



# Vandmiljøovervågning med droner

Et studie af droners anvendelighed til monitorering af danske søers klorofyl  $a$ -indhold

Kandidatspeciale i Naturgeografi Aalborg Universitet 17. juni 2016

Jan Christian Pedersen Magnus Greve Laursen Martin Kauffmann Pedersen



**Titel:** Vandmiljøovervågning med droner – Et studie af droners anvendelighed til monitorering af danske søers klorofyl  $a$ -indhold

**Tema:** Kandidatspeciale

**Projektperiode:** 1.2.16 – 17.6.16

**Projektgruppe:** NG10-1

**Forfattere:**

Jan Christian Pedersen

---

Martin Kauffmann Pedersen

---

Magnus Greve Laursen

---

**Vejleder:** Morten Lauge Pedersen

**Bivejleder:** Ronni Fjordvald Søe

**Antal kopier:** 6

**Sider:** 71

**Bilag:** Elektronisk bilag

**Afsluttet:** 17. juni 2016



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

### Synopsis:

Dette projekt undersøger droners anvendelighed til monitorering af klorofyl  $a$ -indhold i danske søer. Incitamentet for at beskæftige sig med droner som dataindsamlingsmetode, findes i regeringens ønske om, at fremme tidseffektive metoder til implementering af Vandrammedirektivet.

Klorofyl  $a$  angives generelt som sigende for økologisk kvalitet i de danske søer, hvorfor netop denne parameter er undersøgt. Klorofyl  $a$ -indholdets udvikling kan være en dynamisk proces, som især i næringsrige søer kan ændres dramatisk henover sommerhalvåret.

Undersøgelsen havde initierende fokus på bestemmelsen af økologisk tilsand i to midtjyske søer, Hummelsø og Velling Igelsø. Fokus ændredes dog i takt med tekniske udfordringer, og rettedes således mod metoden til bestemmelse af klorofyl og hvordan denne kan forbedres ved hjælp af droner.

Til bestemmelsen af klorofyl  $a$  ud fra droneindsamlet data, konstrueres en algoritme der ved en regressionsanalyse omregner reflektans til klorofylværdier. Algoritmen sammenlignes med lignende metode lavet til satellitovervågning, da datagrundlaget ikke er tilstrækkeligt til at verificere anvendeligheden. Algoritmens præcision kan ikke stadfæstes, men indikerer en vis brugbarhed, der kan og bør optimeres med henblik på anvendelse for danske søer i fremtiden. Algoritmens usikkerhed, giver anledning til inddragelse af remote sensing erfaringer fra vandmiljøundersøgelser i andre dele af verden.

Opsummerende anbefales brugen af droner til sømonitorering, såfremt en klorofylalgoritme udarbejdes på et mere omfattende datagrundlag end, hvad denne undersøgelse kan tilbyde.



## Forord

Dette speciale er skrevet af tre kandidatstuderende på naturgeografi 10. semester ved Aalborg Universitet. Harvard referencing er anvendt som kildehenvisningsmetode. Figurer og tabeller uden kildeangivelse er udarbejdet af projektgruppen. Alle bilag er elektroniske og kan findes på rapportens sidste side.

Forfatterne vil gerne takke følgende personer for deres bidrag til udarbejdelsen af dette projekt:

- Tommy Silberg – Laborant, Institut for bioscience – Silkeborg, Aarhus Universitet.
- Jytte Dencker – Laboratoriefunktionær, Institut for byggeri og anlæg, Aalborg Universitet.
- Diana Stephansen – Adjunkt, Institut for byggeri og anlæg, Aalborg Universitet.
- Naturstyrelsen Søhøjlandet.

Følgende personer takkes for deres store bidrag til at løse de logistiske udfordringer:

- Tom Christian Pedersen & Birgitte Malvang Trude Kristensen.
- Kirsten Greve & Jens Salling Laursen.
- Keld Christian Pedersen & Anna Marie Pedersen



## Abstract

The Water Frame Directive dictates that aquatic environments in Denmark have to achieve good ecological status and prevent further reduction of the water quality. The Danish Environmental Law (Miljømålsloven), which legally implements the Water Frame Directive in Denmark, divides the country into major catchment areas. The catchment areas are covered by individual water plans that seek to ensure good ecological quality on a regional basis. (Naturstyrelsen, 2014)

The water plans use chlorophyll *a*-concentrations in evaluation of ecological quality in Danish lakes. Chlorophyll *a* is dependent on the phosphorus and nitrogen contents, which thus describes the ecological quality.

This study acknowledges the need for monitoring Danish lakes with regard to chlorophyll *a*-contents. A recent study from Closter, et al., (Upubliceret) establishes a chlorophyll algorithm made from *Landsat 8* imagery. The algorithm reaches a coefficient of determination of 47 % (Closter, et al., Upubliceret). The Danish Environmental Law covers lakes larger than five hectares, which pose a challenge when attempting to map the smallest of lakes using the 30x30 m grid that *Landsat 8* uses. This challenge leads the argument for discovering a more refined tool for data collection.

Drones are becoming more and more established in monitoring of the Danish environment. It is the goal of this project to test how drones can contribute to monitoring of Danish lakes by establishing a chlorophyll algorithm. The algorithm is based upon pictures shot with a multispectral camera. Data has been gathered from two Danish lakes in near proximity of the city of Silkeborg. Initially the two lakes were chosen due to the assumption that they represented different ecological classes. Through the analyses carried out during the project, however, it has been established that the lakes are classified as moderate and good ecological quality for Hummelsø and Velling Igel sø respectively, during the course of this project.

The lakes have been investigated on three levels specifically through *in situ* measurements, drone imagery and satellite imagery. It has been the goal to verify the drones' ability to aptly estimate chlorophyll contents in the two lakes. The verification process has been done utilizing the *in situ* measurements as the actual state of chlorophyll contents. Satellite imagery was included in order to compare the two methods of remote sensing. Technical issues regarding the drones has left the project with a distinct lack of drone data.

Therefore, the project is mainly focused on how the used methods can be improved and how other methods can contribute to monitoring of the Danish environment, instead of the results representing a short interval of time. In fact, the additional thoughts section of this report deals entirely with recent articles on how drones can be applied in a Danish context.

The projects' research question cannot solely, be answered by the investigations carried out during the project. Because of this, the additional thoughts section deals with answering the part where the results of this project falls short.

Data gathered using the drones is used to construct a chlorophyll-algorithm. The algorithm stems from a regression analysis, which examines the relationship between reflectance from multispectral imagery and *in situ* measured chlorophyll. The regression analysis reveals a coefficient of determination of 52 % that should, however, not be viewed as completely truthful for lake-chlorophyll contents. The algorithm is compared with an established method for determining the relationship between reflectance and measured chlorophyll using *Landsat 8* imagery. It is

found that the uncertainty of the algorithm established in this project can be ascribed to the lack of a substantial data quantity.

The additional thought section includes methodologies and experiences using drones around the world. In the section it is discussed how the experience with drones can be applied in a Danish context when monitoring aquatic environments.



## Indholdsfortegnelse

1	Problemanalyse .....	11
1.1	Nye teknologier til miljøovervågning .....	11
1.2	Søøkologi og udvikling .....	11
2	Projektbeskrivelse .....	16
2.1	Ændringer fra den oprindelige plan .....	16
2.2	Rapportens undersøgelsespunkter .....	17
2.3	Afgrænsning og begrebsafklaring .....	18
3	Lokalitetsbeskrivelse .....	19
3.1	Søernes placering .....	19
3.2	Hummelsø .....	19
3.3	Velling Igelsø .....	21
3.4	Opsummering .....	23
4	Anvendte metoder .....	24
4.1	Dronemetode .....	24
4.1.1	Formål .....	24
4.1.2	Missionsplanlægning .....	25
4.1.3	Behandling af dronebilleder .....	26
4.2	Landsat 8-billedbehandling .....	27
4.2.1	Formål .....	27
4.2.2	Fremgangsmåde .....	27
4.3	Klorofylalgoritme .....	28
4.4	In situ-målinger .....	29
4.4.1	Klorofyl $a$ .....	30
4.4.2	Suspenderet tørstof .....	30
4.4.3	Secchi-dybde .....	31
4.4.4	Lysintensitet .....	31
4.4.5	Total fosfor .....	32
4.4.6	Kvælstof .....	32
4.5	Litteraturstudie .....	32
4.6	Geodata og andre GIS-metoder .....	33
4.7	Statistik .....	33
4.7.1	$t$ -test .....	33
4.7.2	ANAVA enkelt faktor .....	33
4.7.3	Multivariabel statistik .....	34
5	Resultater .....	35
5.1	In situ-målinger .....	35
5.1.1	Klorofyl $a$ .....	35
5.1.2	Suspenderet tørstof .....	36
5.1.3	Secchi-dybde .....	37
5.1.4	Lysintensitet .....	38
5.1.5	Totalt fosfor .....	39
5.1.6	Kvælstof .....	40
5.1.6	Opsummering .....	41
5.2	Drone- og satellitklorofylalgoritme .....	43
5.3	Droneklorofylkort .....	45
6	Diskussion .....	47
6.1	Indsamling af data vha. droner .....	47

6.1.1	Udførelse af droneflyvning .....	47
6.1.2	Kameraopsætning .....	48
6.1.3	Billedkvalitet.....	48
6.1.4	Billedsammensætning.....	49
6.1.5	Georeferering.....	50
6.1.6	Opsummering.....	50
6.2	Databehandling af dronebilleder .....	51
6.2.1	Droneklorofylalgoritme.....	51
6.2.2	Algoritmen generelt .....	52
6.2.3	Algoritmens spredning.....	52
6.2.4	Algoritmens hældning.....	53
6.2.5	Opsummering.....	53
6.3	Kortlægning af klorofyl.....	53
6.3.1	Klorofylkortenes visuelle indtryk .....	53
6.3.2	Ændring af klorofylkortenes opløsning.....	55
6.3.3	Sandfærdigheden af klorofylkortenes værdier .....	56
6.3.4	Opsummering.....	57
6.4	Dronens anvendelighed i forhold til satellit.....	57
6.4.1	Satellitklorofylkort .....	57
6.4.2	Sammenligning med AMOS-rapportens resultater .....	59
6.4.3	In situ-forholdenes påvirkning på klorofylalgoritmerne .....	60
6.4.4	Opsummering.....	61
7	Konklusion.....	62
8	Perspektivering .....	65
8.1	Erfaringer med remote sensing som metode til miljømonitoring .....	65
8.1.1	Undersøgelser i Skandinavien .....	65
8.1.2	Erfaringer fra Syd- og Nordamerika .....	66
8.1.3	Hvordan er udenlandske erfaringer relevante i forhold til danske søer?.....	66
8.1.4	Hvad synes at være mest almindelige problematikker?.....	66
8.2	Forbedring af dataindsamling og databehandling .....	67
8.2.1	Indsamling af data.....	67
8.2.2	Databehandling.....	67
8.2.3	Udsigten for brugen af drone .....	68
9	Bibliografi.....	69

# 1 Problemanalyse

Søer er en værdifuld naturtype i den danske natur, der indeholder biologisk mangfoldighed og samtidig har stor æstetisk og rekreativ værdi. På trods af en bred interesse for søernes tilstedeværelse og fremtoning, er tilstanden i mange af disse ikke tilfredsstillende, hverken æstetisk eller miljømæssigt. Gennem de seneste 150 år er de fleste danske søer blevet beriget med store mængder næringsstoffer, der har forarmet den biologiske mangfoldighed. (Sand-Jensen, et al., 2013) Ud fra visheden om ringe økologiske forhold i søer og ferske vande generelt, er EU's vandrammedirektiv fra år 2000 implementeret for at undgå yderligere forringelse. Vandrammedirektivets bestemmelser realiseres i Danmark i form af vandplanerne, der har for øje at reducere tilførslen af stoffer, der vurderes at være et problem for vandmiljøet. (Europa-parlamentet og Rådet for Den Europæiske Union, 2000)

## 1.1 Nye teknologier til miljøovervågning

I takt med implementeringen af Vandrammedirektivet søges omkostningseffektive teknologiske metoder til overvågning af vandmiljøet. Den traditionelle overvågning af vandmiljøet med indsamling af vandprøver og efterfølgende analyse i laboratorier er ressourcetung og begrænser frekvensen af målinger og antallet af monitorerede søer. (Jørgensen, et al., 2012) Dette kommer fx til udtryk i *Regeringens handlingsplan for fremme af miljøeffektiv teknologi* fra Miljøministeriet, hvor det pointeres, at der bør sættes på miljøteknologi, der kan optimere vandmiljøovervågning (Miljøstyrelsen, 2007). Af de danske søer fokuseres der mest på de ca. 925 søer på over 5 hektar, der er nævnt i vandplanerne som følge af vandrammedirektivets implementering. I 20 % af de disse søer er tilstanden ukendt og kun i ca. 110 søer foretages systematisk tilsyn (Jørgensen, et al., 2012). Af mere effektive teknologiske tiltag, der kunne inddrages som supplement og optimering af den nuværende vandmiljømonitoring, kan nævnes *remote sensing* og dataindsamling ved hjælp af satellitter og droner.

Remote sensing kan beskrives som observation eller indsamling af information på afstand. Begrebet remote sensing blev brugt første gang i forbindelse med opsendelsen af den første meteorologiske satellit TIROS-1 i april 1960. Opsendelsen og brugen af TIROS-1 åbnede op for brugen af overvågningssatellitter, der den dag i dag indsamler store mængder data. (Campbell, 2002) Nogle af de områder hvortil satellitdata anvendes i dag er arealanvendelse, kyststudier, meteorologi, klimatologi og i forbindelse med naturkatastrofer. Indsamlingen af satellitdata muliggør ikke mindst en mere specifik analyse af forhold i og omkring vandmiljøet, der kan anvendes i forbindelse med monitoring af disse. (Cracknell & Hayes, 2007) Data er frit tilgængeligt og indsamles regelmæssigt, med en dog afhængigt af vejret.

Droner er gået fra at være noget, der udelukkende er blevet anset som værende til militært brug til at være et redskab, der kan bruges civilt såvel som kommercielt. Droner kan udstyres med et væld af teknologisk udstyr, herunder fx navigationsudstyr, sensorer og multispektrale kameraer. Droner anvendes hovedsageligt til at optage video eller tage oversigtsbilleder, men ved at påmontere det rette teknologiske udstyr øges anvendelsesmulighederne. Overvågning af naturområder, termografiske opmålinger og ensformige operationer af dynamiske processer er et udpluk af dronernes anvendelsesmuligheder, der stadig bliver flere i takt med teknologiens udvikling. (Oxford Research, 2015)

## 1.2 Søøkologi og udvikling

Bekymringen for tilstanden i vandmiljøet og heraf behovet for øget vandmiljøovervågning skyldes, at tilførslen af næringsstoffer til vandmiljøet i løbet af de seneste 150 år er forøget markant, hvilket i høj grad er en konsekvens af menneskelig aktivitet. Især tilførslen af kvælstof og fosfor

har en stor effekt på vandmiljøet (Søndergaard, et al., 1999). Tilførslen af næringsstoffer kommer fra en vifte af forskellige kilder, der hver især har bidraget til den forringede vandkvalitet i de ferske vande. Den mest markante tilførsel er sket fra landbrug, dambrug, industri og husholdninger, hvor landbruget er den største leverandør. (Sand-Jensen, 2001)

Et af målene i vandplanerne er at reducere tabet af overskudsfosfor fra landbruget til vandløb og søer. Selvom mængden af overskudsfosfor fra markerne reduceres, findes der stadig en stor mængde fosfor bundet i jorden, der er ophobet gennem de sidste 100 år. Fosfor bundet i jorden frigives løbende til vandmiljøet fx i forbindelse afstrømning eller med brinkerrosion fra dyrkede områder. (Nielsen, et al., 2005)

Forbruget af kvælstof i landbruget er siden 1990'erne faldet, men har stadig en stor indvirkning på vandmiljøet. Fra mængden af kvælstof, der generelt anvendes på agerjord, fjernes blot en andel med afgrøderne. Den relativt store mængde overskydende kvælstof tilføres grund- og overfladevand, hvor konsekvensen fx kan være henholdsvis lukkede drikkevandsboringer og eutrofiering i søer og vandløb. (Sand-Jensen, 2001)

Anvendelsen af fosfor og kvælstof til gødsning af planter skyldes, at disse i naturen ofte forekommer som begrænsende for planternes vækst, da de optræder i den laveste tilgængelige mængde i forhold til planternes vækstbehov.

På samme måde er fosfor og kvælstof begrænsende for algevækst i vandmiljøet. Mængden af fosfor og kvælstof dikterer potentialet for algeopblomstring i søerne. Udledningen af næringsstoffer til søerne varierer i høj grad i forhold til søernes placering og opland. Omgivelsernes vegetation og jordbundssammensætning, samt bebyggelse, industri og landbrug i oplandet har alle indflydelse på søernes økologi. Søerne får altså en næringsstofpåvirkning, der afhænger af deres opland, hvilket kan ses på graden af algeopblomstring henover forår og sommer. (Sand-Jensen, 2001)

Ud fra mængden af næringsstoffer angives graden af primærproduktion, hvoraf den givne sø kan klassificeres som værende i en af fire overordnede trofiske niveauer; oligotrof, mesotrof, eutrof eller hyper-eutrof.

De mest klarvandede søer kaldes oligotrofe og er karakteriseret ved at have en lav tilførsel af næringsstoffer og en stor sigtddybde på op til 28 m. Oligotrofe søer har en lille primærproduktion, hvorfor bestanden af fisk ligeledes er lille grundet et begrænset fødegrundlag. Oligotrofe søer benævnes i visse tilfælde som lobeliesøer, hvilket skyldes tilstedeværelse af planten Tvepibet lobelie. Tvepibet lobelie vokser kun i de mest klarvandede søer og fungerer derfor som karakterart for rene søer. Antallet af lobeliesøer i Danmark er relativt lavt, da de fleste søer indeholder for mange næringsstoffer eller er påvirket af kalkholdig undergrund.

Ud over de fire generelle trofiske niveauer, findes også dystrofe søer. Dystrofe søer er karakteriseret ved at have et stort indhold af humus, hvilket skyldes at de ofte er skovsøer eller beliggende i gamle tørvegrave. Sigtdybden i dystrofe søer varierer afhængigt af indholdet af humus, der farver vandet brunt. Indholdet af næringsstoffer er typisk relativt lavt, hvorfor primærproduktionen ligeledes er forholdsvis lille. På trods af den brune farve er vandets økologiske kvalitet god.

Søer med moderat tilførsel af næringsstoffer kaldes mesotrofe. I en moderat næringsrig sø fordrer forholdene ofte en større primærproduktion i modsætning til produktionen i oligotrofe og dystrofe søer. Den moderate primærproduktion danner grundlag for en større bestand af fisk og udbredelse af planter i søen. Sigtdybden i en mesotrof sø ligger ofte mellem 2 og 8 m. Den mesotrofe sø ligger på grænsen mellem søer, der er næringsfattige og næringsrige.

De fleste danske søer karakteriseres som værende eutrofe. Eutrofe søer er næringsrige som konsekvens af en stor næringsstofftilførsel med en følgende stor primærproduktion. Den relativt store primærproduktion gør, at sigtbarheden i eutrofe søer er lav og ofte ligger mellem 0,8 og 7 m og om sommeren helt ned til 0,3 m. Den ringe sigtbarhed betyder ofte, at lyset ikke når tilstrækkeligt langt ned i vandet, til at bundplanterne på dybe steder kan foretage fotosyntese. Bundforholdene er ikke gunstige for bundplanter, men næringsrigdommen giver gode betingelser for fx rørsump langs bredderne.

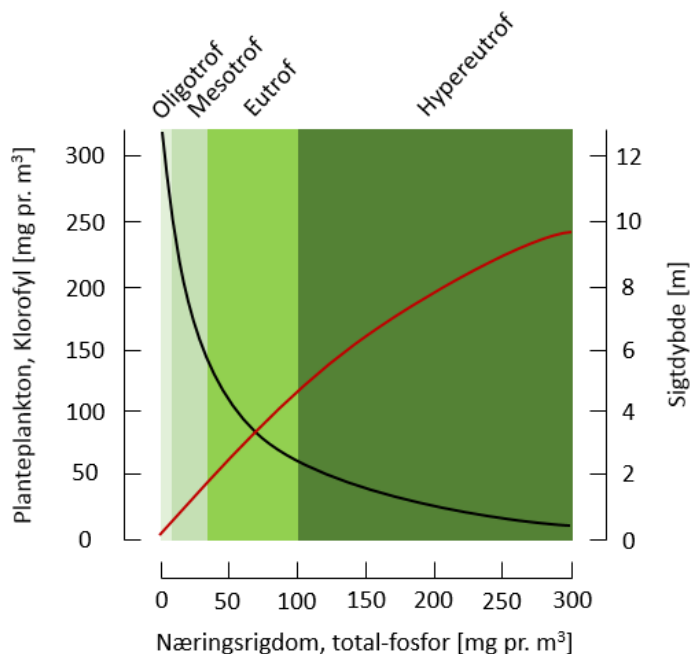
Søer kategoriseret som hyper-eutrofe har en stor primærproduktion, grundet en stor tilførsel af næringsstoffer. Denne søtype er ofte grøn eller blågrøn om sommeren som følge af den store primærproduktion. Den store primærproduktion resulterer i uklart vand med en lav sigtbarhed omkring 0,4 til 0,5 m. Sådanne søer har et stort antal fredfisk og andre smådyr, da rovfisk har dårlige jagtforhold grundet vandets uklarhed. (Sand-Jensen & Lindegaard, 2004)

Tabel 1.1 viser de generelle trofiske niveauer. De trofiske niveauer er placeret hierarkisk med den mest næringsfattige type øverst.

Tabel 1.1 - Præsentation af trofiske niveauer og deres sigtdybde samt respektive indhold af fosfor, kvælstof, klorofyl a og sigtdybde. Redigeret efter Sand-Jensen & Lindegaard (2004).

Trofisk niveau	Total fosfor [ $\mu\text{g/L}$ ]	Total kvælstof [ $\mu\text{g/L}$ ]	Klorofyl a [ $\mu\text{g/L}$ ]	Sigtdybde (m)
Oligotrof	3 - 18	300 - 1600	0,3 - 4,5	5 - 28
Mesotrof	11 - 96	360 - 1400	3 - 11	2 - 8
Eutrof	16 - 390	390 - 6100	3 - 78	0,8 - 7
Hyper-eutrof	750 - 1200	Variierende	>100	0,4 - 0,5

Ud fra Tabel 1.1 ses det, hvordan den stigende mængde af næringsstoffer øger mængden af klorofyl, hvoraf sigtbarheden daler. Denne sammenhæng er illustreret på Figur 1.1, hvor de trofiske niveauer er visualiseret sammen med klorofyl a og sigtbarhed.



Figur 1.1 - Illustration af trofiske niveauer samt sammenhæng mellem fosfor og henholdsvis sigtdybde og planteplankton. Den røde kurve viser sammenhængen mellem planteplankton og næringsrigdom, mens den sorte kurve viser sammenhængen mellem sigtdybde og næringsrigdom. Redigeret efter Sand-Jensen (2001).

Suspenderet tørstof er et samlet udtryk for organiske og uorganiske partikler, der er fritsværende, men ikke opløst, i vandsøjlen. Sådanne partikler kan bestå af eksempelvis silt fra erosion af landbrugsjord, spild fra industri eller plankton. Alle disse partikler kan bevirke, at vandets klarhed reduceres og vandtemperaturen øges grundet stigende absorptions af sollys. (Murphy, 2007; Sand-Jensen, et al., 2013)

Et højt indhold af næringsstoffer i søerne fordrer stor opblomstring af alger og kan forårsage vandblomst, der er masseformering af alger. En stor mængde alger giver uklart vand og forringer forholdene for rovfiskene, der jager vha. synet. Længerevarende perioder med uklart vand vil, som følge af begrænset konsumering af fredfisk, øge antallet af fredfisk. Et øget antal af fredfisk vil øge konsumeringen af dyreplankton. En reduceret dyreplanktonbestand vil accelerere planteplanktonbestanden, der yderligere vil sænke vandets klarhed. I systemet findes således en positiv feedback-effekt, der fordrer ændring i systemet. (Sand-Jensen & Lindegaard, 2004)

Den positive feedback-effekt kan dog ikke siges at være generel for alle søer. Specifikke processer kan influere på forskellige led i feedback-cyklussen. Denitrifikation og dafniebestand er eksempler på sådanne processer.

Denitrifikation er en proces, hvor bakterier i søen bruger kvælstof som iltningmiddel til at nedbryde organisk materiale. Denitrifikationsprocessen udleder vand, kuldioxid og lattergas. Gasserne siver op gennem vandmasserne og ud i atmosfæren, hvorved kvælstof er blevet fjernet fra søen. Denne proces kan fjerne op til halvdelen af det kvælstof, der tilføres søen, som ikke vil være tilgængeligt for planteplankton og derved hæmme deres opblomstring.

Et andet eksempel, der kan hæmme opblomstringen af alger er tilstedeværelsen af dafnier. Dafnier er små krebsdyr og de vigtigste planktonædere i danske søer. En stor del af dafnierne konsumerer alger ved at filtrere søvandet. Antallet af dafnier i en sø har således indflydelse på, hvor stor en del af søens vand, der filtreres for alger. I ekstreme tilfælde kan dafnier filtrere over 100 % af søens vand for egnede fødepartikler på et døgn, hvilket kan holde planteplanktonet betydeligt nede. I gennemsnit kan dafnier fjerne ca. 30 % af fødepartiklerne i døgnnet. En betydelig dafniebestand kan således modvirke algeopblomstringen og skabe klarvandsfaser. (Sand-Jensen, et al., 2013)

Som nævnt ovenfor, har flere parametre indflydelse på den økologiske tilstand i de danske søer. Klorofyl  $a$ -koncentrationen er den parameter, der anvendes i vandplanerne som indikator sigende for økologisk tilstand. Dette skyldes, at klorofyl er det stof i planter, der skylder den grønne farve, der i laboratorieforsøg er let at bestemme. Klorofylmængden er således en indikator for algeomængden og derved vandkvaliteten i eksempelvis søer (Sand-Jensen, et al., 2013). Tabellen herunder angiver, hvordan økologiske tilstandsklasser defineres af klorofyl  $a$ -koncentrationer for forskellige søtyper.

Tabel 1.2 - Grænseværdier mellem økologiske tilstandsklasser, fra vandplan 2010-2015 Randers Fjord. Redigeret fra Miljøministeriet, Naturstyrelsen (2011).

Søtype	Referencetilstand, Klorofyl $a$ [ $\mu\text{g/L}$ ]	Grænser mellem økologiske tilstandsklasser, klorofyl $a$ [ $\mu\text{g/L}$ ]			
		Høj/god	God/moderat	Moderat/ringe	Ringe/dårlig
Type 2, 5, 6	2,45 - 3,72	4,3 - 6,5	8,0 - 12,0	27	56
Type 9, 13	6,24 - 7,5	9,9 - 11,7	21,0 - 25,0	56	90
Type 10, 14	2,53 - 3,85	4,6 - 7,0	8,0 - 12,0	27	56

Tabel 1.2 definerer økologiske tilstandsklasser, som er præsenteret i vandplan 2010-2015 for Hovedvandopland Randers Fjord. Som tabellen viser, er grænsen mellem de økologiske tilstandsklasser forskellige afhængigt af søtype. Type 2 omfatter ferske dybe søer med lavt kalkindhold. Søer af type 5 og 6 er brunvandede ferske søer, både lavvandede og dybe. Type 9 og 10

dækker over ferske kalkrige søer, der henholdsvis er lavvandede og dybe. Lavvandede, kalkrige søer, der samtidig er brunvandede, repræsenterer type 13. Slutteligt angiver type 14 søer der er brunvandede, kalkrige og dybe. Referencetilstanden for søtyperne angiver klorofylindholdet søerne ville have ved upåvirket tilstand. (Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2011)

Ved at undersøge klorofylindhold kan den økologiske tilstand påvises, hvorefter det kan vurderes, hvorvidt tilstanden stemmer overens med evt. målsætninger.

Ønsket om at finde nye metoder til overvågning af vandkvalitet har ført til projektets formål om at undersøge, hvorvidt ny teknologi i form af droner kan anvendes til monitorering af danske søer. I det følgende kapitel er dette projektets formål og fremgangsmåde skitseret.

## 2 Projektbeskrivelse

Ved monitoring af danske søer bruges indholdet af klorofyl *a* som parameter for mængden af alger i søen og således den økologiske tilstand. Formålet med dette projekt er at undersøge, hvordan den økologiske kvalitet kan overvåges vha. ny teknologi med udgangspunkt i klorofylindhold.

Ud fra dette ønske har det oprindelige mål med projektet nærmere bestemt været at undersøge, hvorledes droner kan bruges til at spore algeudviklingen i danske søer henover længden af projektperioden. Denne målsætning har medført følgende problemformulering:

*"Hvordan kan droner, med henblik på evaluering af økologisk kvalitet, bidrage til monitoring af danske søer?"*

Bag denne tilsyneladende simple problemformulering ligger en lang række undersøgelser. Først og fremmest blev to søer udvalgt til undersøgelsen ud fra deres tilgængelighed og størrelse samt deres tilsyneladende forskellighed i næringsstofindhold.

Eftersom udviklingen i vandkvaliteten var ønsket undersøgt, er søerne løbende blevet målt *in situ* for at determinere deres sandfærdige vandkvalitet. Især målingen af klorofyl *a* er væsentlig da disse værdier direkte skulle sammenkobles og sammenlignes med resultater fra droneoverflyvninger.

Dronen skulle anvendes til at tage billeder med et multispektralt kamera, der er optimeret til at opdele reflektans i farvebånd, til detektering af vegetation og mere præcist alger. Dronens billeder skulle herefter behandles på en måde inspireret af en allerede anvendt metode til satellitbilleder af Closter, et al. (Upubliceret), hvor en regressionsanalyse er foretaget for at undersøge sammenhængen mellem *Landsat 8*-billeder og klorofylindhold.

Denne sammenhæng konstrueredes vha. en klorofylalgoritme, der slutteligt skulle sammenlignes med en algoritme fra satellitbilleder for samme søer. Den anvendte satellit, *Landsat 8*, overflyver søerne gennemsnitligt hver ottende dag, hvorfor der blev foretaget målinger i dette interval.

Resultaterne fra *in situ*-målinger, dronealgoritme og satellitalgoritme skulle samtidigt repræsentere undersøgelser, der kunne foretages på tre forskellige plan, nemlig lokalt, regionalt og nationalt.

Produktet fra denne undersøgelse ville derfor være en klorofylalgoritme baseret på dronens billeder og klorofylmålinger taget i intervallet på otte dage. Klorofylalgoritmen ville kunne bruges til at bestemme den omtrentlige mængde klorofyl, og derved algemængde, ved fremtidige målinger uden brug af *in situ*-målinger. Algoritmens resultater ville herefter blive sammenlignet med satellitalgoritmens for at vurdere metodens anvendelighed og eventuelle usikkerheder vil blive diskuteret ud fra bl.a. de resterende *in situ*-målinger så som suspenderet tørstof og secchidybde.

### 2.1 Ændringer fra den oprindelige plan

Grundet tekniske udfordringer var det desværre ikke muligt at følge den oprindelige plan om at indsamle både drone-, satellit- og *in situ*-data hver ottende dag. Dette skyldes, at den anvendte drone tidligt i projektperioden måtte på værksted efter tekniske problemer. Af denne årsag var



det kun muligt at indsamle in situ-data konsekvent hver ottende dag. Satellitbilleder blev fortsat hentet når der var skyfrit over søerne. I bilag 1 ses en oversigt over det indsamlede data fordelt på 12 prøvedage for begge søer.

Eftersom dronen først vendte tilbage fra værkstedet sent i projektperioden var det ikke muligt at indsamle en tilstrækkelig mængde billeder fra dronen til at kortlægge den temporale udvikling af algemængden i søerne vha. denne metode. Det blev derfor nødvendigt at ændre på målsætningen for, hvordan droners anvendelighed til sø-monitering kunne undersøges.

I stedet for at undersøge droners anvendelighed ved at spore udviklingen i klorofyl og vurdere præcisionen af denne metode, bliver der i stedet i højere grad fokuseret på, hvorledes metoden til at undersøge droners anvendelighed kunne optimeres. Resultatet bliver altså ikke blive en definitiv klorofylalgoritme for de to søer, men nærmere et bud på, hvordan sporing af klorofyl metodisk kunne udføres. Præcisionen af metoden vil stadig kunne vurderes da dronens algoritme sammenlignes med resultater og forklaringsgrad for det lignende projekt lavet ud fra satellitdata. Ydermere bliver der lagt større vægt på at undersøge teknologien bag droners anvendelighed til remote sensing.

## 2.2 Rapportens undersøgelsespunkter

Ud fra ovenstående overvejelser vedrørende den begrænsede datamængde er følgende undersøgelsespunkter opstillet. Det er disse fem undersøgelsespunkter, der er søgt besvaret igennem denne rapport.

1. På hvilken måde kan droner bruges til at indsamle data om søers vandkvalitet?
2. Hvorledes kan indsamlede data bidrage til undersøgelse af søers økologiske kvalitet?
3. Hvordan kan det indsamlede data behandles for at kortlægge den geografiske fordeling af klorofyl i søer?
4. På hvilken måde er dronens resultater forskellige fra satellitters og hvordan kan usikkerheder i forhold til in situ-målinger forklares?
5. Hvorledes kan anvendte metode optimeres? Hvad har man gjort i andre dele i verden og hvordan kan andre metoder anvendes i en dansk sammenhæng?

De fem undersøgelsespunkter vil således danne rammerne omkring en undersøgelse af droners anvendelighed til sø-monitering med henblik på algeopblomstring. Undersøgelsen tager stadig udgangspunkt i metoden af Closter, et al. (Upubliceret) til klorofylbestemmelse vha. satellit, hvorfor dronen udstyres med et kamera.

Første undersøgelsespunkt bruges til en indledende undersøgelse af, hvordan dronen skal forberedes til en overflyvning af en sø, hvilket slags kamera, der bør bruges og hvordan billederne skal behandles for at give et samlet luftfoto over fra de pågældende søer.

Det andet undersøgelsespunkt danner rammer om den databehandling, der ligger til grund for dronens klorofylalgoritme, der inkluderer behandlingen af billedernes farvebånd til indeksering og parring med tilsvarende klorofylmængder fundet in situ.

Ved tredje undersøgelsespunkt skal dronens indeks og klorofylalgoritme behandles for at fremstille et kort over den rumlige fordeling af klorofyl i de undersøgte søer.

Hvor de første tre undersøgelsespunkter er rettet mod det metodiske bag rapportens undersøgelser, drejer fjerde undersøgelsespunkt sig om rapportens resultater. Resultaterne vil blive diskuteret i forhold til lignende undersøgelser af satellitbilleder foretaget i forbindelse med dette projekt samt resultaterne i rapporten af Closter, et al. (Upubliceret). Fjerde undersøgelsespunkt diskuterer ligeledes, hvordan fysiske og kemiske parametre kan anvendes i klorofylalgoritmen.

Femte og sidste undersøgelsespunkt besvares i dette projekt i perspektivering. Det undersøges, hvorvidt de anvendte metoder kan optimeres havde bedre teknologi været tilgængelig. I perspektivering vil overvejelser opstået i løbet af projektperioden blive inddraget sammen med viden om den nyeste teknologi indenfor remote sensing og droner indsamlet i et litteraturstudie fra relevante kilder. Perspektivering er således knyttet direkte til resten af projektet og relevant i besvarelsen af projektets problemformulering.

Rapportens fem undersøgelsespunkter vil fungere som rapportens overordnede struktur. Således vil rapportens metode- og resultatkapitel blive opdelt tilnærmelsesvis efter de bagvedliggende metoder, der ligger til grund for undersøgelsespunkterne.

### 2.3 Afgrænsning og begrebsafklaring

I dette projekt er den største begrænsning kommet til udtryk ved manglende data og en snæver tidshorizont. Som beskrevet ovenfor har den lille datamængde fra dronens side gjort, at målsætningen for projektet er lavet om. Dette har betydet, at det ikke har været muligt at spore en decideret udvikling i klorofylmængden ved hjælp af dronen. Endvidere har det ikke været muligt at formulere en endegyldig klorofylalgoritme for søerne samt at undersøge den usikkerhed algoritmen viser.

Ydermere har det været nødvendigt fra starten at begrænse projektets undersøgelser til to søer. Nødvendigheden i at begrænse undersøgelsen ligger i, at databehandling og -indsamling er yderst tidskrævende. Dette har gjort, at der ikke kunne produceres en universel klorofylalgoritme til brug ved andre søer end de to udvalgte.

Grundet den tidsmæssige begrænsning har det yderligere været nødvendigt at afgrænse fokus fra at undersøge søernes forureningsgrad, andet end den deciderede bestemmelse af diverse fysiske og kemiske parametre. Det er således ikke blevet undersøgt, hvorfra en eventuel tilførsel af næringsstoffer kommer.

Som nævnt ovenfor undersøges søerne ud fra en antagelse om, at klorofyl fungerer som en indikator for søers økologiske kvalitet. Grunden til valget af denne parameter som udgangspunkt i projektets målinger ligger i dennes anvendelighed til at repræsentere algemængden fundet i søer. Eftersom stoffet er det, der farver alger grønt antages det også, at det tillader visuel sporing vha. kameraer. I dette projekt inddrages udelukkende klorofyl  $a$  og ikke andre klorofyltyper, da det er den mest markante klorofyltype.

### 3 Lokalitetsbeskrivelse

Dette kapitel søger at beskrive de to udvalgte søer på en række parametre, der tilsammen vil danne et grundlag for en forståelse af, hvilke forhold, der gør sig gældende i hver enkel sø. De undersøgte parametre vil beskrive lokalitet, historie, biologi, geologi og hydrologi. Parametrene er undersøgt ved hjælp af in situ-undersøgelser, samt kort- og litteraturstudier.

Udover at bidrage til læsers forståelse af søerne som så, vil dette kapital levere nyttige informationer, der muliggør sammenligning af denne rapporters undersøgelser med resultater fra lignende projekter.

#### 3.1 Søernes placering

Søerne Hummelsø og Velling Igelsø er beliggende i Silkeborg Kommune, i det centrale Midtjylland (se kortet nedenfor).



Figur 3.1 - Oversigt over Hummelsø og Velling Igelsøs placering. Kortet er lavet vha. geodata fra Geodatastyrelsen (Geodatastyrelsen, 2009).

Som det kan ses på ovenstående kort, ligger søerne omtrent tolv km fra hinanden. Hummelsø ligger godt syv km syd for Silkeborg. Velling Igelsøs nærmeste by er Bryrup, der ligger godt 2 km mod syd.

Søerne ligger begge i det midtjyske Søhøjland, der er et ca. 800 km<sup>2</sup> stort morænelandskab kendt for sine mange søer og kuperede terræn. Det er i dette område, at nogle af Danmarks højeste punkter findes, navnlig Himmelbjerget, Ejer Bavnehøj, Yding Skovhøj og Møllehøj. Begge søer ligger i tilknytning til Danmarks største skovareal Silkeborgskovene (Naturstyrelsen, u.d.). Af kendte vandelementer i området ligger bl.a. søerne Mossø, Langsø, Borresø og Julsø, samt Gudenåen. (Larsen, et al., 2014)

#### 3.2 Hummelsø

Hummelsø er en mindre sø, der ligger ca. to kilometer nord for Them og ligger 77 meter over havets overflade (DVR90). Søen har en relativ lille størrelse målt til 7,8 ha og den har en middel-

dybde på ca. 2,8 m. Søens maksimale dybde er målt til 4,7 m (se eventuelt Figur 3.3 for dybdeforhold).

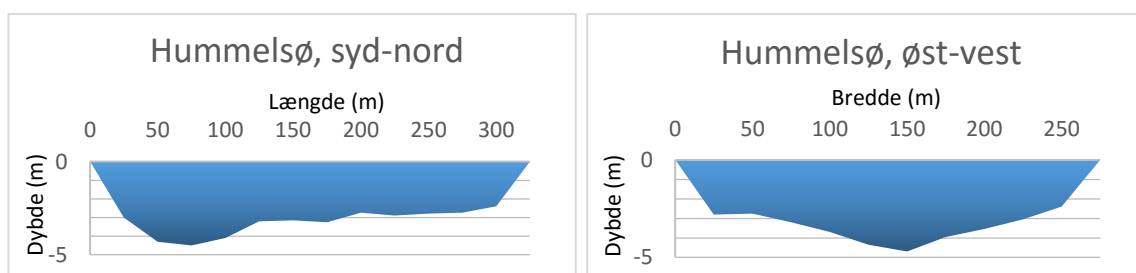
Hummelsø blev fredet i 1969 som en del af en større fredning af det omkringliggende område. Fredning af området skete grundet områdets naturskønhed og Hummelsø blev inkluderet i dette område eftersom der i forvejen var lavet forhandlinger med søens ejere om fredning. Under fredningen bestemmes det, at områdets daværende tilstand ikke måtte ændres i den forstand, at hverken nye bygninger måtte rejses eller vejenes udformning ændres. (Overfredningsnævnet, 1969)



Figur 3.2 - Oversigtskort over Hummelsø og omegn. Kortet til venstre er udarbejdet vha. geodata fra Geodatastyrelsen (Geodatastyrelsen, 2009). Luftfotoet til højre stammer fra 2014 og er fra COWI (2014). Copyright COWI.

Kortene ovenfor viser Hummelsøs form samt de omkringliggende landskabselementer, der hovedsageligt består af forskelligartede landbrugsarealer og mindre skove. Udover enkelte grusveje befinder der sig kun enkeltstående husstande.

Ifølge J. Møller Andersen, der i 1982 udgav en undersøgelse af bl.a. Hummelsø, er bundfaunaen i søen beskrevet som artsrig grundet, at der ikke optræder længere perioder med iltfattige forhold på søbunden. Endvidere er søens dybde tilpas lav til, at der ikke forekommer stratificering om sommeren. Ifølge rapporten domineres bundfaunaen af børsteorme og mitter. Søens flora var ved daværende undersøgelse ligeledes artsrig; domineret af planteplankton og alger. Søen var dengang ikke årsmæssigt domineret af blågrøn alger, men oplevede en sæsonmæssig udvikling af både grøn alger og blågrøn alger. Algemængden blev reduceret mod årets slutning, hvor bakterier og detritus var noget større. (Andersen, 1982)



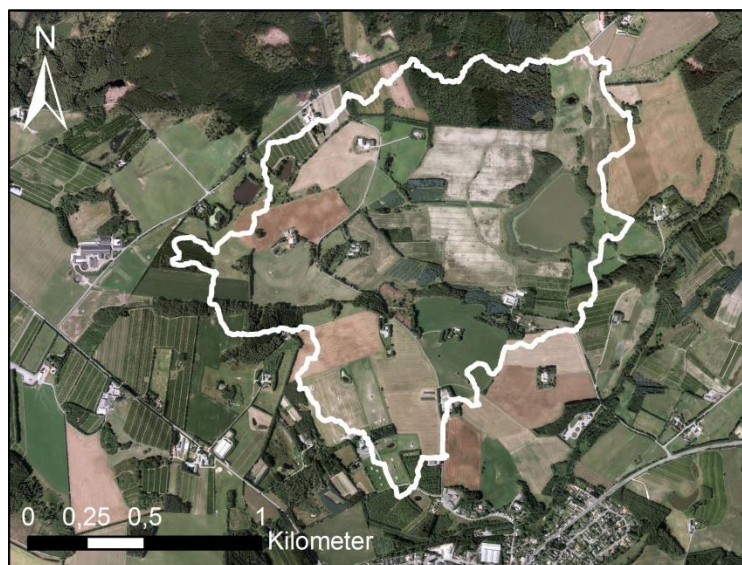
Figur 3.3 - Dybdeforhold i Hummelsø i to tværsnit på langs (syd-nord) og tværs (øst-vest).

Geologisk set befinder Hummelsø sig i resterne af et dødishul beliggende få kilometer øst for hovedstilsandslinjen (Overfredningsnævnet, 1969). Ud fra jordartskort fra området ses det, at jordbunden overordnet domineres af ferskvandsdannelser og moræneler (GEUS, 1999).

Hummelsø karakteriseres som en eutrof sø med lille sigt dybde grundet den relativt høje algeforekomst. I Andersens rapport nævnes det, at den store algevækst kan skyldes tilførsel af spildevand.

vand. Jævnfør teori præsenteret i afsnit 1.2 tilhører Hummelsø søtype 9, hvilket vil sige, at søen er kalkrig, fersk og lavvandet. Hummelsø har blot ét afløb med lille vandføring, hvilket resulterer i en relativt høj opholdstid (dengang beregnet til ca. 280 døgn). Vandtilførslen til søen skete dengang hovedsageligt gennem et rørlagt vandløb mod syd (Andersen, 1982).

Som nævnt tidligere består det omkringliggende areal hovedsageligt af dyrket land kun afbrudt af enkelte samlinger af træer. På kortet nedenfor ses Hummelsø's topografiske opland udregnet vha. ArcGIS og højdekort fra Geodatastyrelsen.



Figur 3.4 - Hummelsø's topografiske oplandsareal. Kortet er udarbejdet vha. geodata fra Geodatastyrelsen (2014). Ortofotoet stammer fra COWI (2014). Copyright COWI.

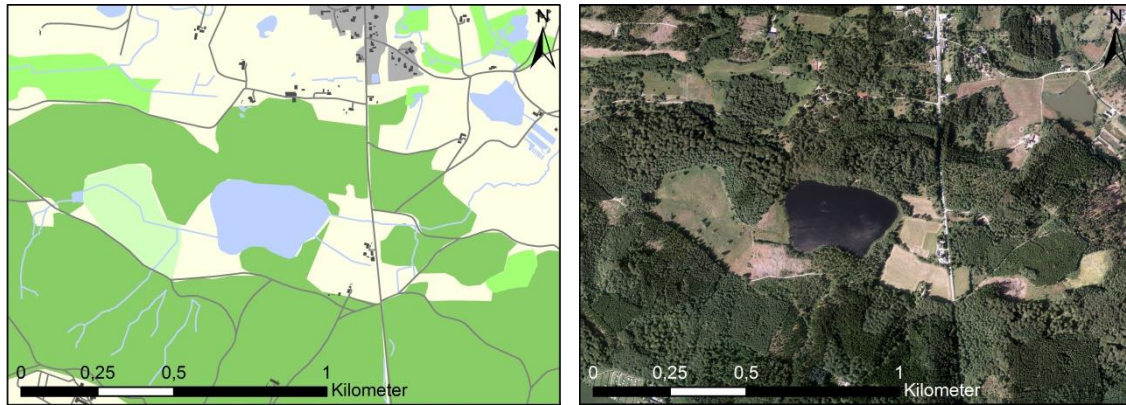
Det topografiske oplands størrelse er beregnet til ca. 2 km<sup>2</sup>, men det er uvist i hvilken grad dette repræsenterer det faktiske hydrologiske opland.

### 3.3 Velling Igelsø

Velling Igelsø ligger i Velling Skov, der er kendt for sine relativt store arealer, der er udlagt som urørt skov bestående af 250 til 300 år gamle bøgetræer (Naturstyrelsen, 2011). Søen ligger omkring 49 m over havoverfladen (DVR90) og har et areal på ca. 7,5 ha. Søen har en middeldybde på 9,6 m og en maksdybde målt til 14,2 m (se eventuelt Figur 3.6 for dybdeforhold). Velling Igelsø ejes og administreres af Naturstyrelsen Søhøjlandet (Naturstyrelsen, 2011).

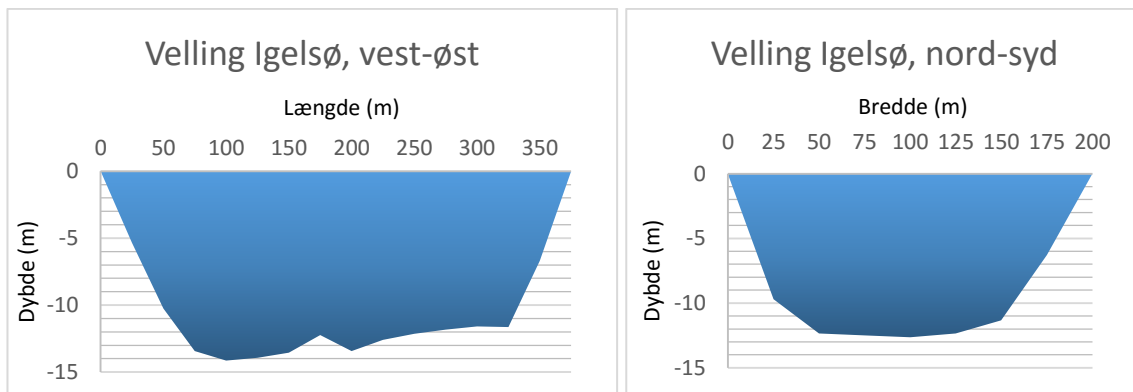
På figuren på næste side ses Velling Igelsø samt det omkringliggende areal. Som det ses ud fra både kort og luftfoto er området domineret af skov. Umiddelbart nord og syd for søen når skovkanten helt ned til bredden, hvorimod der ved søens østlige og vestlige side er åbne arealer med eng samt vådområder. I vådområdet vest for søen græsser der husdyr, der holder bevoksningen nede (Naturstyrelsen, 2011).

Udover den lille forsamling af huse ved Katrinedal (nordøstlig hjørne på kortet), er der kun enkelte spredte bygninger i området omkring Velling Igelsø. I det sydvestlige hjørne af kortet er der dog en campingplads. Umiddelbart øst for søen ligger Vellingvej. De resterende veje omkring søen er hovedsageligt grusveje og stier.



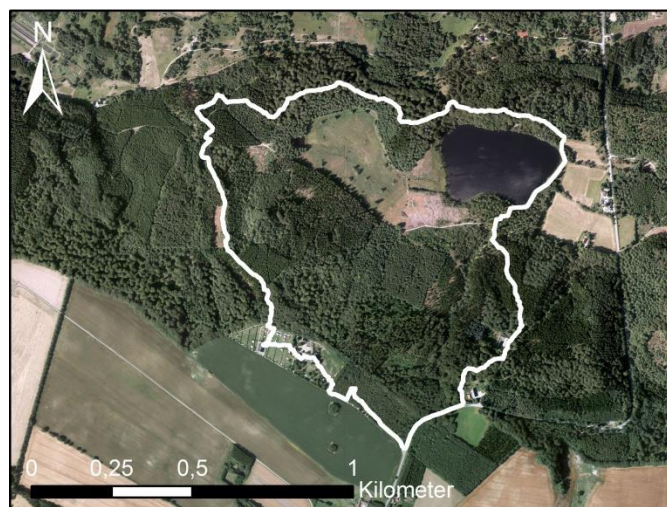
Figur 3.5 - Oversigtskort over Velling Igelsø og omegn. Kortet til venstre er udarbejdet vha. geodata fra Geodatastyrelsen (Geodatastyrelsen, 2009). Luftfotoet til højre stammer fra COWI (2014). Copyright COWI.

Området omkring søen er som sagt domineret af bøgeskov med enkelte islæt af nåltræer. I disse skove findes sjældne planter så som den kødædende soldug og klokkelyng (Naturstyrelsen, 2011). Selve søens bred er en hængesæk bestående af tørvemos med forskellige planter så som starrer og kæruld (Olsen, 2010).



Figur 3.6 - Dybdeforhold i Velling Igelsø i to tværsnit på langs (vest-øst) og tværs (nord-syd).

Velling Igelsø ligger geologisk set i udkanten af en tunneldal med spor af smeltevandsslette mod nord og yngre moræneaflejringer mod syd. Jordarterne karakteriseres som ferskvandsdannelser med smeltevandssand- og grus (GEUS, 1999).



Figur 3.7 - Velling Igelsøs topografiske oplandsareal. Kortet er udarbejdet vha. geodata fra Geodatastyrelsen (Geodatastyrelsen, 2014). Ortofotoet stammer fra COWI (2014). Copyright COWI.

Figuren på forrige side viser Velling Igelsøs topografiske opland udregnet ud fra højdekort fra Geodatastyrelsen. Oplandet har et areal på 0,8 km<sup>2</sup> og omfatter hovedsageligt skov.

Velling Igelsø karakteriseres ved at være en kalkrig og næringsfattig sø (Olsen, 2010). Jævnfør problemanalysen (afsnit 1.2) er søen søtype 10, hvilket svarer til en kalkrig, fersk og dyb sø.

### 3.4 Opsummering

De to udvalgte søer er eksempler på, hvor forskelligartede to danske søer kan være til trods for, at de befinder sig indenfor stort set samme område og deler samme størrelse. Søerne adskiller sig fra hinanden på flere parametre heriblandt dybdeforhold og omgivelser. Dette projekt har fundet at forskelligheden i søernes indhold af næringsstoffer er mindre end først antaget. Hummelsø er eutrof og Velling Igelsø er mesotrof.

## 4 Anvendte metoder

Dette kapitel vil præsentere de metoder, der er anvendt til at besvare rapportens undersøgelsespunkter. De respektive metoder vil blive gennemgået med henblik på at afklare teorien bag de enkelte forhold, der undersøges, samt forklare præcist, hvordan metoderne er blevet brugt i denne sammenhæng.

Kapitlet er opbygget efter rækkefølgen på undersøgelsespunkterne og de metoder, der er brugt til at besvare undersøgelsespunkterne. Således er metoder til udførelse af droneflyvning og dets databehandling præsenteret først. Herefter er indsamling og behandling af satellitbilleder beskrevet, hvorefter metoderne bag klorofylalgoritmerne er forklaret. Kapitlet vil derefter behandle de anvendte metoder til måling af in situ-forhold samt andre anvendte GIS-metoder. Slutteligt vil kapitlet præsentere statistiske metoder anvendt i projektet samt, hvordan litteraturstudiet af erfaringer og nyeste metoder og teknologier til remote sensing er udført.

### 4.1 Dronemetode

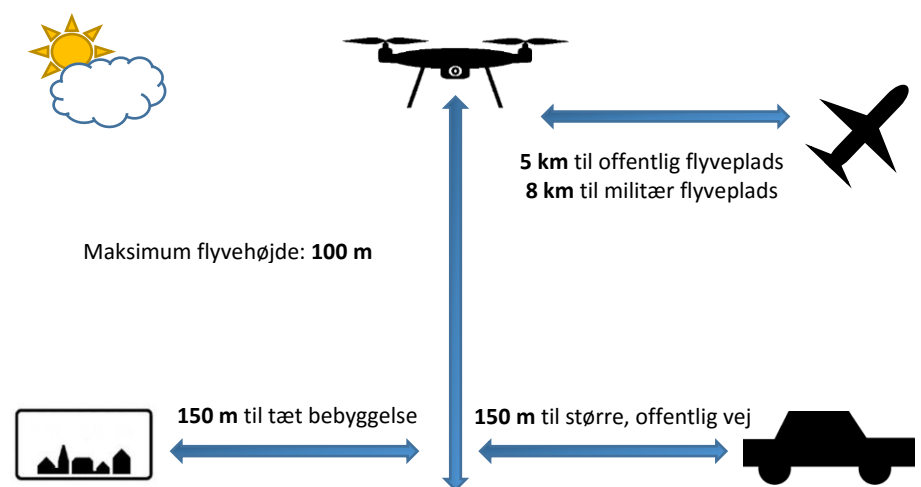
Anvendelsen af drone som dataindsamlingsmetode kræver forberedelse, både teknisk og sikkerhedsmæssigt. I dette afsnit beskrives det, hvordan dronen anvendes som led i besvarelsen af projektet.

#### 4.1.1 Formål

Formålet med brugen af droner er at belyse anvendeligheden af droner i forhold kortlægning af algeopblomstring. I dette projekt er data hovedsageligt produceret vha. et påmonteret multispektralt kamera, der er optimeret til opdeling af farvebånd. Det indsamlede data skal først og fremmest bruges til at producere et billedindeks, der skal anvendes i en algoritme, som klassificerer sammenhængen mellem reflektans og klorofylmængde. Udover dette, vil dronens billeder blive brugt til at konstruere et oversigtskort over søernes geografiske fordeling af klorofyl.

Udover brugen af drone med multispektralt kamera, er der også brugt en mindre avanceret drone med et almindeligt RGB-kamera, til at kreere almindelige oversigtskort over søerne.

En af de egenskaber, der gør dronen interessant som dataindsamlingsmetode er, at den kan foretage samme flyvning gentagne gange. Dette muliggør analyse af dynamiske processer, hvilket netop er tilfældet med algeopblomstring henover forår og sommer.



Figur 4.1 - Illustration af de mest grundlæggende regler vedrørende droneflyvning ud fra BL 9-4.



Anvendelsen af drone foregår med blik for sikkerhed, herunder gældende lovgivning. For droner under 25 kg gælder bestemmelserne i *BL 9-4*, der er udarbejdet af Statens Luftfartsvæsen (Statens Luftfartsvæsen, 2004). Figur 4.1 på forrige side viser de regler, hvorunder droneflyvningen skal finde sted, således der tages hensyn til både privatlivets fred og sikkerheden i luftrummet.

#### 4.1.2 Missionsplanlægning

Til overflyvningen med multispektralt kamera bruges en drone af navnet *X8+* fra *3D Robotics*. Kameraet er et Canon ELPH110 HS-kamera optimeret til afbildning af det grønne -, blå - og nær-infrarøde bånd. Dronen er programmeret til at overflyve Hummelsø og Velling Igelsø på nøjagtigt samme måde under forudbestemte parametre.

Til at konstruere en automatiseret flyvning anvendes programmet *Mission Planner*, der er en kontrolplatform, hvor en række parametre reguleres for at optimere flyvningen med henblik på tid og detaljeringsgrad. Ved at udarbejde en automatiseret flyvning med fastsatte forhold, sikres det at flyvningerne bliver langt mere homogene end ved manuel flyvning.

I *Mission Planner* skabes den automatiserede flyvning ved først at angive et *homepoint*, der placeres i umiddelbar nærhed af det område, der flyves fra. Dernæst laves et *survey-grid*, der angiver det område, som ønskes kortlagt. De givne vilkår er de parametre, der styrer flyvetid og detaljeringsgrad. I tabellen herunder ses, hvilke parametre, der er justeret i forbindelse med flyvningerne over henholdsvis Hummelsø og Velling Igelsø.

Tabel 4.1 - Parametre, der er justeret for at tilpasse flyveruten efter tid og detaljeringsgrad.

Parametre	Hummelsø	Velling Igelsø
Flyvehøjde [m]	100	100
Flyvehastighed [m/s]	5	5
Flyvetid [min]	8,18	8,10
Areal [m <sup>2</sup> ]	84.134	81.019
Opløsning ved jorden [cm]	3,37	3,37
Antal billeder [-]	45	42
Overlap [%]	60	60
Sideoverlap [%]	65	65

Parametrene i tabellen er fastsat efter ønsket om at opnå den størst mulige detaljeringsgrad ved en flyvetid på maksimalt 10 min. Med størst detaljeringsgrad menes største opløsning ved jorden samt et betydeligt overlap mellem billederne. Flyvetiden og søernes størrelse er de begrænsende faktorer for detaljeringsgraden, da dronens batterikapacitet er 10 min i henhold til sikkerhedsovervejelserne.

Eftersom dronens flyvninger overholder samtlige bestemmelser beskrevet i *BL 9-4* har det ikke været nødvendigt at indhente tilladelser fra andre end de respektive lodsejere samt fra Naturstyrelsen. Se endvidere bilag 2 samt bilag 3, der viser eksempel på dronehåndbogen samt en risikovurdering for begge søers overflyvning.



Figur 4.2 - Illustration af flyverute over henholdsvis Hummelsø og Velling Igelsø.

Figur 4.2 viser den rute dronen flyver over henholdsvis Hummelsø og Velling Igelsø, hver gang data indsamles. Gule streger angiver selve flyveruten og grønne markeringer angiver *waypoints*, hvor dronen ændrer retning.

Inden flyvning er 6 objekter placeret i hver sø, der skal fungere som fikspunkter i det ellers ensartede vand. Fikspunkternes primære formål er at optimere mulighederne for at finde fælles-træk i billederne, da et af formålene med dataindsamlingen er at skabe ét sammenhængende billede til yderligere analyse.

Som nævnt er der udover overflyvningen med X8+ dronen anvendt en mindre avanceret drone til indsamling af simple RGB-billeder til kreering af et samlet luftfoto i naturlige farver. Disse overflyvninger er foretaget manuelt med en DJI Phantom-drone udstyret med et GoPro Hero 4-kamera.

For at overholde reglerne for dronflyvning er personel udsendt til forskellige, strategisk udvalgte steder ved brinken, der skal agere som spottere, som fortæller droneoperatøren, hvornår dronen skal foretage vendinger for ikke at overskride de lovpligtige afstande fra eksempelvis større, offentlige veje og private ejendomme.

Overflyvningen af begge søer er sket i et rektangulært flyvemønster med en varighed på maksimalt 5 min. Billederne er taget med 1 sekunds mellemrum, hvilket giver et stort antal billeder, der fordrer et detaljeret oversigtskort.

#### 4.1.3 Behandling af dronebilleder

Første skridt i behandlingen af dronernes billeder er at samle dem til ét samlet billede af begge søer. Dette er gjort ved hjælp af softwaren *Agisoft Photoscan*, hvor de uploadede billeder først og fremmest skal inspiceres; Billeder, der ikke er taget ortogonalt på søerne, fx billeder under *takeoff* og landing, bliver frasorteret da disse ikke er relevante i forhold til det ønskede resultat.

Efterfølgende opstilles de godkendte billeder på række ved hjælp af funktionen *Align Photo*, der indhenter information om kameraets orientering og placering. Informationen om kameraets position omdannes herefter til en punktsky, der repræsenterer dybden i billederne. Kreeringen af punktskyen foregår ved hjælp af funktionen *Building Dense Point Cloud*, hvor de enkelte punktskyer for hvert billede kombineres. Ved at anvende funktionen *Building Mesh* er det dernæst muligt at skabe en sammenhængende maske mellem de separerede punkter i punktskyen. Teksturen i den 3-dimensionelle maske skabes herefter ud fra en bred vifte af parametre, hvor kvaliteten af de enkelte billeder er dominerende for kvaliteten og detaljeringsgrad af teksturen i det endelige resultat. (Agisoft LLC, 2013) Det endelige resultat er ét sammenhængende billede over henholdsvis Hummelsø og Velling Igelsø, hvorfra indeksering af billederne kan beregnes og den færdige klorofylalgoritme senere kan tilføjes.

Indekseringen af de multispektrale dronebilleder er blevet udført vha. GIS-programmet ArcGIS. Desværre var det ikke muligt at sammensætte de multispektrale billeder i Agisoft, hvorfor en-

keltbilleder i stedet blevet udvalgt. Billederne er blevet udvalgt til bedst muligt at kunne repræsentere søerne i forhold til skarphed, størst mulig areal med vand og mindst muligt refleksion fra sol og skyer. For hver overflyvning blev tre repræsentative billeder udvalgt til videre analyse.

De udvalgte billeder er skåret til vha. *Extract By Mask*-værktøjet for at fjerne evt. brink samt i nogle tilfælde solens direkte refleksion i vandoverfladen. Billedfilerne er af typen RAW, og er 16-bit data, der tager værdier mellem 0 og 65.535 ligesom billeder fra Landsat 8-satellitten. Før billederne kan behandles i ArcGIS er billederne blevet konverteret fra RAW til TIFF vha. et online konverteringsværktøj (se eventuelt [www.zamzar.com](http://www.zamzar.com)). Billederne lægges herefter ind i ArcGIS, hvor det blå og det grønne bånd behandles med henblik på at udarbejde indeksering. Celler med maksimums- og minimumsværdierne 0 og 65.535 er blevet fjernet fra billederne vha. *Set Null*-værktøjet, da de anses for at være fejl i rasteren. For at kunne behandle de to farvebånd i *Raster Calculator* konverteres de til datatypen *Float* vha. værktøjet af samme navn.

Billederne er nu klar til beregning af det billedindeks, der bedst illustrerer reflektansen fra klorofyl i begge søer. Beskrivelsen af denne indeksberegning er præsenteret i afsnit 4.3 da denne procedure er ens for både drone- og satellitbilleder.

I bilag 4 findes en illustration af alle de funktioner og processer, der er anvendt til behandlingen af dronebillederne til den samlede indeksberegning og klorofylkorts-konstruering.

## 4.2 Landsat 8-billedbehandling

Dette afsnit vil præsentere, hvorledes Landsat 8-satellitbilleder er blevet behandlet før disse kan indgå i projektets klorofylalgoritme. Først vil formålet ved anvendelse af disse billeder blive beskrevet, hvorefter den specifikke fremgangsmåde vil blive præsenteret.

Landsat 8 gennemflyver samme bane hver 16. dag med et overlap til de omkringliggende baner. Dette projekts case-område, i nærheden af Silkeborg, befinder sig i *Path* 196 samt 197 og således vil data fra Landsat 8 være tilgængelig cirka hver 8. dag. For satellitbillederne er tilgængelighed ikke det samme som brugbarhed, da et eventuelt skydække gør billederne ubrugelige for det givne område.

### 4.2.1 Formål

Formålet med brugen af Landsat 8-billederne i dette projekt er at sammenligne satellitdataets resultater med klorofylalgoritmen og fordelingen af klorofyl udregnet for dronebillederne. For at satellitdataet er i stand til at kunne indekseres gennemgår billederne en række beregninger og statistiske analyser. Fremgangsmåden anvendt til dette er inspireret af metoden af Closter, et al. (Upubliceret) fra AMOS-projektet.

Når satellitdataet har gennemgået disse beregninger og analyser skal billederne indekseres for siden at indsættes i klorofylalgoritmen (se afsnit 5.2). Således vil klorofylindholdet i søer altså blive estimeret fra ca. 700 kilometers højde (United States Geological Survey, 2013; Closter, et al., Upubliceret).

### 4.2.2 Fremgangsmåde

Satellitdata kan hentes ned fra *United States Geological Survey's* (USGS) downloadværktøj, der er tilgængeligt på deres hjemmeside ([www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov)). Med satellitbilledet følger en metadatafil, der giver informationer om en række parametre på tidspunktet for overflyvningen. Specifikt består satellitbilleder fra Landsat 8 af følgende elleve farvebånd: kystaerosol, blå, grøn, rød, nærinfrarød, SWIR 1 og 2 (kortbølget infrarød), pankromatrisk, cirrusskyer og de termisk infrarøde bånd TIRS 1 og 2. Til undersøgelsen af klorofyl anvendes det blå og grønne bånd,

da en kombination af disse ifølge Closter, et al. (Upubliceret) giver den største forklaringsgrad for danske søer.

Data fra Landsat 8 består af digitale tal, som skal omregnes til strålingen i toppen af atmosfæren (ToA), der herefter kan anvendes til efterfølgende analyse. Denne omregning sker ved følgende formel, der anvender konstanter fra metadatafilen:

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{CAL} + A_L \quad (1)$$

hvor,

$L_{\lambda}$	Strålingen i toppen af atmosfæren
$M_L$	Båndspecifik multiplikativ skaleringsfaktor
$A_L$	Båndspecifik additiv skaleringsfaktor
$Q_{CAL}$	Digitale tal (rå-output fra Landsat 8)

(Srinivasan, 2013; United States Geological Survey, 2015)

De ubehandlede satellitdata korrigeres for atmosfæriske forstyrrelser, som fx aerosoler, således den målte refleksion repræsenterer værdier gældende ved overfladen. Metoden, der er anvendt til atmosfærekorrektion kaldes DOS (Dark Object Subtraction). Metoden antager, at visse celler i billedet er placeret i fuldstændig skygge, hvilket betyder at reflektansen, der når satellitten skyldes atmosfærisk forstyrrelse (Chavez, 1996).

Som navnet antyder, går DOS-korrektionen ud på at finde den mørkeste værdi i hvert bånd, for derefter at subtrahere denne værdi fra samtlige celler. Denne proces foretages i ArcGIS. Funktionen *Calculate Statistics* finder mindste værdi i billedet, hvorefter *Raster Calculator* er nyttig til beregninger på hver enkelt celle. Efter DOS-korrektionen klippes satellitbillederne således de kun indeholder celler fra de to søer, der består af vand. I ArcGIS er to søpolygoner tegnet, der vha. *Extract By Mask*-værktøjet skærer billederne til.

Efter DOS-korrektionen og omregningen er farvebåndene klar til anvendelse i GIS-analyser og til at indgå i projektets klorofylalgoritme.

I bilag 5 findes en illustration af alle de funktioner og processer, der er anvendt til behandlingen af satellitbillederne til den samlede indeksberegning og klorofylkorts-konstruering.

### 4.3 Klorofylalgoritme

Efter både drone- og satellitbilleder er blevet behandlet i form af udklip og diverse korrektioner, skal begge billedsæt omdannes til et indeks, der viser den bedst mulige klorofylreflektans fra søernes overflade. Dette indeks laves ud fra de farvebånd, der tilsammen er påvist af Closter, et al. (Upubliceret) at have den bedste forklaringsgrad i forhold til klorofyl *a* målt in situ. Følgende ligning viser, hvordan indekset er udregnet:

$$Indeks = \frac{Blå - Grøn}{Blå + Grøn} \quad (2)$$

Hvor,

Blå	det blå rasterbånd fra enten drone eller satellit
Grøn	det grønne rasterbånd fra enten drone eller satellit

Efter Closter, et al. (Upubliceret)

Et indeks fra denne beregning er således et nyt raster med samme opløsning og geografiske udbredelse som de originale filer.

Efter indeksfilerne er beregnet skal disse holdes op mod de in situ-målte klorofyl  $a$ -værdier for de pågældende søer og feltdage. Før dette skal klorofylværdierne log-transformeres og gennemsnit for rasterfilerne findes. I dette projekt antages det, at drone- samt satellitbilleder og in situ-data er samhørende og repræsenterer de samme forhold, hvis data er indsamlet inden for maksimalt to dage. Eftersom der ikke kunne konstrueres samlede kort ud fra dronens multispektrale billeder, er der i stedet udvalgt tre enkeltstående billeder, der har fungeret som en trippelbestemmelse af søernes gennemsnitlige værdier.

De log-transformerede klorofylværdier og gennemsnitsværdierne for indeksene plottes herefter i et koordinatsystem, hvor en lineær regressionsanalyse foretages. Sammenhængen mellem de to størrelser beskrives ved linjens ligning med en tilknyttet  $R^2$  værdi.  $R^2$ -værdien beskriver metodens forklaringsgrad og således, hvor god sammenhæng, der er mellem de to typer indeks og gennemsnitlige klorofylværdier for pågældende feltdag.

For at kunne konstruere et kort over søernes rumlige fordeling af klorofyl  $a$  anvendes klorofylalgoritmerne fra henholdsvis drone- og satellitbilleder. Fremgangsmåden til dette er at indregne indeksrasterfilerne i de respektive klorofylalgoritmer.

Et eksempel på denne udregning vil således være:

$$\log(\text{klorofyl}) = a \cdot \text{indeks} + b \quad (3)$$

Hvor,

Log(klorofyl)	Log-transformeret klorofyl $a$ -mængde
$a$	Hældning fra drone- eller satellitalgoritme
$\text{indeks}$	Indeksrasterfil fra henholdsvis drone- og satellitbilleder
$b$	Skæring på $y$ -akse fra drone- eller satellitalgoritme

Ovenstående udregning foretages i ArcGIS-værktøjet Raster Calculator og resulterer i et nyt raster med fordelingen af log-transformerede klorofylværdier. Disse værdier er herefter igen omregnet vha. Raster Calculator for at vise de *sande* klorofyl  $a$ -værdier i  $\mu\text{g/l}$  i et rasterdatasæt.

De endelige rasterfiler påsættes herefter en passende skala så fordelingen af klorofyl visuelt kan inspiceres.

#### 4.4 In situ-målinger

Dette afsnit vil præsentere de metoder, der er brugt til at bestemme søernes indhold af klorofyl  $a$ , suspenderet tørstof, secchi-dybde, lysintensitet, total fosfor og kvælstof.

Det antages, at in situ-målingerne er et udtryk for søernes aktuelle, sandfærdige forhold. Dette betyder i praksis, at målingerne vil blive sammenlignet med de andre datatyper, der undersøges, nemlig billederne fra drone og satellit, for at se i hvor høj grad disse metoder kan påvise de sandfærdige forhold.

På nær sigtdybdemålingerne, og indstråling måles de resterende in situ-målinger ud fra vandprøver. Disse vandprøver er indsamlet hver prøvedag og blev indsamlet i lige store dele i hver kvadrant af søerne (se billederne på næste side).



Figur 4.3 - Oversigt over vandprøvetagningslokaliteter i henholdsvis Hummelsø (venstre) og Velling Igelsø (højre). Kortene er lavet ved hjælp af ortofoto fra Cowi (2014). Copyright COWI.

Ved hvert prøvested blev der udtaget ca. 2,5 liter søvand resulterende i 10 liter blandet vand, der skulle repræsentere et gennemsnit af hele søen. Således blev der taget højde for eventuelle forskelle i søernes fordeling af eksempelvis algemængde, der kan blive påvirket af forhold så som eksponering for vind.

De samlede vandprøver er blevet brugt til undersøgelser af søernes indhold af total fosfor, samt indhold af kvælstof, klorofyl *a* og suspenderet tørstof, hvis behandlingsmetoder er beskrevet nedenfor.

#### 4.4.1 Klorofyl *a*

Til bestemmelsen af søvandets indhold af klorofyl er der blevet anvendt en metode baseret på en fremgangsmåde af Markager & Fossing (2013). Som tidligere nævnt skal målingerne af in situ klorofyl bruges til bestemmelsen af klorofylalgoritmerne. I det efterfølgende vil en kort beskrivelse af fremgangsmåden fremgå:

Vandprøver fra både Hummelsø og Velling Igelsø er filtreret gennem et 0,7  $\mu\text{m}$  filter. Mængden af søvand, der skal igennem filtret, afhænger af algemængden i prøverne. Når filtret er tæt på impermeabelt, er konserveringen slut og filtret nedfryses til konservering.

Efter konservering indsættes filtret i et centrifugeglas og 10 ml ethanol tilsættes. Centrifugeglases omrystes inden centrifugering i 10 min ved  $10.000 \text{ m s}^{-2}$ . Klorofylekstraktet overføres herefter til en glaskuvette, hvorefter absorbansen kan aflæses i et fotospektrometer. Denne absorbans skal derefter konverteres til en klorofylmængde ved hjælp af en simpel ligning.

#### 4.4.2 Suspenderet tørstof

Formålet med bestemmelsen af suspenderet tørstof er at vurdere, hvorvidt det har indflydelse på satellit- såvel som dronebilleder. Refleksionen fra vandsøjlen skyldes alle fritsvævende partikler i vandet det være sig alger, suspenderet tørstof herunder mineralske partikler og opløste organiske stoffer såvel som vandet selv (Sand-Jensen, et al., 2013).

Fremgangsmåden til bestemmelse af andelen af suspenderet tørstof er lavet ud fra den fælles europæiske standard *DS/EN 872*. En kort beskrivelse af denne fremgangsmåde forefindes nedenfor.

Andelen af suspenderet tørstof bestemmes ud fra samme principper som ved klorofyl-eksperimentet, hvor en bestemt mængde vand skal gennem et filter, hvorefter vægtdifferencen analyseres. Før filtrene kan vejes efter eksperimentets udførelse skal filtrene tørres ved  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  i 24 timer for at fjerne al tilføjede vand.

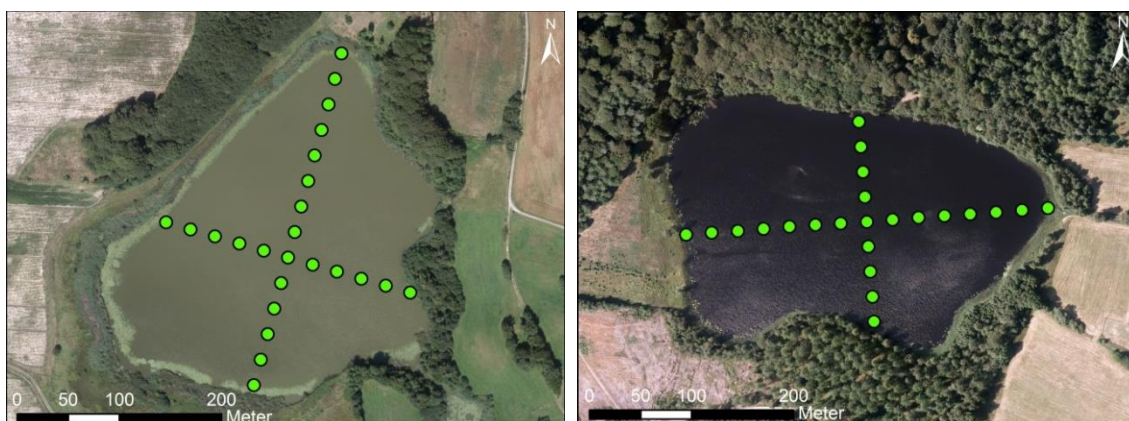
Ved dette forsøg bruges et filter med maskevidde på 1,2  $\mu\text{m}$  og mængden af vand, der skal

filtreres er, ligesom ved klorofyl-eksperimentet, afhængigt af vandets indhold af suspenderet tørstof.

#### 4.4.3 Secchi-dybde

Secchi-dybden er målt ud fra den antagelse, at vandets klarhed influerer på dronens og satelliters evne til at estimere mængden af klorofyl i vandet. Af samme årsag har det været et ønske at tage relativt mange prøver således at søernes eventuelle forskellige sigtdybder kan sammenlignes med resultaterne fra drone- og satellitbilleder.

Formålet med måling af secchi-dybder er at undersøge, hvordan sigtbarheden ændrer sig i søerne over sæsonen. Der findes en sammenhæng mellem mængden af partikler i vandet (herunder alger og suspenderet tørstof) og målet er at vurdere om der eksempelvis findes sammenhæng mellem stigende klorofylindhold og vandets sigtbarhed. (Sand-Jensen, et al., 2013)



Figur 4.4 - Oversigt over secchi-målingslokaliteter ved Hummelsø (venstre) og Velling Igelsø (højre). Kortene er lavet ved hjælp af ortofoto fra Cowi (2014). Copyright COWI.

Til dette projekt er secchi-dybden blevet målt i to transekter på langs og på tværs af begge søer. Der er foretaget en måling omtrent hver 25. meter. Kortene ovenfor viser de omtrentlige placeringer af secchi-målingerne ved hver sø.

Selve målingen af sigtdybden foregår ved hjælp af en såkaldt secchi-skive, der er en hvid, rund skive med en diameter på 20 cm, som sænkes ned i vandet. Når skiven lige præcist ikke kan ses længere noteres længden af rebet, der er fastspændt til secchi-skiven. Da lys mister sin energi både på vej ned og op fra secchi-skivens dybde når lyset i virkeligheden længere ned end, hvad der kan ses fra overfladen.

#### 4.4.4 Lysintensitet

I forbindelse med indsamling af in situ-målinger og droneflyvning, er lysintensitet blevet målt ved hjælp af et spektrometer. Målingerne er taget ud fra en antagelse om, at lysindstrålingen påvirker sigtdybden i vandet, hvor en skyfri himmel vil fordrage en større sigtdybde mens et tæt skydække vil mindske sigtdybden. Samtidigt antages det, at drone- og satellitbilleder vil blive påvirket af mængden af indstråling på tidspunktet for overflyvningen.

Målet er således at få en værdi for lysindstrålingen på feltdagene for de to søer. Værdierne, der logges kan sammenlignes og det vil blive estimeret om eventuelle forskelle i indstrålingen for perioden for dataindsamlingen i de to søer har nogen effekt på de indsamlede sigtdybder og dronebilleder.

Selve målingerne er taget ved at placere spektrometret placeres i en lysning, således at lyset ikke begrænses af eventuelle træer eller lignende. Lysfilteret vendes mod himlen for at få den direkte indstråling. Spektrometret sættes vha. softwaren *SpectraSuite* til at logge lys med bølgelængder

mellem 300 - 750 nm hvert femte minut. Herefter tages et gennemsnit af målingerne og resultatet er en graf, der viser gennemsnitsindstrålingen for den tidsperiode, hvor dataindsamlingen blev foretaget.

#### 4.4.5 Total fosfor

Formålet med at undersøge total er at undersøge, hvordan næringsstoffets tilstedeværelse påvirker algevækst. Det vil blive undersøgt, hvordan mængden af total udvikler sig og om der findes en sammenhæng mellem klorofylværdierne i samme periode.

Metoden til bestemmelse af totalt fosfor er baseret på Nielsen (2007)'s tilpassede fremgangsmåde fra standarden *DS 292 and Standard Methods 2500-P*. En kort beskrivelse af fremgangsmåden fremgår af det følgende:

Fosformængden måles ved at udtage to gange 50 ml søvand fra hver sø. Vandet filtreres gennem et 0,3 µm filter, hvorefter prøverne konserveres vha. svovlsyre (4 mol). Til prøvetagningen foretages en trippelbestemmelse.

Efter konserveringen tilføjes ammoniumamolybdat og kaliumantimonatrat, hvilket reagerer med vandprøvernes indhold af ortofosfat, hvorefter en intens blå farve fremkommer. Den blå farve repræsenterer således koncentrationen af ortofosfat, hvilket kan bestemmes vha. et spektrofotometer og en ligning.

#### 4.4.6 Kvælstof

Bestemmelsen af søernes kvælstofindhold er lavet ud fra standarden *DS 223:1991*, hvilket er blevet udført af en tredjepart.

Formålet med bestemmelse af kvælstof er at undersøge om næringsstoffet har en effekt på udviklingen i klorofylmængde. Det undersøges således om der er sammenhæng mellem udviklingen i kvælstof- og klorofylindhold.

Forinden bestemmelsen af kvælstofindholdet, er prøverne blevet behandlet på følgende måde. Eftersom der også på denne parameter er ønsket en trippelbestemmelse, blev der udtaget tre vandprøver fra hver sø fra hver prøvetagning. Hver vandprøve måler omtrent 10 ml, som er filteret gennem et 0,3 µm filter, der til konservering er blevet nedfrosset i små plastikbeholdere.

Efter konservering er kvælstofprøverne som nævnt sendt til en specialist, der har udført målingerne efter gældende standarder.

### 4.5 Litteraturstudie

Besvarelsen af femte undersøgelsespunkt til rapportens perspektivering er delvist lavet ud fra et litteraturstudie. Litteraturstudiets formål er at undersøge, hvordan droner bruges i andre dele af verden og hvordan disse metoder ville kunne bidrage til besvarelsen af dette projekts problemformulering. Der fokuseres på to hovedemner inden for anvendelsen af droner til monitoring, nemlig dataindsamling og databehandling. Studiet vil vurdere droners anvendelighed bl.a. i forhold til nye satellitter.

Litteraturstudiet tager udgangspunkt i videnskabelige artikler tilgængelige gennem portalen *Web of Science*. Litteraturen er begrænset til artikler der er udgivet i år 2010 og fremefter. I litteratursøgningen er brugt følgende søgeord: *drone, satellite, UAV, UAS, environmental, monitoring, remote sensing, freshwater, aquatic systems, chlorophyll og algae*. Litteraturstudiet benytter 12 artikler.



## 4.6 Geodata og andre GIS-metoder

Udover brugen af GIS-værktøjer til analysen af klorofylmængden i de udvalgte søer, er ArcGIS-brugt til at lave oversigtskort, der eksempelvis bruges i lokalitetsbeskrivelsen i projektet. Herudover er ArcGIS også blevet anvendt til at konstruere oplandsanalyser for de to søer (for nærmere beskrivelse, se bilag 6). Formålet med oplandsanalysen er at få et indblik i hvilke elementer der dominerer oplandet og således undersøge hvor stor miljøbelastningen er. Som nævnt er GIS også brugt til at sammensætte dronebilleder og til at analysere klorofyl fra landsat.

Nedenfor præsenteres det geodata som ArcGIS-arbejdet i projektet har benyttet sig af.

Kort 10	Vektordata fra Geodatastyrelsen, der indeholder landskabs-elementer som vandløb, skov og veje. Kort 10 er blevet brugt i oversigtskortene.
Ortofoto	Luftfotos over hele Danmark fra COWI (2014) i rasterdata. Luftfotoerne er blevet brugt til oversigtskort og som underlæg til de dronebaserede luftfotos.
Jordtypekort	Rasterbaseret kort fra GEUS, der angiver jordtypen i toppen af jordlaget. Jordtypekortene er ikke brugt direkte som kort i projektet, men bruges til at beskrive de dominerende jordtyper i søernes opland.
Landsskabs-elementer	Landsskabs-elementerne fra Aarhus Universitet (DJF) anvendes heller ikke som kortlag, men bruges til at beskrive, hvorfra de geologiske aflejringer stammer.
Højdemodel	Rasterbaseret højdemodel DTM/hydro (cellestørrelse på 1,6 m) fra Geodatastyrelsen. Højdemodellen bruges i oplandsanalyserne af søerne.

ArcGIS er desuden blevet anvendt til at georeferere ortofotos. Før overflyvning blev henholdsvis fire og tre *ground control points* (GCP) lagt ud omkring Hummelsø og Velling Igelsø. GCP'erne blev opmålt med differential GPS og herefter georefereret i ArcGIS vha. værktøjet *Georeferencing*. Georefereringen havde til formål at kunne placere ortofotos på et COWI oversigtskort samt for at formindske forvrængning fra GoPro-kameraets fiskeøjelinse.

## 4.7 Statistik

Dette afsnit præsenterer de statistiske metoder, der er anvendt i dette projekt. Projektet anvender tre forskellige metoder navnlig *t*-test, ANAVA enkelt faktor samt multivariabel statistik.

### 4.7.1 *t*-test

Den uafhængige *t*-test tester hypoteser på to niveauer. Testen sammenligner to middelværdier, hvor  $H_0$  eksempelvis kan være  $\text{klorofyl}_{\text{in situ}} = \text{klorofyl}_{\text{drone}}$  der tester om de to datasæt er ens.  $H_0$ -hypotesen er konservativ og antager at de to datasæt er ens. Signifikansniveauet for  $H_0$ -hypoteserne er i dette projekt 0,05. En forkastning af  $H_0$ -hypotesen vil i eksemplet vise at  $\text{klorofyl}_{\text{in situ}}$  er forskellig fra  $\text{klorofyl}_{\text{drone}}$ , der således er signifikant forskellige. (Poulsen, 2006)

### 4.7.2 ANAVA enkelt faktor

ANAVA bruges i projektet til at undersøge de enkelte parametre for forskelle fordelt over projektets feltdage. ANAVA-testen sammenligner variansen på de forskellige datasæt gennem en *F*-test.  $H_0$ -hypotesen har, ligesom i *t*-testen, et signifikansniveau på 0,05. ANAVA-testens output er

en  $p$ -værdi der forkaster  $H_0$ -hypotesen hvis den er under signifikansniveauet på 0,05. Ulempen ved ANAVA-testen er, at den ikke viser, hvilke feldage der er forskel på, men blot, at der er forskel på mindst to af de undersøgte middelværdier. For at identificere, hvilke middelværdier, der er forskellige fra hinanden bruges programmet PAST3 til at lave  $t$ -test på flere prøver. (Poulsen, 2006). PAST er et gratis statistikprogram udviklet af Oslo Universitet. Programmet er anvendeligt til udførelsen af multivariabel statistik (kan hentes på <http://folk.uio.no/ohammer/past/>).

#### 4.7.3 Multivariabel statistik

$t$ -testen på flere prøver sammenligner, ved *Tukey's pairwise*-metoden, alle middelværdierne i et datasæt med hinanden. Dette er bestemt i PAST 3. De individuelle  $P$ -værdier mellem prøverne vil indikere signifikant forskel, hvis de er under 0,05. Eftersom tabeller indeholdende disse  $P$ -værdier er en anelse omfattende findes de på bilag 7.

## 5 Resultater

Dette kapitel præsenterer projektets resultater for henholdsvis in situ-målinger, drone og satellit. In situ-målingerne er, udover at være præsenteret i tabeller, plottet på grafer for at identificere udviklingen igennem projektets forløb.

Resultatafsnit 5.3 præsenterer, hvorfra udvalgte dronebilleder er valgt. Afsnittet bruges hovedsageligt til at skabe et overblik inden billederne bliver præsenteret enkeltvis i diskussionen.

Det sidste afsnit vil præsentere projektets to klorofylalgoritmer for henholdsvis drone og Landsat 8. Algoritmernes usikkerhed bliver kort berørt inden de inddrages i diskussion. I diskussionen vil algoritmerne blive gennemgået mere grundigt og bl.a. blive sammenlignet med klorofylalgoritmen fra Closter, et al. (Upubliceret).

I bilag 8 findes en feltdagsoversigt med hver feltdags målinger og observationer.

### 5.1 In situ-målinger

Dette afsnit vil præsentere resultaterne for samtlige in situ-målinger, der er foretaget i Hummelsø og Velling Igelsø. Rækkefølgen for disse resultater er samme som ved metodeafsnittet, hvilket vil sige, at afsnittet først præsenterer resultaterne for klorofyl og suspenderet tørstof, og dernæst Secchi-dybde og lysintensitet. Slutteligt Værdierne for total fosfor og opløst kvælstof.

Sidst i dette afsnit præsenteres en oversigt over alle parametres middelværdi fordelt over alle feltdage og begge søer. Til denne oversigt forekommer også en kort gennemgang af de statistiske sammenhænge mellem de enkelte parametre.

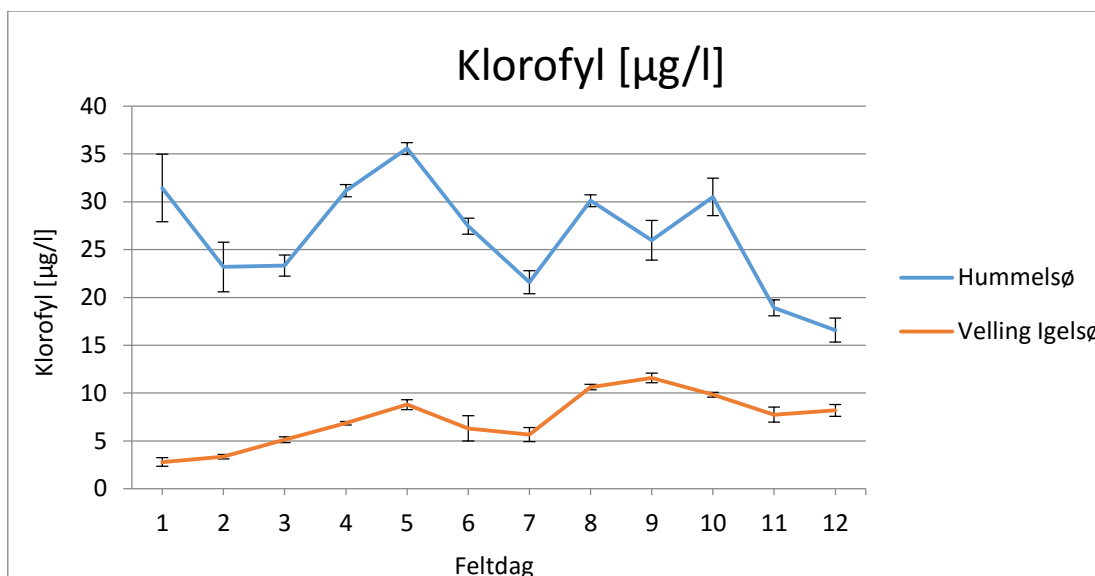
#### 5.1.1 Klorofyl $a$

Tabellen nedenfor indeholder klorofyl  $a$ -resultaterne for Hummelsø og Velling Igelsø. Tabellen indeholder gennemsnitsværdier for hver feltdag samt tilhørende standardafvigelser. Tabellen indeholder ligeledes totale gennemsnitsværdier for søerne. De log-transformerede middelværdier er fremvist her, da disse er brugt i klorofylalgoritmerne sammen med indekstal for henholdsvis drone- og satellitbilleder.

Tabel 5.1 - Oversigt over målte værdier for klorofyl  $a$  for Hummelsø og Velling Igelsø.

Feltdag	Hummelsø			Velling Igelsø		
	Middelværdi [ $\mu\text{g/l}$ ]	Std.afvigelse [ $\mu\text{g/l}$ ]	Log (middel- værdi)	Middelværdi [ $\mu\text{g/l}$ ]	Std.afvigelse [ $\mu\text{g/l}$ ]	Log (middel- værdi)
1	31,44	3,53	1,50	2,80	0,46	0,45
2	23,18	2,60	1,37	3,35	0,23	0,52
3	23,34	1,11	1,37	5,14	0,30	0,71
4	31,18	0,63	1,49	6,85	0,17	0,84
5	35,57	0,62	1,55	8,79	0,53	0,94
6	27,44	0,83	1,44	6,31	1,32	0,80
7	21,58	1,20	1,33	5,68	0,73	0,75
8	30,11	0,61	1,48	10,63	0,28	1,03
9	25,98	2,08	1,41	11,59	0,50	1,06
10	30,51	1,97	1,48	9,83	0,24	0,99
11	18,92	0,83	1,28	7,75	0,77	0,89
12	16,59	1,25	1,22	8,19	0,62	0,91
Gns.	26,32	5,72	-	7,24	2,72	-

Grafen på næste side viser udviklingen i mængden af klorofyl  $a$  i begge søer.



Figur 5.1 - Udviklingen i mængden af klorofyl a i Hummelsø og Velling Igelsø. Standardafvigelsen for hver prøvedag er markeret med sorte linjer i hvert punkt.

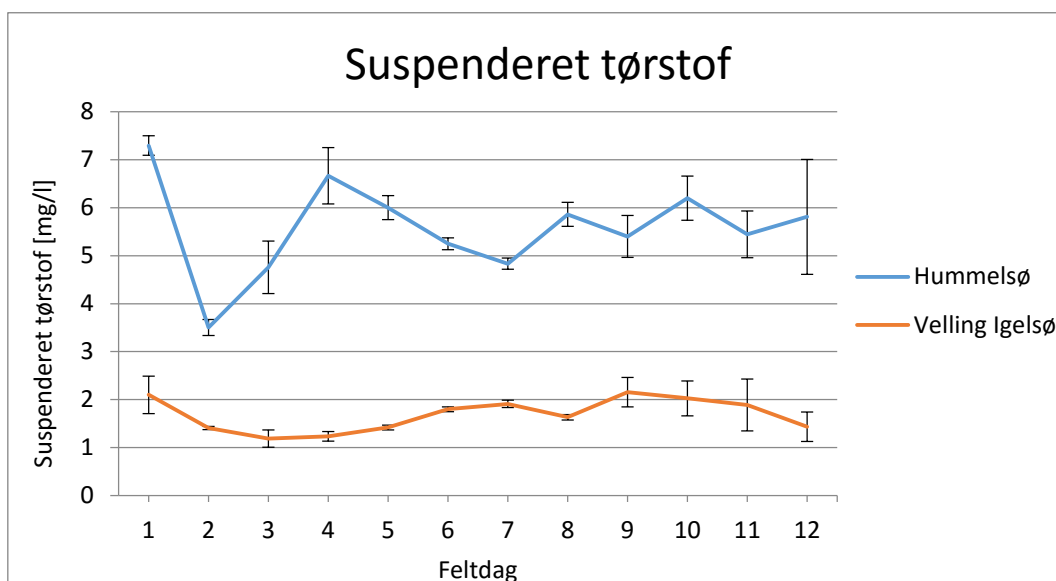
### 5.1.2 Suspenderet tørstof

Nedenstående tabel viser gennemsnitsværdierne fundet for suspenderet tørstof i begge søer. Tabellen viser desuden fundne standardafvigelser for samtlige feltdage. Nederst i tabellen findes udregnede middelværdier for samtlige målinger.

Tablet 5.2 - Oversigt over fundne værdier for suspenderet tørstof i Hummelsø og Velling Igelsø.

Feltdag	Hummelsø		Velling Igelsø	
	Middelværdi [mg/l]	Standardafvigelse [mg/l]	Middelværdi [mg/l]	Standardafvigelse [mg/l]
1	7,29	0,20	2,10	0,39
2	3,50	0,17	1,41	0,03
3	4,76	0,55	1,19	0,18
4	6,67	0,59	1,23	0,10
5	6,00	0,25	1,42	0,05
6	5,25	0,13	1,80	0,05
7	4,83	0,12	1,91	0,08
8	5,86	0,25	1,63	0,06
9	5,40	0,44	2,15	0,31
10	6,20	0,46	2,03	0,36
11	5,44	0,49	1,89	0,54
12	5,81	1,20	1,43	0,31
Gns.	5,58	1,03	1,68	0,40

Grafen på næste side illustrerer udviklingen i suspenderet tørstof for begge søer.



Figur 5.2 - Udviklingen i mængden af suspenderet tørstof i Hummelsø og Velling Igelsø. Standardafvigelsen for hver prøvedag er markeret med sorte linjer i hvert punkt.

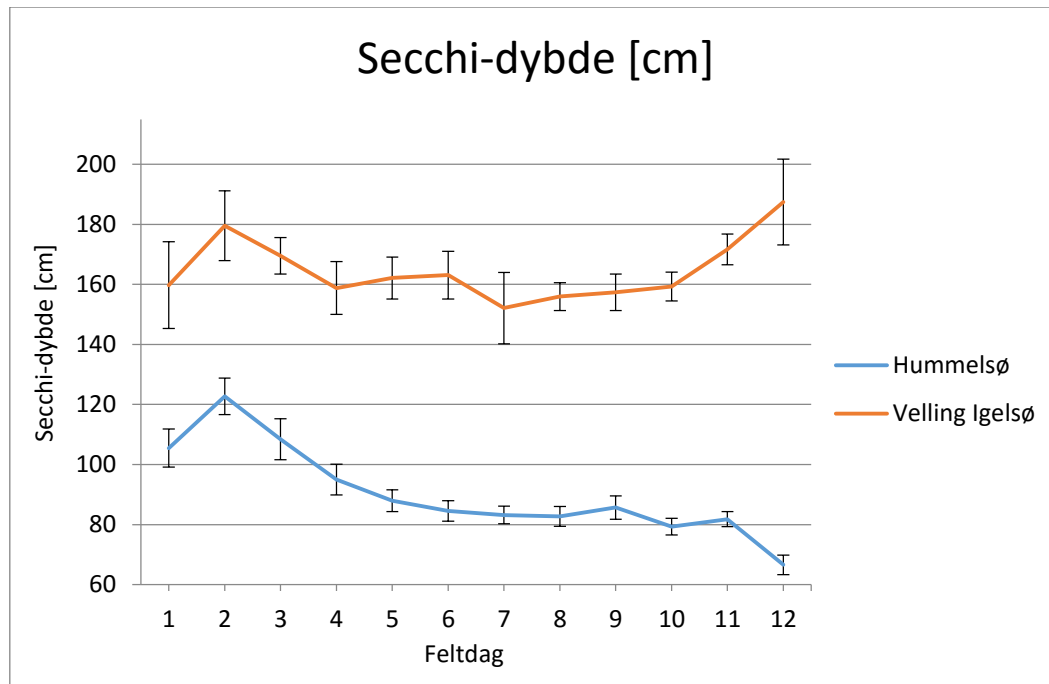
### 1.1.1 Secchi-dybde

Herunder er sigtdybden i Hummelsø og Velling Igelsø præsenteret, i form af gennemsnitlige secchi-dybder. Foruden secchi-dybder, er også standardafvigelse angivet i Tabel 5.3 såvel som på Figur 5.3.

Tabel 5.3 - Gennemsnitlige secchi-dybder for Hummelsø og Velling Igelsø, samt tilhørende standardafvigelser.

Feltdag	Hummelsø		Velling Igelsø	
	Middelværdi [cm]	Standardafvigelse [cm]	Middelværdi [cm]	Standardafvigelse [cm]
1	105,5	6,4	159,8	14,5
2	122,7	6,1	179,5	11,6
3	108,4	6,8	169,5	6,1
4	95,0	5,1	158,8	8,8
5	88,0	3,7	162,1	7,0
6	84,6	3,4	163,1	8,0
7	83,2	2,9	152,1	11,9
8	82,7	3,4	156,0	4,6
9	85,7	3,9	157,4	6,1
10	79,3	2,8	159,3	4,8
11	81,8	2,5	171,8	5,1
12	66,6	3,2	187,4	14,3
Gns.	90,3	15,2	164,7	10,4

Figuren på næste side illustrerer udviklingen for secchi-dybde i søerne, over 12 feltdage henover foråret.



Figur 5.3 - Illustration af gennemsnitlige secchi-dybder med tilhørende standardafvigelser.

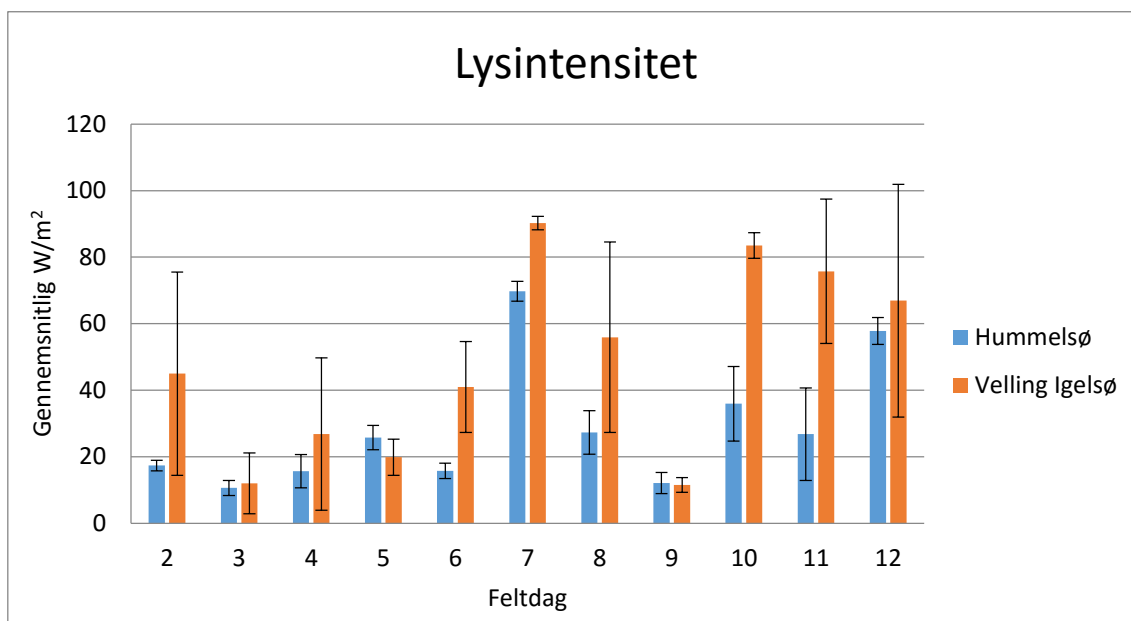
### 5.1.3 Lysintensitet

I Tabel 5.4 er den gennemsnitlige lysintensitet for de enkelte feltdage angivet. Desuden er standardafvigelsen angivet. Lysintensitetsdata, hvorpå gennemsnittene er udregnet, er placeret i bilag 7. Bemærk at lysintensiteten først måles fra feltdag 2.

Tabel 5.4 - Oversigtstabel for gennemsnitlig lysintensitet ved henholdsvis Hummelsø og Velling Igelsø.

Feltdag	Hummelsø		Velling Igelsø	
	Lysintensitet [W/m <sup>2</sup> ]	Standard afvigelse [W/m <sup>2</sup> ]	Lysintensitet [W/m <sup>2</sup> ]	Standard afvigelse [W/m <sup>2</sup> ]
2	17,37	1,61	44,98	30,57
3	10,62	2,29	11,98	9,14
4	15,68	5,03	26,86	22,89
5	25,76	3,67	19,88	5,46
6	15,78	2,33	40,99	13,67
7	69,71	2,99	90,21	2,02
8	27,31	6,51	55,93	28,61
9	12,11	3,18	11,55	2,24
10	35,94	11,19	83,49	3,85
11	26,79	13,93	75,74	21,69
12	57,85	4,03	66,93	34,98
Gns.	28,63	19,14	48,05	28,55

Værdierne præsenteret i Tabel 5.4 er visualiseret på grafen på næste side. Grafen illustrerer, hvordan den gennemsnitlige lysintensitet varierer fra feltdag til feltdag samt fra sø til sø.



Figur 5.4 - Grafisk illustration af den gennemsnitlige lysintensitet for hver felt dag.

#### 5.1.4 Totalt fosfor

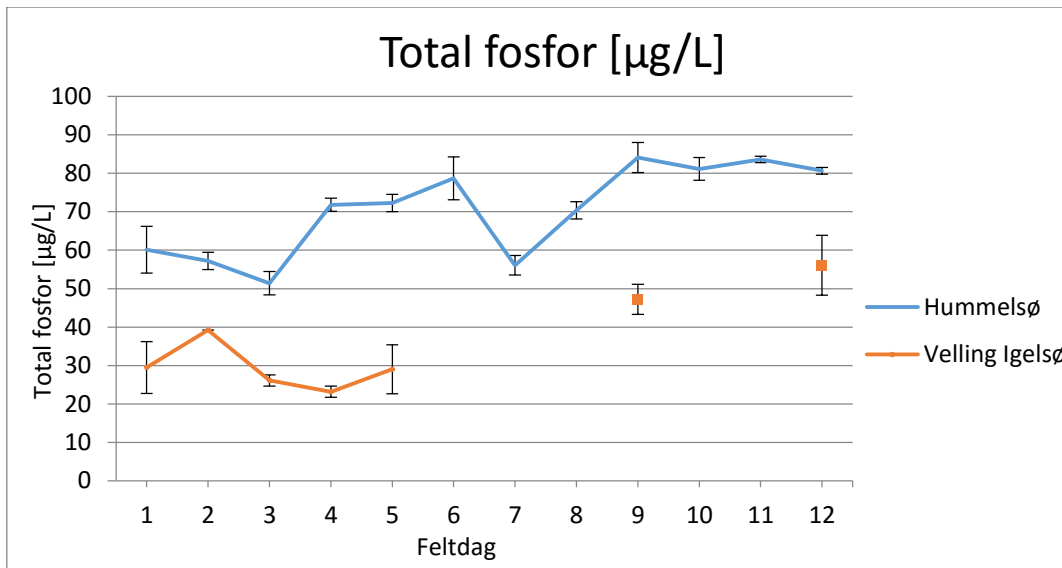
Nedenstående tabel viser de fundne værdier for totalt fosfor fundet for Hummelsø og Velling Igelsø. Udover værdierne for hver prøvedag viser tabellen også standardafvigelser samt totale gennemsnitsværdier for begge søer.

De manglende middelværdier for Velling Igelsø skyldes en metodisk fejl i aflæsningen af absorbansværdier under eksperimentet. Værdierne, der ikke er inkluderet her, har en værdi <20,20 µ/l.

Tabel 5.5 - Oversigt over fundne værdier for total fosfor for Hummelsø og Velling Igelsø. De manglende værdier skyldes en metodisk fejl under aflæsningen i eksperimentet.

Felt dag	Hummelsø		Velling Igelsø	
	Middelværdi [µg/l]	Standardafvigelse [µg/l]	Middelværdi [µg/l]	Standardafvigelse [µg/l]
1	60,14	6,07	29,51	6,74
2	57,22	2,23	39,23	0,00
3	51,39	3,04	26,11	1,46
4	71,80	1,68	23,19	1,46
5	72,29	2,23	29,02	6,36
6	78,68	5,58	-	-
7	56,08	2,55	-	-
8	70,33	2,25	-	-
9	84,09	3,90	47,23	3,90
10	81,14	2,95	-	-
11	83,60	0,85	-	-
12	80,65	0,85	56,08	0,85
Gns	48,29	14,66	35,77	12,19

Grafen på næste side viser udviklingen i mængden af total fosfor i begge søer.



Figur 5.5 - Udviklingen i mængden af total fosfor i Hummelsø og Velling Igelsø. Standardafvigelsen for hver prøvedag er markeret med sorte linjer i hvert punkt. De manglende værdier skyldes en metodisk fejl under aflæsningen i eksperimentet.

### 5.1.5 Kvælstof

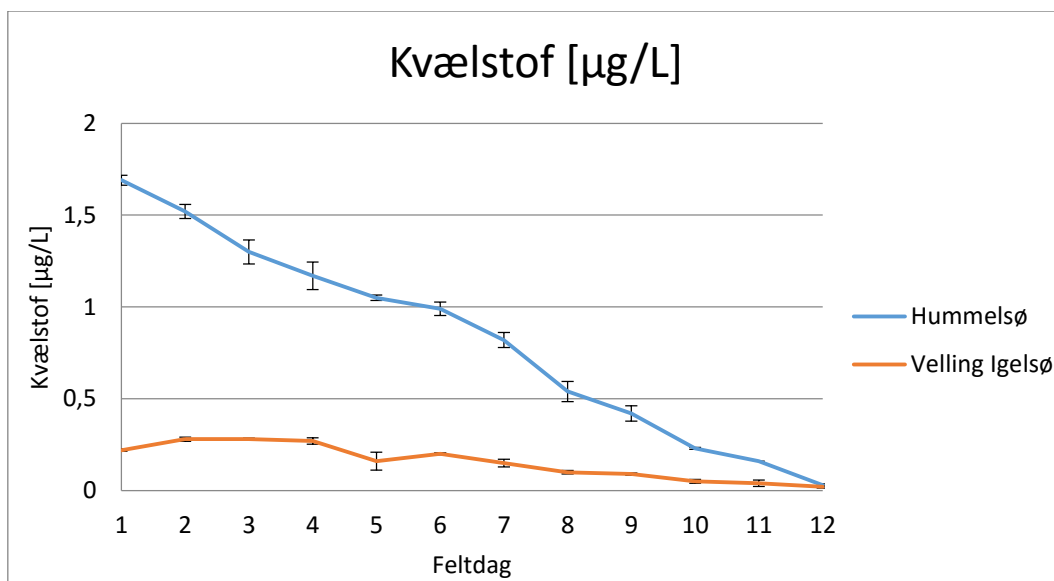
Kvælstofindhold i søerne er præsenteret i Tabel 5.6, hvor feltdagenes middelværdi er angivet sammen med standardafvigelse.

Tabel 5.6 - Kvælstofindhold i Hummelsø og Velling Igelsø.

Feltdag	Hummelsø		Velling Igelsø	
	Middelværdi [µg/l]	Standardafvigelse [µg/l]	Middelværdi [µg/l]	Standardafvigelse [µg/l]
1	1,69	0,03	0,22	0,01
2	1,52	0,04	0,28	0,01
3	1,30	0,07	0,28	0,01
4	1,17	0,08	0,27	0,02
5	1,05	0,02	0,16	0,05
6	0,99	0,04	0,20	0,01
7	0,82	0,04	0,15	0,02
8	0,54	0,06	0,10	0,01
9	0,42	0,04	0,09	0,01
10	0,23	0,01	0,05	0,01
11	0,16	0,00	0,04	0,02
12	0,03	0,01	0,02	0,01
Gns	0,83	0,55	0,16	0,10

Udviklingen indenfor søernes kvælstofindhold er illustreret på figuren på næste side. Standardafvigelsen er også angivet på grafen.





Figur 5.6 - Illustration af udviklingen i søernes kvælstofindhold i undersøgelsesperioden.

### 5.1.6 Opsummering

Nedenstående tabeller (Tabel 5.7 og Tabel 5.8) opsummerer gennemsnitsværdierne for samtlige in situ-parametre fordelt over de to søer.

Tabel 5.7 - In situ-parametre for Hummelsø for hver prøvedag.

Feltdag	Hummelsø					
	Klorofyl [µg/l]	Suspenderet tørstof [mg/l]	Secchi-dybde [cm]	Lys [W/m <sup>2</sup> ]	Total fosfor [µg/l]	Kvælstof [µg/l]
1	31,44	7,29	105,5	-	78,68	1,69
2	23,18	3,50	122,7	17,37	56,08	1,52
3	23,34	4,76	108,4	10,62	70,33	1,30
4	31,18	6,67	95,0	15,68	84,09	1,17
5	35,57	6,00	88,0	25,76	81,14	1,05
6	27,44	5,25	84,5	15,78	39,67	0,99
7	21,58	4,83	83,2	69,71	24,33	0,82
8	30,11	5,86	82,7	27,31	34,00	0,54
9	25,98	5,40	85,7	12,11	43,33	0,42
10	30,51	6,20	79,3	35,94	41,33	0,23
11	18,92	5,44	81,8	26,79	43,00	0,16
12	16,59	5,81	66,6	57,85	41,00	0,03
Gns.	26,32	5,58	90,3	28,63	53,10	0,83

Begge tabeller er blevet testet for varians vha. en ANAVA-test for hver parameter. ANAVA-testen viste, at der er en signifikant forskel på middelværdierne for to eller flere af feltdagene for hver parameter og der således er sket en signifikant udvikling for hver parameter for både Hummelsø og Velling Igelsø. *P*-værdierne for *t*-testene mellem feltdagenes målinger er at finde i bilag 7.

Tabel 5.8 - In situ-parametre for Velling Igelsø for hver prøvedag.

Velling Igelsø						
Feltdag	Klorofyl [µg/l]	Suspenderet tørstof [mg/l]	Secchi-dybde [cm]	Lys [W/m <sup>2</sup> ]	Total fosfor [µg/l]	Kvælstof [µg/l]
1	2,80	2,10	159,8	-	29,51	0,22
2	3,35	1,41	179,5	44,98	39,23	0,28
3	5,14	1,19	169,5	11,98	26,11	0,28
4	6,85	1,23	158,8	26,86	23,19	0,27
5	8,79	1,42	162,1	19,88	29,02	0,16
6	6,31	1,80	163,1	40,99	-	0,20
7	5,68	1,91	152,1	90,21	-	0,15
8	10,63	1,63	156,0	55,93	-	0,10
9	11,59	2,15	157,4	11,55	47,23	0,09
10	9,83	2,03	159,3	83,49	-	0,05
11	7,75	1,89	171,7	75,74	-	0,04
12	8,19	1,43	187,4	66,93	56,08	0,02
Gns.	7,24	1,68	164,7	48,05	35,77	0,20

I problemanalysen er der redegjort for, hvordan tilstedeværelsen af næringsstoffer fordrer algeopblomstring i søer, og at denne kan spores vha. klorofylindhold. Klorofylindholdet skulle stige i løbet af sæsonen ved stigende lysintensitet.

Udviklingen af klorofylindholdet for Hummelsø vurderes imidlertid ikke som værende særlig betydelig og er ikke karakteristisk for en næringsrig sø. Den manglende algeopblomstring kan umiddelbart forklares ved indholdet af fosfor og kvælstof i søen. I tabellen ses det, hvordan indholdet af disse næringsstoffer falder i løbet af de ca. tre måneder, hvor dataindsamlingen stod på. Eftersom fosfor og kvælstof er vigtige næringsstoffer for alger, kan fraværet af algeopblomstring muligvis tilskrives disse lave mængder. Baggrunden, hvorpå Hummelsø blev udvalgt i projektet som en næringsrig sø må således siges at være en forkert antagelse, da søen forekommer mindre næringsrig end forventet. Hummelsø tilhører med et gennemsnitligt klorofylindhold på 26,3 µg/l ifølge projektets målinger tilstandsklassen moderat, jævnfør Tabel 1.2 i problemanalysekapitlet (kapitel 1).

Klorofylindholdet i Velling Igelsø stiger fra feltdag 1 og frem til feltdag 9. Herefter begynder indholdet at falde stødt. Forklaringen er sandsynligvis udtryk for samme fænomen som gjorde sig gældende for Hummelsø. Kvælstofindholdet i søen falder og det vurderes, at fraværet af næringsstoffet er årsag til, at klorofylindholdet ikke stiger yderligere. Klorofylindholdet i Velling Igelsø på 7,2 µg/l placerer søen i tilstandsklassen god, jævnfør Tabel 1.2.

Ved hjælp af en korrelationsanalyse udført i det statistiske værktøj PAST, er sammenhængen mellem klorofyl og de resterende in situ-parametre, på nær lysintensitet, undersøgt nærmere.

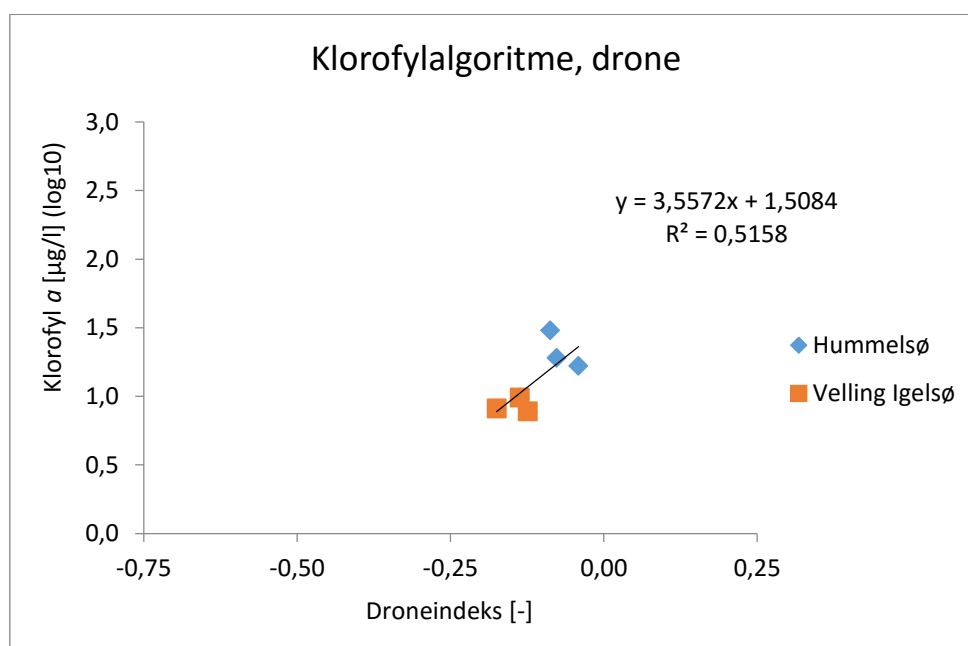
I denne undersøgelse viser det sig, at der for Hummelsø er rimelige, positive sammenhænge mellem udviklingen i klorofyl  $\alpha$ -koncentrationen og parametrene suspenderet tørstof (forklaringsgrad på 48 %), total fosfor (forklaringsgrad på 47 %) samt kvælstof (forklaringsgrad på 32 %). For Velling Igelsø ses en negativ sammenhæng mellem udviklingen i klorofyl  $\alpha$  og kvælstof. I bilag 7 ses alle  $P$ -værdier udregnet mellem udvalgte in situ-parametre.

## 5.2 Drone- og satellitklorofylalgoritme

Dette afsnit vil præsentere de udregnede klorofylalgoritmer for de indsamlede drone- og satellitbilleder. Endvidere vil afsnittet præsentere de beregnede gennemsnitsklorofylmængder ud fra klorofylalgoritmerne og indeksene.

Nedenstående figurer viser de fundne sammenhænge mellem log-transformeret klorofylindhold og gennemsnitsværdier fra henholdsvis drone- og satellitindeks. Hver graf viser en tendenslinje for samtlige punkter samt dennes ligning og forklaringsgrad ( $R^2$ ).

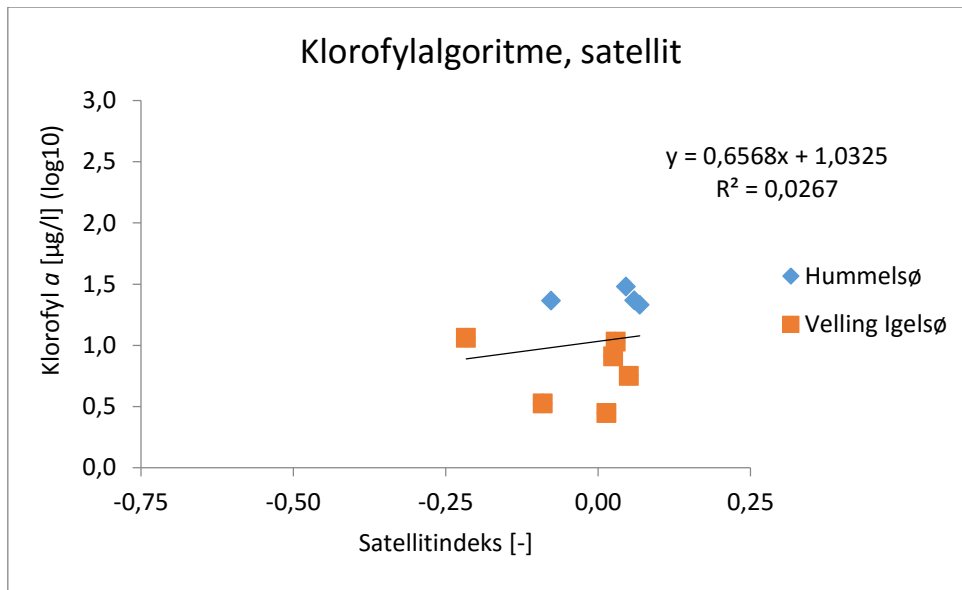
Tabellerne præsenterer gennemsnitsværdierne for de udregnede indekser samt de tilhørende log-transformerede klorofylværdier. Kun feltdage, hvor både klorofyldata samt henholdsvis drone- og satellitindekser er indsamlet, er vist i figurer og tabeller.



Figur 5.7 - Lineær regressionsanalyse mellem log-transformeret klorofylindhold og droneindeks. Hvert punkt svarer til en feltdag.

Tablet 5.9 - Værdier for droneindeks og log-transformerede klorofylværdier for undersøgte søer.

Hummelsø			Velling Igelsø		
Feltdag	Droneindeks [-]	Klorofyl (log10) [µg/l]	Feltdag	Droneindeks [-]	Klorofyl (log10) [µg/l]
10	-0,09	1,48	10	-0,14	0,99
11	-0,08	1,28	11	-0,12	0,89
12	-0,04	1,22	12	-0,17	0,91



Figur 5.8 - Lineær regressionsanalyse mellem log-transformeret klorofylindhold og satellitindeks. Hvert punkt svarer til en feltdag.

Tabel 5.10 - Værdier for satellitindeks og log-transformerede klorofylværdier for undersøgte søer.

Hummelsø			Velling Igelsø		
Feltdag	Satellitindeks [-]	Klorofyl (log10) [µg/l]	Feltdag	Satellitindeks [-]	Klorofyl (log10) [µg/l]
2	-0,08	1,37	1	0,01	0,45
3	0,06	1,37	2	-0,09	0,52
7	0,07	1,33	7	0,05	0,75
8	0,05	1,48	8	0,03	1,03
			9	-0,22	1,06
			12	0,02	0,91

Nedenfor præsenteres de udregnede klorofylværdier baseret på klorofylalgoritmerne og de gennemsnitlige indeksværdier for hver feltdag, hvor drone- og satellitbilleder er indsamlet. Tabellerne viser desuden de in situ-målte klorofylværdier.

Tabel 5.11 - Beregnede klorofylværdier ud fra middelindeksværdier samt drone- og satellitklorofylalgoritmen.

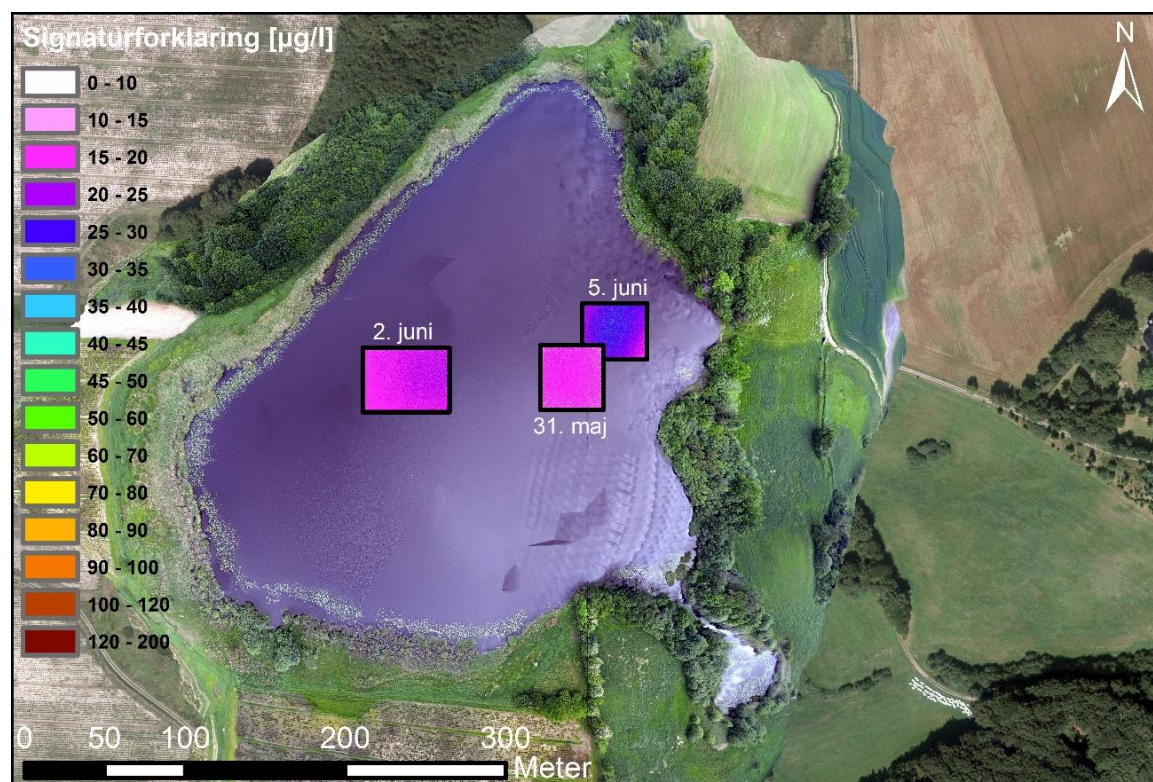
Drone	Beregnet klorofylmængde [µg/l]	In situ-klorofylmængde [µg/l]	Satellit	Beregnet klorofylmængde [µg/l]	In situ-klorofylmængde [µg/l]
Hummelsø	15,43	30,51	Hummelsø	9,55	23,18
	16,74	18,92		11,80	23,34
	23,23	16,59		11,98	21,58
Velling Igelsø	10,24	9,83	Velling Igelsø	11,62	30,11
	12,07	7,75		10,94	7,75
	8,01	8,19		9,41	8,19
				11,62	5,68
				11,28	10,63
				7,73	11,59
		11,11	8,19		

### 5.3 Droneklorofylkort

Dette afsnit vil præsentere oversigtskort over de to søer for hver af de tre overflyvninger. Endvidere vil der blive præsenteret middelværdier for den beregnede klorofylmængde for hver overflyvning.

Formålet med kortene er at give et overblik over, hvor de enkelte klorofylkort er placeret i søerne. Endvidere indikerer de farvede udsnit den beregnede klorofylmængde i søerne.

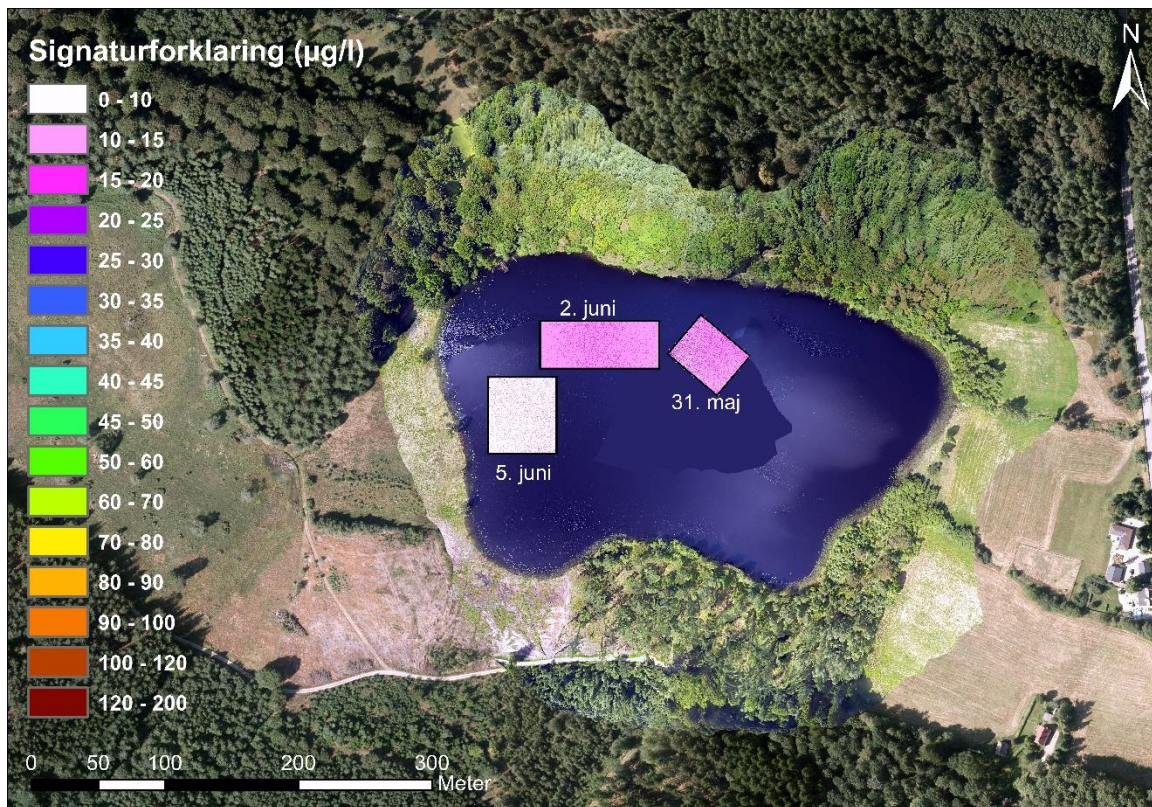
Det skal nævnes at georeferering af udsnittene ikke har været mulig pga. billedernes totale dækning af vand. Billederne er placeret skønsmæssigt i søerne og billedernes proportioner lige så. Kortene skal således ikke betragtes som en nøjagtig geografisk placering af klorofylfordelingen, men nærmere som overbliksbilleder, der tilnærmelsesvist beskriver klorofylfordelingskortenes placering og proportion.



Figur 5.9 - Klorofylkortenes placering og fordeling i Hummelsø. Baggrundsbilledet under det sammensatte luftfoto lavet i forbindelse med dette projekt stammer fra 2014 og er fra COWI (2014). Copyright COWI.

Figuren ovenfor viser klorofylkortenes skønsmæssige placering i Hummelsø. Det ses, at søens beregnede klorofylværdier ligger mellem 10-30  $\mu\text{g/l}$ .

De enkelte klorofylkort er fremstillet vha. RAW-data billeder fra det multispektrale kamera, mens baggrundskortet er konstrueret vha. to ortofotos. Søen og brinken er lavet af sammensatte GoPro-billeder, hvor det resterende af kortet er fra COWI. I kanten af det sammensatte billede kan forvrængning ses i forhold til COWI-ortofotoet i baggrunden. Forvrængningen skyldes dels kameraets fiskeøjelinse, dels manglende overlap og dels, at georefereringen af ortofotoet udelukkende indeholder søen. På selve søen ses også forvrængninger i billedet, men søens proportioner (brinklinje) afbilleder virkeligheden.



Figur 5.10 - Klorofylkortenes placering og fordeling i Velling Igelsø. Baggrundsbilledet under det sammensatte luftfoto lavet i forbindelse med dette projekt stammer fra 2014 og er fra COWI (2014). Copyright COWI.

Figur 5.10 viser klorofylkortenes placering i Velling Igelsø henholdsvis d. 31. maj samt d. 2. og 5. juni. Klorofylmængden i disse udsnit spænder mellem 0 og 20  $\mu\text{g}$  klorofyl pr. l.

Baggrundsbilleder er ligesom ved Figur 5.10 lavet af sammensatte GoPro billeder samt ortofoto fra COWI. Det til formålet sammensatte ortofoto indeholder også forvrængninger ved søens vandoverflade i form af især genskin. Endvidere var det på dette ortofoto ikke muligt at fremstille et komplet ortofoto da midten af billedet ikke kunne sættes sammen. Midten af billedet er blevet farvet blå for layoutets skyld. Formålet med ortofotoet er imidlertid blot, at illustrere placeringen af klorofylkortene på søen. Forvrængningen anses derfor ikke som en væsentlig fejl.

Fælles for klorofylkortenes fordeling på søerne er, at de, på trods af princippet om repræsentativ udvælgelse i forhold til geografisk dækning, er forholdsvis begrænsede. Denne udvælgelse har imidlertid været nødvendig fordi mængden af billeder i høj kvalitet var begrænset og kun dækker en del af søerne. Information om eventuel forskellighed i den horisontale klorofylmængde er således kun undersøgt i begrænset omfang.

## 6 Diskussion

Dette kapitel søger at besvare rapportens fire første undersøgelsespunkter beskrevet i projektbeskrivelsen (kapitel 2). Besvarelsen af undersøgelsespunkterne sker i kronologisk rækkefølge.

### 6.1 Indsamling af data vha. droner

Følgende del omhandler 1. undersøgelsespunkt; *”På hvilken måde kan droner bruges til at indsamle data om søers vandkvalitet?”*

I afsnittet diskuteres dronens funktionalitet som dataindsamlingsmetode. Mulige tekniske forbedringer og overvejelser vedrørende flyveforhold diskuteres med udgangspunkt i erfaringer og med henblik på fremtidig brug.

#### 6.1.1 Udførelse af droneflyvning

At anvende en drone som dataindsamlingsmetode indeholder en vis risiko, hvad angår drift. I forhold til anvendelsen af satellitdata, der pålideligt er tilgængeligt hver 8 dag, er der for dronen større risiko for driftsproblemer. I dette projekt har dronen beklageligvis været ved reparatør over en længere periode, som konsekvens af en defekt.

Dronens defekt og manglende tilstedeværelse er selvsagt beklagelig i forbindelse med den tidsmæssige begrænsning det skyldte for udarbejdelsen af dette projekt, men kan ses som en generel brugsskade, der potentielt kan forekomme ved brugen af drone. Ser man bort fra risikoen for defekter, og antager at dronen er fuldt ud funktionel, kan der derimod indsamles data til enhver tid – kun begrænset af nedbør og kraftig vind. Ved hjælp af dronen er det muligt at indsamle data langt oftere end satellitdata er tilgængeligt, da Landsat 8-billeder for undersøgte søer kun er tilgængeligt ca. hver ottende dag. Ydermere er satellitbilledernes tilgængelighed også begrænset af vejret i forhold til skydække.

Dronen er som nævnt blevet brugt til dataindsamlingen ud fra en forudbestemt flyvning, der er uploadet til dronens autopilot inden flyvning. Den automatiserede flyvning fungerer upåklageligt, såfremt den uploadede mission er udformet korrekt. Missionen til disse flyvninger er optimeret således, at den største datadetaljeringsgrad er indhentet på den flyvetid, der har været til rådighed. Anvendelsen af forudbestemte missioner til monitorering af søer anbefales, da det giver mulighed for at gentage den samme dataindsamling, hvilket er ideelt til at undersøge dynamiske processer såsom algeopblomstring.

Skulle dette projekts forsøg udvides til et større case-område med flere forskellige søer, kunne en database med missioner for enhver sø oprettes som således let kunne uploades og dataindsamlingen kunne udføres indenfor få minutter.

At have en database med missioner kræver selvsagt, at samtlige potentielle problematikker er belyst og afklaret. Den automatiserede flyvning kan fx blive problematisk, hvis den uploadede mission dikterer en flyvehøjde på 100 m, samtidig med, at *geofence* er angivet som 100 m. Hvis dronen rammer geofence-højden returnerer den til *launch*. At dronen vender hjem ved evt. flyveproblemer, er i sig selv en god egenskab, men kan være problematisk i forhold til den begrænsede batteritid.

Batteritiden er ca. 15 min, hvor der af sikkerhedsmæssige grunde oftest kun flyves i 10 min. Hvis dronen returnerer til launch, bruger den dyrebar batteritid, hvilket gør, at batteriet efterfølgende ikke kan dække den ønskede mission og dermed er spildt. Det er naturligvis muligt at påmontere et nyt opladt batteri, men antallet af medbragte batterier er givetvis også begrænset. Batteriets kapacitet, og dermed flyvetiden, er afgørende for, hvor stort et areal, der kan afdæk-

kes. En enkelt, større sø kan monitoreres ud fra flere missioner, hvilket dog kræver udskiftning af batterier undervejs.

Grundet den forholdsvis korte flyvetid, anses dronen som værende mest anvendelig på mindre søer. Da langt størstedelen af de over 120.000 danske søer har et overfladeareal under 1 ha, er dronen brugbar i langt de fleste søer (Sand-Jensen, 2001). Som nævnt i kapitel 1 dikterer vandrammedirektivet en mere omfattende miljømonitoring, hvilket kræver inddragelse af mere effektive teknologier, da miljøtilstanden især i de mindre søer er ukendt.

Droneflyvningen i denne undersøgelse er, som tidligere nævnt, foretaget indenfor bestemmelserne i BL 9-4. Flyves der under BL 9-4 restriktionerne er der visse begrænsninger i forbindelse med afstande til by og vej. Dette bør dog ikke anses som værende et større problem, da der kan søges om kommerciel flyvetilladelse, således de gængse afstande kan overskrides.

#### 6.1.2 Kameraopsætning

Ved brug af drone til dataindsamling skal der påmonteres et brugbart kamera. Til denne undersøgelse er der som nævnt anvendt et Canon ELPH 110 HS kamera, der er indstillet til at optimere opfangelsen af blå, grønt og nærinfrarødt lys. Kameraet er oprindeligt en del af en multispektralt opsætning med to kameraer, hvor den ene halvdel er afmonteret, da dronen ikke kunne kompensere for vægten af begge kameraer.

Som nævnt i afsnit 4.2 anvendes kun det blå og det grønne bånd til udarbejdelsen af klorofylalgoritmen, hvorfor det røde bånd kunne udelades ved dataindsamlingen. I princippet opfanger et almindeligt digitalkamera reflektans i de i projektet anvendte bånd (RGB), men de tager ofte ikke billederne i det ønskede format. I metoden, der praktiseres i denne undersøgelse, anvendes billeder i RAW-format, hvilket skyldes ønsket om at få rådata. RAW-filerne præsenterer de faktiske reflektansværdier for hver enkelt celle uden, at kameraet har foretaget en automatiseret billedbehandling. JPEG-filer, som digitalkameraer oftest producerer, er komprimerede og ofte farve-koregerede således de ikke præsenterer faktiske værdier. De komprimerede billeder forekommer ofte som 8-bit-billeder, hvor der maksimalt kan vises 256 farvenuancer i hver celle (Adobe, u.d.).

I forsøget på at opnå højeste detaljegrad, er der i dette forløb anvendt 16-bit-billeder, hvilket svarer til bitdybden på Landsat 8-billederne. I 16-bit-billederne kan der forekomme 65.536 nuancer, hvilket giver et langt mere nuanceret billede.

Ved at indsamle data i RAW-format stilles der krav til lagringskapacitet. De indsamlede RAW-filer fylder hver 24 MB, hvilket stiller krav til lagringsplads. Udover at fylde væsentligt mere end JPEG-filerne, tager det også længere tid for kameraet at gemme RAW-filerne. Ved kameraopsætningen stod det klart, at der på det anvendte kamera skulle gå op mod ti sekunder før RAW-filen blev gemt og næste billede kunne tages.

Intervaller på ti sekunder kan være en begrænsning i forbindelse med dataindsamlingen, da dronen dermed skal flyve langsommere, for at sikre tilpas overlap i billederne. Udfordringerne med indsamlingen af RAW-filerne kan givetvis undgås, ved at investere i et bedre kamera, der har mere plads og bedre processor, således billederne hurtigere bliver gemt og det næste kan tages.

#### 6.1.3 Billedkvalitet

Billederne er i dette projekt indsamlet i et anvendeligt format i forhold til ovenstående bestemmelser, men ikke alle billederne var brugbare. Ved visuel inspektion af billederne var det tydeligt, at en del af billederne var slørede. Dette kan skyldes, at kameraet har problemer med at stille skarpt. Hvis kameraet er indstillet til automatisk at fokusere inden hvert billede tages, kan den relativt hyppige udløsning medføre, at kameraet ikke når at fokusere. Desuden kan der fo-



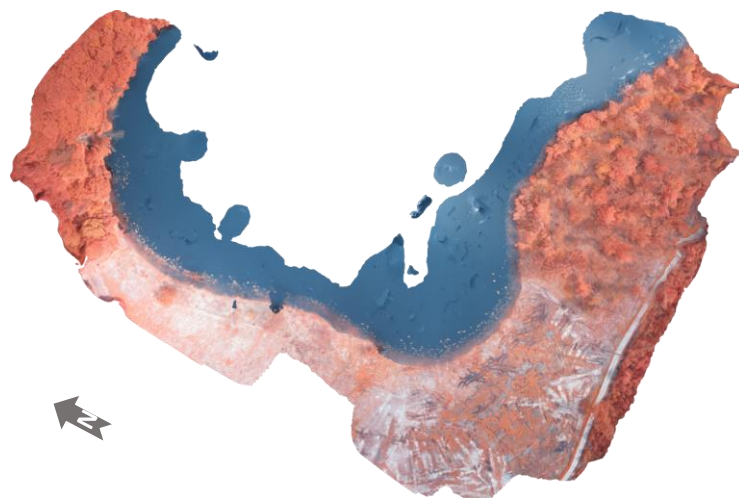
rekomme slør i billederne, hvis kameraet udløses ved checkpoints, hvor dronen ændrer retning. At en del af billederne er af ringe kvalitet, bør ikke sætte spørgsmålstegn ved metoden. Den ringe billedkvalitet kan tilskrives mangel på tid til korrekt opsætning og kan givetvis løses ved at optimere kameraophænget.

#### 6.1.4 Billedsammensætning

Billederne fra søerne er forsøgt kombineret, således det er muligt at konstruere en visualisering af klorofylfordelingen over søernes areal. Visualiseringen skulle præsentere det beregnede klorofylindhold i søen på en let forståelig måde.

Ønsket om at skabe et samlet ortofoto over hele søen er dog kun delvist lykkedes. Det har været muligt at skabe et oversigtsbillede ved hjælp af GoPro Hero4-kameraet monteret på DJI Phantom-dronen (se eventuelt Figur 5.9 i afsnit 5.3). Billederne fra GoPro Hero4 kameraet er taget med fiskeøjelinsse, hvilket gør, at billederne dækker et langt større område end det multispektrale kamera og indeholder dermed langt flere mulige fikspunkter som billedsammensætningsværktøjet kan anvende. Oversigtsbilledet er dog ikke anvendeligt i forhold til klorofylbestemmelse, da det er taget i JPEG-format. Billederne fra X8+ dronen med det multispektrale kamera har ikke været mulige at sammensætte til ét stort oversigtsbillede, men kun mindre i brudstykker. Dette skyldes manglende fikspunkter i billederne, der ofte kun indeholder vand, samt billedernes uskarphed.

Nedenstående billede viser, hvordan kun landjord er sammensat med høj præcision, hvorimod vandoverfladen kun er sammensat delvist og fremstår med unaturlige forvrængninger.



Figur 6.1 - Sammensat ortofoto af billeder taget med multispektralt kamera over Velling Igelsø. Landjorden fremstår rødt da kameraet ikke viser naturlige farver.

Som nævnt i afsnit 4.1 blev seks fikspunkter placeret i hver sø i et forsøg på at kompensere for manglen på sammenlignelige objekter. Fikspunkterne havde dog ingen effekt, hvilket kan skyldes deres beskedne størrelse. Fikspunkterne bestod overvejende af 5 liters plastdunke, som fra 100 meters højde ikke syner af meget. Problemet med de manglende fikspunkter kunne potentielt løses ved at placere flere eller større fikspunkter på søerne. Ved at øge fikspunktfylden på søerne, øges samtidig tidsforbruget da en båd skal bruges til at udlægge og indsamle punkterne. Hvis fikspunkter skal placeres på søerne inden hver flyvning sætter dette spørgsmålstegn ved, hvor tidseffektiv metoden rent faktisk er. Det er ikke en umulighed, men der bør stræbes efter, at finde en løsning, hvor et billedbehandlingsprogram kan kombinere billederne.

Resultatet af billedsammensætningen kunne potentielt være bedre, hvis flere af billederne var af bedre kvalitet i den forstand, at de ikke skulle være uskarpe eller udsat for *motion blur*.

Hvis dette ikke ville være nok, og billedsammensætningsværktøjet helt skal undgås, kan GPS-punkter for hvert billede potentielt muliggøre en sammensætning af billederne i ArcGIS. Hvis billederne indsættes med tilhørende GPS-punkter i ArcGIS, kan rasterne sammensættes evt. ved hjælp af *Merge*-funktionen.

Selvom sammensætningen af billeder ikke fungerer, er det ikke ensbetydende med, at man ikke kan finde klorofylindhold. Den udregnede klorofylalgoritme kan anvendes på enkeltbilleder. Der kan altså udvælges billeder fra repræsentative steder på søen, hvorfra klorofylindholdet kan indikeres gennem indeksering af farvebåndene. Ved at have billeder fra tilnærmelsesvist alle områder i den givne sø, er det muligt at danne et overblik for klorofylfordelingen. Metoden kræver gentagelse af samme billedbehandling i ArcGIS, men denne arbejdsbyrde kan lettes ved at anvende funktionen *model builder*, hvor et samlet værktøj kreeres. På den måde kan samme række af funktioner og beregninger foretages på flere billeder.

Grundet problematikken med billedsammensætningen, er der her i projektet udvalgt enkeltbilleder, hvorpå klorofylalgoritmen er anvendt. Det skal hertil nævnes, at billederne ikke er forsøgt kombineret ved hjælp af andre billedsammensætningsprogrammer end Agisoft, hvilket derfor ikke udelukker, at andre programmer fungerer bedre til billeder med få tydelige fikspunkter.

Det skal også nævnes, at overlappet for dataindsamling var relativt lav, med henholdsvis 60 % og 65 % for overlap og sideoverlap, jævnført Tabel 4.1 i afsnit 4.1. Ved at have et større overlap i billederne, øges muligheden for at finde fællestræk på tværs af billederne. Overlappet er angivet til netop 60 % og 65 %, da flyvetid og antallet af billeder herved sænkes. Det faktiske overlap var endnu mindre pga. af kameraets tidskrav til billedarkivering. Dette er u hensigtsmæssigt i forhold til den ønskede sammensætning af billeder, men nødvendigt i forhold til RAW-filernes store størrelse på kameraets 2 GB hukommelseskort. Ved optimale forudsætninger ville billederne være taget med større overlap, for at højne kvaliteten i et sammensat oversigtsbillede.

#### 6.1.5 Georeferering

Det antages, at enkeltbilleder af søerne under de rette forhold og forudsætninger kan sammensættes til komplette billeder over hele søer. De sammensatte billeder kan efterfølgende georefereres, for at få den korrekte projektion i billedet.

Georefereringen for oversigtsbillederne af Hummelsø og Velling Igelsø foregik ved hjælp af udlagte *ground control points* (GCP). Der var ved Hummelsø udlagt fire GCP'er og tre ved Velling Igelsø. Antallet af GCP'er må siges at være et minimum, men de var placeret strategisk omkring søen og vurderes derfor til at være tilstrækkelige til formålet.

Manuel placering af GCP omkring søerne er potentielt ikke nødvendig. GCP-punkter kan være statiske objekter nær søerne, hvorfra GPS-målinger gang på gang kan anvendes til georeferering. Hvis disse letgenkendelige punkter kan ses fra et i forvejen georefereret luftfoto, som fx ortofoto fra COWI anvendt i denne rapport, kan manuel GPS-måling ved søerne helt undlades. Ved Hummelsø og Velling Igelsø var der ingen umiddelbare objekter, som kunne anvendes til georeferering, hvilket antyder at brugbare georeference objekter ikke er til stede ved alle søer.

#### 6.1.6 Opsummering

Tilgængeligheden af dronebilleder er større end ved satellitter. Det kræver dog noget forarbejde i form af GCP'er og missionsplanlægning. Når disse er lavet kan samme flyvning foretages gentagende gange uden megen forberedelse.

Der er i dette projekt anvendt et 16-bit multispektralt kamera, som lagrer RAW-filer, der i format minder meget om de satellitbilleder, som kan hentes fra Landsat 8-satelliten. Det vurderes, at anvendelsen af et kamera med større processor og linse vil være mere optimalt til at tage

skarpe billeder mens dronen er i luften. Alternativt kan dronens kameraophæng eventuelt forbedres ved i stedet at montere et *gimbal*-ophæng.

Det har i dette projekt været et ønske, at samle de mange dronebilleder til ét samlet billede for begge søer. Dette har imidlertid været umuligt med de anvendte værktøjer. Potentielt kan dette problem overkommes ved hjælp af bedre billedsammensætningsværktøj eller ved at koble GPS-kordinater til alle billeder og manuelt sammensætte disse i ArcGIS. Ved et større overlap mellem billederne kan det dog være, at problemet helt kan overkommes.

De samlede billeder bør på fordelagtig vis georefereres så søernes færdige klorofylkort kan påføres en projektion og lægges på et baggrundskort. Dette viser sig at være en simpel operation når billederne er samlede og der er udlagt ground control points (GCP). For at undgå det tidskrævende aspekt ved at udlægge GCP'er kan fikspunkter eventuelt genbruges så in situ-GPS-måling helt kan undlades.

## 6.2 Databehandling af dronebilleder

Dette afsnit vil diskutere resultaterne af dronebilledernes indeksering og den tilhørende klorofylalgoritme med de log-transformerede klorofyl  $a$ -værdier. Dette vil blive diskuteret for at finde svar på rapportens 2. undersøgelsespunkt, der lyder: *Hvorledes kan indsamlede data bidrage til undersøgelse af søers økologiske kvalitet?*

Værdierne, der er fremkommet efter indekseringen af dronebilleder og den lineære regressionsanalyse, vil blive diskuteret i forhold til spredning, hældning samt forklaringsgrad og de overordnede metodiske faktorer, der kan have påvirket disse.

### 6.2.1 Droneklorofylalgoritme

Resultaterne fra dronebilledernes indeksering viser en række rasterfiler med værdier, der spænder fra -1 til 1. Indeks værdierne, der er brugt til klorofylalgoritmen, er udregnet fra middelværdier for tre billeder pr. sø pr. feltdag. Således er der lavet en trippelbestemmelse, som skal repræsentere søens samlede middelværdi.

Tabellen nedenfor opsummerer de gennemsnitlige indeks værdier for hver sø og feltdag, hvor droneflyvning er foretaget.

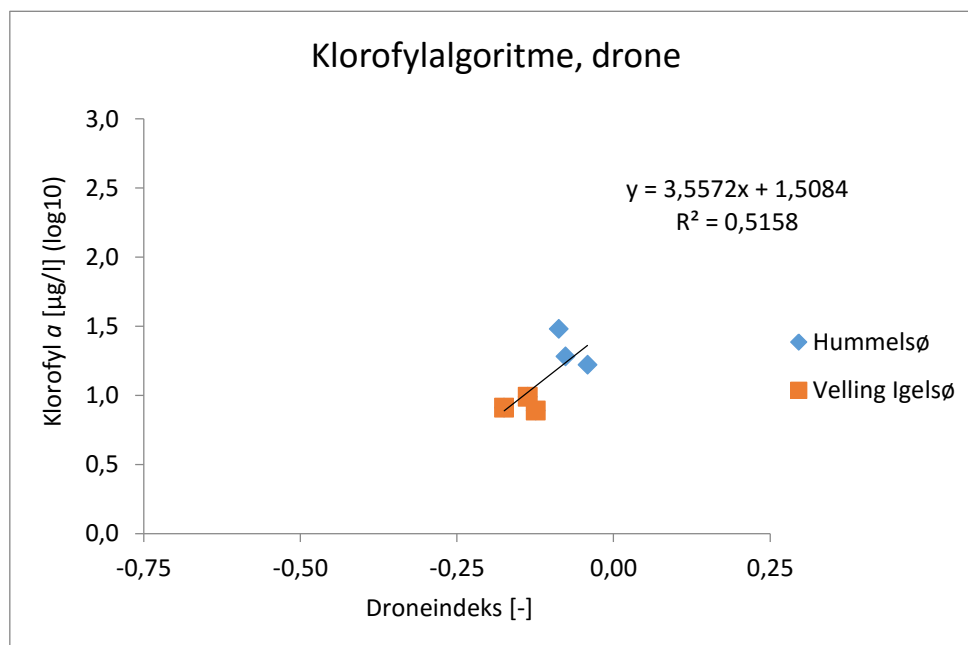
Tabel 6.1 - Middelværdier for dronebilledernes indeksering for Hummelsø og Velling Igelsø.

Feltdag	Droneindeks [-]	
	Hummelsø	Velling Igelsø
10	-0,09	-0,14
11	-0,08	-0,12
12	-0,04	-0,17

Som det ses ovenfor spænder de udregnede gennemsnitsværdier fra -0,17 til -0,04. Umiddelbart ses det, at Hummelsø's gennemsnitlige indeks værdier er en smule højere end Velling Igelsø's. Eftersom disse værdier forholdsvis vil være de samme efter den log-transformerede klorofylmængde er tilføjet i den lineære regressionsanalyse, er der i dette afsnit ikke præsenteret statistiske forhold for indekseringen. Ligeledes vil diskussionen af forskelligheden i de seks indeks først blive nærmere behandlet i afsnit 6.3, hvor klorofylmængden er indregnet i indeksene.

### 6.2.2 Algoritmen generelt

Klorofylalgoritmen er som nævnt kreeret ud fra en lineær regressionsanalyse mellem de indekserede dronebilleder og log-transformerede klorofyl  $a$ -værdier. Nedenfor ses samme graf som præsenteret i resultatkapitlet (afsnit 5.2), der viser regressionens tendenslinje og dennes ligning samt forklaringsgrad ( $R^2$ ). Bemærk, at tendenslinjen er udført mellem alle punkter og ikke søerne hver især.



Figur 6.2 - Lineær regressionsanalyse mellem log-transformeret klorofylindhold og droneindeks. Hvert punkt svarer til én felttag.

Umiddelbart ses det ud fra grafen, at der er forholdsvis lav spredning på de seks punkter. Spredningen er ligeledes lille blandt de to søer indbyrdes. Tendenslinjens ligning, altså klorofylalgoritmen, har en positiv stigende tendens, hvilket vil sige, at der ud fra disse punkter er et sammenhæng, som viser, at et lavere billedindeks svarer til en lavere klorofylmængde.

Parametrene *spredning* og *hældning* vil i de følgende afsnit blive diskuteret nærmere.

### 6.2.3 Algoritmens spredning

Som nævnt indledningsvis har dronens klorofylalgoritme en tilsyneladende lav spredning mellem de seks punkter, der er indregnet. Udover ved visuel inspektion af grafen, ses denne tendens også ved forklaringsgraden på ca. 52 %. Forklaringsgraden vurderes i denne sammenhæng til at være høj, men dette skal dog fortolkes med et vist forbehold da der er anvendt et relativt lavt antal punkter til regressionsanalysen. Endvidere må det antages, at forklaringsgraden er blevet styrket ved, at punkterne søerne imellem ligger fint samlet.

Det er indikeret tidligere at det er en væsentlig begrænsning i datagrundlaget, at der kun er foretaget tre droneflyvninger for hver sø. Var der blevet foretaget flere overflyvninger og tilhørende in situ-målinger af klorofyl  $a$ -indhold kunne dette have resulteret i en brugbar klorofylalgoritme for søerne. Dette under den forudsætning, at det større antal prøvetagninger skulle foretages over et helt år for at få et størst muligt spænd af reflektans- og klorofylværdier.

En klorofylalgoritme lavet på flere målinger ville i princippet kunne bruges til i fremtiden at estimere de enkelte søers klorofylindhold blot ved at overflyve den pågældende sø og indeksere dronens billeder. Søernes individuelle algoritmer ville ikke kunne bruges til andre søer, da de

ikke vil være universelt gældende før et større antal forskelligartede søer er indregnet i en samlet regressionsanalyse.

Vendes fokus tilbage til de to søers individuelle punkter må det siges at være meget positivt for denne rapporters metoder, at disse ligger tæt sammen. Dette påviser ensartetheden i de individuelle søers indekser og gennemsnitsklorofylindhold.

#### 6.2.4 Algoritmens hældning

Den positivt stigende tendens indikerer som nævnt, at der ved lavere indeksværdier vil forekomme lavere klorofylindhold. Denne forklaring stemmer overens med at punkterne for Hummelsø har højere indeksværdier (-0,09 til -0,04) end Velling Igelsø (-0,17 til -0,12). Ligeledes har Hummelsø også højere log-transformerede klorofylværdier [ $\mu\text{g/l}$ ] (1,22 til 1,48) kontra Velling Igelsøs værdier (0,89 til 0,99).

Grundet det lave antal af prøver anvendt til rapportens droneklorofylalgoritme, er det ikke muligt at konkludere, hvorvidt dennes tendens er sandfærdig. Før der ville kunne spås om dette skulle der have været inkluderet flere søer i projektet.

Af denne årsag er det nødvendigt at sammenligne dronens resultater med lignende metoder og resultater, hvilket i dette tilfælde er anvendelsen af satellitter. Dronens algoritme vil derfor blive sammenlignet med en lineær regressionsanalyse foretaget mellem satellitindeks og tilhørende klorofylværdier. Yderligere vil resultaterne blive diskuteret i forhold til algoritmen fundet i AMOS-projektet. Denne diskussion inddrages i afsnit 6.4.

#### 6.2.5 Opsummering

Indekseringen af dronebillederne indikerer, at der er en vis forskellighed mellem de to søers gennemsnitsreflektans. Indregnes indekserne i en lineær regressionsanalyse med de dertilhørende log-transformerede klorofylmængder fremkommer der en algoritme med en stigende tendens. Forklaringsgraden på dronens klorofylalgoritme er ca. 52 %, hvilket afspejler en lav spredning mellem alle seks punkter.

Den lille spredning blandt punkterne fra søerne hver især indikerer, at de anvendte metoder til indeksering og indregning af klorofylmængder er gode. Dog kan ingen universel sammenhæng påvises da datagrundlaget er for småt. I stedet må dronens resultater sammenlignes med resultater fra lignende undersøgelser med satellitbilleder for at afklare disses præcision.

### 6.3 Kortlægning af klorofyl

Dette afsnit søger at diskutere de anvendte metoder til kortlægningen af klorofyludbredelsen i de udvalgte søer. Dette vil blive diskuteret for at finde svar på det tredje undersøgelsespunkt: *Hvordan kan det indsamlede data behandles for at kortlægge den geografiske fordeling af klorofyl i søer?*

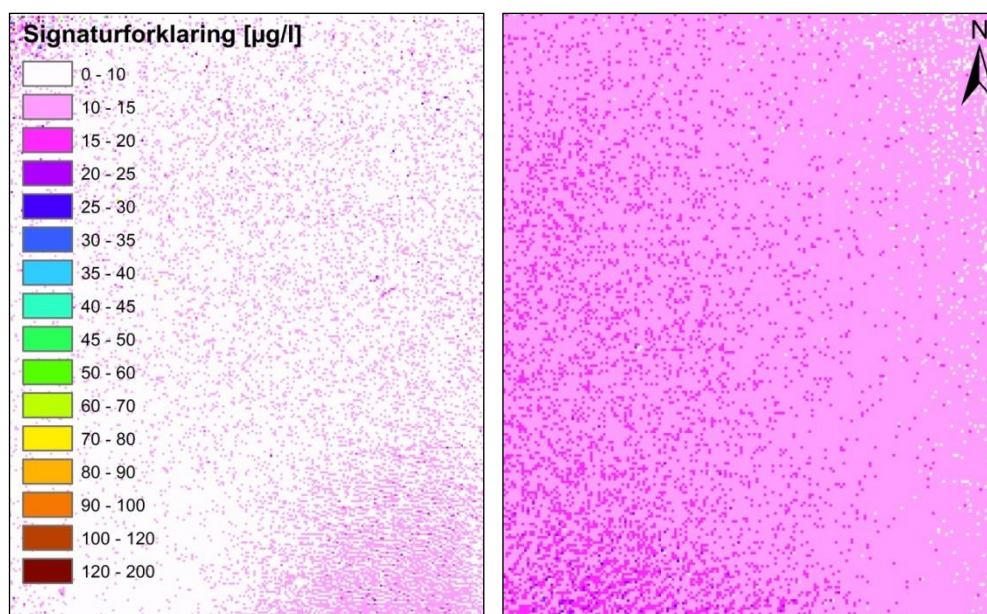
Først i dette afsnit, vil resultaterne for kortlægningen blive diskuteret i forhold til det umiddelbare visuelle indtryk billederne giver. Heri vil nødvendigheden i at reducere opløsningen af billederne for at give et mere sandfærdigt indtryk af middelværdierne i udbredelsen præsenteres. Slutteligt vil afsnittet diskutere de beregnede resultater fra klorofylkortene i forhold til de egentlige klorofylværdier målt in situ.

#### 6.3.1 Klorofylkortenes visuelle indtryk

Kortlægning af klorofylindhold i Hummelsø og Velling Igelsø sker ved hjælp af klorofylalgoritmen indregnet i indeksværdierne ved hjælp af Raster Calculator-værktøjet i ArcGIS. Klorofylværdierne

præsenteres i et nyt raster, hvor hver celle har en klorofylværdi.

Figur 6.3 viser klorofylindholdet i Velling Igelsø for d. 2. og 5. juni, estimeret ud fra klorofylalgoritmen skabt på droneindsamlet data. Farvenuancerne i billederne er valgt ud fra evnen til at visualisere værdiforskelle cellerne imellem. Nuancerne kan reguleres efter behov, men det blev fundet at signaturforklaringen fra Closter, et al., (Upubliceret) har gode farvekontraster, hvorfor der her er valgt et lignende farvespektrum.

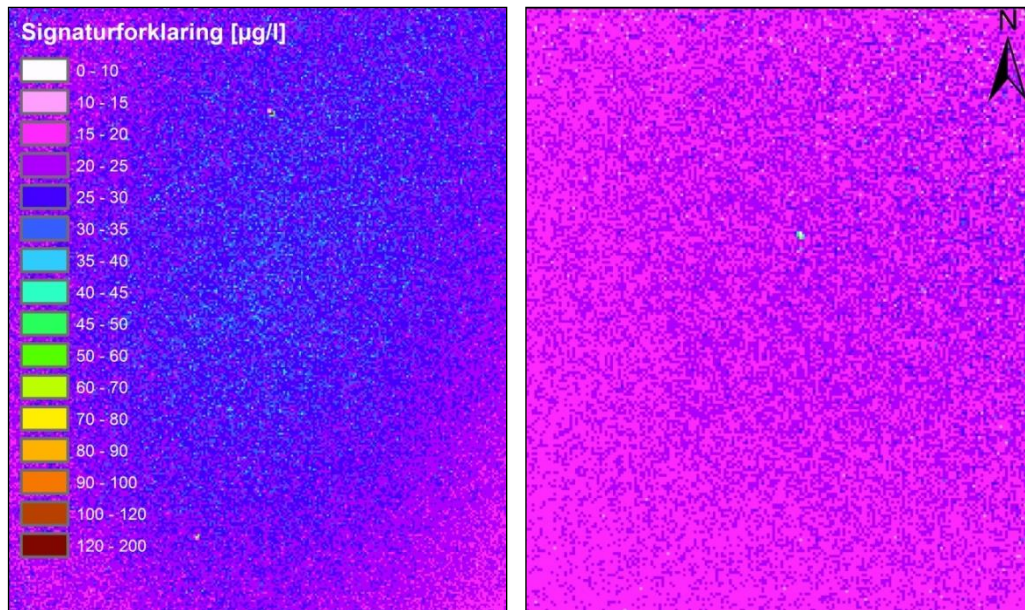


Figur 6.3 - Klorofylkort for Velling Igelsø, lavet ud fra dronedata. Billedet til højre viser estimeret klorofylindhold fra 2. juni og venstre del fra 5. juni. Bemærk, at billederne ikke har samme geografiske omfang.

Visuel inspektion af Figur 6.3 antyder, at der er sket en udvikling mht. klorofylindholdet i Velling Igelsø fra 2. juni til 5. juni. De faktiske in situ-klorofylværdier for 2. og 5. juni er henholdsvis 7,75 og 8,19, hvilket er en begrænset udvikling. Værdierne i Figur 6.3 ligger groft sagt i et spænd mellem 0 - 20, hvilket påviser en usikkerhed i forhold til at kunne præsentere et præcist mål for klorofylindholdet. Variationen ud fra dronedata skyldes givetvis andre forhold end ændring i klorofylindhold. Eksempelvis ses der i kortet til venstre i Figur 6.3 et mønster af højere klorofylværdier, der ligner krusninger i vandoverfladen (nederst i højre hjørne). Den øgede klorofylmængde må derfor tilskrives genskin fra sollys.

På samme måde viser Figur 6.4 en variation, der er mere markant, end hvad in situ-målingerne giver udtryk for. Ud fra kortene på næste side er det tydeligt, at der ud fra dronebilleder kan spores variation i søerne. Dog antyder billederne også en vis usikkerhed, da der er enkelte punkter, som ved visuel inspektion afviger meget fra det omkringliggende gennemsnit.

Ved visuel inspektion af Figur 6.3 og Figur 6.4 ligger værdier groft sagt mellem 15 og 30 µg klorofyl pr. l. Ved nærmere inspektion forekommer der dog også koncentrationer mellem 0 og 200 µg/l. Minimum og maksimum værdierne forekommer kun i begrænset antal og anses ikke som regulære klorofylværdier. En klorofylværdi på 0 og 200 µg/l vurderes at være henholdsvis under- og overestimeringer, som fx kan skyldes tilstedeværelse af flydende planter eller de fikspunkter, der er udlagt i søen (som ellers er forsøgt fjernet fra kortene). Den øgede refleksion i sådanne punkter kan altså medføre udsving i de estimerede klorofylmængder.



Figur 6.4 - Klorofylkort for Hummelsø, lavet ud fra dronedata. Billedet til højre viser estimeret klorofylindhold fra 2. juni og venstre del indikerer indholdet fra 5. juni.

Tydelige variationer i kanten af billederne skyldes ofte genskin. I dette projekt har der ikke været forudsætninger for at bearbejde genskin ved indsamling af data og efterfølgende behandling andet end frasortering af billeder med tydeligt genskin af synligt lys. Det vurderes dog at korrektion for dette kan optimere metoden og præcisere det estimerede klorofylindhold.

### 6.3.2 Ændring af klorofylkortenes opløsning

Dronebillederne har en høj detaljeringsgrad, der rent praktisk ikke nødvendigvis er optimal. Cellestørrelsen på de multispektrale billeder i en højde på 100 m er 3,37 x 3,37 cm, men ved monitoring af søer er der givetvis ikke behov for at undersøge klorofylindhold pr. 3,37 cm.

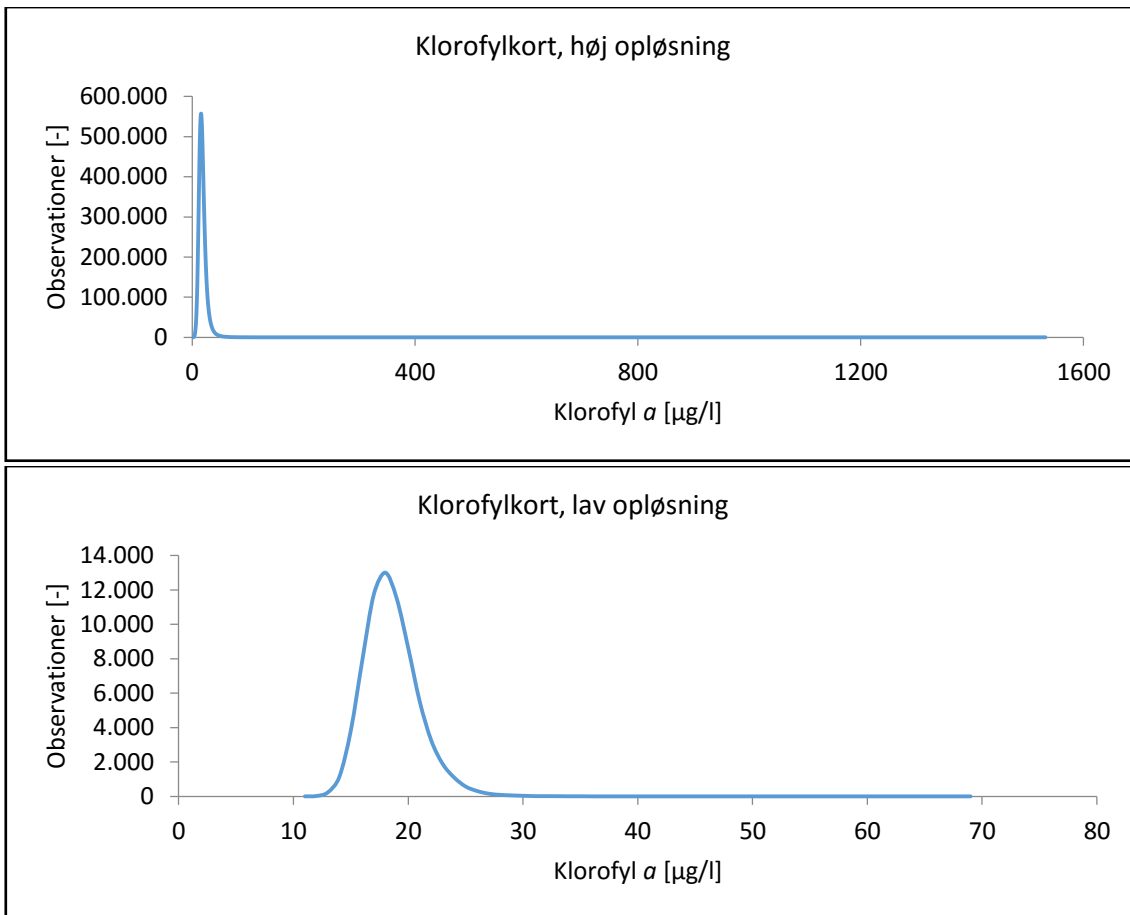
For at reducere detaljegraden kan ArcGIS-værktøjet *Aggregate* anvendes, som samler et brugerdefineret antal af celler til én celle ud fra eksempelvis middelværdien af de samlede celler. På grund af den høje opløsning i billederne, er det altså muligt at skabe oversigtskort med brugerdefineret cellestørrelse. Ved at reducere opløsningen reduceres også datamængden, hvilket gør billedbehandlingen mindre tidskrævende.

Billederne præsenteret i ovenstående indeholder celler á omtrent 30 x 30 cm. Selv efter denne reduktion i opløsning, er de anvendte dronebilleder ca. 10.000 gange mere detaljerede end satellitbilleder på 30 x 30 m.

Hovedårsagen for at reducere opløsningen i dronens klorofylkort er, at kortene med større cellestørrelse bedre visualiserer de dominerende koncentrationer i det enkelte billede. Dette skyldes, at en del af ekstrem-observationerne, der forekommer i cellerne på 3,37 x 3,37 cm fjernes.

Før en reduktion viser kortene et virvar af forskellige værdier, som ikke repræsenterer et egentligt gennemsnit af de beregnede klorofylværdier. Visuelt kan det altså være svært at vurdere, hvilke værdier, der er dominerende i de enkelte områder.

Figur 6.5 illustrerer fordelingen af klorofylværdier henholdsvis før og efter cellerne sammenlægges og opløsningen reduceres. Det er tydeligt, at fordelingen af klorofyl ved høje opløsninger har langt flere ekstremværdier, men langt størstedelen af værdierne ligger samlet. Fordelingen af klorofylværdier er langt mere jævnt fordelt ved den lavere opløsning, hvor de mest ekstreme værdier ligger lige under 70 µg/l.



Figur 6.5 - Fordeling af klorofylværdier 5. juni. Øverst ses observationerne inden sammenlægning af celler, nedenfor viser observationer efter sammenlægning.

Ved at hæve cellestørrelsen ændres antallet af observationer, fra 7.116.511 til 71.068, hvilket også afspejler den mindre datamængde. De aggregerede celler indeholder koregerede værdier, hvor ekstremer udlignes. Spændet for klorofylværdier mindskes ved faldende opløsning, hvilket igen er kilde til diskussion om, hvor lille cellestørrelsen bør være.

### 6.3.3 Sandfærdigheden af klorofylkortenes værdier

Ud fra dronens gennemsnitsindeksværdier og den tilhørende klorofyl algoritme er der blevet udregnet en gennemsnitsværdi for den klorofylmængde søernes reflektans afspejler. Resultaterne for dette er tidligere præsenteret i afsnit 5.3.

Ud fra disse resultater er der blevet opstillet en nulhypotese til at undersøge om de in situ-målte klorofylværdier og de beregnede værdier statistisk set er hinanden afvigende. Nulhypotesen hævder, at værdierne er ens.

For at undersøge nulhypotesen er der blevet udført en *t*-test for datasættenes middelværdier (se eventuelt bilag 7 for *t*-testens resultater). Ved udførelsen af denne *t*-test kan nulhypotesen *ikke* forkastes, hvilket betyder at de to datasæt statistisk set er ens.

Selvom statistikken indikerer, at både de beregnede og in situ-klorofylmængder ikke er forskellige, ses det dog alligevel, at variansen er mindre ved de beregnede klorofylmængder i forhold til de faktuelle værdier målt in situ. Dette indikerer, at klorofyl algoritmen ikke præcist kan estimere den faktuelle klorofylmængde selvom middelværdierne stemmer overens.



### 6.3.4 Opsummering

Den endelige kortlægning af klorofylfordelingen i søerne er praktisk i forhold til formidling af resultater. Ved at præsentere klorofylværdier grafisk øger det forståelsen, hvilket er essentielt i så fald det skal præsenteres for den brede befolkning. Grundet den høje opløsning fra det multispektrale kameras billeder er det fordelagtigt at reducere opløsningen for at mindske datastørrelsen og samtidigt forbedre det visuelle indtryk ved klorofylkortene.

Udregnes en middelværdi for oversigtskortenes beregnede klorofylværdier viser det sig, at disse statistisk set er ens med de faktuelle værdier målt in situ. Den mindre varians ved de beregnede værdier indikerer dog, at klorofylalgoritmen har problemer med at ramme de faktuelle værdier når disse er enten høje eller lave i forhold til middelværdien.

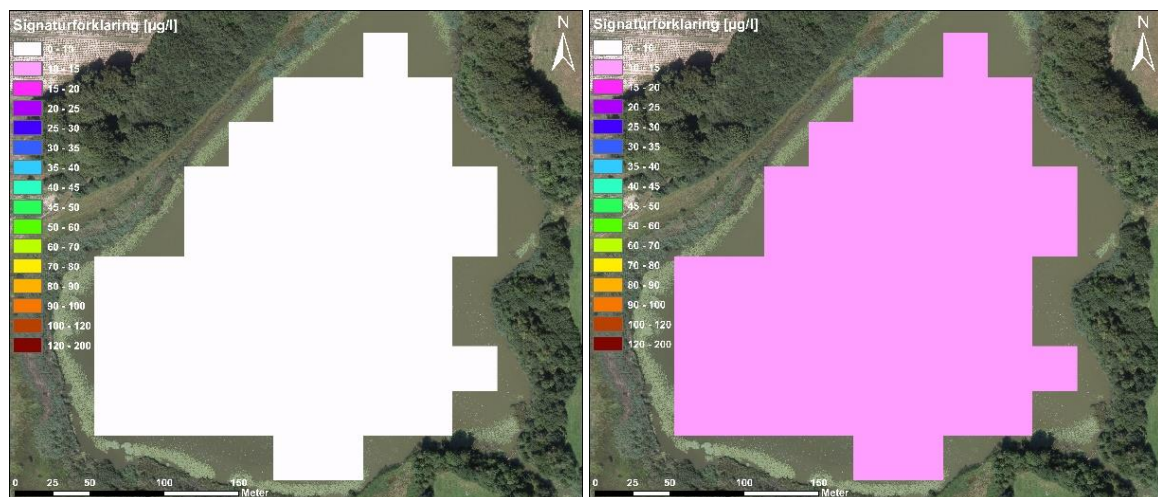
## 6.4 Dronens anvendelighed i forhold til satellit

Dette afsnit vil diskutere, hvordan analyser lavet vha. dronebilleder adskiller sig fra satellitanalyser. Ligeledes vil projektets in situ-målinger blive behandlet og det vil blive vurderet, hvordan disse influerer på dronens resultater. Dette gøres ud fra rapportens fjerde undersøgelsespunkt, der lyder: *"På hvilken måde er dronens resultater forskellige fra satellitters og hvordan kan usikkerheder i forhold til in situ-målinger forklares?"*

Samlet vil denne diskussion ende ud i en vurdering af dronens anvendelighed i forhold til konventionelle satellitmetoder.

### 6.4.1 Satellitklorofylkort

I projektet er der blevet udført fire klorofylkort ud fra Landsat 8-billeders indeksering og projektets satellitklorofylalgoritme. De fire klorofylkort er udvalgt ud fra henholdsvis den tidligste og seneste feltdag i projektperioden, hvor satellitbilleder var tilgængelige for begge søer. Denne udvælgelse er sket under antagelsen af, at klorofylkoncentrationen udvikler sig i løbet af sæsonen og kortene således vil være udtryk for den størst mulige variation. Nedenfor præsenteres klorofylkortene for Hummelsø med cirka seks uger mellem de to billeder.

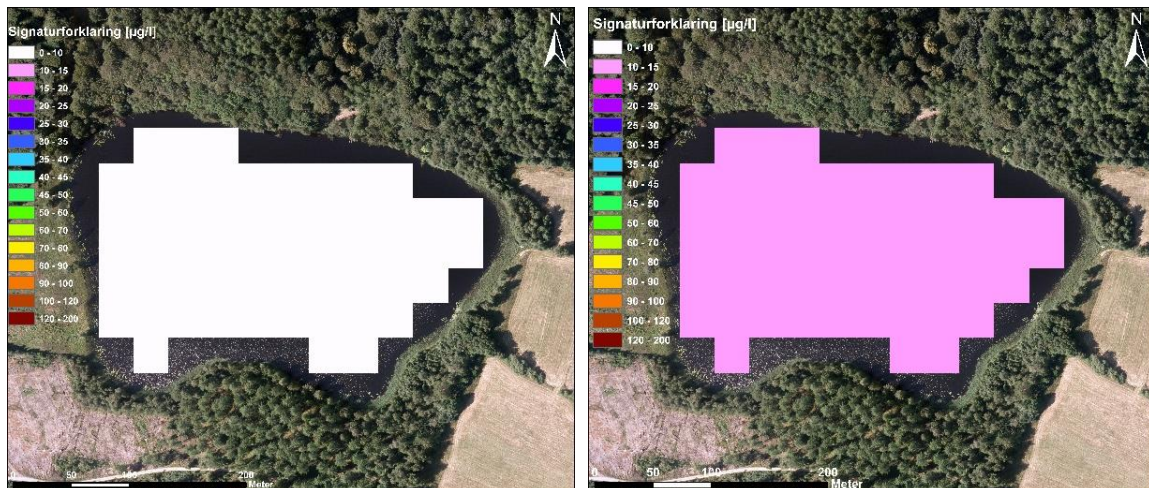


Figur 6.6 - Klorofylkort over Hummelsø lavet ud fra Landsat 8-billedindeks og satellittens klorofylalgoritme. Til venstre ses klorofylkort fra d. 1. april og det højre fra d. 19. maj. Baggrundskortet stammer fra 2014 og er fra COWI (2014). Copyright COWI.

Kortet for 1. april viser klorofylkoncentrationer i intervallet 0 – 10 µg klorofyl pr. l. In situ målingen af klorofyl fra d. 1. april viser et klorofylindhold på ca. 23 µg klorofyl pr. l. Kortet fra d. 19. maj viser klorofylkoncentrationer i intervallet 10-15 µg/l, mens in situ målinger for samme dag

var ca. 30  $\mu\text{g}/\text{l}$ . De to klorofylkort underestimerer således de korrekte klorofylkoncentrationer, hvilket kan tilskrives klorofylalgoritmens mangelfulde datagrundlag samt atmosfærekorrektionen.

Figuren nedenfor (Figur 6.7) viser satellitklorofylkort for Velling Igelsø. Kortet til venstre viser klorofylkoncentrationer mellem 0 og 10  $\mu\text{g}/\text{l}$  (1. april), mens kortet til højre viser koncentrationer mellem 10 og 15  $\mu\text{g}/\text{l}$  (19. maj). De sandfærdige in situ-målinger fra disse dage er henholdsvis for ca. 3  $\mu\text{g}/\text{l}$  og ca. 11  $\mu\text{g}/\text{l}$ . De to kort viser således begge de korrekte klorofylintervaller.



Figur 6.7 - Klorofylkort over Velling Igelsø lavet ud fra Landsat 8-billedindeks og satellittens klorofylalgoritme. Billedet til venstre er fra d. 1. april og billedet til højre fra d. 19. maj. Baggrundskortet stammer fra 2014 og er fra COWI (2014). Copyright COWI.

Fælles for de fire klorofylkort lavet ud fra Landsat 8-billeder er, at datagrundlaget i projektet har været relativt småt, hvilket har givet en klorofylalgoritme med lav forklaringsgrad. De fire kort er blevet konstrueret ud fra den simple algoritme og er således forbundet med en vis usikkerhed. DOS-atmosfære-korrektionen, der er anvendt i projektet er ligeledes relativt simpel. DOS-korrektionen tager bl.a. ikke højde for atmosfærens sammensætning. Eksempelvis er indholdet af vanddamp i atmosfæren en effekt DOS ikke tager højde for.

Det vurderes at kortene er lavet på en relativt simpel baggrund og at billederne for Velling Igelsø, som repræsenteres korrekt er en tilfældighed.

Som ved klorofylkortene for dronebillederne er der ved satellittens klorofylkort udregnet middelværdier, der er blevet sammenlignet med de faktuelle klorofylværdier fundet in situ. Se eventuelt afsnit 5.2 for de udregnede middelværdier og bilag 7 for tallene bag den statistiske undersøgelse.

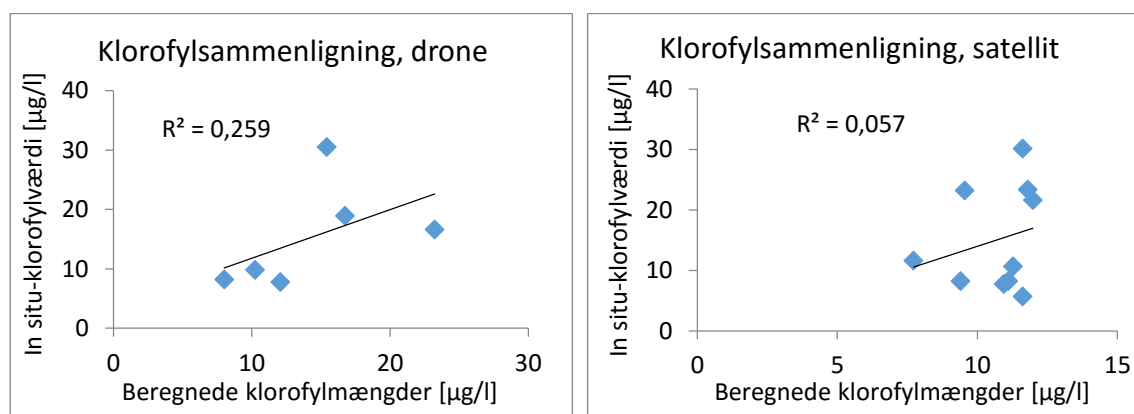
Den udførte *t*-test mellem udregnede og faktuelle klorofylværdier viser, at en nulhypotese omkring datasættens ensartethed *ikke* kan forkastes. De beregnede og faktuelle klorofylværdier er derfor statistisk set ens. Som ved dronens beregnede middelmiddelværdier er der også for satellittens en mindre variation i middelværdierne i forhold til de faktuelle middelværdier. Dette kan ligeledes indikere, at den udregnede klorofylalgoritme for satellitbillederne ikke er anvendelig i forhold til bestemmelse af klorofylmængder, der ligger højt eller lavt i forhold til middelværdien. Disse resultater skal dog tolkes med et vis forbehold grundet førnævnte problematik om for få indregnede punkter i algoritmerne.

#### 6.4.2 Sammenligning med AMOS-rapportens resultater

Ifølge Closter et al. (Upubliceret) opnås en total fejl på 18 µg/l mellem beregnede og faktuelle klorofylmængder efter udelukkelse af to ekstreme outliers ud fra 35 match-up datasæt. Hvert match-up datasæt repræsenterer et in situ-datasæt for én sø. Dette projekt har som bekendt kun brugt to match-up datasæt til at udføre den lineære regressionsanalyse.

I dette projekt har det ikke været muligt at lave en brugbar krydsvalidering og således udregne den totale fejl, som følge af den begrænsede datamængde. Det må dog antages, at fejlen er betydelig og sandsynligvis større end de af dette projekts kortlagte klorofylværdier grundet en simplificeret atmosfærekorrektion og det mindre grundlag for klorofylalgoritmen.

I et forsøg på at beskrive sammenhængen mellem beregnede og in situ-klorofylmængder er følgende to grafer konstrueret (Figur 6.8).



Figur 6.8 - Plot af beregnede klorofylværdier og in situ-målinger fra henholdsvis drone- og satellitklorofylalgoritmen.

Graferne ovenfor viser lineære sammenhænge mellem beregnede klorofylmængder baseret på denne rapporters drone- og satellitklorofylalgoritme samt in situ-målte klorofylværdier.

Dronens  $R^2$ -værdi viser en forklaringsgrad på 25,9 % og især søernes interne variation er genstand for væsentlig usikkerhed. Det antages at forklaringsgraden ville have været højere hvis flere overflyvninger var blevet udført med henblik på at skabe en bedre klorofylalgoritme.

Satellitens resultater viser en forklaringsgrad på 5,7 %, hvilket er udtryk for en meget ringe sammenhæng mellem satellitestimeret klorofyl og de faktiske værdier. Det vurderes, at en mere avanceret atmosfærekorrektion og flere prøvetagninger kunne højne forklaringsgraden.

Ud fra den begrænsede datamængde indikerer disse grafer, at dronens klorofylalgoritme bedre afbilleder de faktiske forhold. En egentlig forskel kan dog ikke konkluderes pga. det begrænsede datasæt, hvorpå især dronens klorofylalgoritme er konstrueret.

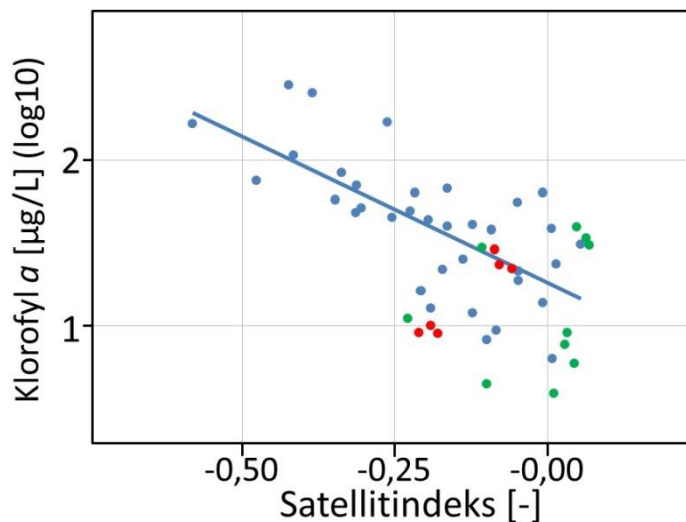
Metoden til at illustrere sammenhængen mellem beregnede og faktuelle klorofylværdier vurderes yderst brugbar til en fremtidig, nærmere undersøgelse af en droners anvendelighed til at estimere klorofylmængder. Sådanne grafer bør dog suppleres med en udregnet total fejl, der kan beskrive ligningens usikkerhed i µg klorofyl *a* pr. liter.

Figuren på næste side (Figur 6.9) viser et plot af AMOS-rapportens regressionsanalyse for satellitbilleder (blå punkter og tendenslinje). Grafen er skønsmæssigt blevet påført de sammensatte værdier for log-transformerede in situ-klorofylværdier samt henholdsvis drone- og satellitindeks. Plottet er udført for at kunne vurdere, i hvor høj grad denne rapporters værdier passer ind i resultaterne fundet af Closter, et al. (Upubliceret).

Umiddelbart ses det, at dronens punkter (rød) ligger nogenlunde indenfor det spænd AMOS-rapportens match-up datasæt dækker over. Tre af punkterne ligger endda helt tæt ved tendens-

linjen. Denne rapport's satellitpunkter (grøn) ligger hovedsageligt i periferien af AMOS-punkterne. Især ses det, at den højre del af punkterne ligger udenfor størstedelen af de blå punkter.

Det vurderes, at det for denne rapport's resultater er positivt, at værdierne for dronen ligger tilnærmelsesvis oveni resultaterne fra AMOS-rapportens regressionsanalyse.



Figur 6.9 - AMOS-plot med klorofylresultater for denne rapport's drone- (røde prikker) og satellitresultater (grønne prikker). Kilde: Redigeret fra Closter, et al. (Upubliceret).

En interessant forskel mellem AMOS-rapportens klorofylalgoritme og denne rapport's to algoritmer er, at ligningernes hældninger ikke peger i samme retning. Som det ses ovenfor har AMOS' klorofylalgoritme en nedadgående tendens, hvilket indikerer, at en *lavere* indekssværdi svarer til en *højere* log-transformeret klorofylværdi. Dette forhold er omvendt af, hvad der er fundet i denne rapport for drone- og satellitalgoritmen eftersom disse indikerer, at en *højere* indekssværdi svarer til en *lavere* klorofylværdi (se eventuelt afsnit 5.2, der viser denne rapport's klorofylalgoritmer).

Det antages, at denne forskel grunder i den førnævnte problematik om denne rapport's begrænsede datagrundlag. Det antages altså, at samme tendens ville udvikle sig havde der været indregnet flere punkter i regressionsanalysen da indekseringen og klorofylværdierne er udregnet vha. samme metode.

#### 6.4.3 In situ-forholdenes påvirkning på klorofylalgoritmerne

In situ-målingerne blev oprindeligt udvalgt med henblik på at verificere de estimerede værdier fra dronen efter en antagelse af, at de alle kunne influere på målingerne samt at undersøge den overordnede udvikling i søernes tilstand. Mængden af dronedata blev som bekendt begrænset, hvorfor de fleste af parametrene ikke er videreført til denne diskussion.

Fandtes et større datagrundlag bag denne rapport kunne dronens klorofylalgoritme have været testet for indflydelsen af de faktorer, der kan tænkes at påvirke den reflektans, som det multispektrale kamera opfanger.

De værdier, der kan tænkes at påvirke eller fortælle noget om dronealgoritmens evne til at estimere klorofylmængden i søer inkluderer de pågældende søers secchi-dybde, mængde af suspenderet tørstof samt lysintensiteten, der er til stede i perioden mens dronen tager sine billeder. En lav secchi-dybde og høj mængde suspenderet tørstof medfører en øget turbiditet, hvilket kunne resultere i et lavere genskin eller ændret farve i vandet. Ligeledes vurderes det, at billeder taget ved lav lysintensitet kan resultere i en lavere reflektans fra vandoverfladen, hvis

kameraets ISO-indstillinger ikke er optimale.

Sådanne korrektioner minder metodisk meget om de rettelser, der skal foretages for satellitbilleder i form af atmosfærekorrektion. Udfordringen med skiftende lysintensitet er dog mindre relevant for satellitter da brugbare billeder udvælges uden skydække og tages på samme tidspunkt af dagen.

Hvis parametre, som de ovenfor anførte, testes for påvirkning på klorofylalgoritmens resultater, skulle de testes individuelt mod de beregnede klorofylmængder. Er de enkelte parametres indflydelse signifikant bør de tages i betragtning til en endelig klorofylalgoritme. Omvendt skal de undlades, hvis der ikke viser sig at være en signifikant sammenhæng.

En ulempe ved en klorofylalgoritme, der inkluderer estimerede koefficienter på baggrund af flere parametre er, at der skal inkluderes in situ-værdier for disse ved brug af algoritmen. Dog kan det være muligt at udregne empiriske konstanter til algoritmen, hvis der forefindes et tilstrækkeligt stort datagrundlag. For yderligere information vedrørende opsætning af lineære regressionsanalyser, se eksempelvis Stuberger & Sønderkov (2011).

#### 6.4.4 Opsummering

De udførte klorofylkort, baseret på satellitbilleder indsamlet til denne rapport, viser en ensartet fordeling af klorofyl i søerne. Modsat dronebillederne kan disse altså ikke vise samme rumlige varians grundet den større celledørrelse. Usikkerheden i satellitkortene ser ud til at være større end ved dronebillederne.

Som ved dronebillederne lader det til, at de beregnede klorofylmængder ud fra satellittens klorofylalgoritme har problemer med at estimere værdier, der ligger højt og lavt i forhold til middelværdien. Statistisk set, er der ingen forskel mellem de faktuelle og udregnede klorofylmængder vha. satellitklorofylalgoritmen.

Sammenlignes denne rapport's match-up datasæt med AMOS-rapportens regressionsanalyse ses det, at punkterne ligger tilnærmelsesvis indenfor det spænd af punkter, der ligger til grund for denne. Dette tyder på en vis præcision af denne rapport's metoder til indeksering af drone- og satellitbilleder. Det lille datagrundlag for denne rapport vurderes at forårsage, at drone- og satellitklorofylalgoritmens hældning afviger fra den i AMOS-rapporten.

Havde der været et tilstrækkeligt datagrundlag kunne droneklorofylalgoritmens resultater have været testet for påvirkninger af forskellige in situ-parametre. Ved en sådan analyse kunne algoritmen i sig selv ændres såfremt parametrene påvirkning er signifikant.

## 7 Konklusion

De danske søer er stadig påvirket efter mange års ureguleret tilførsel af næringsstoffer fra byer og landbrug. Selvom søerne udgør et vigtigt æstetisk og økologisk element i det åbne land er tilstanden i mange af søerne ikke tilfredsstillende. Af denne årsag er der i de seneste årtier indført love, der søger at undgå yderligere forringelse og i bedste fald forbedre vandmiljøet.

I forbindelse med EU's vandrammedirektiv er der udtrykt interesse for at udforme metoder til regelmæssig monitoring af vandområder, der sandsynligvis kan erstatte de traditionelle overvågningsmetoder, som ofte er yderst tids- og ressourcerkrævende. Med implementering af ny teknologi er håbet, at et større antal danske søer regelmæssigt kan overvåges.

Et af de nyeste tiltag indenfor monitoring af danske søer, og naturlige elementer generelt, er *remote sensing* vha. satellitter. Disse er bl.a. implementeret i AMOS-projektet, hvor data fra Landsat 8-satellitten er bearbejdet til at formulere en algoritme, der kan anvendes på en lang række danske søer for at estimere indholdet og fordelingen af klorofyl *a*. I samme forbindelse har AMOS-projektet effektiviseret databehandlingen så en database af klorofylkort er let at finde på internettet (på Beta-form).

AMOS-projektet er meget lovende som et lettilgængeligt og omfattende remote sensing-program, men brugen af satellitter har flere begrænsninger, der hæmmer deres anvendelighed. Eksempelvis bliver de enkelte Landsat 8-billeder kun taget hver 16. dag og billederne kan være ubrugelige, hvis der er overskyet når billedet tages. Yderligere er satellittens opløsning på 30 x 30 meter begrænsende i forhold til, hvor små søer, der kan inkluderes i undersøgelser af disses vandkvalitet.

Ud fra overvejelser om mulighederne for at anvende lignende teknologier til remote sensing af danske søer, er det i denne rapport blevet undersøgt, hvordan droner kan bruges til at estimere og kortlægge vandkvalitet i danske søer. Dette er gjort ud fra følgende problemformulering:

*"Hvordan kan droner, med henblik på evaluering af økologisk kvalitet, bidrage til monitoring af danske søer?"*

Det oprindelige ønske bag denne rapport var at konstruere en gældende klorofylalgoritme for to danske søer. Det har dog ikke været muligt at indsamle et tilstrækkeligt datagrundlag til regressionsanalysen, der ligger bag algoritmen, da projektets anvendte drone i størstedelen af projektperioden ikke har været tilgængelig. I stedet er der blevet opstillet fem undersøgelsespunkter, der tilsammen udgør en udførlig undersøgelse af de metoder og overvejelser, der skal til før en almenyldig klorofylalgoritme baseret på dronebilleder kan udarbejdes.

Første undersøgelsespunkt har undersøgt dronen som et dataindsamlingsapparat i forhold til de forberedelser, der skal til før en mission kan udføres samt hvilket udstyr, der bør anvendes for at få anvendelige billeder.

Til dette projekt er der brugt en drone af navnet X8+ fra 3D Robotics udstyret med et 16-bit multispektralt Canon ELPH110 HS-kamera, der er optimeret til at opfange blå, grønt, og nært-infrarødt lys. Kameraet lagrer RAW-filer, hvilket minder meget om Landsat 8-billederne i format, hvilket letter den efterfølgende billedbehandling. Dog har det vist sig at være umuligt at sammensætte billederne til ét samlet for begge søer vha. det anvendte billedsammensætningsprogram. Havde flere billeder været i fokus, eventuelt ved brug af bedre kamera og stabilisering, kunne det eventuelt have løst problemet. Alternativt findes der andre simple metoder til sammensætningen. Lykkes det at kreere et samlet luftfoto fra en hel sø kan disse med fordel georefereres så billedet får en korrekt projektion. Dette kræver et vis forarbejde, men dette kan undgås, hvis der findes fikspunkter nær søens brinker, hvis koordinater kan aflæses fra både drone-

billeder og i forvejen georefererede luftfoto.

Det vurderes, at dronen som dataindsamlingsværktøj i forhold til anskaffelse af multispektrale luftfotos er en meget fin metode, der på sigt kan hamle op med de lettilgængelige satellitbilleder. Når dronen fungerer optimalt, og forarbejdet er udført korrekt, kan en overflyvning af en sø på ca. 8 hektar overstås på kort tid.

Det andet undersøgelsespunkt handler om metoderne bag databehandlingen af dronebillederne, der skal til for at udregne en klorofylalgoritme, der kan anvendes til at estimere klorofylindhold i danske søer. En regressionsanalyse er blevet foretaget mellem log-transformerede in situ klorofylmålinger og et billedindeks lavet af billedernes blå og grønne bånd.

Resultatet af regressionsanalysen er en algoritme med en forklaringsgrad på 52 % og en positiv stigende tendens, der indikerer, at høje indekxsværdier svarer til høje klorofylværdier. Det vurderes, at de anvendte metoder til indeksering af dronebilleder er brugbare, hvilket især base-res på den fine samling af søernes individuelle punkter.

Det er væsentligt at pointere, at selve resultatet af regressionsanalysen ikke er nogen universel sammenhæng, der kan anvendes direkte på andre søer. Dette ville kræve et betydeligt større datagrundlag med flere søer indregnet i algoritmen.

Til tredje undersøgelsespunkt er det blevet undersøgt, hvordan kort over udbredelsen af klorofyl i de undersøgte søer kan udarbejdes vha. dronens klorofylalgoritme og indekxbillederne. Desuden giver undersøgelsespunktet bud på, hvordan de beregnede klorofylværdier kan sammenlignes med faktuelle værdier.

De udarbejdede klorofylkort vurderes til at være yderst brugbare til at illustrere fordelingen af klorofyl i mindre danske søer. Den høje opløsning fra det multispektrale kamera gør, at det er muligt for brugere at definere en favorabel cellestørrelse, hvilket kan være fordelagtigt i forhold til at reducere datamængde og forbedre det visuelle indtryk. Middelklorofylværdierne for kortene viser sig at være statistisk set ens med faktuelle værdier. Dog ser det ud til, at algoritmen har svært ved at estimere værdier, der ligger højt og lavt i forhold til faktuelle middelværdier.

Det antages, at kortenes evner til at beregne klorofylværdier vil øges med en klorofylalgoritme, hvor der er indregnet flere match-up datasæt.

Slutteligt er det, i forbindelse med undersøgelsespunkt fire, blevet diskuteret i hvor høj grad dronens klorofylalgoritme og tilhørende kort kan sammenlignes med satellitters. Dette er blevet gjort både i forhold til denne rapportes egne behandlede satellitbilleder samt klorofylalgoritmen, der fremgår af AMOS-projektet.

Modsat dronens klorofylkort ses der ingen forskel i den rumlige fordeling af klorofyl på denne rapportes satellitbilleder. Dette skyldes givetvis den langt lavere opløsning på satellitbillederne. Som ved dronens beregnede klorofylværdier er de for satellitbillederne også statistisk ens med de faktuelle. Desuden indikeres det, at satellitalgoritmen har samme udfordring ved høje og lave værdier. I forhold til AMOS-projektets klorofylalgoritme ses det, at denne rapportes match-up datasæt passer nogenlunde ind i det spænd, som AMOS' regressionsanalyse er baseret på. Dette støtter op om denne rapportes metoder til indeksering af drone- og satellitbilleder.

En yderligere vurdering af dronens klorofylalgoritme er, at denne kunne optimeres, hvis der foretages en test af andre, relevante in situ-målinger, der kan have påvirket kameraets evne til at detektere klorofylmængder.

Anvendelsen af droner kan potentielt være en af de efterspurgte effektiviserende teknologier, der kan anvendes som en del af en mere intens monitoring af mindre, danske søers vandkvalitet. Denne rapportes metoder kan givetvis forbedres i takt med, at faktorer som kamerateknologi og

billedbehandlingsmetoder udvikler sig, men det vurderes, at denne rapporters relativt simple metoder er brugbare som udgangspunkt til videreudvikling af en bredt anvendelig klorofylalgoritme til brug ved mindre søers miljøovervågning vha. droner.



## 8 Perspektivering

Dette kapitel undersøger igennem et litteraturstudie, hvordan droner som dataindsamlingsmetode kan optimeres, med udgangspunkt i de i projektet erfarede udfordringer. Litteraturstudiet inddrager artikler, der omhandler vandmiljøerne i andre dele af verden. Fremtidsperspektiverne for anvendeligheden af droner, vil slutteligt blive vurderet ud fra erfaringer og metoder præsenteret i litteraturen.

### 8.1 Erfaringer med remote sensing som metode til miljømonitoring

Inddragelsen af videnskabelige artikler giver en bred forståelse for, hvordan remote sensing anvendes til miljømonitoring i andre dele af verden. Den snævre sammenligning med fokusområdet for dette projekt, sporing af algeopblomstring i små søer ved hjælp af drone, er relativt uberørt, jævnfør søgningen efter artikler til litteraturstudiet. Der er derimod en bred vifte af artikler med fokus på sporing af algeopblomstring fra satellitter. I denne perspektivering vil det blive undersøgt, hvordan droner kan bidrage til den allerede etablerede satellitanvendelse. Inddragelsen af satellit-erfaringer kan være relevant, da dronemetoden i dette projekt læner sig op af satellitmetoden fra AMOS-projektet præsenteret af Closter, et al. (Upubliceret).

Undersøgelser af vandmiljøer vha. satellitdata er udbredt verden over. I Zimbabwe er satellitdata fx brugt i forbindelse med undersøgelse af udviklingen af klorofyl *a*-indhold og trofisk tilstand, når vandniveauet i reservoiret er på sit højeste og laveste. Undersøgelsen i Zimbabwe er, hvad angår lokale forhold, langt fra forholdene i Danmark, mens selve undersøgelsen af klorofylindhold ved remote sensing vurderes af Dalu, et al. (2015) at være anvendelig i andre områder og kan især tilbyde nyttig data for sværtilgængelige områder. Artiklen af Dalu, et al. (2015) giver altså indikationer på, at denne metode kan være anvendelig de fleste steder, dog med hensyntagen til lokale forhold, der influerer på de økologiske forhold. Desuden pointeres det også, at deres resultater var mest præcise i skyfrie perioder.

#### 8.1.1 Undersøgelser i Skandinavien

Dette projekt har også beskæftiget sig med lokalområdets mangfoldighed. Ved udvælgelsen af Velling Igelsø som et af case-områderne, gjordes overvejelser om hvorvidt søen var for brunvandet, da dette ifølge Closter, et al. (Upubliceret) kan være problematisk i forhold til korrekt afbildning. Under indsamling af in situ-målinger blev det observeret at Velling Igelsø havde en brun farve, men jævnfør kapitel 1 karakteriseres søen ikke som brunvandet

En undersøgelse af potentialet for økologisk tilstandsvurdering ud fra vandplanter, er foretaget på 72 søer med forskellige farvetal i Sverige, hvor Birk & Ecke (2014) antyder, at den tydelige sammenhæng mellem droneindsamlet data og in situ-data åbner op for monitorering af søer, som generelt ellers er omkostningsfuld og omfattende for de talrige søer Skandinavien. (Birk & Ecke, 2014) Undersøgelsen af de svenske søer omfatter næsten udelukkende søer i boreale områder, hvorfor Birk & Ecke (2014) påpeger, at der kan være forskel på, hvordan klorofyl *a* detekteres i de søer i boreale områder og søer, der er udsat for større menneskelig påvirkning.

I Finland er sammenligning af in situ-klorofyl- og satellitklorofylværdier ligeledes undersøgt. Undersøgelsen er foretaget på Pyhäjärvi, en 155 km<sup>2</sup> sø, hvor eutrofiering har været et markant problem siden 1980'erne. Undersøgelsen kan ikke overføres direkte til danske forhold, da Pyhäjärvis størrelse langt overgår den søstørrelse, hvorpå metoden ønskes anvendelig i Danmark. Lepistö, et al. (2010) står for undersøgelsen og påpeger et væsentligt forhold, som kunne optimere præcisionen af klorofylopmålingerne ved hjælp af satellit og drone; omfattende in situ data til kalibrering af klorofylalgoritme, hvilket også i dette projekt er anvendt.

Undersøgelserne i Finland og Sverige indikerer, at klorofyl  $a$ -detektering er relativt afhængig af, hvor stor en mængde data den anvendte klorofylalgoritme er udarbejdet på. Både Lepistö, et al. (2010) og Birk & Ecke (2014) pointerer, at in situ-data er yderst vigtig for at konstruere præcise klorofylalgoritmer. In situ-data bruges til verificering af algoritmerne og er således altafgørende i etableringen af velfunderede algoritmer.

#### 8.1.2 Erfaringer fra Syd- og Nordamerika

Lepistö, et al. (2010) påpeger behovet for omfattende datagrundlag til kalibrering af klorofylalgoritmer, hvilket understøttes i en undersøgelse foretaget på Lake Ontario i Nordamerika. Watkins (2010) forklarer, at undersøgelsen virker lovende for fremtidig kvantificering af klorofyl, men at der er behov for yderligere udvikling af metoden. Klorofylindholdet i Lake Ontario blev udmærket skildret på åbent vand, hvor klorofylindholdet var lavt. Tættere på land, hvor niveauet af klorofyl og tilstedeværelse af organisk materiale var større, optrådte klorofylalgoritmen mere upræcis. (Watkins, 2010)

Watanabe, et al. (2015) har ligeledes foretaget en undersøgelse af klorofyl  $a$ -indhold vha. satellitter. Denne undersøgelse fandt sted i Barra Bonita-reservoiret nær São Paulo i Brasilien. Resultaterne i denne undersøgelse overestimerede klorofyl  $a$ -indholdet i reservoiret. Watanabe, et al. (2015) beskriver, at den anvendte metode ikke bør anvendes på søer med relativt lavt klorofyl  $a$ -indhold. Den brasilianske undersøgelse forholder sig ikke kritisk til mængden af data, men hæfter sig ved en ikke-tilfredsstillende atmosfærekorrektion for deres valgte båndkombination. Konklusionen på undersøgelsen i Brasilien, er en opfordring til flere studier, som kan forbedre nuværende estimerende modeller for Barra Bonita specifikt og andre lokaliteter generelt. (Watanabe, et al., 2015)

#### 8.1.3 Hvordan er udenlandske erfaringer relevante i forhold til danske søer?

Der præsenteres eksempler på klorofylalgoritmer, der egner sig bedst til at spore enten høje eller lave koncentrationer. Algoritmerne er oftest udarbejdet på data, som repræsenterer et udvalg af søtyper. Artiklerne, der er inddraget i denne perpektivering, tilkendegiver stort set alle, at de udarbejdede algoritmer passer bedst på én bestemt søtype. Den udbredte variation i evnen til at spore klorofyl i forhold til, hvilken type sø, der undersøges antyder, at der i Danmark bør udarbejdes en eller flere algoritmer, som forholder sig specifikt til søtyper, hvilket understøttes af Closter, et al. (Upubliceret).

Rodríguez, et al. (2014) har undersøgt økologisk kvalitet, herunder klorofyl  $a$ -indhold, i den 6,4 ha store Arreo Lake. Størrelsen på Arreo Lake er meget lig størrelsen på Hummelsø og Velling Igesund på henholdsvis 7,8 ha og 7,5 ha. Klorofylindholdet blev estimeret ud fra en algoritme, som er kalibreret i forhold til typiske spanske mesotrofe søer. Klorofylindholdet målt fra satellitten varierede fint i forhold til in situ-værdier. Der blev desuden observeret anormaliteter, der vurderes at skyldes koncentrationen af suspenderet tørstof. (Rodríguez, et al., 2014)

#### 8.1.4 Hvad synes at være mest almindelige problematikker?

Erfaringerne med miljømonitoring ved hjælp af remote sensing, er ud fra dette litteraturstudie præget af lignende problematikker og forslag til forbedringer. Især Watkins (2010), Lepistö, et al. (2010) og Watanabe, et al. (2015) bekendtgør behovet for yderligere undersøgelser og en stor mængde data, for at kunne skabe klorofylalgoritmer med tilfredsstillende præcision. Udslag i satellitfundne klorofylværdier tilskrives af Rodríguez, et al. (2014) tilstedeværelsen af suspenderet tørstof og manglende korrektion for denne. Et nærmere studie af suspenderet tørstof kunne potentielt tilpasse nøjagtigheden af klorofylsporingen. Desuden bør det nævnes, at undersøgelsen af klorofyl ved remote sensing fungerer bedst i skyfrie perioder (Dalu, et al., 2015). Watanabe, et al. (2015) beretter desuden ønske om bedre atmosfærekorrektion.

## 8.2 Forbedring af dataindsamling og databehandling

I afsnittet ovenfor blev der redegjort for erfaringer med remote sensing som metode til monitorering af søer, hvortil mulige forbedringer blev nævnt. I dette afsnit præsenteres forskellige optimeringsmuligheder til nogle af de udfordringer, der kan være forbundet med remote sensing.

### 8.2.1 Indsamling af data

Dataindsamling ved brug af både drone og satellit er fordelagtig, da de begge er mindre tidskrævende en klassisk in-situ indsamling. I litteraturen, der omhandler brugen af satellit, nævnes data som værende lettilgængelig. Den lettilgængelige satellitdata gør det bl.a. nemmere at monitorere områder, som praktisk set vil være sværttilgængelige. (Dalu, et al., 2015; Watanabe, et al., 2015; Watkins, 2010)

Birk & Ecke (2014) ser perspektiverne i droner som dataindsamlingsmetode. En væsentlig fordel er muliggørelsen af undersøgelse af miljøforhold stort set uafhængig af tid og rum. Monitorering med droner sker i lav flyvehøjde med høj billedopløsning, hvilket giver en enorm mængde data. Den store datamængde åbner op for nye undersøgelser herunder evt. artsbestemmelse. Udviklingen indenfor optisk udstyr som kan påmonteres dronen, giver ligeledes forhåbninger om endnu mere detaljerede undersøgelser. (Birk & Ecke, 2014)

Endnu en væsentlig fordel, der er tilegnet gennem dette projekt omhandler netop den uafhængige frekvens af dataindsamling. Den brugerspecificerede frekvens af flyvninger gør dronen optimal til undersøgelser af dynamiske processer, hvilket Birk & Ecke (2014) støtter op om. I dette projekt anvendes Mission Planner til at forenkle dataindsamling i høj frekvens, således dronen automatisk flyver nøjagtig samme rute hver gang. Opsætningen af dronemissioner er essentiel for indsamlingen af data, da dette sætter rammerne for mængden af data og sikrer, at hele det ønskede område bliver undersøgt.

Gennem litteraturstudiet antydes det, at forberedelserne til droneflyvningerne i dette projekt blev foretaget ud fra en fremgangsmåde, der i positive vendinger er brugt af andre. Fremgangsmåden i dette projekt stemmer fint overens med hvordan Flynn & Chapra (2015) har gjort, inden de foretog 18 identiske flyvninger over et vandløb i USA for at undersøge vegetation. Flynn & Chapra (2015) beskriver, hvordan de først udlægger GCP, hvorefter de konstruerer en mission for den ønskede flyvning og til sidst kontrolleres kamera for at sikre, at data indsamles i rette format. Umiddelbart kan det ud fra Flynn & Chapra (2015) antydes, at fremgangsmåden for droneflyvningen i dette projekt potentielt kan gøre sig gældende som generel forberedelse.

### 8.2.2 Databehandling

Databehandlingen er undersøgt på mange forskellige måder, hvilket er tydeligt i ovenstående del, da der i litteraturen bliver præsenteret flere forskellige problematikker.

I dette projekt var der problemer med sammensætningen af billederne, hvilket givetvis kan omgås ved at optimere opsætningen for kameraet eller sågar investere i et nyt og bedre. Generelt virker sammensætningen af billeder fra drone ikke til at være noget problem, da det ikke er nævnt i den fundne litteratur. Det kan altså antages, at det er et mindre teknisk problem.

Dalu, et al. (2015) nævnte, at lyskalibrering af data bør overvejes, hvilket ud fra nærmere litteraturstudie understøttes. Da flyvehøjden for droner er langt lavere end satellitterne, vil der forekomme en mindre grad af atmosfærisk forstyrrelse. I et studie omhandlende radiometrisk kalibrering af remote sensing-data, påpeger Wang & Myint (2015) ligeledes, at der selv ved droner bør kalibreres for små forstyrrelser. Wang & Myint (2015) foreslår at udarbejde en konstant

kalibreringsparameter, der kan skabes ud fra minimumsreflektanser. Metoden Wang & Myint (2015) præsenterer har visse ligheder med DOS-metoden, som er anvendt til atmosfærekorrektion i dette projekt. I et finsk miljøstudie omhandlende jordbrug, blev dronedata bearbejdet ud fra samme princip, hvor der arbejdes med mørke objekter og minimumsværdier (Honkavaara, et al., 2013). Ud fra litteraturen lader det altså til, at der kan foretages en mindre atmosfærekorrektion på dronedata, ud fra samme princip som er anvendt ved DOS-metoden. En generel kalibreringsmetode kræver yderligere undersøgelser på en større mængde data. (Wang & Myint, 2015; Honkavaara, et al., 2013)

Udover korrektionen for atmosfæriske forstyrrelser, kan præcisionen af klorofylalgoritmerne forstyrres af andre partikler i vandet. Undersøgelsen af Lake Ontario foretaget af Watkins (2010), indeholder også et forslag om at opstille algoritmer til bestemmelse af organisk materiale og suspenderet tørstof. Forslaget fra Watkins (2010) understøttes af Le, et al. (2016), der har lavet en optisk undersøgelse af vandkvalitet i Pensacola Bay i Florida. Le, et al. (2016) har udformet algoritmer for klorofyl, organisk materiale og suspenderet tørstof, på data fra et område karakteriseret af flodudløb. I undersøgelsen gøres det klart, at algoritmerne kun bør overføres til områder med samme kompleksitet, hvad angår vandkvalitet. (Le, et al., 2016) Ud fra litteraturstudiet virker det altså til, at større forekomster af suspenderet tørstof og organisk materiale, kan påvirke refleksion og dermed sporingen af klorofyl. Algoritmer, som tager højde for disse forhold bør dog laves ud fra data, der repræsenterer de danske forhold, for at kunne anvendes nationalt.

Generelt for de tiltag, der foreslås til optimering af klorofylsporing er, at disse korrektioner bør baseres på en omfattende mængde data om danske forhold.

### 8.2.3 Udsigten for brugen af drone

Ved opsendelsen af *Sentinel-2*-satellitterne er opløsningen raffineret til 10 x 10 m for satellitdata, hvilke præciserer satellitbaseret remote sensing. For store søer kan en opløsning på 10 x 10 m være meget anvendelig, men for danske forhold kan der stadig være fordele i at tilegne sig data i højere opløsning. Ved anvendelsen af droner i stedet for satellit, fjernes størstedelen af forstyrrelsen fra atmosfæren. I en artikel af Hill & Clemens (2014), argumenteres der for, at dronerne fremadrettet kan udstyres med diverse teknologiske udstyr, da disse vil blive mindre i vægt og omfang. Fremtidig teknologi kan således potentielt udfase nogle af de nuværende problematikker.

Ud fra litteraturstudiet er der flere usikkerheder ved estimering af klorofyl ved hjælp af drone og satellit. Disse usikkerheder kan bearbejdes på sigt, ved hjælp af flere uddybende studier, især om brugen af drone. En ting, der gentages gang på gang i artiklerne er, at brugen af droner til monitorering af økologisk tilstand i vandmiljøer bør fremmes.

Det er blevet undersøgt hvilke fordele og udfordringer droner besidder i monitoringsammenhæng. Fordele omfatter en stor datamængde, mulighed for høj frekvens af data samt at de kan dække sværttilgængelige områder med gentagne og ens overflyvninger. De væsentligste udfordringer droner står overfor er et stort krav til in situ-data til verificering af algoritmer, korrektion for suspenderet tørstof samt en nødvendighed af kendskab til lokale forhold fx ved specifikke algoritmer til specifikke søtyper. Perspektiverne for droner som dataindsamlingsmetode er store, men det står klart at teknologien stadig er i sin ungdom.

## 9 Bibliografi

- Adobe, u.d. *Grunlæggende om billeder*. [Online]  
Tilgængelig på: <https://helpx.adobe.com/dk/photoshop/using/image-essentials.html#WSfd1234e1c4b69f30ea53e41001031ab64-73daa>  
[Senest hentet eller vist den 12. juni 2016].
- Agisoft LLC, 2013. *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0*, St.Petersburg: Agisoft LLC.
- Andersen, J. M., 1982. *Undersøgelser i 1980 af Hummel sø, Gjessø, Elle sø, Avn sø, Silkeborg lillesø, Schoubyes sø*. Århus: Århus Amtskommune.
- Birk, S. & Ecke, F., 2014. The potential of remote sensing in ecological status assessment of coloured lakes using aquatic plants. *Ecological Indicators*, juni, p. 398–406.
- Campbell, J. B., 2002. *Introduction to remote sensing*. New York: The Guilford Press.
- Chavez, P. S., 1996. Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, september, pp. 1025-1036.
- Closter, R. M. et al., Upubliceret. *AMOS - Et vandforvaltningsværktøj til monitorering af søer.*, Aarhus: Miljøministeriet.
- COWI, 2014. *DK-DDOland2014\_12cm\_UTM32ERTS89* [Geodata].
- Cracknell, A. P. & Hayes, L., 2007. *Introduction To Remote Sensing*. 2. red. Boca Raton: CRC Press.
- Dalu, T. et al., 2015. An assessment of chlorophyll-a concentration spatio-temporal variation using Landsat satellite data, in a small tropical reservoir. *Geocarto International*, 27 marts, pp. 1130-1143.
- Europa-parlamentet og Rådet for Den Europæiske Union, 2000. *Europa-parlamentets og Rådets Direktiv 2000/60/EF af 23. oktober 2000 om fastlæggelse af en ramme for Fælleskabets vandpolitiske foranstaltninger*. [Online]  
Tilgængelig på: [http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0007.02/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0007.02/DOC_1&format=PDF)
- Flynn, K. F. & Chapra, S. C., 2015. Remote Sensing of Submerged Aquatic Vegetation in a Shallow Non-Turbid River Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 15 december, pp. 12815-12836.
- Geodatastyrelsen, 2009. *Kort10* [Geodata].
- Geodatastyrelsen, 2014. *Højdekort: DHM/hydro* [Geodata].
- GEUS, 1999. *Jordartskort* [Geodata].
- Hill, S. L. & Clemens, P., 2014. Miniaturization of Sub-meter Resolution Hyperspectral Imagers on Unmanned Aerial Systems. *Spectral Imaging Sensor Technologies*.
- Honkavaara, E. et al., 2013. Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture. *Remote Sensing*, 6 oktober, pp. 5006-5039.

- Jørgensen, T. B. et al., 2012. *Remote sensing Af Søers Klorofylindhold - RASK*, København Ø: Naturstyrelsen.
- Larsen, G., Mikkelsen, O. A. & Thorval, S., 2014. *Det Midtjyske Søhøjland*. [Online]  
Tilgængelig på:  
[http://denstoredanske.dk/It,\\_teknik\\_og\\_naturvidenskab/Geologi\\_og\\_kartografi/Danske\\_geologiske\\_lokaliteter/Det\\_Midtjyske\\_S%C3%B8h%C3%B8jland](http://denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Geologi_og_kartografi/Danske_geologiske_lokaliteter/Det_Midtjyske_S%C3%B8h%C3%B8jland)  
[Senest hentet eller vist den 29. februar 2016].
- Le, C. et al., 2016. Bio-optical water quality dynamics observed from MERIS in Pensacola Bay, Florida. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 4. februar, pp. 26-38.
- Lepistö, A. et al., 2010. Monitoring of spatial water quality in lakes by remote sensing and transect measurements. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, p. 176–184.
- Markager, S. & Fossing, H., 2013. *Klorofyl a koncentration*. Århus: Århus Universitet.
- Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2011. *Vandplan 2010-2015. Randers Fjord. Hovedvandopland 1.5 Vanddistrikt: Jylland og Fyn*, s.l.: Miljøministeriet, Naturstyrelsen.
- Miljøstyrelsen, 2007. *Danske løsninger på globale miljøforandringer - Regeringens handlingsplan for fremme af miljøeffektiv teknologi*, København: Miljøstyrelsen.
- Murphy, S., 2007. *General Information on Solids*. [Online]  
Tilgængelig på: <http://bcn.boulder.co.us/basin/data/NEW/info/TSS.html>  
[Senest hentet eller vist den 14. Marts 2016].
- Naturstyrelsen, 2011. *Velling Skovene*. [Online]  
Tilgængelig på: [http://naturstyrelsen.dk/media/nst/89803/Velling%20Skov\\_291113\\_Web.pdf](http://naturstyrelsen.dk/media/nst/89803/Velling%20Skov_291113_Web.pdf)  
[Senest hentet eller vist den 10. marts 2016].
- Naturstyrelsen, u.d. *Silkeborg-skovene*. [Online]  
Tilgængelig på: <http://naturstyrelsen.dk/naturoplevelser/naturguider/silkeborgskovene/>  
[Senest hentet eller vist den 15. juni 2016].
- Nielsen, A. H., 2007. *Determination of total phosphorus and dissolved reactive phosphorus*.
- Nielsen, K., Søndergaard, M. & Friberg, N., 2005. God miljøkvalitet i søer og vandløb. *Aktuel Naturvidenskab*, Issue 1, pp. 17-20.
- Olsen, S., 2010. *Danmark - 4.000 oplevelser*. København: Nordisk Forlag.
- Overfredningsnævnet, 1969. *Afgørelser - Reg. nr.: 04548.00*. [Online]  
Tilgængelig på: <http://www2.blst.dk/nfr/04548.00.pdf>  
[Senest hentet eller vist den 10. marts 2016].
- Oxford Research, 2015. *Droner - en ny vækstbranche?*, Frederiksberg: Oxford Research.
- Poulsen, T. G., 2006. *Advanced statisticals data treatment*, Aalborg: Aalborg University.
- Rodríguez, Y. C., el Anjoumi, A., Gómez, J. D. & Pérez, D. R., 2014. Using Landsat image time series to study a small water body in Northern Spain. *Environ Monit Assess*, 13. januar, p. 3511–3522.
- Sand-Jensen, K., 2001. *Søer - en beskyttet naturtype*. København: Gads Forlag.

- Sand-Jensen, K. et al., 2013. *Naturen i Danmark - De Ferske Vande*. København: Gyldendal.
- Sand-Jensen, K. & Lindegaard, C., 2004. *Ferskvandsøkologi*. 2 red. København: Gyldendal.
- Srinivasan, S., 2013. *Using Data from the Landsat 8 TIRS Instrument to Estimate Surface Temperature*. [Online]  
Tilgængelig på: <http://geohackers.in/2013/08/using-data-from-the-landsat-8-tirs-instrument-to-estimate-surface-temperature/>
- Statens Luftfartsvæsen, 2004. *Trafik- og Byggestyrelsen*. [Online]  
Tilgængelig på:  
[http://selvbetjening.trafikstyrelsen.dk/civilluftfart/Dokumenter/Love%20og%20bestemmelser/Bestemmelser%20for%20Civil%20Luftfart%20\(BL\)/BL%2009-serien/9\\_4\\_ud3.pdf](http://selvbetjening.trafikstyrelsen.dk/civilluftfart/Dokumenter/Love%20og%20bestemmelser/Bestemmelser%20for%20Civil%20Luftfart%20(BL)/BL%2009-serien/9_4_ud3.pdf)  
[Senest hentet eller vist den 12. april 2016].
- Stubberger, R. & Sønderskov, K. M., 2011. *Forudsætninger for lineær regression og variansanalyse efter mindste kvadraters metode*. 5 red. Aarhus: Institut for statskundskab - Aarhus Universitet.
- Søndergaard, M., Jeppesen, E. & Jensen, J. P., 1999. *Danske søer og deres restaurering*, Silkeborg: Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser.
- United States Geological Survey, 2013. *Landsat 8 History*. [Online]  
Tilgængelig på: [http://landsat.usgs.gov/about\\_ldcm.php](http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php)  
[Senest hentet eller vist den 16. marts 2016].
- United States Geological Survey, 2015. *EarthExplorer*. [Online]  
Tilgængelig på: <http://earthexplorer.usgs.gov>  
[Senest hentet eller vist den 14. juni 2016].
- Wang, C. & Myint, S. W., 2015. A Simplified Empirical Line Method of Radiometric Calibration for Small Unmanned Aircraft Systems-Based Remote Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15 juli, pp. 1876-1885.
- Watanabe, F. S. Y. et al., 2015. Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images. *Environmental Research and Public Health*, 19 august, pp. 10391-10417.
- Watkins, J., 2010. Use of satellite remote sensing tools for the Great Lakes. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 9 juni, pp. 127-134.

# Bilag

Bilag 1 – Oversigt over indsamlet data

Bilag 2 – Dronehåndbog

Bilag 3 – Risikovurdering

Bilag 4 – GIS-model til droneklorofylkort

Bilag 5 – GIS-model til satellitklorofylkort

Bilag 6 – Oplandsanalyse

Bilag 7 – In situ-målinger og statistik

Bilag 8 – Faktabokse for feltdage

---