

$$L = \sum_{i=1}^{N} a_i x_i + b \tag{2.8}$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^{N} a_i^2 \sigma_i^2 \tag{2.9}$$

En vanlig metod för att jämföra två olika mätseriers tidsförskjutning är korskorrelation, $R_{xy}[\tau]$. Metoden bygger på att man multiplicerar två mätserier med mätpunkter (x_1, y_1),(x_2, y_2),..., (x_{N-1}, y_{N-1}),(x_N, y_N) enligt Ekvation (2.10) för att se var den största korrelationsfaktorn finns och därigenom kunna identifiera tidsförskjutningens varaktighet [Bengtsson, 2012].

$$R_{xy}[\tau] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot y[n+\tau] \tag{2.10}$$

Vidare är korrelationskoefficienten r ett vanligt numeriskt mått på sambandet mellan två oberoende mätserier. Denna beskriver relationen mellan två mätserier (x och y enligt ovan) med N antal observationer där mätseriernas respektive medelvärde benämns $\bar{x}$ samt $\bar{y}$. Korrelationskoefficienten beräknas enligt Ekvation (2.11) och resultatet ligger inom intervallet $-1 \leq r \leq 1$, där 1 är ett maximalt positivt samband och -1 ett maximalt negativt [Rydén, 2014].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \bar{y})^2}} \tag{2.11}$$

3
Utveckling av mätutrustning

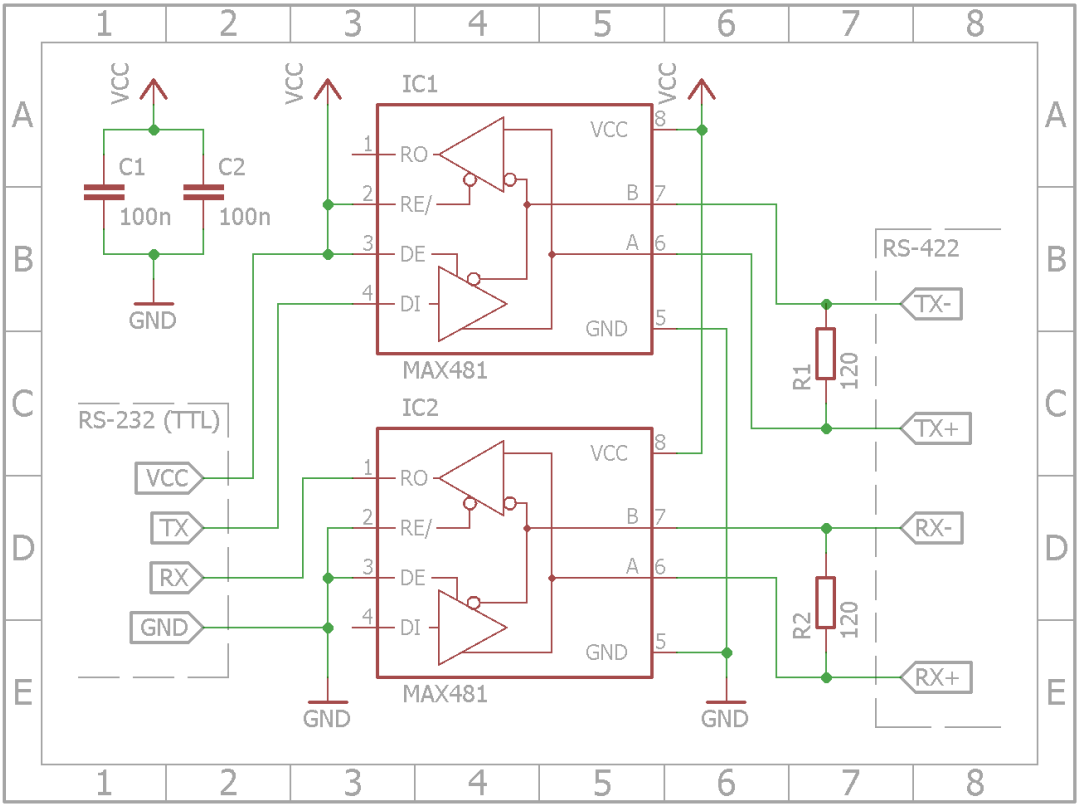
En optisk avståndsmätare baserad på laserljus kommer att användas för detta projekt då denna har fördelen att ljuset är fokuserat. Dessutom är denna variant den enda typ av optisk avståndsmätare som gruppen kunnat finna som uppfyller specifikationerna. Den avståndsmätare som valts är instrumentet Micro-Epsilon optoNCDT ILR1181-30(22). Denna laser uppfyller enligt produktbladet den satta kravspecifikationen förutom i avseendet gällande linjäritetens osäkerhet, där denna är 5 mm jämfört med 3 mm som är det önskvärda [Micro-Epsilon, 2016a]. Dock gäller olinjäriteten för sensorn i temperaturintervallet −40 °C till +50 °C och då avståndsmätaren kommer användas under mer stabila temperaturer i intervallet 0 °C till +20 °C har gruppen ändå valt att utvärdera lasern i fråga då Sten Bergstrand på SP Sveriges tekniska forskningsinstitut kunde låna ut ett exemplar. Avståndsmätaren har dessutom en inbyggd temperatursensor, dock utan angiven mätosäkerhet, samt ett inbyggt värmeelement [Micro-Epsilon, 2016b].

Avståndsmätaren optoNCDT ILR finns i ett antal modeller med olika specifikationer. Den modell som SP Sveriges tekniska forskningsinstitut lånade ut till gruppen kommunicerar med seriell data över RS-422-standarden, medan andra varianter använder sig av RS-232 [Micro-Epsilon, 2016b]. Den stora fördelen med att använda RS-422 är framförallt den minskade störningskänsligheten och det därmed betydligt längre maximala överföringsavståndet. Detta beror på att kommunikationen sker med hjälp av differentiell signalering över partvinnad kabel, varför en stor del av eventuella störningar kan släckas ut i mottagarenheten. Nackdelen är att utrustning för att koppla RS-422 till en dator är dyr och kan vara svår att finna. För RS-232 finns färdiga enkla kablar att köpa för att koppla till en USB-port. Dessa kommer i ett antal olika varianter, men en kabel för kommunikation med RS-232 vid TTL-nivåer (0–5 V) fanns att tillgå. Kabeln är egentligen en omvandlare från USB till RS-232 och bygger på Prolifics PL2303-krets. Förutom dubbelriktad kommunikation fås även en +5 V matning och jord i RS-232 änden.

3.1 Omvandlare mellan RS-232 och RS-422

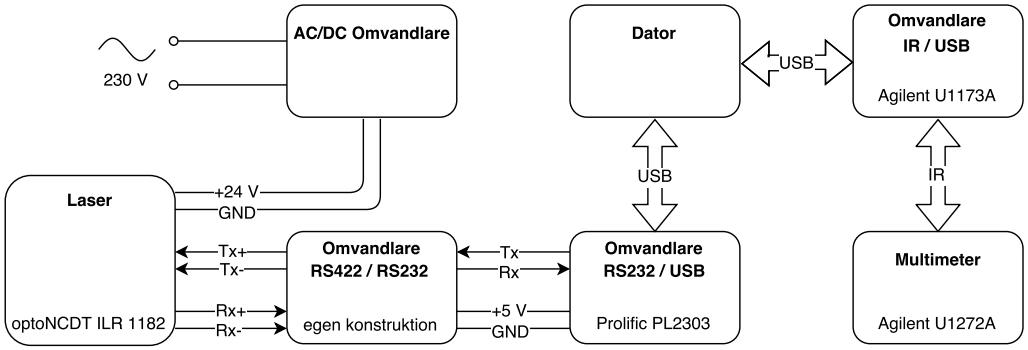
För att kunna koppla ihop de båda standarderna skapades en omvandlare baserad på kretsen Maxim MAX481, som är en transceiver för RS-422. Ett kretschema för hur denna är uppbyggd finns i Figur 3.1. Omvandlaren spänningsmatas från datorns USB-kontakt via den tidigare nämnda kabeln.

Vid vissa mätningar loggades den externa temperaturen som ett komplement till avståndsmätarens inbyggda temperaturmätare. Detta sker via en Agilent U1272A



Figur 3.1: Kretsschema för omvandlare mellan RS-232 (TTL) och RS-422.

multimeter vars termoelement är monterat på lasermätarens chassi och som kopplas till datorn via en IR-port. Agilent tillhandahåller en kabel för detta ändamål med beteckningen U1173A. Ett blockschema över hur kommunikationen sker mellan dator, laser och multimeter finns i Figur 3.2. Sammanfattningsvis gör denna lösning att RS-422 kan användas för det längre avståndet medan RS-232-sträckan kan minimeras till under 1 m.



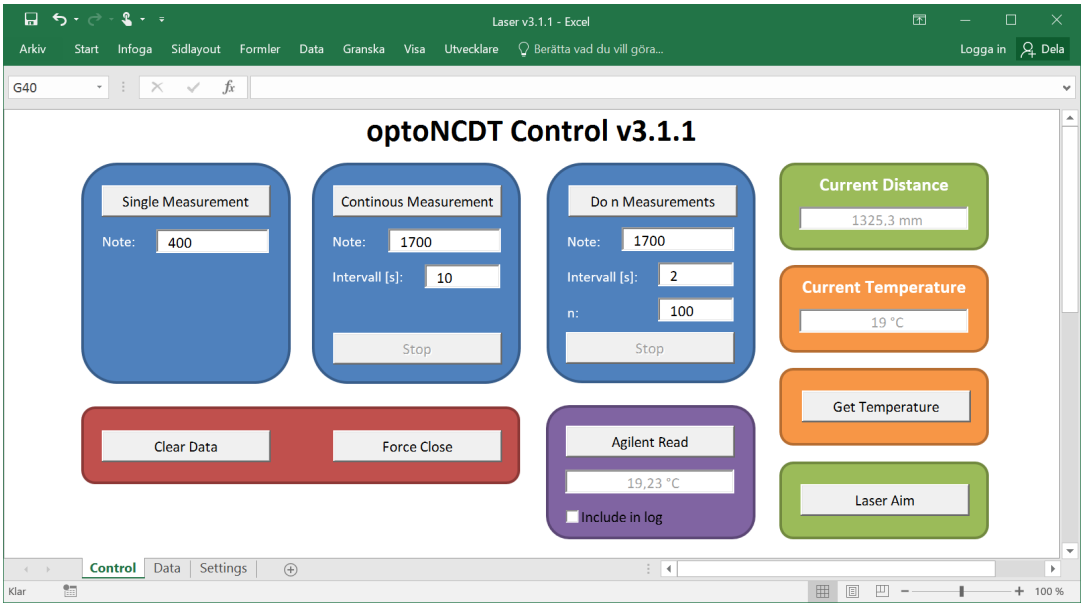
Figur 3.2: Blockschema över dataöverföringen från laser och multimeter till dator.

3.2 Mjukvara för insamling av mätdata

Den till avståndsmätaren medföljande mjukvaran har inte tillräckligt bra funktioner för att tillfredsställande logga de tänka mätserierna. Därför utvecklades en ny kommunikations- och datainsamlingslösning programmerad med *Visual Basic for Applications* (VBA) i Excel. Programvalet beror på önskemål från Sveriges tekniska forskningsinstitut om att eventuellt återanvända vår utvecklade mjukvara. Som komplement till kommunikationen med lasersensorn programmerades även funktioner för att hämta data gällande temperatur från multimetern. Mjukvaran bygger på funktioner hämtade från `http://people.uwplatt.edu/~evensenh/Hal_Evensens_Homepage/VBA_Communication.html` som i sin tur uttnyttjar kommunikationsfunktioner i *Microsoft Windows API*.

Excelprogrammets grafiska gränssnitt går att se i Figur 3.3 och består av tre flikar, som kan ses längst ner till vänster i figuren. Dessa är *Control*, *Data* och *Settings*. *Control*-fliken har ett antal olika funktioner för att styra mätutrustningen. Programmet kan göra enskilda mätningar, kontinuerligt göra mätningar med ett inställbart intervall, samt göra n antal mätningar med valt antal sekunders mellanrum. Vidare går det att göra enskilda mätningar för den inbyggda respektive den externa termometern samt aktivera kontinuerlig ljuspunkt från lasern för att ha möjlighet att ställa in träffpunkt.

När mätningar görs så sparas dessa i fliken *Data* med varje ny mätning på en ny rad. Mätningarna taggas med tiden då de skedde samt den eventuella anteckning som gjorts i *Note*-fältet. Den sista fliken, *Settings*, är för inställningar och där väljs bland annat vilken COM-port och bithastighet som datorn skall använda för att kommunicera med de externa enheterna.



Figur 3.3: Skärmdump på den utvecklade laserstyrningen i Excel.

4

Metod och resultat av experiment

För att utvärdera om den optiska avståndsmätaren fyller den av gruppen uppsatta kravspecifikationen utförs experiment i en kontrollerad miljö för att skatta mätosäkerheten. De faktorer som ska undersökas är instrumentets repeterbarhet, linjäritet samt ett eventuellt temperaturberoende. Vid mätningar av avståndsmätarens prestanda krävs stabilitet och möjlighet att underlätta utförandet av experimenten och baserat på detta användes en försöksrigg. Försöksriggen består av en 5 m lång järnprofil med fästen för en reflektor i ena änden och en flyttbar släde med ett roterbart fäste för lasern. Ovanpå järnprofilen sitter en talmeter monterad som referens. En ritning av mätriggen kan ses på denna rapports omslag.

Avslutningsvis görs en längre mätserie med lasern monterad i mareografbrunnen i Onsala. Detta för att få en bild av hur den testade optiska avståndsmätaren förhåller sig till de instrument som sitter monterande i brunnen idag.

4.1 Repeterbarhet

För mätningarna beskrivs först metod och sedan redovisas resultatet.

4.1.1 Metod

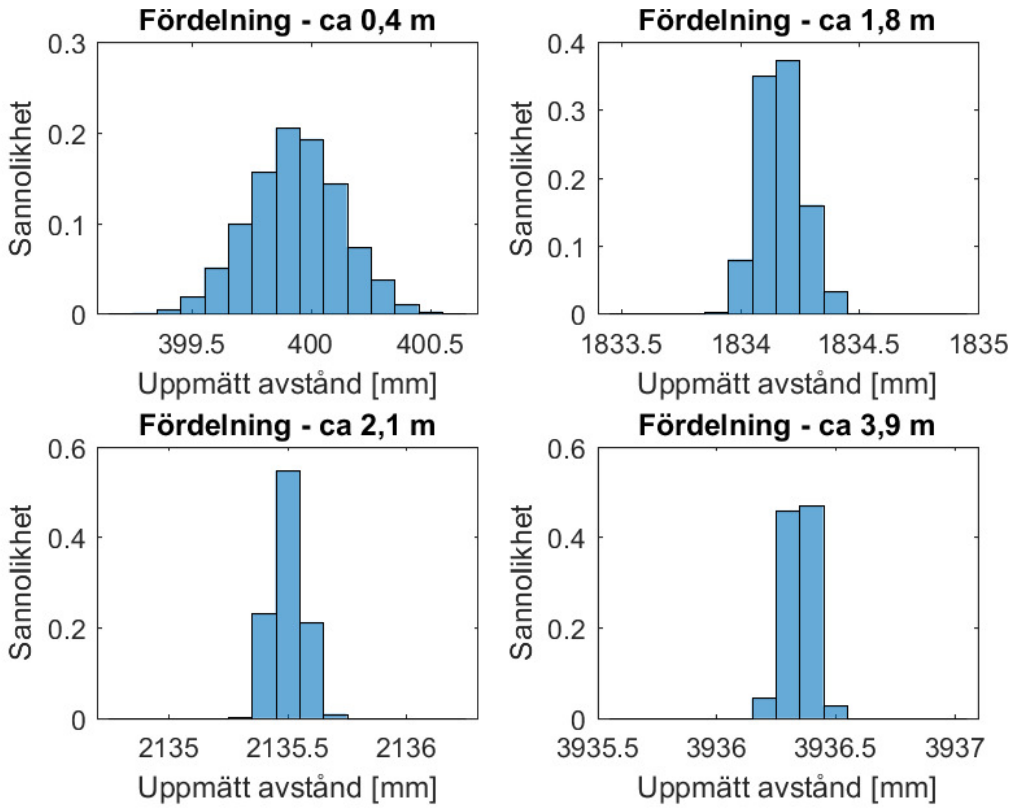
En del av avståndsmätarens mätosäkerhet är repeterbarheten. För att kunna avgöra hur stor denna är utförs ett stort antal mätningar på olika kända avstånd. För denna tillämpning är de aktuella avstånden 0,4 – 4,0 m. Därför ska sådana mätningar minst göras på det minsta och det största av dessa avstånd. Detta då det finns en risk att repeterbarheten inte är lika stor vid alla avstånd. Tillverkaren av lasern anger repeterbarheten till mindre eller lika med 0,5 mm [Micro-Epsilon, 2016a], men detta gäller över hela mätområdet: 0,1 - 150,0 m. Det är möjligt att repeterbarheten är betydligt bättre inom det lilla mätområde som är aktuellt här. Repeterbarheten testas genom att göra ett flertal mätningar på ett konstant avstånd under en kortare tidsperiod, till exempel var tionde sekund under ett antal timmar. Det är en fördel om temperaturen är så konstant som möjligt när dessa mätningar görs. För att se vilket fall som har den sämsta repeterbarheten är det lämpligt att upprepa försöket vid olika temperaturer och avstånd. Med hjälp av Ekvation (2.1) kan mätvärdenas standardavvikelse beräknas vilket beskriver mätutrustningens repeterbarhet.

4.1.2 Resultat

Fyra mätserier har genomförts där repeterbarheten har testats på olika distanser under olika långa tidsserier. De distanser som har testats är inom intervallet 0,4 – 4,0 meter. Dessa fyra mätningar ger standardavvikelser enligt Figur 4.1. Denna figur visar också att mätningarna är approximativt normalfördelade.

Tabell 4.1: Mätseriernas repeterbarheter.

Cirka avstånd [mm]	Standardavvikelse, σ [mm]	3σ [mm]
400	0,20	0,59
1800	0,10	0,29
2100	0,07	0,21
3900	0,06	0,19



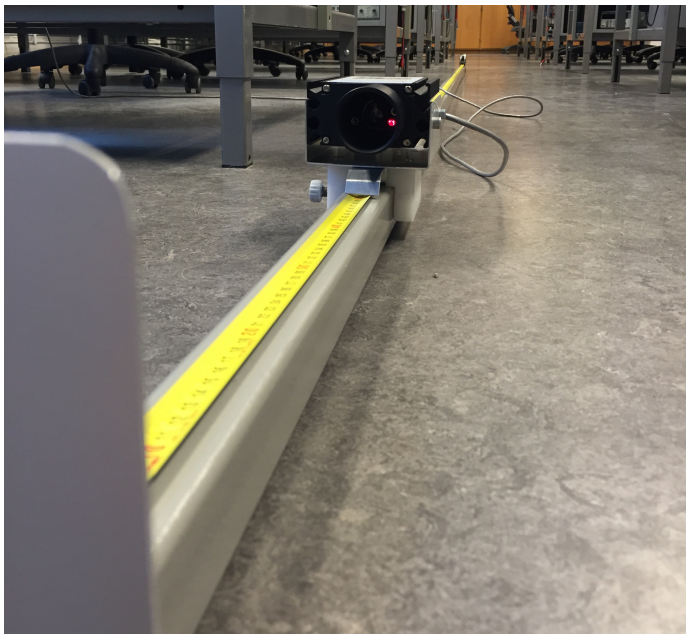
Figur 4.1: Fördelningen av mätdata för att studera repeterbarheten.

4.2 Linjäritet

För linjäritetsexperimenten beskrivs först metoden och sedan redovisas resultaten.

4.2.1 Metod

Linjäriteten hos avståndsmätaren undersöks genom att samla in minst 100 mätvärden vid 20 olika avstånd mellan 0,5 m och 4,5 m, utförda i slumpmässig ordning. Mätningarna sker med lasern monterad i mätriggens släde och reflektorn är placerad på mätriggens kortsida som ses i Figur 4.2. Vid varje sampling måste lasern träffa samma punkt på reflektorn. Mätningarna utförs slumpmässigt för de olika avstånden för att undvika eventuella mätfel som följer med exempelvis konstant ökande eller minskande avstånd samt ökad temperatur till följd av lång användningstid. Avståndet mäts även med talmeter som referens mot det med lasern uppmätta värdet.

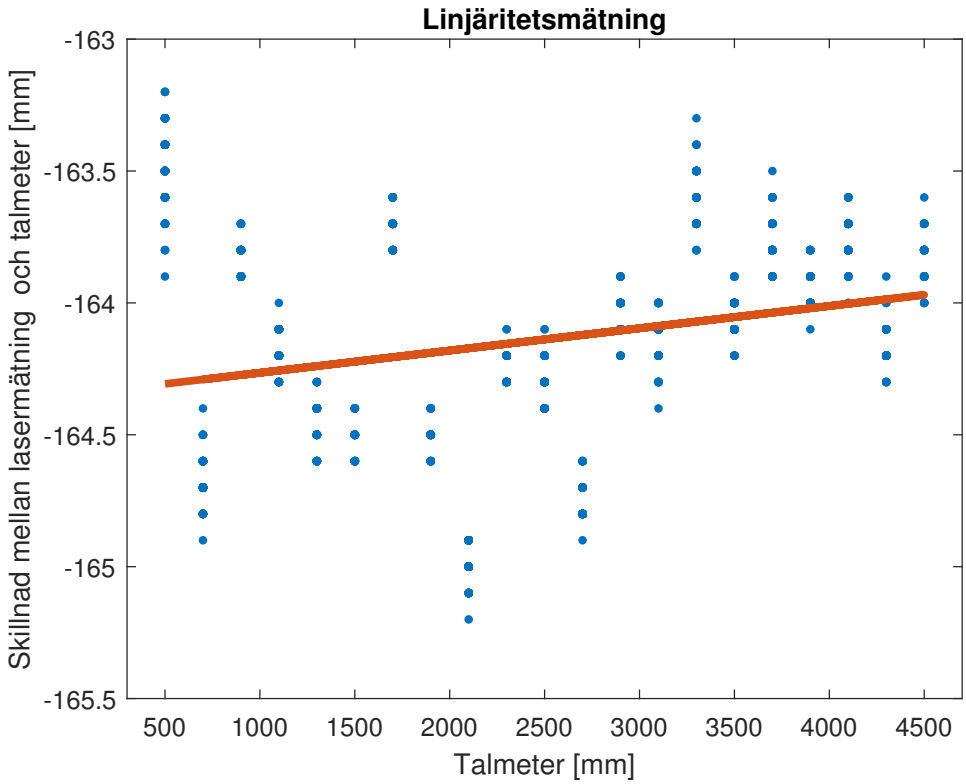


Figur 4.2: Foto på mätuppställning.

4.2.2 Resultat

Mätningarna för linjäriteten genomfördes enligt metoden ovan med 100 mätningar på varje avstånd. Detta resultat kan ses i Figur 4.3. På mätriggen fanns en talmeter som referens. Denna var förskjuten ca 164 mm jämfört med laserns referenspunkt och är anledning till detta värde på figurens y-axel.

Vid mätningarna upptäcktes en skarv på mätriggen vid ca 2400 mm från reflektorn som gjort att mätningar framför och bakom denna skarv har gett olika träffpunkter på reflektorn. För att träffa på samma höjd kan lasern vinklas svagt upp eller ner vid de mätavstånden. När denna vinkel (v) jämförs med en referensvinkel (vid det kortaste mätavståndet) kan förhållandet mellan den uppmätta (d_u) och sannadistansen (d_m) beskrivas enligt Ekvation (4.1).



Figur 4.3: Mätserie för linjäritetstest grupperade efter talmeterns referensvärde.

$$\cos v = \frac{d_m}{d_u}, \tag{4.1}$$

Den maximala vinkelskillnaden mellan olika mätpunkter uppmättes med hjälp av en inclinometer (Wyler Clinotronic PLUS) till $0{,}30° \pm 0{,}02°$. Detta ger ett maximalt felbidrag på $\Delta d = d_u - d_m = 0{,}06$ mm då avståndet mellan laser och reflektor är 4500 mm. Liknande värden bör gälla för de justeringar som gjorts i horisontalled. Totalt blev olinjäriteten 0,027 % i enlighet med Ekvation (2.4) samt att den linjära skillnaden mellan 0,4 och 4,0 m var 0,3 mm i Figur 4.3.

4.3 Temperaturberoende

Först beskrivs metod och sedan resultat.

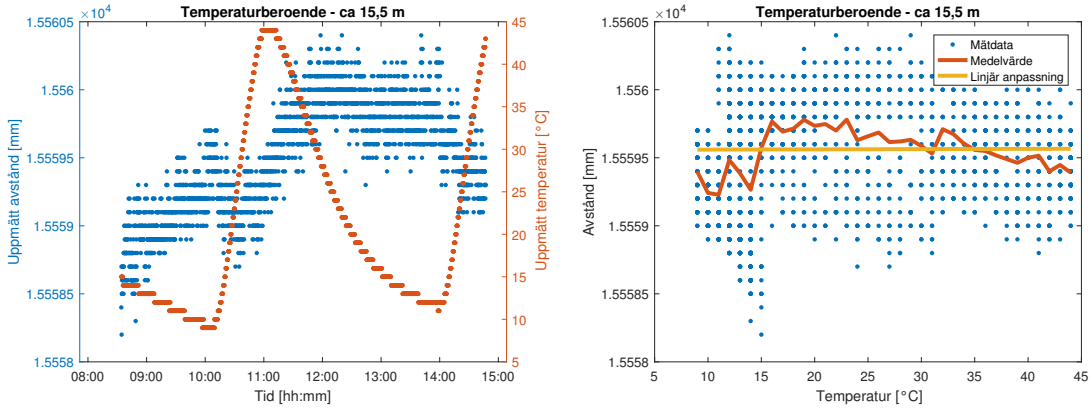
4.3.1 Metod

Laserns temperaturberoende undersöks genom mätningar på två olika avstånd, 15,5 m samt 36,0 m. Dessa två längder är valda för att undersöka huruvida ett temperaturberoende förändras linjärt med avstånd. Hypotesen är att ju kortare avståndet är, desto mindre mätosäkerhet uppnås.

Mätningarna sker utomhus med lasern placerad i ett isolerat värmeskåp som till en början är avstängt och har fått anpassa sig till omgivningens temperatur. Detta för att mätningen ska kunna starta vid en temperatur nära den lägsta uppmätta i mareografbrunnen. Därefter ökas temperaturen upp till 40 °C genom att slå på värmeskåpets uppvärmningsfunktion. Denna temperatur är 10 °C under laserns maximal arbetstemperatur enligt databladet [Micro-Epsilon, 2016b].

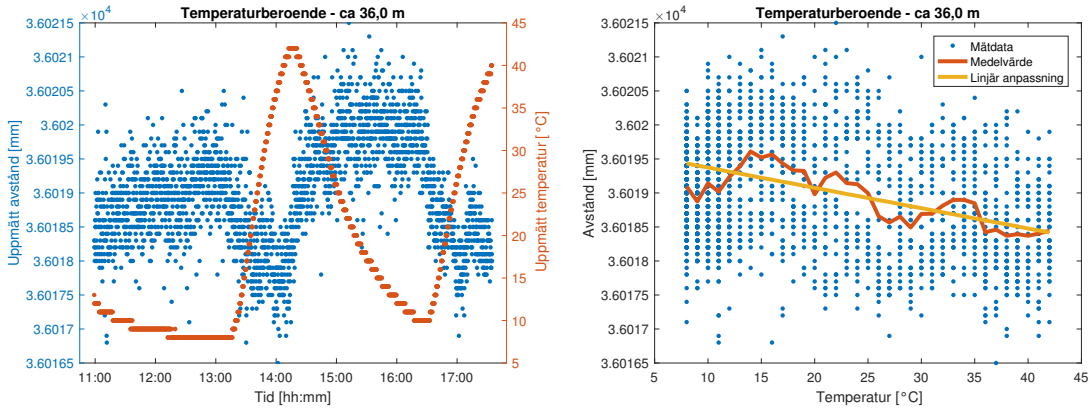
4.3.2 Resultat

Vid mätningar av laserns temperaturberoende utfördes samma test vid två olika avstånd, ca 15,5 m och 36,0 m. Resultaten för de två olika mätningarna kan ses i Figur 4.4 samt Figur 4.5. I försöket på det längre avståndet kan ett svagt temperaturberoende eventuellt ses, men så är inte fallet på den kortare sträckan.



(a) Rådata med avseende på tid **(b)** Medelvärde

Figur 4.4: Mätning av temperaturberoende på ca 15,5 m avstånd.



(a) Rådata med avseende på tid **(b)** Medelvärde

Figur 4.5: Mätning av temperaturberoende på ca 36,0 m avstånd.

Enligt Micro-Epsilon [Micro-Epsilon, 2016a] ska lasern fungera mellan −10 °C och +50 °C (utan påslaget värmeelement) och inom detta intervall ha en linjäritet på ±5 mm. Mellan 15 °C och 30 °C ska linjäriteten vara ±2 mm [Micro-Epsilon, 2016a].

4.4 Reflektor

För experimentet beskrivs först metoden och sedan resultatet.

4.4.1 Metod

Reflektorn har utformats som en platta som reflekterar laserns puls och ett mot plattan vinkelrätt lod som ska stabilisera reflektorn och även hindra det från att tippa över. Massan hos reflektorn är 72 g och plattans diameter är 9 cm. Då lodet har en liten volym jämfört med plattan antas denna inte påverka beräkningen av densiteten.

Testen av reflektorns yta genomförs med den kortaste samplingstiden (100 ms) som lasern kan genomföra. På detta sätt undersöks om reflektionen är så pass bra att tillräckligt mycket energi reflekteras innan samplingstiden är slut. Detta test utfördes både i mörker, för att likna mareografbrunnens tillstånd, samt i ett ljust rum. Anledningen till tester i ljusa förhållanden är att testerna kommer genomföras i dagsljus samt att man vill att lasern ska fungera även om man lyfter på mareografbrunnens lock.

4.4.2 Resultat

Beräknat för det datum då densiteten var maximal respektive minimal enligt Tabell 2.2 och ekvationer i Avsnitt 2.4 blir största skillnaden i höjdled 0,089 mm. De tester som bedrivits kopplat till reflektorns förmåga att reflektera laserns ljus finns sammanfattade i Tabell 4.2

Tabell 4.2: Reflektionstester på olika material.

Färg	Material	OK ljust	OK mörkt
Svart	Tejp	Ja	Ja
Vit	Väggfärg, matt	Ja	Ja
Grå	Plast	Ja	Ja
Silver	Metall, blank	Nej	Nej
Silver	Metall, matt	Ja	Ja

Av tabellen följer att alla material som testats utom blank metall fungerade som reflektor. En matt vit färg står rekommenderad i databladet från Micro Epsilons [Micro-Epsilon, 2016a].

4.5 Utvärdering i mareografbrunn

Denna sektion innehåller en metodbeskrivning och resultat för mätningar i Onsala rymdobservatoriums mareografbrunn.

4.5.1 Metod

Ett plaströr med diametern 10 cm monterades vertikalt i mareografbrunnen. Längden på röret var tillräckligt så att den nedre änden alltid befinner sig under vattenytan och samtidigt är hanterbar vid brunnens topp där lasern monterades på rörets övre del. Laserstrålen samplas varannan sekund och reflekteras mot en vit reflektor som flyter på vattnet. Rörets diameter medför att någon punkt på reflektorn alltid befinner sig mitt i röret där laserstrålen träffar. Genom röret går även en fiskelina fastsatt i reflektorn och i rörets övre del för att lätt kunna få upp denna.

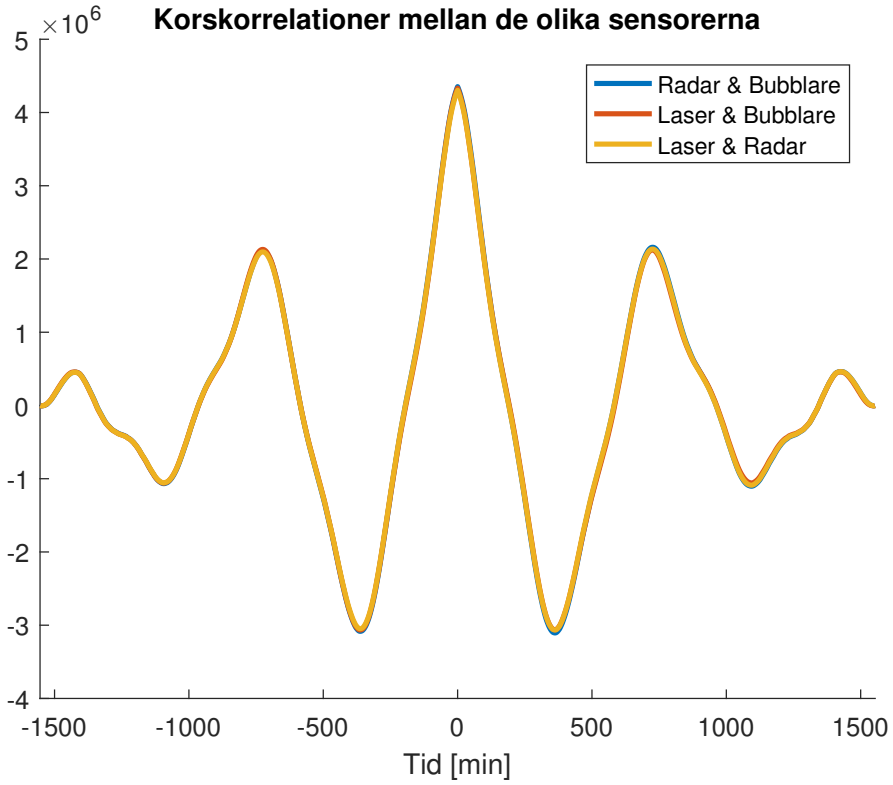
4.5.2 Resultat

Mätningarna i mareografbrunnen i Onsala genomfördes med samma mjukvara som tidigare dock med en annan dator som inte var uppkopplad till internet. Detta medförde att tiden för lasern i datorn inte överensstämde med de andra sensorernas tider, som är kopplade till en gemensam loggenhet. Tiden kunde justeras med hjälp av en korskorrelation för att avgöra hur mycket dataserierna borde förskjutas gentemot varandra för bästa anpassning. Den tidsjusterade korskorrelation ses i Figur 4.6.

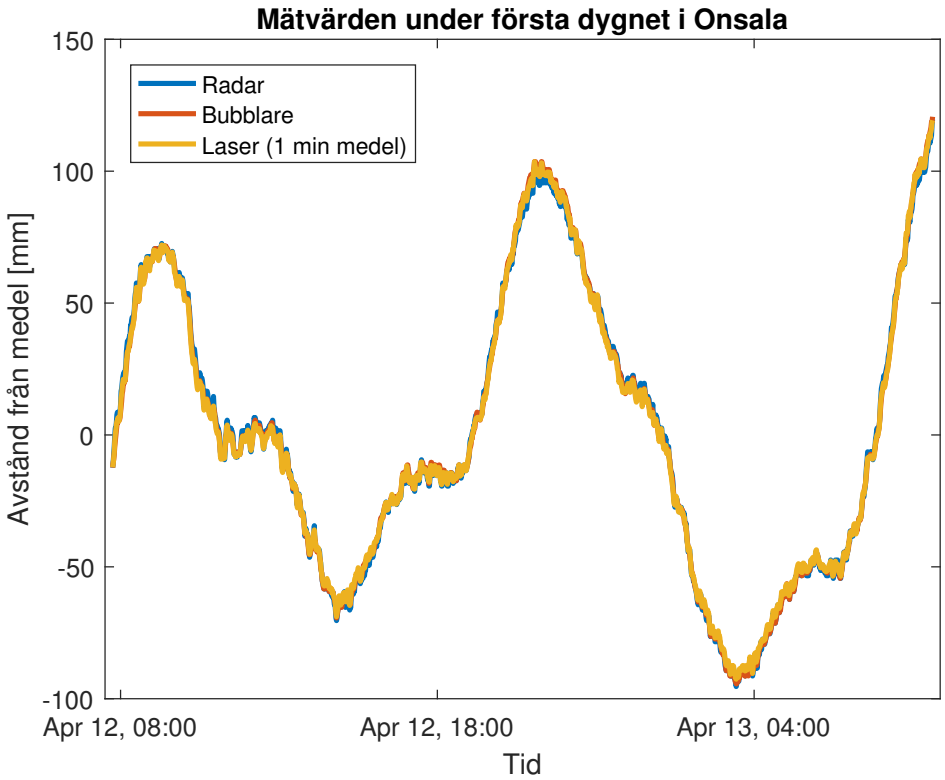
Resultatet av mätningarna efter tidsjusteringen går att se i Figur 4.7. Denna figur visar avståndet till instrumentets eget medelvärde där laserns tid är förskjuten en minut framåt och där laserns och radarns värde är inverterade då lasern och radarn mäter ovanifrån mot vattenytan. Detta för att enklare kunna jämföra instrumenten sinsemellan. Vidare har korrelationskoefficiententerna beräknats enligt Avsnitt 2.5, där resultatet presenteras i Tabell 4.3. Alla tre mätserer korrelerar starkt till varandra, starkast när lasern är en av sensorerna.

Tabell 4.3: Korrelationskoefficienten mellan de olika sensorerna.

Sensorer	Korrelationskoefficienten, r
Radar & bubblare	0,999 360
Laser & bubblare	0,999 775
Laser & radar	0,999 477



Figur 4.6: Korskorrelation mellan radar, bubblare och laser.



Figur 4.7: Mätvärden från respektive medelvärde över tid i mareografen.

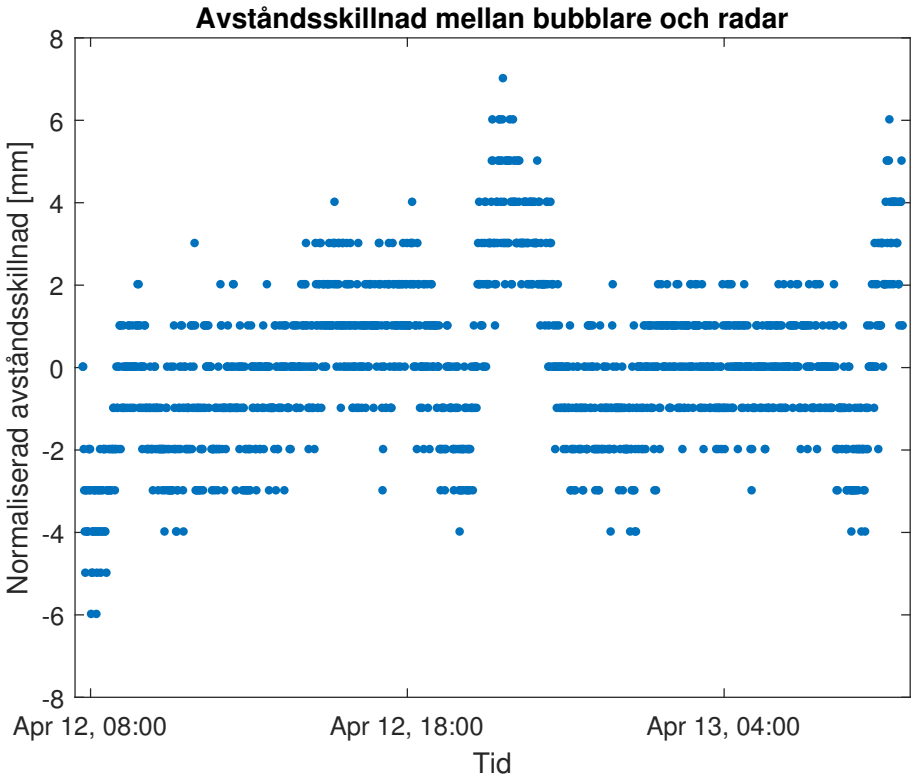
Skillnaden i avstånd mellan de olika mätmetoderna, normaliserade som i Figur 4.7, presenteras i Figur 4.8 – 4.10. Av figurerna kan ses att nivåskillnaden mellan bubblare och radar är störst med värden runt 7 mm, medan den optiska avståndsmätaren och de två systemen inte har en större differens sinsemellan än 5 mm. I Figur 4.11 kan fördelningen av avståndsskillnaden ses för jämförelser mellan alla tre sensorer. Denna fördelning kan beskrivas som normalfördelad med en standardavvikelse på $\sigma_{BR} = 1{,}92$ mm, $\sigma_{BL} = 1{,}27$ mm och $\sigma_{RL} = 1{,}72$ mm, där subskripten står för bubblare (B), radar (R) respektive laser (L). I och med att differensen mellan två mätserier är normalfördelad och är en linjärkombination enligt Ekvation (2.8) kan tre uttryck på formen från Ekvation (2.9) ställas upp. Dessa kan ses i Ekvation (4.2).

$$\begin{cases} \sigma_{BR}^2 = \sigma_B^2 + \sigma_R^2 \\ \sigma_{BL}^2 = \sigma_B^2 + \sigma_L^2 \\ \sigma_{RL}^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 \end{cases} \tag{4.2}$$

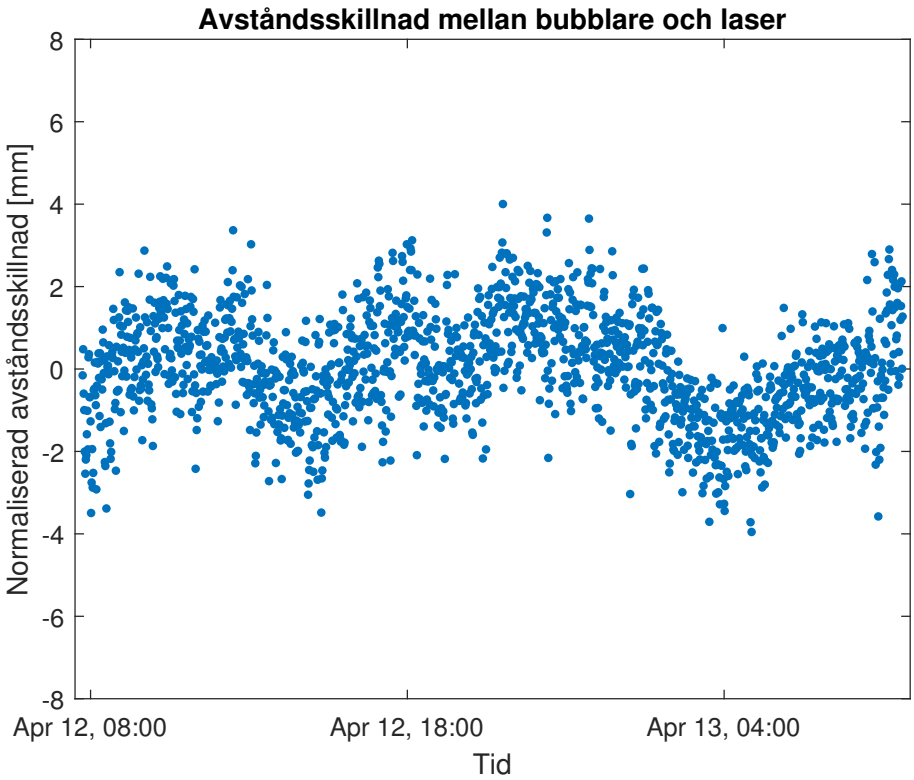
Ekvationssystemet (4.2) består av tre ekvationer och tre okända och kan därmed lösas för att få fram standardavvikelserna för varje enskild sensor. Resultatet av denna lösning kan ses i Tabell 4.4.

Tabell 4.4: Standardavvikelser för varje enskild sensor.

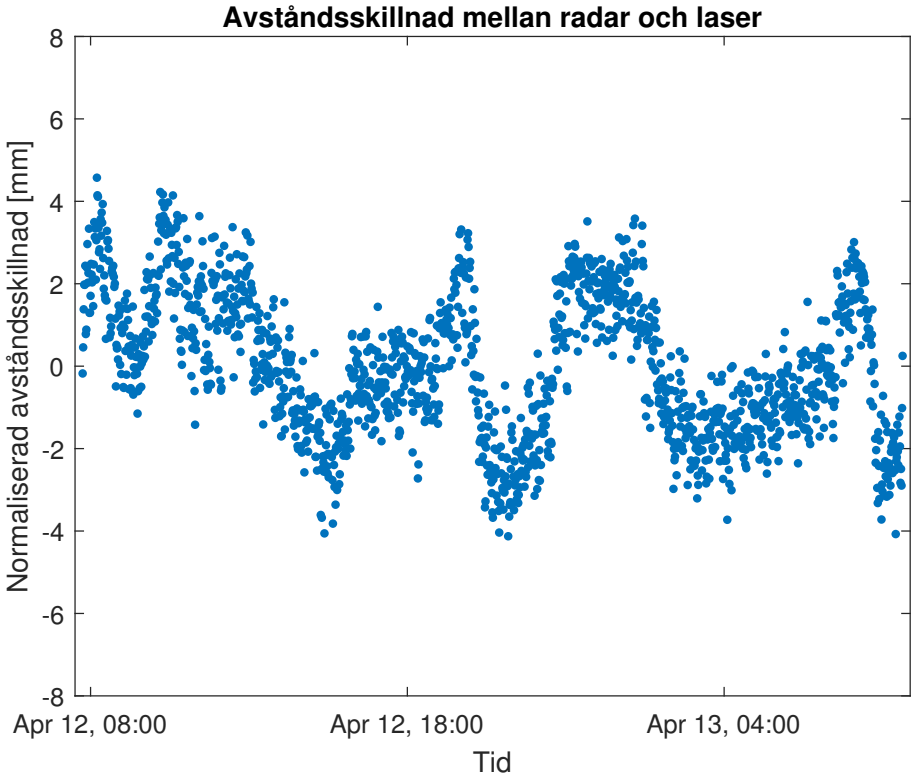
Mätutrustning	σ [mm]
Bubblare	1,09
Radar	1,59
Laser	0,67



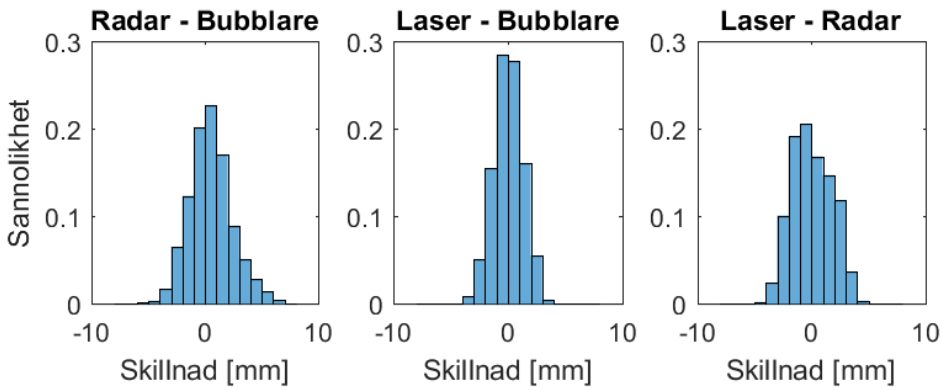
Figur 4.8: Skillnaden i havsnivå mätt med bubblare och radar.



Figur 4.9: Skillnaden i havsnivå mätt med bubblare och laser.



Figur 4.10: Skillnaden i havsnivå mätt med radar och laser.



Figur 4.11: Fördelningsdiagram av skillnaderna mellan radar, bubblare och laser.

5

Diskussion och slutsats

Syftet med detta arbete har varit att utvärdera en metod för att mäta havsnivån med ett optiskt mätinstrument. Att öka noggrannheten på dessa mätningar är viktigt ur flera perspektiv, särskilt med tanke på de klimatförändringar som samhället står inför. När instrumentet jämfördes med de befintliga sensorer som idag används för detta ändamål på Onsala rymdobservatorium, visade det sig att lasern som metod stod sig bra. Förklaringar till detta kan vara laserns riktade ljusstråle som minskar riskerna för reflektioner i rörets väggar samt att ingen hänsyn behöver tas till lufttryck. Med en skattad standardavvikelse på endast $\sigma_L = 0{,}67$ mm var den optiska avståndsmätaren den mest stabila av de testade sensorerna över tidsperioden ett dygn.

Bubblare utnyttjar bland annat tryckskillnader och vattnets densitet för att beräkna vattennivån. Vid beräkningar i denna rapport har dock inte den exakta nivån uppmätt av bubblarna beräknats med avseende på den exakta densiteten i mareografbrunnen. Istället har en nollnivå beräknats från medelvärdet av bubblarens uppmätta nivå under ett dygn. I Figur 4.7 kan det ses hur väl denna metod fungerar och hur samma metod gällande de andra sensorerna står sig mot varandra.

Även reflektorns höjdläge har ett beroende av densiteten. Beräkningarna i denna rapport tyder på att den maximala höjdskillnad vid olika densiteter hos havsvattnet är relativt liten, 0,089 mm. Det finns möjligheter att påverka denna för att ytterligare minska reflektorns inverkan på mätningarna. Detta kan göras genom att minska reflektorns vikt, då den nu är onödigt tung, samt öka arean enligt Ekvation (2.7). Även fiskelinan som löper genom röret för att kunna dra upp och rengöra reflektorn, kan påverka resultatet av mätningarna. Ett förslag på förbättring kan vara att istället använda någon form av magnetisk lösning för att hämta upp reflektorn.

För tester som utfördes med mätriggen har felkällor upptäckts som har påverkat mätningarna. Ett exempel är en skarv 2400 mm från reflektorn. Det maximala felbidrag denna gett upphov till beräknades till absolut max 0,12 mm baserat på vinkelskillnader beroende på träffpunkt på reflektorn. Detta gör att mätosäkerheten beroende på olinjäriteten maximalt är 0,42 mm inom det aktuella spannet. Det är dock troligt att detta mått är lägre än så och att trenden som syns i Figur 4.3 beror på svårigheter med mätningarna, så som avläsning av talmeter och felet med träffbilden.

Vid de repeterbarhetstester som gjorts visar det sig att repeterbarheten är sämre vid kortare avstånd än vid längre, där $\sigma_{400\,\mathrm{mm}} = 0{,}20$ mm och $\sigma_{3900\,\mathrm{mm}} = 0{,}06$ mm. Denna skillnad kan eventuellt hänföras till svårigheterna att mäta korta avstånd med optiska sensorer med överlappande pulser och väldigt korta tidspann

som skall mätas.

Vidare finns i manualen för sensorn beskrivet att det kortaste avståndet vid sämre reflektorförhållanden är 0,4 m. Vid experiment i labbmiljö användes en svart reflektor i ett ljust rum. Detta kan vara en förklaring till den märkbart sämre repeterbarhet vid det kortaste avstånden jämfört med de andra mätserierna. Hänsyn togs till detta vid utvärderingen i mareografbrunnen då en vit reflektor användes. För att öka noggrannheten ytterligare kan lasern flyttas uppåt så att det aktuella mätområdet hamnar i ett område som har bättre repeterbarhet. Dock bör i så fall fler försök göras för att fastställa repeterbarheten när avståndet blir större än 3900 mm.

Linjäritetstesterna gjordes under kontrollerade former i labbmiljö, där temperaturen hålls någorlunda konstant. I Figur 4.3 går det att se att det finns en svag trend, det är dock svårt att säga om denna beror på lasern eller på svagheter i mätuppställning och vitt brus. Då en talmeter användes som referens är även avläsningen och noggrannheten hos denna en felkälla när upplösningen är såpass hög som i detta försök.

För att undersöka ett eventuellt temperaturberoende hos laserns mätvärden riggades en mätuppställning upp utomhus, på ett tak. Detta för att få möjlighet att komma ner till temperaturer under rumstemperatur. Ingen av de båda mätserierna visar några övertygande indikationer på att ett sådant beroende skulle finnas. Den distansmässigt längre av de båda serierna kan eventuellt visa på en svag trend, men den är för svag för att vara övertygande. Det finns också flera potentiella felkällor i försöken som kan gett upphov till dessa resultat. Sådan kan vara till exempel vind som vibrerar målytan och värmeskåpet samt den snö som tyvärr föll under försöket. Vidare försök i mer kontrollerad miljö hade varit att föredra. Om ett temperaturberoende finns borde detta vara så litet vid laserns användningsområde på maximalt 4 m att detta inte har någon betydelse.

Optisk avståndsmätning ser ut att vara en fungerande och noggrann metod för mätning av havsnivå, förutsatt att den fungerar även över tid. De mätvärden som kommer att samlas in på Onsala rymdobservatorium framöver kan användas för att om ett år avgöra om systemet är pålitligt över längre tid och för att undersöka hur utrustningen påverkas av de temperaturförändringar som sker. Dessutom bör det plaströr som för närvarande är monterat i mareografbrunnen bytas ut mot exempelvis ett kopparrör för att minska eventuell påväxt och undvika underhåll vid ett tidsmässigt längre experiment. Mätningar från den optiska avståndsgivaren bör sedan jämföras med de andra sensorerna i mareografbrunnen för att undersöka deras mätosäkerhet relativt varandra, men även med andra oberoende instrument som GNSS under en viss epok för att ytterligare undersöka laserns position och tillförlitlighet i världsrymden.

Litteraturförteckning

[Ågren, 2009] Ågren, J. (2009). *Beskrivning av de nationella geoidmodellerna SWEN08_RH2000 och SWEN08_RH70*. Lantmäteriet.

[Amann m.fl., 2001] Amann, M.-C., Bosch, T., Lescure, M., Myllylä, R., och Rioux, M. (2001). Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, 40(1):10–19.

[Bengtsson, 2012] Bengtsson, L. (2012). *Elektriska mätsystem och mätmetoder*. Studentlitteratur, Lund, 1. uppl. edition.

[Berkovic & Shafir, 2012] Berkovic, G. och Shafir, E. (2012). Optical methods for distance and displacement measurements. *Adv. Opt. Photon.*, 4(4):441–471.

[Campbell Scientific, 2015] Campbell Scientific (2015). Datasheet Campbell Scientific CS475.

[Hammarklint, 2009] Hammarklint, T. (2009). *Havsvattenstånd vid svenska kusten*. SMHI, Norrköping, Sverige, 41 edition. Faktablad 41.

[Hofmann-Wellenhof m.fl., 2007] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., och Wasle, E. (2007). *GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.

[IOC, 2006] IOC (2006). Manual on sea-level measurements and interpretation, volume iv : An update to 2006. *IOC Manuals and Guides No.14, vol. IV ; JCOMM Technical Report No.31; WMO/TD. No. 1339*.

[Jivall & Lidberg, 2000] Jivall, L. och Lidberg, M. (2000). Sweref 99–an updated euref realisation for sweden. In *EUREF, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF)*, pages 167–175.

[Kaplan & Hegarty, 2005] Kaplan, E. och Hegarty, C. (2005). *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house.

[Micro-Epsilon, 2016a] Micro-Epsilon (2016a). Datasheet optoncdt ilr 1181-30 / 1182-30 / 1183/30.

[Micro-Epsilon, 2016b] Micro-Epsilon (2016b). Instruction manual - optoncdt ilr 1181 / 1182.

[Millero m.fl., 1980] Millero, F. J., Chen, C.-T., Bradshaw, A., och Schleicher, K. (1980). A new high pressure equation of state for seawater. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 27(3):255–264.

[Rydén, 2014] Rydén, J. (2014). *Stokastik för ingenjörer*. Studentlitteratur, Lund, 1. uppl. edition.

[Sandegren, 1946] Sandegren, R. (1946). Svenska nivåförändringsproblem. *Meddelelser fra Dansk Geologisk Förening II*.

[Stocker m.fl., 2013] Stocker, T. F., Dahe, Q., och Plattner, G.-K. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. *Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers (IPCC, 2013).*

[Wahlbom, 2015] Wahlbom, J. (2015). Evaluation of sea level sensors at the onsala space observatory.