



Miljøministeriet
Naturstyrelsen

Remote sensing Af Søers Klorofyl- indhold

Optimering af vandmiljøovervågning



2015

Datablad

Titel: Remote sensing Af Søers Klorofylindhold (RASK). Optimering af vandmiljøovervågning

Forfattere: Torben Bramming Jørgensen¹, Martin Søndergaard², Dennis Trolle², Lars Boye Hansen³, Mikael Kamp Sørensen³, Rikke Margrethe Closter⁴ og Jørgen Erik Larsen⁴

Kvalitetssikring: Jørgen Krogsgaard Jensen⁴

Parter:

¹ Limfjordssekretariatet, Stigsborg Brygge 5, 9400 Nørresundby

² Institut for Bioscience, Århus Universitet, Vejlsovej 25, 8600 Silkeborg

³ GRAS, Geographic Resource Analysis and Science, Øster Voldgade 10, 1350 København K

⁴ DHI, Agern Allé 5, DK-2970 Hørsholm

Følgegruppe: Kjeld Sandby Hansen^a, Ivan Ben Karottki^c, Thomas Theis Nielsen^b

^a Naturstyrelsen, Miljøministeriet, C.F. Tietgens Boulevard 40, 5220 Odense SØ

^b Naturstyrelsen, Miljøministeriet, Haraldsgade 53, 2100 København Ø

^c Roskilde Universitet, Universitetsvej 1, 02, 4000, Roskilde

Udgiver: Naturstyrelsen, Haraldsgade 53, DK-2100 København Ø, Tlf.: (+45) 72 54 30 00, www.nst.dk

År: 2015

Redaktionen afsluttet i år 2012

ISBN nr.: 978-87-7175-521-3

Rapport citationsform: Torben Bramming Jørgensen, Martin Søndergaard, Dennis Trolle, Lars Boye Hansen, Mikael Kamp Sørensen, Rikke Margrethe Closter og Jørgen Erik Larsen. 2012. Remote sensing af søers klorofylindhold – RASK. Naturstyrelsen, Haraldsgade 53, DK-2100 København Ø. ISBN nr. 978-87-7175-521-3 s.

Forsidebillede: WorldView-2 optagelse af studieområdet fra 1. oktober 2011. Silkeborg er placeret i billedets nordvestlige område. Den rumlige opløsning på billedet er 2 meter. Som man kan se, er billedet meget detaljeret og står meget skarpt på en klar solskinsdag som den 1. oktober 2011, hvor man endda kan ane de mange sejlbåde, der var på søerne den dag.

Ansvarsfraskrivelse:

Naturstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Naturstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Naturstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Naturstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.



Miljøministeriet
Naturstyrelsen



AARHUS
UNIVERSITY



Indholdsfortegnelse

1	INDLEDNING	4
1.1	BAGGRUND	4
1.2	PROJEKTETS FUNDAMENT	4
1.3	PROJEKTETS FORMÅL OG INDHOLD	6
2	SATELLITDATA – HISTORIK (STATE OF THE ART)	7
2.1	HISTORISK PERSPEKTIV - SATELLITDATA UDVIKLING FRA MR TIL VHR	7
2.2	FREMTIDEN – SENSORER, DATATYPER	8
2.3	KRAV TIL SATELLITDATA OG METODER FOR ANVENDELSE TIL MONITERING AF SØER/VAND	8
2.4	TIDLIGERE ERFARINGER MED BRUG AF SATELLITDATA TIL MONITERING AF SØER	10
2.5	UDVIKLINGS- OG FORSKNINGSAKTIVITETER	12
3	MULIGHEDER I DANMARK	13
3.1	ERFARINGER FRA DEN MARINE MONITERING	13
3.2	VIDENSBEHOV I DANSKE SØER	13
3.3	SATELLITDATA	14
3.4	MEGET HØJTOPLØSELIGE DATA (<10M)	15
3.5	MELLEMOPLØSELIGE DATA (10-250 M)	16
3.6	LAVOPLØSELIGE DATA (>250 METER)	17
3.7	DATA ANVENDELIGHED – TEKNISKE MULIGHEDER	18
3.8	DATA BRUGT I PROJEKTET	18
4	SATELLITOVERVÅGNING AF SØER – SPEKTRALANALYSE AF HØJT OPLØSELIGE BILLEDER	20
4.1	METODE	20
4.2	RESULTATER	25
4.3	KONKLUSION	28
5	SATELLITOVERVÅGNING AF SØER – MELLEMOPLØSELIGE BILLEDER (LANDSAT)	29
5.1	METODE	29
5.2	RESULTATER	31
5.3	KONKLUSION	32
6	SATELLITOVERVÅGNING AF SØER – LAVTOPLØSELIGE BILLEDER (MERIS FR)	34
6.1	METODE	34
6.2	RESULTATER	35
6.3	KONKLUSION	37
7	MODELINTEGRATION	38
7.1	VALIDERING AF ØKOLOGISKE MODELLER OG DATAASSIMILERING	38
7.2	RAVN SØ – 1D MODELLERING	39
7.3	FURESØ – 3D MODELLERING	43
7.4	KONKLUSION	47
8	PARALLELLER TIL ANDEN TEKNOLOGI	48
8.1	AUTOMATISK SAMPLING	48
8.2	HPLC	49
8.3	SYNERGI MELLEEM MONITERINGSPARAMETRE BASERET PÅ SAMME DATAKILDE	51
9	FREMTIDSPERSPEKTIVER – HVOR ER VI I 2015?	52
9.1	NYE SATELLITTER	52
9.2	GMES – GLOBAL MONITORING OF ENVIRONMENT AND SECURITY	53
9.3	KONTROLOVERVÅGNING / OPERATIONEL OVERVÅGNING	53
9.4	OVERVÅGNING PÅ FORSKELLIGE NIVEAUER	54
9.5	INTEGRERET PROGRAM MED IN SITU-, SATELLIT- OG MODELDATA	54
9.6	AUTOMATISERET DATAINDSAMLING, BEARBEJDNING OG PRÆSENTATION	55
9.7	OVERVÅGNING AF ALGEBLOOMS	55
9.8	DATAKRAV OG MULIGHEDER	56
9.9	UDFORDRINGER/FORHINDRINGER/ BEGRÆNSNINGER/FALDGRUBER	56
10	BEHOV FOR MERE VIDEN	59
11	ADMINISTRATIONSVÆRKTØJ TIL SATELLITOVERVÅGNING AF SØER	60
11.1	TIDSHORISONT OG OMKOSTNINGER	62
12	MARKEDSPOTENTIALE	63
12.1	DANMARK	63
12.2	EU	63
12.3	UDLAND I ØVRIGT	64
13	SAMLET KONKLUSION	65
14	REFERENCER	67

1 Indledning

Remote sensing Af Søers Klorofylindhold (RASK) Optimering af vandmiljøovervågning

Torben Bramming Jørgensen, Lars Boye Hansen, Mikael Kamp Sørensen, Martin Søndergaard, Dennis Trolle, Rikke Margrethe Closter og Jørgen Erik Larsen

Det nationale overvågningsprogram blev etableret i 1989 med henblik på at følge udviklingen i vandmiljøet ved gennemførelse af Vandmiljøplan I. Behov for viden og dokumentation om natur- og miljøforhold har udviklet sig løbende og det nationale overvågningsprogram har da også undergået større og mindre revisioner siden 1989. Igennem den seneste årrække har der været et stigende ønske om i højere grad at inddrage innovative og omkostningseffektive teknologiske løsninger.

1.1 Baggrund

I Strategi for Overvågningsprogrammet 2011-2015 hedder det blandt andet: "Programmet skal løbende inddrage ny viden og nye teknologier, der optimerer og effektiviserer overvågningen". Styringsgruppen for ferskvand iværksatte derfor forskellige aktiviteter til inddragelse af teknologiske løsninger i søovervågningen og havde i den forbindelse de første drøftelser af eventuelle muligheder for at inddrage satellitovervågning i den nationale søovervågning. På søområdet er der behov for kendskab til et meget stort antal søer og vandhullers tilstand og udvikling for at kunne fastlægge målsætning og vurdere målopfyldelse. Traditionelt er miljøovervågning i søerne foregået ved at udtage vandprøver og analysere disse i laboratoriet. Af ressourcemæssige årsager er der derfor en begrænsning i såvel prøvetagningsfrekvensen som i antallet af overvågede søer.

Satellitovervågning kan afhjælpe begrænsninger i datatilgængeligheden ved at øge antallet af loka-

liteter (større geografisk dækning) og desuden forøge overvågningsfrekvensen betydeligt, således at det bliver muligt både at følge udvikling i tilstand, men også at foretage en screening af et stort antal søer og derigennem være i stand til at prioritere overvågningsindsatsen.

"Handlingsplan for fremme af miljøeffektiv teknologi" igangsat af Miljøministeriet i 2010 gjorde det muligt at søge midler til en analyse af mulighederne for etablering af satellitbaseret overvågning. I handlingsplanen hedder det blandt andet: "Vi ønsker at satse på miljøteknologi som en vej frem for dansk erhvervsliv" og videre at man prioriterede: "samarbejde i partnerskaber mellem virksomhederne, forskningsinstitutionerne og de offentlige myndigheder". "Vand" er et af handlingsplanens tre hovedindsatsområder og mere specifikt "Løsninger til overvågning af vandmiljø og vandkvalitet – Teknologi og metoder til optimering og automatisering af vandmiljøovervågningen."

På denne baggrund blev projektet Remote sensing Af Sø-Klorofyl (RASK) startet i efteråret 2010 som et samarbejde mellem DHI, GRAS og Institut for Bioscience, Århus Universitet.

1.2 Projektets fundament

Der er et stadigt stigende behov for viden om vandmiljøets tilstand og udvikling. Dette gælder i hele verden såvel som i Europa og ikke mindst i Danmark, hvor der i øjeblikket arbejdes med at udvikle en række nye metoder til overvågning i forbindelse med Vandrammedirektivets implementering. Ønsket om øget overvågning gælder både den tidsmæssige som

den rumlige opløsning, hvor der typisk ønskes data fra flere lokaliteter og hyppigere målinger. Eftersom ressourcerne, der kan anvendes til overvågning, er begrænsede, er det et behov, som stiller store krav om optimerede og forbedrede metoder til overvågning. En oplagt metode er her at øge automatiseringen af dataindsamlingen, og set i dette lys har satellitovervågning af vandmiljøet meget store perspektiver.

I Danmark stiller implementeringen af Vandrammedirektivet også nye krav til det nationale overvågningsprogram. På sømrådet er der et behov for viden om alle søer større end 5 ha, således at det kan vurderes, om de enkelte søer vil opfylde kravet om mindst god økologisk tilstand. I øjeblikket vurderes opfyldelsen af dette krav udelukkende i forhold til indhold af klorofyl a. Dette kræver kendskab til såvel søernes aktuelle tilstand som en viden om udviklingen i søerne igennem den seksårige planperiode. Gennemsnitligt foretages der årlig således kun undersøgelser i omkring 100 af de i alt omkring 925 søer, som indgår i vandplanerne. Prøvetagningsfrekvensen er i de fleste tilfælde månedlig, hvilket medfører en betydelig usikkerhed på fastlæggelsen af sommergennemsnitlige værdier og forekomsten af algeopblomstringer.

Monitering af miljøforhold med satellitbilleder kan udvide den geografiske dækning samt frekvens og antal af overvågede lokaliteter betydeligt. Det vil således være muligt ikke blot at overvåge søer og andre vandområder, hvor man har et kendskab til tilstanden i forvejen, men også at indhente viden om lokaliteter, som ikke tidligere er undersøgt vha. traditionelle undersøgelsesmetoder. Brug af satellitbaseret information vil endvidere være et væsentligt element i at opfylde Vandrammedirektivets krav til overvågning af algeopblomstringer og endelig vil en integration af den satellitbaserede information med økologiske modeller forbedre mulighederne for udvikling af prognoseværktøjer. I Danmark har vi særlige forudsætninger for at udvikle sådanne metoder, da en omfattende overvågning i de sidste 20 år muliggør en effektiv test af metoderne

Det er forventningen, at monitering af vandkvalitet baseret på satellitinformation og modellering vil være mere omkostningseffektiv (i forhold til observationsmængde og frekvens) end nuværende metoder. Traditionelle overvågningsmeto-

der, der inkluderer prøvetagning og analyser er meget ressourcekrævende. Det er derfor særdeles vanskeligt at opnå en rumlig og tidslig dækning, der er tilstrækkelig til at vurdere såvel korttidsvariationer som langsigtede trends. Tilsvarende vil traditionel overvågning ikke være tilstrækkelig for early warning på akutte hændelser såsom algeopblomstringer, der kan give problemer for badevandskvalitet og vandforsyning.

Remote sensing teknologier bliver billigere og billigere og der er derfor et udtalt behov for projekter til operationalisering af de senere års forskning og teknologiudvikling.

Det vurderes, at der er et stort potentiale for i øget grad at anvende satellitinformation i den danske miljøadministration såvel i akvatiske som terrestriske miljøer. Projektet tager derfor udgangspunkt i det samarbejde, som er udviklet gennem en årrække mellem DMU - Fagdatacenter for ferskvand (nu Århus Universitet) og amterne/Naturstyrelsen, således at relevans og anvendelighed i den danske miljøadministration sikres.

Internationalt er der ligeledes store perspektiver i udvikling af satellitbaseret overvågning. I områder med svag institutionel og logistisk infrastruktur samt svag kemisk og biologisk analysekapacitet er traditionelle registrerings- og overvågningsprogrammer meget vanskelige at gennemføre. Remote sensing teknologier vil her kunne give værdifulde kvalitetsdata, der kan anvendes i vandressource-forvaltningen til registrering og politikudvikling, planlægning, overvågning og evaluering. Det vurderes derfor, at der vil være et marked for remote sensing teknologien. Her tænkes ikke alene på den fattige del af den 3.verden, men særligt også i udviklingsbrændpunkter som BRIK-landene (Brasilien, Rusland, Indien og Kina) og andre lande med store vækstpotentialer og deraf følgende vandressource udfordringer.

Mhp. markedsføring af en nyudviklet satellitbaseret moniteringsteknik er det afgørende at kunne dokumentere, at metoderne er vel kalibrerede, videnskabelig solidt underbyggede, samt anvendelige i forhold til en forlængelse af eksisterende historiske tidsserier. For anvendelse i overvågningsprogrammet er det ligele-

des vigtigt at metoderne er operationelle og brugervenlige.

1.3 Projektets formål og indhold

Det er projektets formål at skabe grundlaget for etablering af en robust og kosteffektiv metode til vurdering af klorofylkoncentration i søer samt til overvågning af algeopblomstringer.

Dette skal ske ved:

- At beskrive state-of-the-art i overvågning af søer vha. satellitoptagelser.
- At udvikle tidssvarende algoritmer for beskrivelse af sammenhængen mellem satellitbilleders spektrale bånd og klorofylkoncentrationen i danske søer.
- At forbedre grundlaget for en højere grad af integration af satellitoptagelser med økologiske sømodeller til validering og prognose af klorofyl- og algeforekomst og deres udvikling.

2 Satellitdata – historik (State of the art)

2.1 Historisk perspektiv - Satellitdata udvikling fra MR til VHR

Satellitbilleder har været tilgængelige siden 1960'erne, hvor de første spionsatellitter begyndte at optage billeder. De første kommercielle satellitter var dog først tilgængelige i 1970'erne. Frem mod år 2000 var tilgængeligheden af satellitter især præget af to typer billeder:

1. Kortlægningsatellitter: Billeder i forholdsvis høj rumlig opløsning (ca. 30 m) tilgængelige hver 16. dag og primært brugt til arealkortlægning
2. Monitorering: Daglige billeder i 1 km opløsning (fra 1982) primært brugt til dynamiske parametre (hav, is, sne, vegetationsanalyser i stor skala).

Medium Resolution (MR) – de første generelt tilgængelige data

Siden 1973 har Landsat programmet været banebrydende, og det er forsat et af de vigtigste arkiver til historiske analyser og kortlægning. Opløsningen på Landsat blev fra 1984 forbedret med nye satellitter i 30 m opløsning med mulighed for billeder hver 16. dag og god mulighed for at skelne overfladetyper pga. en god spektral opløsning.

Et tilsvarende satellitprogram er det franske SPOT, som har en anelse bedre opløsning end Landsat og tilmed mulighed for at dreje sensoren på satellitten, hvilket giver mulighed for hyppige optagelser over et område.

Sideløbende har monitoringsatellitter som f.eks. NOAA leveret billeder mange gange dagligt i 1 km opløsning, f.eks. til estimering af havtemperaturer.

Very High Resolution (VHR) og bedre monitorering

Omkring år 2000 kom en række nye markante satellitter til. Indenfor kortlægningsatellitterne

begyndte den såkaldte VHR epoke – Very High Resolution med billeder i 1 m opløsning fra Ikonos satellitten og alene med optagelser som funktion af efterspørgslen. Ikonos er siden blevet efterfulgt af en række satellitter med 50-60 cm opløsning. Disse sensorer har forholdsvis ”brede” spektrale bånd med deraf følgende begrænset evne til at skelne karakteristiske områder i spektrale signaturer.

Omtrent samtidig sendte NASA to nye monitoringsatellitter op – Terra og Aqua med MODIS sensoren ombord. MODIS dækker i 250 m – 1000 m opløsning op til to gange dagligt og har en række forholdsvis smalle bånd, der gør det muligt at kortlægge detaljer i marine miljøer, herunder klorofyl a og suspenderet sediment. I 2002 blev ESA satellitten ENVISAT opsendt, som i 300 m eller 1200 m opløsning kan give detaljeret information omkring vandkvalitet på daglig basis for Danmark.

Anden generation VHR

Igenem 00'erne var tendensen at reproducere Ikonos. Det skyldes, at der primært var efterspørgsel efter hyppige opdateringer af kystområder, byer osv. Denne tendens fortsatte indtil 2009, hvor WorldView-2 blev opsendt – den første rigtige multispektrale VHR satellit med 8 bånd i 2 m opløsning. Denne konfiguration åbner nye muligheder for kortlægning af vand, idet der her findes mere kortbølgede samt smallere bånd end på nogen af de tidligere højtopløselige kortlægningsatellitter.

Ud over den forbedrede opløsning – både rumligt og spektralt – er den nye generation af satellitter desuden kendetegnet ved en langt højere optagekapacitet og fleksibilitet. Detaljeret planlægning af optagelser ved brug af meteorologisk satellitbilleder gør, at det er muligt at optage billeder i bedre kvalitet oftere end

før, idet skyer i højere grad end tidligere kan undgås.

2.2 Fremtiden – sensorer, datatyper

Der er en række initiativer i gang, som skal sikre bedre adgang til satellitbaseret miljøinformation. Et af de vigtigste tiltag er GMES (Global Monitoring of Environment and Security), der er finansieret af EU/ESA. Under GMES bliver der de kommende år opsendt en række jordobservationssatellitter, samtidig med at det bliver etableret en række services, som skal gøre data og afledte produkter bredere tilgængelige for brugere.

I 2014 opsendes Sentinel 2 således, som med en opløsning på 10-60 m og optagefrekvens hver 3-4. dag i Danmark kan blive et vigtigt element i fremtidig overvågning af ferskvand. Derudover opsendes Landsat Data Continuity Mission primo 2013 – en ny og forbedret Landsat sensor med kraftigt forbedret følsomhed. Fælles for begge datakilder vil være, at data bliver gratis og således frit tilgængelige for offentligheden.

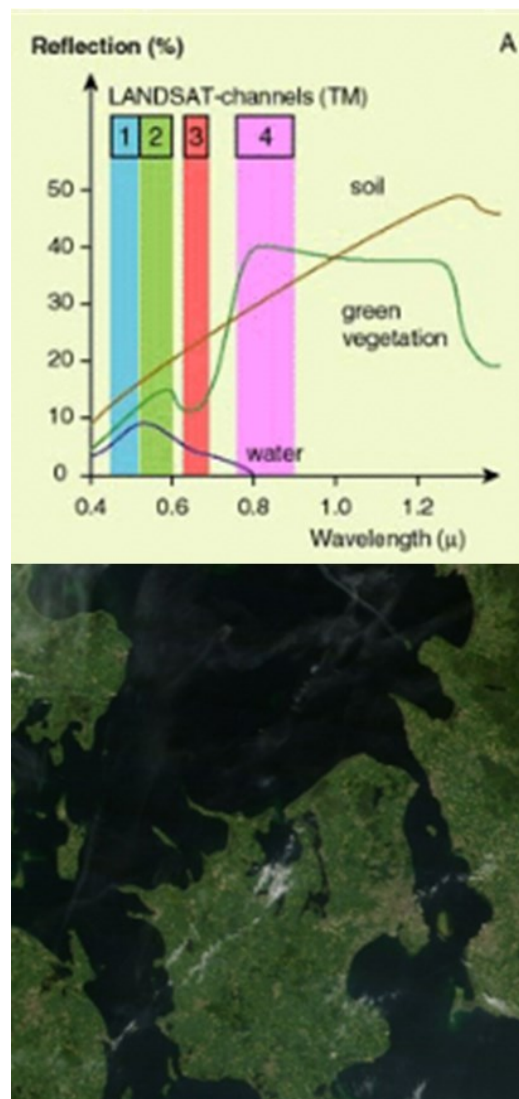
I forhold til detaljerede målinger af f.eks. vandkvalitet er også en række hyperspektrale satellitter på vej, f.eks. ENMAP i 2013. Denne teknologi kendes stort set kun fra flybaserede scannere, men indenfor en årrække vil et antal hyperspektrale sensorer således være til rådighed.

2.3 Krav til satellitdata og metoder for anvendelse til monitorering af søer/vand

Korrekt estimering af reflektans

Satellitmonitoring ved hjælp af passive sensorer baserer sig på registrering af reflekteret eller emitteret elektromagnetisk stråling fra overfladen. Forskellige overflader har hver deres karakteristiske måde at reflektere solens indstråling på, hvilket det menneskelige øje registrerer som forskellige overfladers varierende farver. Tilsvarende er de forskellige satellitsystemer i stand til at registrere den mængde reflekteret stråling, der når sensoren i forskellige områder af det elektromagnetiske spektrum. Et eksempel på dette er vist i Figur 1, hvor reflektanskurven for tre forskellige overfladetyper er vist sammen med placeringen af de første 4 bånd på Landsat TM sensoren. Det menneskelige øje er i stand til at regi-

strere reflekteret energi i det synlige område svarende til de 3 første bånd på TM sensoren.



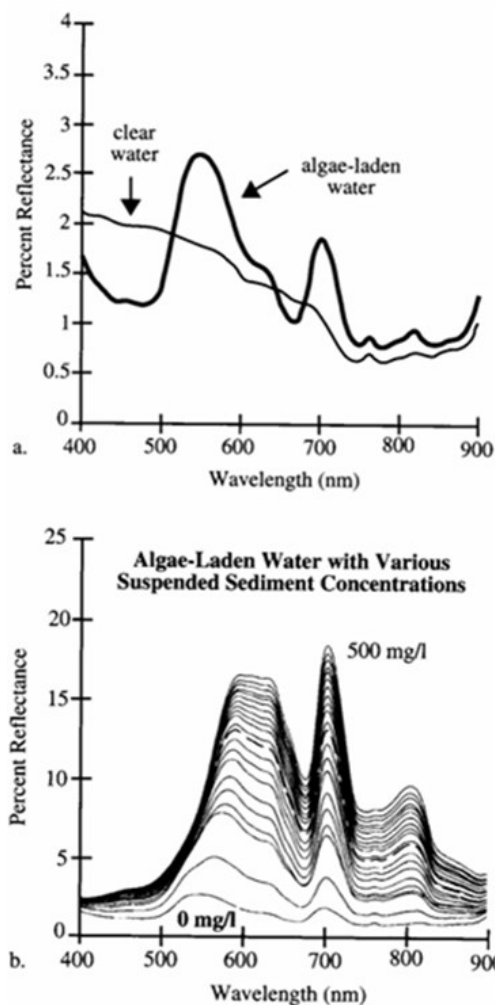
Figur 1 Øverst: Typiske reflektanskurver for tre forskellige overfladetyper. De farvede områder markerer placeringen af Landsat TM bånd © Eduspace, ESA. Nederst: MODIS billede fra 5. juni 2011 baseret på bånd placeret tilsvarende bånd 1 til 3 på Landsat – dvs. fra den blå del af det elektromagnetiske spektrum til det røde ©NASA.

Som det ses af Figur 1 er reflektansen fra vand generelt meget lille – vi opfatter således vand som et mørkt objekt, når vi betragter det, som det også ses på højre del af figuren. Netop den lille mængde reflekteret stråling, der reflekteres fra vandsøjlen, stiller store krav til atmosfærekorrektionen af data. Med en atmosfærekorrektion fjerner man atmosfærens påvirkning af den reflekterede energi, så man derved bliver i stand til at omsætte den registrerede stråling målt ved sensoren til reflektansen ved overfladen. Hvis den reflekterede mængde

energi således kun udgør 5-10 % af den indkomne stråling fra solen, vil en upræcis atmosfærekorrektion påvirke den estimerede reflektans ved overfladen betydeligt. Atmosfærekorrektion er således et vigtigt element i beregningen af korrekte indikatorer for vandkvalitet såsom klorofyl-a

Spektral opløsning

Det er tydeligt, at reflektansen for vand varierer i de fire viste Landsat TM bånd (Figur 1). Reflektanskurven varierer alt efter vandets sammensætning, herunder koncentrationer af klorofyl, suspenderet materiale og gulstof. Et eksempel på variationen mellem 'rent' vand og vand med en høj koncentration af klorofyl-a er vist i Figur 2.



Figur 2 Reflektanskurve for 'rent' vand uden betydelige mængder klorofyl og vand med højt indhold af klorofyl (øverst) samt for vand med varierende mængder af suspenderet sediment (nederst, Jensen, 2007).

Med introduktionen af klorofyl i vandet stiger vandets samlede absorption i den blå del af spektret (omkring +/- 480 nm), mens reflektansen stiger kraftigt i den grønne del af spektret (om-

kring +/- 560 nm). Øjet opfatter vandets farve som skiftende fra blå i det rene vand til mere grønlig/gulligt i det klorofylholdige vand. Bemærk også den karakteristiske top i reflektans omkring 700 nm, der skyldes spredning pga. algernes opbygning, minimum pigment- og vandabsorption samt den stærke absorption i den røde del af spektret omkring 675 nm. Jo mere præcist de enkelte sensorers bånd er defineret, desto bedre bliver deres evne til præcist at estimere variation i reflektansen mellem de enkelte bånd samt ramme netop det område, hvor forskellen mellem to bånd f.eks. er størst. Desuden er selve antallet af bånd og deres placering i det elektromagnetiske spektrum af stor betydning for mulighederne for estimering af vandkvalitetsparametre.

Metoder og algoritmer

Empirisk tilgang – forhold mellem forskellige bånd.

I det foregående afsnit blev en række karakteristiske forskelle på reflektansen af 'rent' vand og klorofylholdigt vand kort beskrevet. Disse karakteristiske ændringer og kurvernes indbyrdes forskellige forløb har indgået som parameter i mange af de tidligere algoritmer til beregning af klorofylkoncentrationer. Stumpf og Tyler (1988) foreslog således en ratiotilgang baseret på området umiddelbart før toppen omkring 700 nm (den røde del af spektret) og selve toppen (nærinfrarød del af spektret) og tilsvarende tilgang er senere brugt af Dekker (1993) specifikt for vandkvalitet i søer. Ruddick (2001) baserede ligeledes en metode for meget turbide marine vande på ratiotilgangen ligesom Pulliainen *et al.* (2001) i deres arbejde med estimering af vandkvalitet i søer.

For typen af satellitdata, der ikke indeholder nok spektral information til at man kan lave en robust semianalytisk baseret beregning af vandets optiske egenskaber, er arbejdsgangen med brug af forskellige indeks, der baseres på reflektansforskelle i forskellige dele af spektret stadig den mest anvendte. Den benyttes således stadig i stor stil til de nyere sensorer, der ikke er specifikt designet til monitoring af vandkvalitet (f.eks. Worldview-2, Silva *et al.* 2011).

Metoder og algoritmer – Semianalytisk tilgang – brug af neurale netværk

Med introduktionen af MERIS data, hvor der er 15 forskellige bånd fordelt over spektret - bånd der er meget veldefinerede (smalle, lav signal/støj ratio) samt bånd, der er specifikt designet til monitorering af vand og atmosfære - er en ny tilgang til estimering af vandkvalitet blevet udbredt. På MERIS data er flere neuralt netværk-baserede metoder blevet udviklet, hvor netværkene dels forholder sig til tilgængeligt in-situ data (brugt til at træne netværket) samt til de forskellige bestanddele i vandet og deres indbyrdes påvirkning af hinanden. Et eksempel på f.eks. effekten på den samlede reflektans for vand med konstant klorofylkoncentration som funktion af varierende mængder sediment er vist på Figur 2. Det karakteristiske forløb på reflektanskurven fra Figur 2 er stadig tydeligt, men niveauerne og forholdet mellem forskellige dele af spektret ses at variere betydeligt.

Tilgangen med neurale netværk er implementeret i ESAs standard marine produkter, hvor målet er bedst mulig global performance (ESA 2006). For farvandene omkring Danmark er yderligere to lokalt trænedede netværk tilgængelige (Schroeder *et al.* 2007, Doerffer and Schiller 2007, Doerffer and Schiller 2008) og de senere års test under MarCoast projektet har demonstreret en betydeligt bedre performance ved de lokalt tilpassede metoder i forhold til den globalt dækkende (Hansen *et al.*, 2008, MarCoast, 2010).

Den neuralt netværksbaserede analyse af MERIS data er med succes blevet overført til monitorering af større søer også (Doerffer and Schiller 2007, Doerffer and Schiller 2008) under det ESA finansierede MERIS Lake projekt, hvor søer i Finland og Spanien samt Bodensee i Tyskland, Østrig, Schweiz indgik i træningen af det neurale netværk samt i validering af metoden. Valideringsøvelsen viste, at netværket er i stand til at levere fornuftige resultater over en række forskellige betingelser (Ruiz-Verdú *et al.* 2008).

Den seneste udvikling af neurale netværk er specifikt rettet mod kystnære vande, hvor en række forbedringer i forhold til atmosfærekorrektion og netværkperformance er i fokus. Arbejdet laves under det ESA finansierede CoastColour projekt (<http://coastcolour.org/>). Det forventes, at erfaringerne fra projektet vil medføre forbedrede

muligheder for monitorering af ferskvandsområder også i kraft af fokus på komplekse vande (turbide) samt forbedret atmosfærekorrektion

Generelle betragtninger

Som det kan ses af de foregående afsnit, er der alt efter typen af inputdata en række forskellige tilgange, der kan vælges i forhold til monitorering af søer baseret på satellitdata. Det er uden for dette projekts muligheder at udvikle metoder og algoritmer fra bunden. I stedet vil projektet fokusere på de tidligere udviklede metoder, hvor der for de højere opløselige data primært vil være tale om en ratio-tilgang, mens førromtalte neurale netværk udviklet for europæiske søer testes på MERIS 300 m. data for de største søer i Danmark.

I forhold til at udvikle metoder til systematisk monitorering af søer i Danmark er det desuden interessant at vurdere mulighederne for at udvikle såvel et generelt system, der kan køre uden behov for lokale tilpasninger, som et værktøj med sø-specifikke algoritmer og kalibrering.

2.4 Tidligere erfaringer med brug af satellitdata til monitorering af søer

Brug af satellitdata til monitorering af søer og ferskvandsområder har især de seneste 10 år gennemgået en rivende udvikling. Der er flere faktorer, der bidrager til denne udvikling, hvor de væsentligste er:

- Der er kommet markant flere satellitsystemer med en konfiguration, der gør dem egnede til monitorering af parametre, der beskriver vandkvalitet. Dette har øget både tilgængeligheden af data (flere systemer, der potentielt kan optage data over et givent område), samt medført en stor grad af konkurrence mellem de kommercielle satellitdistributører, hvilket igen har medført et betydeligt fald i priserne på data.
- Lettere adgang til data samt tolkede produkter. Sideløbende med udviklingen af satellitsystemerne har der været stor fokus på udvikling af software til bearbejdning af data fra de forskellige systemer. Der er endvidere investeret massivt i udvikling af systemer, der gør det muligt dels at finde

og dernæst at downloade data i forskellig grad af tolkning/bearbejdning direkte via internettet. I Europa er det især de senere års udvikling af services under GMES programmet, hvor fokus netop er på udbredelse af brug af satellitdata til f.eks. miljømonitoring, der har hjulpet til at afstanden mellem databehandlere og datafortolkere er minimeret kraftigt. Gennem en markant centraliseret politisk prioritering på EU niveau er der i dag således centraliseret adgang til de fleste 'kerneservices', der leverer basis dataprodukter samt en mængde specialiserede remote sensing dataformidlere og konsulenter, der driver mere specialiserede services. På det marine område er kerneservices således udbudt på Paneuropæisk niveau under MyOcean projektet ¹, mens mere specialiserede danske services er repræsenteret gennem aktiviteter under MarCoast projektet, hvor de danske repræsentanter DMI ² og DHI/GRAS³ viser operationelle vandkvalitetsdata baseret på MERIS og MODIS for de danske farvande samt kombinerede satellitdata med hydrodynamiske modeller for at levere mere præcise forudsigelser om hydrodynamiske og økologiske forhold.

I Danmark er der et meget begrænset erfaringsgrundlag i forhold til brug af satellitdata til monitorering af ferskvandsområder. Andre steder i verden har man opbygget et betydeligt erfaringsgrundlag og i det følgende vil erfaringerne fra henholdsvis USA og Finland kort blive skitseret.

Erfaringer fra USA

I USA findes flere eksempler på længerevarende programmer, hvor den økologiske status i søer vurderes med hjælp af satellitbaseret input. Det amerikanske Landsat program har været en vigtig årsag til udbredelsen af brug af satellitdata til regional monitorering af f.eks. søer, da programmet har sikret en generelt god og stabil adgang til data. Samtidig har især NASA udviklet metoder til monitorering gennem en lang årrække. Endelig har man i USA været dygtige til at inddrage frivillige i indsamlingen af data for de enkelte søer. Således har Environmental Protection Agency siden 1987 aktivt støttet etableringen og uddan-

nelsen af frivillige prøvetagere til jævnlige at indsamle information omkring søers vandkvalitet.

Inddragelse af frivillige i miljøovervågningen giver nogle overvejelser omkring metodevalg og nøjagtighed på indrapporterede værdier. I de her omtalte programmer har man forsøgt at minimere usikkerheden ved at benytte en simpel Secchi-disk måling som indikator for vandkvaliteten.

Her beskrives kort to programmer fra USA, der succesfuldt opererer ud fra denne tilgang.

Lake Water Clarity Monitoring and Analysis with Satellite Remote Sensing:

I staten Wisconsin begyndte man i 1999 et program, hvor indrapportering af sigtgybde-målinger fra indbyggere i staten danner basis for en kalibrering af satellitdata. I perioden 1999 – 2001 fik man gennem et forskningsprojekt på University of Wisconsin-Madison etableret den statistiske sammenhæng mellem sigtgybden og satellitdata, så det derigennem blev muligt at producere et kort over sigtgybden baseret på satellitdata for over 8.000 af de største mere end 15.000 søer i staten. Efterfølgende er den satellitbaserede metode blevet indarbejdet i statens 'Department of Natural Resources' eksisterende monitoringsprogram Wisconsin Citizen Lake Monitoring Network, hvor der siden midten af 1980'erne rutinemæssigt er blevet indsamlet sigtgybde data. Siden 2001 er systemet således blevet brugt rutinemæssigt og i 2010 bestod det af 925 frivillige der indrapporterede data, der kan danne basis for beregninger af sigtgybden i statens øvrige 7000 større søer⁴.

Maine Volunteer Lake Monitoring Program:

I staten Maine i USA har man siden 1971 kørt et monitoringsprogram baseret på frivillig indrapportering fra mere end 500 af statens søer. Den seneste trend i projektet er at koordinere indsamling af f.eks. sigtgybde på tidspunkter med passage af satellit. Målet er der ved over 2-3 år at få opbygget et datasæt, der vil kunne bruges til at kalibrere satellitdata, så man ud fra satellitdata kan monitorere den økologiske status i tusindvis af søer, der ikke mo-

¹ MyOcean: <http://www.myocean.eu.org>

² DMI Marcoast side: <http://marcoast.dmi.dk>

³ DHI/GRAS MarCoast side: <http://havudsigten.dk>

⁴ University of Wisconsin-Madison projektside: <http://www.lakesat.org>; Wisconsin Lakes Monitoring, Department of Natural Resources: <http://dnr.wi.gov/lakes>

niteres rutinemæssigt. Projektet i Maine er i første omgang baseret på Landsat data, men vil kunne udvides til at benytte andre datakilder også.

Finland

Med landets mange søer har der naturligt været fokus på udvikling af metoder til monitorering af søernes tilstand ved hjælp af satellitdata. Adskillige nationale initiativer er således blevet gennemført med aktiv støtte fra TEKES (Finnish Funding Agency for Technology and Innovation), hvor betydelig ekspertise og erfaring er blevet opbygget hos bl.a. SYKE (Finnish Environment Institute) og TKK (the Laboratory of Space Technology of the Helsinki University of Technology). Sideløbende har man i Finland været dygtige til at deltage i internationale forsknings- og udviklingsprojekter gennem f.eks. det europæiske rammeprogram for forskning og teknologisk udvikling og aktiviteter under det Europæiske Rumforskningsagentur (ESA).

I dag er satellitdata således en prioriteret del af det finske monitoreringssystem. Billeder bruges i kombination med traditionelt indsamlede prøvedata til at vurdere planktonalger og makrofytters udbredelse og udvikling over tid. Samtidig er finske interesser i dag centralt placeret i udviklingen af forbedrede metoder til behandlingen af satellitdata, så man hele tiden er på forkant med udviklingen både teknologisk og datamæssigt. Finske partnere er f.eks. centralt placeret i FRESHMON projektet under det 7. rammeprogram, hvor fokus netop er på forbedret monitorering af ferskvandsområder vha. satellitdata. Derved vil Finland være i stand til fortsat at optimere udbyttet af ressourcerne brugt på både traditionel monitorering samt de satellitbaserede aktiviteter.

2.5 Udviklings- og forskningsaktiviteter

Historisk er udviklingen i satellitbaseret monitorering af søer i Europa blevet drevet af forskningsaktiviteter på europæisk niveau. Under det EU finansierede SALMON projekt (Satellite Remote Sensing for Lake Monitoring, 1996-99) var fokus således på at evaluere mulighederne og potentialet ved satellitbaseret sømonitorering. Under FP5-IST projektet SISCAL (Satellite-based Information System on Coastal Areas and Lakes, 2001-04) var fokus i nogen grad at udvikle metoder

men i endnu højere grad at gøre informationen tilgængelig til brugere på en operationel og lettilgængelig måde. Mere specifik udvikling af metoder til brug til monitorering af søer blev senere lavet under det ESA finansierede MERIS LAKES projekt (2008-09) hvor den semi-analytiske tilgang fra MERIS blev tilpasset brug af sømonitorering. Senest er FP7 projektet FRESHMON (Freshwater Monitoring, 2011-13) startet med fokus på opbygning af et system der kan levere information omkring vandkvalitet på europæisk niveau.

Der har således historisk været stor fokus på mulighederne ved satellitbaseret monitorering af søer i Europa, og med implementering af WFD i 2015 er der også øget fokus på at udvikle services der kan levere den nødvendige information til brugerne. I forhold til danske interesser er det værd at bemærke at Danmark ikke er repræsenteret i de seneste aktiviteter, og heller ikke vil være det i de aktiviteter der starter op i nærmeste fremtid. Erfaringen med storskala europæiske projekter - f.eks. GMES relaterede - er desuden at der ofte tilbydes et produkt der enten ikke dækker lokale behov eller ikke er tilgængeligt på en måde, så lokale brugere kan få fuldt udbytte af det, da projekterne oftest er målrettet store internationale institutioner som EU. Så på trods af de eksisterende og kommende storskala projekter relateret til sømonitorering på europæisk niveau vurderes det, at der er behov for dansk udvikling af ekspertise og værktøjer der er tilpasset danske forhold både i forhold til økologiske forhold i danske søer og præsentation af data (sprog, tradition mv.). Derved sikres også fleksibilitet i systemet (f.eks. tilpasning til dansk lovgivning og/eller metodik samt mulig indflydelse på drift og justeringer af systemet).

3 Muligheder i Danmark

Som det beskrives i det foregående kapitel er der et meget begrænset erfaringsgrundlag for monitorering af søer i Danmark vha. satellitteknologi. I dette afsnit vil vi gå mere i dybden med hvilke muligheder, der i øjeblikket er for at inddrage teknologien til monitorering af danske søer. Vi tager udgangspunkt i de danske erfaringer med marin monitorering vha. satellitdata efterfulgt af en kort karakteristik af de danske søer, i forhold til hvor satellitinformation kunne tænkes at bidrage med information. De to sidste afsnit omhandler dels satellitdata generelt – hvilke datatyper har været relevante at inddrage for danske søer og hvad er deres muligheder/begrænsninger i dag - samt endelig en overordnet analyse af den øjeblikkelige state-of-the art i forhold til integration af satellitdata og økologisk modellering.

3.1 Erfaringer fra den marine monitorering

Med opsendelsen af ENVISAT i 2002 blev der taget et kæmpeskridt mod almen anerkendelse af satellitbaseret monitorering af vandkvalitet i marine områder. ENVISAT er specielt designet og optimeret til at observere vand og siden opsendelsen har der været stor fokus på udvikling af metoder til behandling af data samt på udvikling af services, der kan levere tolkede informationer til f.eks. nationale og regionale myndigheder. I Danmark har DHI/GRAS samt DMI i en årrække leveret detaljeret information omkring vandkvalitet for farvandene omkring Danmark under MarCoast initiativet.

Erfaringerne fra den marine monitorering vil i betydelig grad kunne inddrages i en udbredelse af brug af teknologien for ferskvandsområder også. Det gælder f.eks. områder som:

- System design – hvad skal et system kunne levere af information samt i hvilken form skal det leveres? Vigtigt at integrere brugerne i udviklingsfasen for at sikre, at brugernes behov rent faktisk dækkes.
- Behov for træning. Det drejer sig om ny teknologi, så en vis teknologibarriere er at

forvente, inden den accepteres. Fuld accept og inddragelse i monitoringsprogrammet vil kræve træning og information om både mulighederne og begrænsningerne ved metoder og data.

- Vigtigt at forholde sig til usikkerheder. Validering af metoderne og integrering af in-situ data til kalibrering af metoderne er meget centralt.

Erfaringerne fra den marine overvågning viser endvidere tydeligt, at det i dag er muligt at integrere satellitbaserede informationer med de traditionelle monitoringsaktiviteter og derved optimere indsatsen i monitoringsprogrammet. Ved at bygge videre på erfaringerne fra den marine monitorering sikrer man et godt udgangspunkt for tilsvarende optimering af ressourcerne i forhold til monitorering af ferskvandsområderne

3.2 Vidensbehov i danske søer

Der findes omkring 120.000 danske søer og vandhuller, som er større end 100 m² og dermed omfattet af naturbeskyttelsesloven. I henhold til Vandrammedirektivet fokuserer man i Danmark især på søer over 5 hektar, hvoraf der i vandplanerne indgår omkring 925 søer, hvor tilstanden er ukendt i omkring 20 %. Der føres årligt tilsyn i omkring 110 af disse søer, således at de fleste større søer indgår i en 6-årig undersøgelsesturnus. I de øvrige danske søer bliver der ikke systematisk indsamlet vandprøver.

Størsteparten af de danske søer er næringsrige med høje koncentrationer af fytoplankton og klorofyl a. Det gennemsnitlige sommerindhold af klorofyl a i danske søer ligger på 50-60 ug/l (gennemsnit af 550 søer med data fra 2005-2009 er 56 ug/l). Dermed ligger de fleste søer også over den klorofylgrænse, der indtil videre er den eneste variabel, der anvendes i Danmark til at afgøre om søerne opfylder vandrammedirektivets krav om mindst god økolo-

gisk tilstand i 2015 og dermed også til at afgøre, hvilken indsats, der skal foretages for at forbedre vandkvaliteten.

Anvendelsen af remote sensing kan øge antallet af søer samt monitoringsfrekvensen med et bedre kendskab til søernes aktuelle tilstand og et forbedret beslutningsgrundlag til følge.

Monitering af vandblomst

Et af elementerne i Vandrammedirektivet, som skal vurderes i forbindelse med anvendelse af fytoplankton som biologisk kvalitetselement, er forekomsten af vandblomst, dvs. store forekomster af alger, typisk i form af blågrønalger, der i stille og varme sommermåneder kan lægge sig i tykke lag på overfladen af søer og brakvandsområder. Forekomsten og udbredelsen af vandblomst er hidtil kun dækket via punktprøvetagninger, hvilket langt fra giver et fyldestgørende billede. Remote sensing med højere opløsning i både tid og rum af klorofylindhold og eventuelt forekomsten af blågrønalger vil kunne bidrage med værdifulde data, som tillige vil kunne indgå i vurderingen af søernes mållopfyldelse.

Det vurderes, at remote sensing vil kunne udgøre et betydeligt supplement til traditionel prøvetagning og analyser af klorofyl-a og bidrage til et væsentligt bedre data- og beslutningsgrundlag og effektivisere omkostningerne til monitering.

3.3 Satellitdata

Med de mange forskellige typer data, der i dag er tilgængelige, afhænger af de forskellige muligheder og begrænsninger for brug af satellitdata i monitoringsprogrammet meget af datavalget. En første forudsætning for at benytte satellitdata i monitoringsprogrammet er, at der er mulighed for at få optaget egnede data.

Adgang til data og deres egnethed afhænger af flere faktorer såsom f.eks. vejret, pris på data, den rumlige - og spektrale opløsning på data og sikkerhed for kontinuitet i data fremover.

I det følgende er beskrevet tre forskellige datatyper inddelt efter deres rumlige opløsning. De tre grupper har hver især deres muligheder og begrænsninger og behandles derfor separat. For alle tre grupper gælder imidlertid nogle generelle overvejelser om, hvad der gør dem egnede til brug i en monitoringsopgave i Danmark.

Tabel 1 Antal skyfri observationer i 2009 sæsonen baseret på MERIS Fr data i 300 meters opløsning

Måned	Ravn Sø	Furesø
Marts (15 – 31)	4	5
April	12	11
Maj	10	4
Juni	8	6
Juli	5	3
August	12	8
September	7	8
Total	58	45

Skydække

Som tidligere beskrevet er tendensen, at der bliver flere potentielle optagelser over områder i Danmark fra satellitsystemer, der har en spektral og rumlig opløsning, der gør dem egnede til monitering af ferskvandsområder. En vigtig forudsætning for optagelse af data er imidlertid skyfri betingelser. Det danske vejr er som bekendt til tider præget af mange skyer, og der vil dermed være perioder, hvor det ikke er muligt at observere jordoverfladen. Jo flere potentielle optagelser, der er mulige, desto større vil sandsynligheden for skyfri forhold på overflyvningstidspunktet også være. Monitering baseret på Landsat med 16 dages overflyvningsinterval har naturligt ringere sandsynlighed for gode optagelser end en service baseret på det kommende Sentinel-2 program med 2-3 dages overflyvningsinterval. MERIS data har en potentiel 'nær-daglig' dækning da ENVISAT overflyvningsfrekvens over Danmark er tæt på daglig. Ved at kigge på tilgængeligheden af skyfri data fra MERIS kan vi derfor få en indikation af hvor mange dage vi kan forvente skyfri optagelser. Udtræk fra hele MERIS FR tidsserien over Danmark fra 2009 viste at der i perioden 15. marts til 30. september var henholdsvis 45 og 58 skyfri optagelser over Furesøen på Sjælland og Ravn Sø i Jylland (Tabel 1). Selv med en overflyvningsfrekvens på 2-3 dage kan man således forvente minimum en skyfri observation om måneden og som regel flere.

Data tilgængelighed – før og nu

Til dokumentation af en eventuel temporal udvikling af en parameter – f.eks. klorofyl koncentrationen – vil adgang til historiske data være meget relevante. De forskellige satellitsy-

stemer har alle opbygget et arkiv af tidligere optagede data, men varigheden og dækningsgraden af arkivet varierer.

Tilsvarende varierer muligheden for optagelse af nye data også for de forskellige satellitsystemer. Nogle af systemerne har en kapacitet, der muliggør systematisk optagelse, mens andre systemer er drevet af en 'on-demand' tilgang, hvor der kun optages data, hvis der på forhånd er indgået aftale herom. Derudover spiller kamerakonstruktion og satellittens placering og bane omkring Jorden ind og påvirker hvor ofte data potentielt er tilgængelige. I forhold til monitorering af noget så dynamisk som klorofylkoncentrationer i søer kan det have stor betydning, hvornår data optages og ideelt set er optagelser 'så ofte som muligt' derfor umiddelbart at foretrække for at forøge muligheden for optagelse af gode data (jvf. afsnit omkring skydække).

For ethvert monitoringsprogram er det vigtigt at forholde sig til kontinuitet i data. Det gælder både i forhold til opbygning og udvikling af metoder og rutiner, men i særdeleshed også i forhold til sikkerhed for fremtidigt datagrundlag. Typen af satellitter, der er anvendelige i denne sammenhæng, kan betegnes som 'generelle' jordobservations-satellitter. De har en konfiguration, der muliggør en bred anvendelse af data og bygger i større eller mindre grad direkte på erfaringerne fra tidligere systemer for at sikre kontinuitet, samtidig med indførelse af nye muligheder i takt med teknologisk udvikling af teknikken (f.eks. flere/bedre bånd, bedre dækning rumligt og temporalt mm.).

Økonomi og rumlig opløsning – balance mellem pris og behov

Udover spørgsmålet om hvorvidt det rent teknisk er muligt at få optaget data, er det også nødvendigt at forholde sig til den økonomiske side af brugen af satellitdata i et monitoringsprogram. Der er i de fleste tilfælde en tæt forbindelse mellem den rumlige opløsning og prisen på data, hvor de mest detaljerede data er dyrest at anskaffe. I forbindelse med valg af data til monitoringsopgaver må man lave en afvejning af den ønskede detaljeringsgrad på en parameter kontra prisen på anskaffelsen af information. Til prisen skal medregnes både udgifter til evt. indkøb af data samt ressourcer til behandling og analyse af data. Her vil det alt andet lige kræve flere res-

sourcer at håndtere store datamængder (data med høj rumlig opløsning).

3.4 Meget højt opløselige data (<10m)

Denne gruppe dækker primært data tilgængelige fra kommercielle operatører. Den første fuldt kommercielle satellit i denne gruppe blev opsendt i 1999 og siden er der løbende blevet sendt flere i omløb. Eksempler på sensorer i denne gruppe er IKONOS, Quickbird, GeoEye-1 og WorldView-2.

Skydække

Kapaciteten på de nyeste højt opløselige satellitter er blevet kraftigt forøget de seneste år i kraft af mulighed for hurtigere og mere fleksibel styring af sensoren på satellitterne samt generel øget optage- og downlinkkapacitet. Samtidig er antallet af satellitter, der kan optage data i denne opløsning, hastigt stigende, så der er således gode muligheder for at få optaget data på et specifikt tidspunkt.

Konkurrence på satellitterne

Med de kommercielle operatører af systemer, der kan levere højt opløselige data, er konkurrence en parameter, der skal medtages i vurdering af mulighed for optagelse af brugbare data. Disse systemer har mulighed for at flytte optikken på satellitten og derved styre hvilke områder, der optages ved hver passage. I det tilfælde, hvor to kunder indenfor samme satellitdækning bestiller data, der kræver justering af optikken, introduceres et potentielt kapacitetsproblem. Kan justeringen ikke foretages indenfor den påkrævede tid kan kun én af optagelserne realiseres. For at vælge hvilke optagelser, der skal laves, må operatøren derfor prioritere de to opgaver. Her vil der primært blive kigget på størrelsen på ordren og kundens status hos operatøren (stor kunde kontra mindre kunde). Som eksempel på en situation, hvor der evt. kan opleves kapacitetsproblemer for optagelser i Danmark, er perioden hver sommer, hvor EU får lavet optagelser af forskellige områder som input til deres kontrol af uddeling af landbrugsstøtte (arealanvendelseskortlægning). En mindre optagelse i Danmark vil i konkurrence med en stor EU-ordre altid blive nedprioriteret. Det skal også nævnes, at der de sidste 10 år har været perio-

der, hvor USA's militær har booket satellitterne fuldstændig for at bruge dem til efterretningsindsamling under større konflikter. Det forekommer heldigvis sjældent, men sås f.eks. i starten af konflikterne i Irak og Afghanistan.

Datatilgængelighed

Da denne datatype er forholdsvis ny og i vid udstrækning kun optages "on-demand", er dataarkivet med historiske data over Danmark relativt beskedent. Den stadig større kapacitet på de nyeste højtopløselige satellitter har dog betydet en øget tendens til "spekulative optagelser", hvor satellitoperatøren optager data i forventning om, at det kan generere et salg på et tidspunkt. Dækningen er derfor stærkt forøget især indenfor de seneste 2 år. Der sker dog ingen systematisk optagelse af data. Data i denne kategori blev først tilgængelige med opsendelsen af IKONOS i slutningen af 1999, så data går i bedste fald tilbage til sæsonen 2000. Adgang til data foregår på fuldt kommercielle vilkår og data købes gennem officielle datadistributører.

Økonomi og rumlig opløsning

Den øgede konkurrence mellem de kommercielle operatører af højtopløselige satellitsystemer har betydet en kraftig reduktion i pris på data de seneste år. Alt tyder på, at tendensen vil fortsætte de kommende år, i takt med at flere satellitter bliver opsendt og konkurrence øges. I 2011 var km²-prisen for sensorer med en rumlig opløsning på under 2 meter mellem 20 – 40 US\$, så der er stadig et stykke vej til en pris, der gør det muligt at anvende denne type data systematisk i monitoringen af de danske søer. De højtopløselige data kan imidlertid bruges i situationer, hvor ekstra detaljer er ønskede f.eks. i form af detaljestudier af enkelte udvalgte søer eller som validerings- eller kalibreringsinput til udvikling og drift af empiriske eller dynamiske sømodeller.

3.5 Mellemløselige data (10-250 m)

I denne gruppe er det især data fra de to Landsat 5 og 7 systemer, der er interessante, idet de begge er tilgængelige i 30 m opløsning hver 16. dag. Landsat systemet er desuden helt unikt i og med at det går tilbage til 1984 med den samme type sensor. Landsat data var tidligere temmelig kostbare at anskaffe, men med frigivelsen af arkivet i 2009 blev alle optagne scener siden 1984 gjort frit tilgængelige. Det vil sige, at det i dag er muligt

at lave en temporal analyse for perioden 1984 til i dag baseret på frit tilgængelige data i 30 m opløsning. Nye data er tilgængelige hver 16. dag.

Skydække

Med et interval på 16 dage mellem hver overflyvning vil der potentielt være 13-14 optagelser henover en sæson fra marts til september. En del af disse vil givetvis være skyede så reelt er antallet af scener, der kan bruges betydeligt lavere og der vil være perioder med længere varighed mellem datadækningen.

Datatilgængelighed

Gruppen af satellitter indenfor kategorien "Mellemløselige data (10-250 m)" går generelt betydeligt længere tilbage i tid end gruppen af meget højtopløselige data. Landsat programmet går med den nuværende sensortype (TM/ETM) tilbage til 1984, og med adgang til en næsten 30 år lang tidsserie af konsistente satellitdata, vil man med eksisterende in-situ data fra det nationale monitoringsprogram have mulighed for at analysere søers historiske udvikling. Den lange periode betyder også, at der er lang erfaring med brugen af Landsat data i forhold til f.eks. metoder til kalibrering, atmosfærekorrektion, samt monitorering af ferskvand og søer (f.eks. Wisconsin Citizen Lake Monitoring Network, USA⁵). De rå data er tilgængelige gennem NASA og adgang kræver ingen forudgående aftale. Nye data gøres løbende tilgængelige gennem samme system og er typisk tilgængelige inden for 1-2 uger efter optagelse.

Økonomi og rumlig opløsning

Normalt siger man, at den mindste enhed, der kan observeres på et satellitbillede, svarer til et billedes pixelstørrelse – for Landsat altså svarende til 30 x 30 m. For at tage højde for eventuelle mindre afvigelse i præcision på georeferencen samt det faktum, at søer ofte har en irregulær form i forhold til et satellitbilledes kvadratiske struktur, er det imidlertid fornuftigt at udvide kriteriet for størrelsen "den mindste enhed der kan identificeres". Udvides kriteriet med en pixel på alle leder fås et område på 90 x 90 meter svarende til 0,8 hektar. Som nævnt i afsnit 3.2 er hovedparten af de

⁵ <http://dnr.wi.gov/lakes/clmn/>

danske søer af beskeden størrelse. Men med mulighed for monitorering af søer ned til ca. 1 hektar vil man kunne dække de omkring 925 søer, der indgår i vandplanerne og også nogle af de lidt mindre. En anden fordel ved Landsat er størrelsen på de enkelte scener, som har en størrelse på 185 x 185 km og ligger i et fast grid. Med en enkelt scene får man således en konsistent optagelse af data dækkende et meget stort område, hvilket gør det noget nemmere at sammenligne data for enkelte søer for den samme dag i forhold til hvis data var optaget over flere dage med deraf varierende atmosfæresammensætning, belysningsforhold (solens position, skydække og -skygger mm) og optagevinkler.

Som det allerede er nævnt, blev det samlede Landsat arkiv fra NASA/USGS gjort frit tilgængeligt i 2009. Data kan således anvendes uden andre omkostninger end ressourcer til behandling og analyse.

Der er i afsnittet her fokuseret på Landsat som repræsentant for adskillige tilgængelige satellitsystemer, der opererer med en rumlig opløsning mellem 10 – 250 m. De øvrige systemer er alle karakteriseret ved en eller flere af følgende udsagn og derfor nedprioriteret i forhold til Landsat:

- Har en meget kortere tidsserie af arkiverede data.
- Kun kommercielt tilgængelige; ofte høj pris.
- Ikke optimal sensor konfiguration (SPOT mangler f.eks. det blå bånd, der typisk indgår i beregning af klorofyl baseret på indeks).

3.6 Lavopløselige data (>250 meter)

Den mest robuste anvendelse af satellitdata til bestemmelse af eksempelvis klorofyl α i dag er de såkaldt højfrekvente, lavt-opløselige sensorer. Disse sensorer kan tage billeder en eller flere gange dagligt i en forholdsvis grov rumlig opløsning på 250 – 1000 m. Til marin monitorering er denne skala tilstrækkelig. Ud over den rumlige opløsning er det vigtigt, ved satellitmålinger af vand, at optagelserne har en høj tidslig frekvens, da vandmiljøet er ekstremt dynamisk. Sensorerne, der bruges til måling af vandkvalitet, er i stand til at adskille forholdsvis smalle områder af den reflekterede stråling fra havoverfladen, hvilket betyder, at det er muligt at separere eksem-

pelvis klorofyl fra uorganisk suspenderet materiale.

Samme metode er i princippet også mulig for søer (Koponen *et al.*, 2008). Imidlertid er der en række tekniske udfordringer, der skal løses, før en operationel overvågning kan igangsættes i Danmark. Den rumlige opløsning på 250-1000 m, som de daglige målinger kan fås i, er kun brugbar for de største danske søer. For at undgå kanteffekter, når der måles med grov rumlig opløsning, bør en sø ved anvendelse af denne teknik have en udstrækning på mindst 1,5 km, hvilket kun gør løsningen mulig for de allerstørste søer i Danmark (Guanter *et al.*, 2010). For mindre søer er det nødvendigt at benytte data med højere rumlig detaljeringsgrad, hvilket i øjeblikket vil ske på bekostning af optagefrekvens og spektral (farvemæssig) detaljeringsgrad.

For de lavopløselige data (>250 m) er det primært MODIS og MERIS, der er relevante, da deres opløsning kommer tættest på kategoriens nedre grænse. Data med lavere opløsning (f.eks. historiske SeaWiFS i 1 km opløsning) vil i bedste fald kunne bidrage med information for de største søer i Danmark. Både MODIS og MERIS data er frit tilgængelige gennem henholdsvis NASA og ESA og har en bred anvendelse indenfor jordobservation, hvor det regionale til nationale er i fokus. For MODIS gælder, at data er tilgængelig i en opløsning varierende fra 250 m til 1000 m, dog er der kun to bånd tilgængelige i den højeste opløsning. MERIS fås ligeledes i varierende opløsning fra 300 m til 1200 m. Her fås alle 15 bånd i den bedste opløsning. Da MERIS sensoren desuden er MODIS sensorerne teknisk overlegen og i stand til at levere mere præcise data vil MERIS være at foretrække fremfor MODIS på trods af den lidt lavere rumlige og tidslige opløsning.

Skydække

I og med at MODIS systemet består af både Terra og Aqua satellitterne, er der potentielt to daglige optagelser af vores område⁶. Dette er særdeles stærkt i forhold til kortest mulige interval mellem skyfri optagelser. MERIS passerer tæt på dagligt og den daglige potentielle

⁶ Satelliternes orbit varierer en smule, så dækningen ikke er fuldstændig sammenfaldende med daglig dækning. Enkelte dage vil der således ikke være dækning over Danmark.

optagelse er tilsvarende velegnet til monitorering i Danmark.

Datatilgængelighed

Hvor NASA tidligt prioriterede let og hurtig adgang til deres data, har ESA i MERIS sensorens første leveår primært prioriteret udviklingen af metoder og applikationer. NASA data har derfor i en årrække været frit tilgængelige i nær-realtid med direkte adgang gennem en webbrowser, mens adgang til ESA data har været begrænset til godkendte formål, der krævede forudgående ansøgning og godkendelse. I dag optages alle scener rutinemæssigt i den bedste opløsning og proceduren for godkendelse er blevet lettere sammen med adgangen til operationelle data - både til standard data, der fås gennem ESA, men også til mere specialiserede og/eller tolkede dataprojekter gennem f.eks. de danske MarCoast 'service providers' DHI/GRAS og DMI på det marine område. For historiske data er man stadig nødt til at gå gennem ESAs arkiver med deraf følgende behov for registrering og godkendelse, hvilket forsinker adgangen i forhold til MODIS. Man kan få adgang til en længere tidsserie af daglige MODIS data i løbet af 'få dage', mens adgang til en tilsvarende MERIS tidsserie i 300 m opløsning tager 'få uger'.

I forhold til historiske data og muligheder for trend analyser vil man med MODIS data kunne gå tilbage til 2000 for MODIS Terra og 2002 for MODIS Aqua. MERIS data er tilgængelige tilbage til 2002 også, men for de tidlige år er der begrænset mulighed for data i den bedste opløsning.

Økonomi og rumlig opløsning

I kraft af at data fra både de to MODIS sensorer og MERIS er frit tilgængelige er det økonomisk kun ressourcer til databehandling og tolkning, der er nødvendige i forhold til et monitoringsprogram. Den rumlige opløsning på f.eks. MERIS på 300 x 300 m muliggør jf. forrige afsnit omkring rumlig opløsning, at den mindste enhed, der kan observeres, er på 9 hektar. Følger man rationalet fra tidligere og udvider området til 3 x 3 pixels, svarer det til, at søer med en størrelse på omkring 81 hektar eller større vil kunne monitoreres med data i denne opløsning.

For de største danske søer vil denne type data dog stadig være yderst interessant i kraft af den potentielt daglige dækning, der muliggør mange

flere observationer over en sæson, end hvad der er muligt gennem det nuværende in-situ baserede monitoringsprogram. Med denne type data vil analyser af klorofylkoncentrationer henover sæsonen således være mulige, ligesom data kan bruges til udvikling og kalibrering af sømodeller i større søer.

3.7 Data anvendelighed – tekniske muligheder

I de tre foregående afsnit er der blevet fokuseret på data anvendelighed ud fra tre faktorer:

- datatilgængelighed
- økonomi
- den rumlige opløsning

Der er imidlertid stor forskel på de enkelte sensorers konfiguration, hvilket gør nogle sensorer mere velegnede end andre til monitorering af søer. Her spiller forskellige faktorer ind såsom antallet af reflektansbånd, båndenes bredde, båndenes placering i det elektromagnetiske spektrum og sensorens generelle følsomhed. Selv om betingelserne omkring datatilgængelighed, økonomi og rumlig opløsning umiddelbart tyder på egnethed kan de tekniske begrænsninger ved en sensor således betyde, at man må gå på kompromis med en eller flere af de 3 førnævnte faktorer. Et eksempel på dette er f.eks. Landsat systemet, hvor økonomi, rumlig opløsning og til dels også datatilgængeligheden umiddelbart er attraktiv. Imidlertid er sensitiviteten i data relativt lav (data leveres i 8-bit dybde, svarende til 256 unikke værdier, hvor reflektansen mellem 0 og 1 kan skaleres), hvilket giver nogen begrænsninger i forhold til at registrere nuancer i reflektansen fra søerne som følge af f.eks. varierende klorofyl indhold. Det betyder endvidere, at analysen bliver meget følsom overfor variation og usikkerhed i f.eks. atmosfærekorrektion, hvilket kan gøre det svært at sammenligne absolutte værdier. For de nyeste og kommende sensorer er følsomheden betydeligt bedre – data leveres nu typisk i 10 bit (1024 unikke værdier) eller op til 12 bit (4096 værdier).

3.8 Data brugt i projektet

For at undersøge mulighederne bredt er der i RASK projektet blevet arbejdet med forskellige

satellitdata i varierende opløsning. De tre typer data der er indgået i analyserne dækker 3 forskellige rumlige opløsninger. Det drejer sig om:

- WorldView-2: 2 m x 2 m rumlig opløsning. Den pt. mest avancerede kommercielt tilgængelige satellit. Data er tilgængelige i 8 bånd med nogle helt unikke muligheder for analyser af f.eks. vandmiljøet. I RASK projektet bruger vi WorldView-2 data til højtopløslig kortlægning af klorofyl indhold af søer i søhøjlandet omkring Silkeborg.
- Landsat: 30 m x 30 m rumlig opløsning. Passerer Danmark i en fast bane hver 16. dag. Den store fordel med Landsat er det historiske arkiv, der gør det muligt at gå mere end 30 år tilbage i tid. Da data desuden er frit tilgængelige, er det med til at opveje den lave sensitivitet i data, der betyder, at data ikke er optimale til at analysere vandområder. I RASK bruger vi Landsat til at kalibrere og validere økologiske sømodeller samt som forberedelse til Sentinel-2 programmet.
- MERIS (MEDIUM Resolution Imaging Spectrometer). 300 m x 300 m rumlig opløsning. Kan i dag levere billeder hver 1-2 dage men i lav rumlig opløsning. Disse optagelser har vi anvendt til blandt andet at illustrere perspektiverne i at anvende satellitoptagelser med korte tidsintervaller i sammenhæng med økologiske sømodeller for derigennem at forbedre modellernes evne til at forudsige tilstand og udvikling.

Der er i dag et stort antal forskellige satellitdata, der er tilgængelige i mere eller mindre let tilgængelig form. En del ældre data leveres gennem centrale services – f.eks. NASA og ESA. Andre kræver aftaler direkte med de enkelte satellitoperatører eller tilknyttede leverandører. Data til projektet anskaffes af GRAS, der er autoriseret reseller af de højtopløselige data samt har samarbejdsaftaler og – rutiner til dataadgang hos de relevante organisationer såsom ESA.

4 Satellitovervågning af søer – spektralanalyse af højt opløselige billeder

For at undersøge og demonstrere mulighederne for klorofyllkortlægning i danske søer baseret på meget højopløselige satellitdata blev der i løbet af 2011 optaget et antal billeder i 2 meters rumlig opløsning. Billederne dannede baggrund for en række test af mulighederne for estimering af klorofyl i danske søer ved at analysere sammenhængen mellem satellitbilledernes spektrale bånd og den samtidige klorofylkoncentration i udvalgte danske søer.

På Figur 3 er vist et WorldView-2 billede optaget d. 1/10 2011 over studieområdet sydøst for Silkeborg. Området dækker ca. 80 km² og er valgt som arbejdsområde, da det dækker mange søer med varierende klorofylindhold indenfor et lille område. De fleste af områdets store søer (Julso,

Borre Sø og Brassø) gennemstrømmes af Gudenåen og er som sådan ret næringsrige med mulighed for høje klorofyl-koncentrationer. Andre af søerne ligger i næsten upåvirkede skovområder (Slåen Sø, Almind Sø) og er næringsfattige og med forventelig lave klorofylkoncentrationer.

4.1 Metode

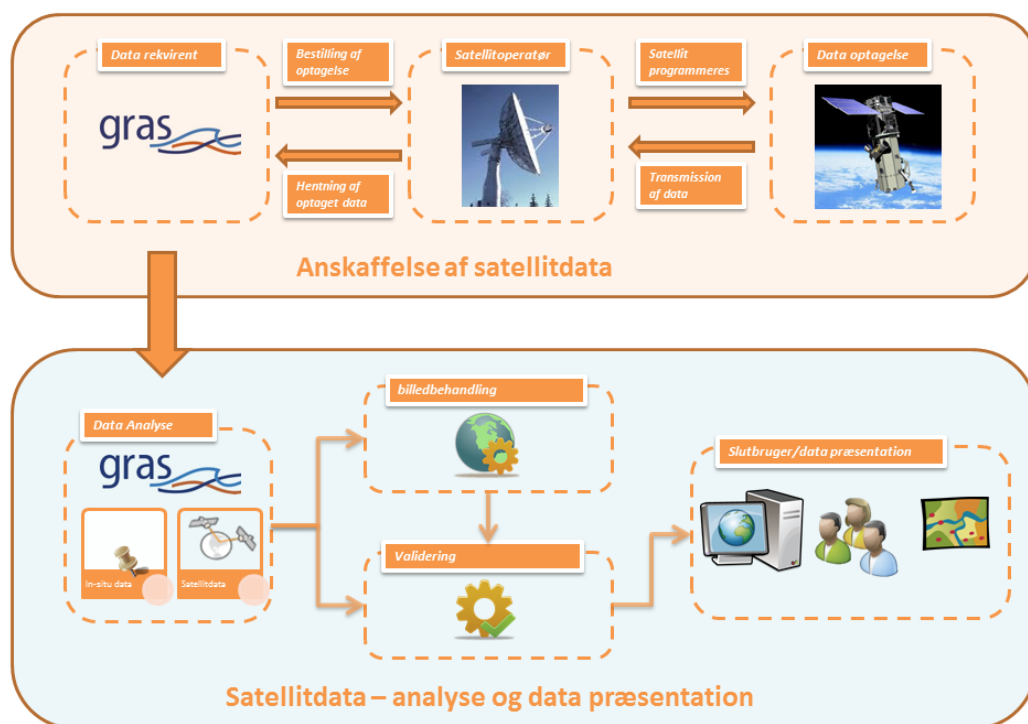
Optagelse af satellitdata

Der blev i løbet af 2011 optaget fire billeder fra den kommercielle WorldView-2 satellit.

World-View-2 satellitten leverer billeder i 2 x 2 meters opløsning, som kan transformeres til meget detaljeret information om klorofylkon-



Figur 3 WorldView-2 optagelse af studieområdet fra 1. oktober 2011. Silkeborg er placeret i billedets nordvestlige område. Den rumlige opløsning på billedet er 2 meter. Som man kan se, er billedet meget detaljeret og står meget skarpt på en klar solskinsdag som den 1. oktober 2011, hvor man endda kan ane de mange sejlbåde, der var på søerne den dag.



Figur 4 Arbejdsgang i forbindelse med bestilling og analyse af meget højt opløselige data til RASK projektet.

centrationen i søer. WorldView-2 er den nyeste generation af meget højt opløselige satellitbilleder og instrumentet er i stand til at levere data i en meget høj opløsning samt i otte forskellige spektrale bånd i 2 meters opløsning. Denne type data optages 'on-demand' på fuldt kommercielle vilkår. Data fra denne type satellitter distribueres gennem en af satellitoperatørens autoriserede distributører. Det generelle arbejdsflow kan ses på Figur 4.

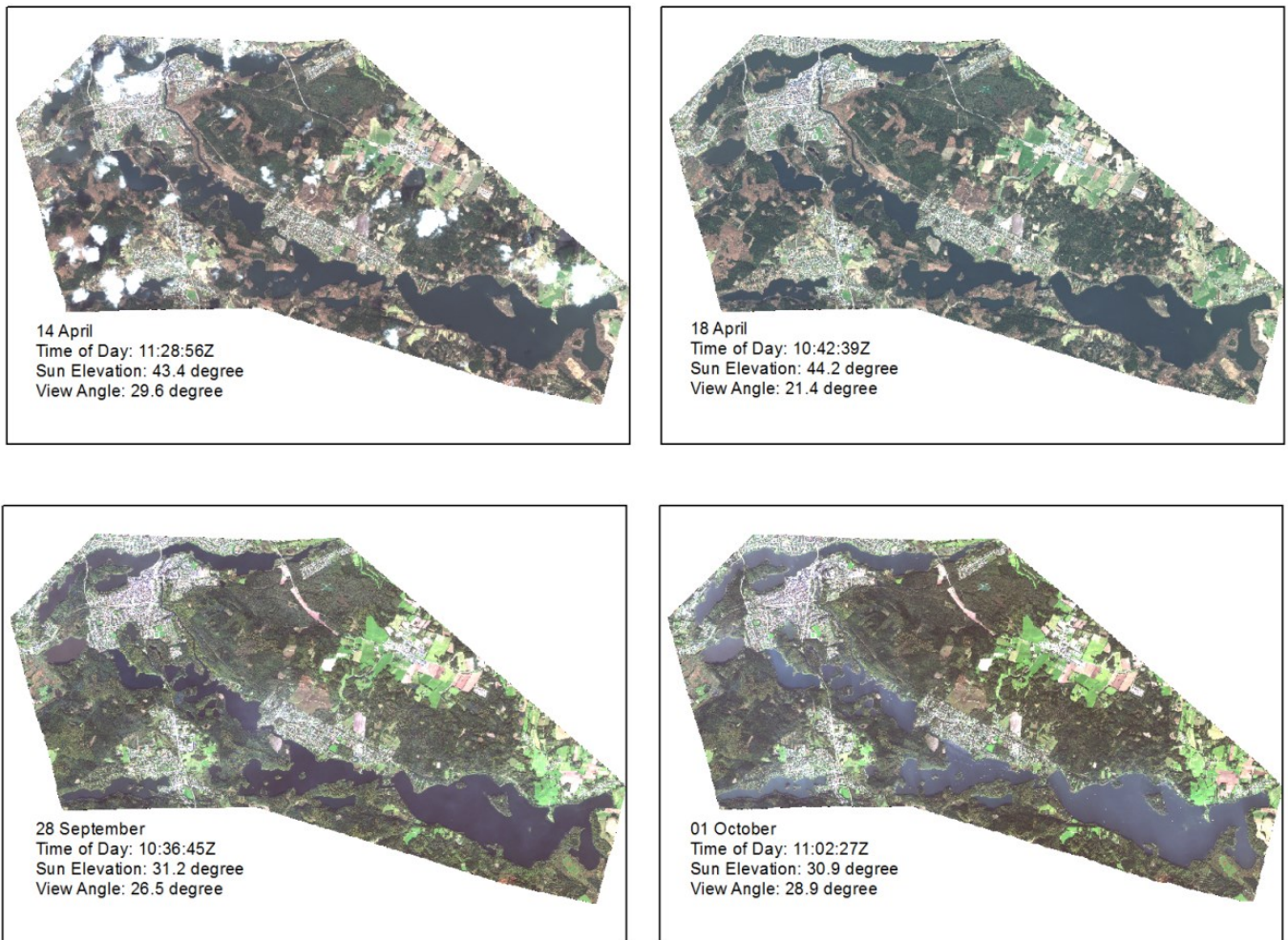
I tæt samarbejde med satellitoperatøren placeres først en ordre (optagelsen bestilles). Satellitoperatøren programmerer herefter satellitten og data kan optages. I tilfælde af skyede forhold kan der kræves en række forsøg, før en succesfuld optagelse realiseres. Efter optagelse sendes besked om succes samt link til data til bestilleren, der herefter kan hente de optagne data og starte billedbehandlingen.

Uheldigvis viste det sig, at projektets testperiode – perioden april – september 2011 – var en helt usædvanlig skyet periode. Det var planen at optage data løbende henover sommerperioden med op til 10 optagelser, men skyerne betød at det kun blev muligt at optage data i midt-april samt i

slutningen af september⁷. I alt blev der optaget 4 billeder (Figur 5).

WorldView-2 data købes på kommercielle vilkår, hvor prismodellen varierer efter en række kriterier f.eks. mængden af data, man ønsker optaget (antal km²), hvilke kriterier man har til f.eks. maksimalt accepteret skydække, optagevinkel mm., samt hvilken prioritet man ønsker at have på satellitten (i tilfælde af konkurrence på satellitten prioriteres man efter hvilken prioritetsklasse, man har bestilt data i). I vores tilfælde var det vigtigt at have de bedst mulige data (få skyer + optimale optagevinkler) samt den størst mulige sandsynlighed for optagelse (høj prioritet på satellitten), hvilket betød, at prisen for en optagelse dækkende vores studieområde på 80 km² lå på omkring 20.000 kr. Ved brug af standardbetingelser og med færre krav til optagelsen/data ville prisen kunne reduceres med omkring 50 %.

⁷ For at sikre bedst mulige analyseforhold blev der opsat en række krav til optagelsen i forhold til f.eks. maksimalt accepteret skydække, samt bedst mulig optagevinkel. Kravene betød, at sandsynligheden for en optagelse kunne realiseres blev reduceret i forhold til en standard optagebetegnelse. Til gengæld sikrede vi os at få billeder i en høj kvalitet. I forhold til at undersøge potentialet blev kvalitet på data altså vægtet højere end kvantitet.



Figur 5 Data optaget fra WorldView-2 satellitten over søhøjlandet omkring Silkeborg i løbet af 2011.

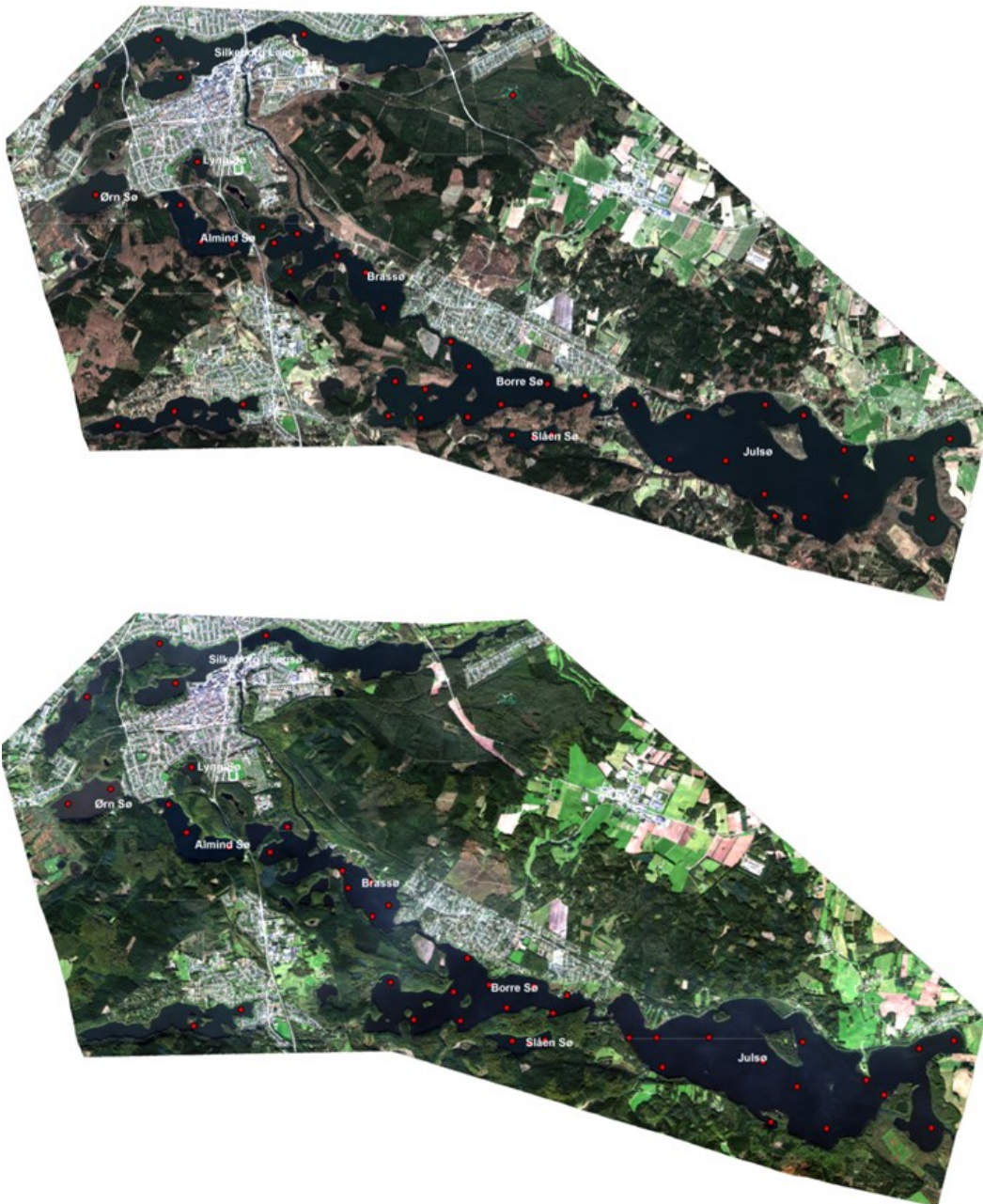
Indsamling af in-situ målinger

Parallelt med satellitoptagelserne blev der gennemført en målekampagne på søerne i kampagneområdet, hvor der blev taget vandprøver til traditionel bestemmelse af klorofylkoncentrationen på en række lokaliteter. Målekampagnen og satellitoptagelsen blev koordineret, således at der blev optaget to billeder med få dages mellemrum og der ind i mellem foretaget en målekampagne. For begge perioder gælder, at vejrforholdene var gode med svag vind. Det skønnes derfor, at prøverne er repræsentative for forholdene i de enkelte søer for dagene umiddelbart før og efter prøvetagning. I forbindelse med den første kampagne blev der udtaget vandprøver til klorofyl α koncentrationer fra 11 søer og 47 lokaliteter. Ved den anden kampagne blev 9 søer besøgt fordelt på i alt 44 lokaliteter. Vandprøverne blev alle udtaget fra båd og fra overfladevandet og opbevaret mørkt og køligt, indtil prøverne ved hjemkomst blev filtreret og klorofyl ekstraheret med ethanol. Analyseusikkerheden ved klorofyl α

målinger ligger normalt indenfor 5-10 %. De faktiske værdier af klorofyl α anvendes til at udvikle algoritmer til estimering af klorofylkoncentrationen på baggrund af satellitoptagelserne fra WorldView-2 satellitten.

Under målekampagnen var det en prioritet at besøge så mange af søerne indenfor satellitbilledernes udsnit som muligt samt lave nok målinger i de enkelte søer til at kunne vurdere graden af rumlig variation. En fordeling af indsamlingslokaliteterne under de to målekampagner er vist i Figur 6.

De indsamlede prøver dækker over søer med varierende økologisk kvalitet. Målekampagnens 80 km² store undersøgelsesområde var udvalgt for at sikre så stor variation i søernes indhold af klorofyl som mulig. Figur 7 viser et frekvensdiagram over vandprøvernes klorofylkoncentration fra de to målekampagner. Der er en overvægt af relativt lave koncentrationer



Figur 6 De røde punkter markerer hvor vandprøver blev indsamlet under de to målekampagner i henholdsvis midt-april (øverst) og slut-september (nederst).

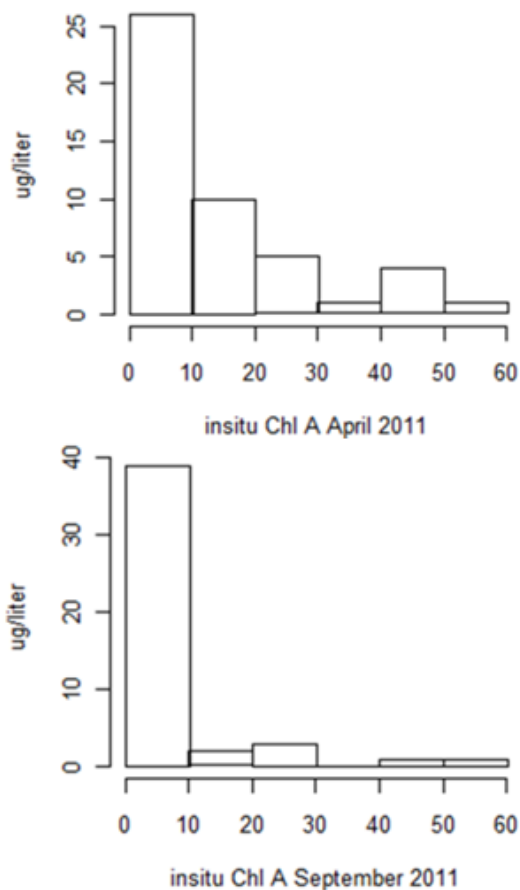
men dog stadig et tilstrækkeligt antal målinger med høje koncentrationer til også at kalibrere satellitdata her.

For at dokumentere den horisontale variation i klorofylindholdet, blev der desuden udtaget flere vandprøver i de enkelte søer langs udlagte transekter.

Billedbehandling af satellitdata

Ved hjælp af de bearbejdede vandprøver er det muligt at kalibrere reflektansen målt fra satel-

litten til en absolut klorofylværdi. Input hertil er en analyse af informationsmængden ved brug af forskellige forhold mellem forskellige bånd som beskrevet i afsnit 2.3: Empirisk tilgang – forhold mellem forskellige bånd”. De ubehandlede satellitdata blev vha. billedbehandlingsprogrammerne ENVI 4.9 og IDRISI TAIGA processeret til brugbare input i reflektansanalysen. Dette involverer en række processtrin, der overordnet omhandler:



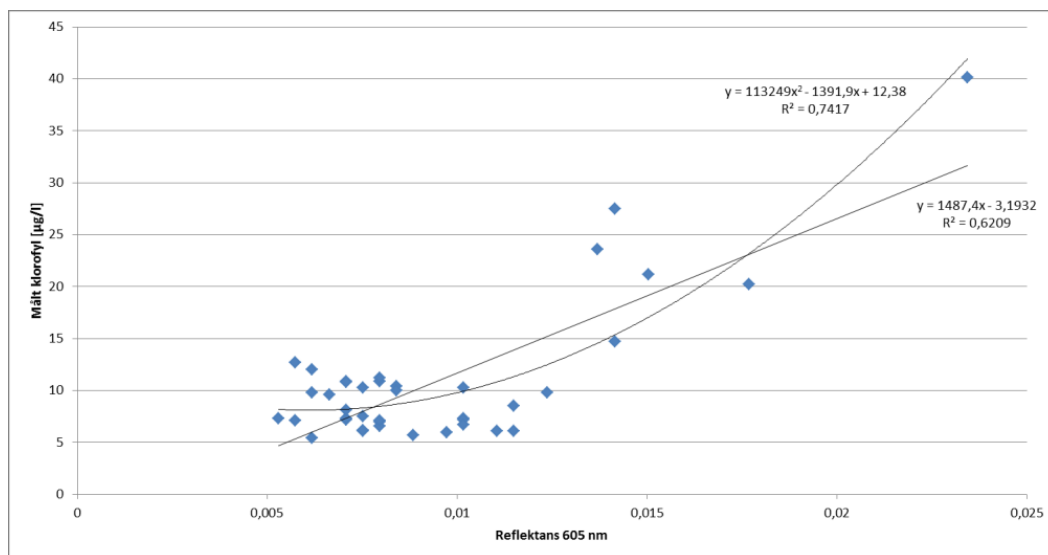
Figur 7 Histogram over de målte klorofylkoncentrationer foretaget under de to målekampagner.

- Georeferering af data. Den absolutte geokode på billederne blev optimeret vha. en række nøjagtige fikspunkter.
- Kalibrering af data. De 'rå' billeddata konverteres til radians vha. aktuelle kalibreringskoefficienter.

- Atmosfærisk korrektion samt beregning af reflektans. Atmosfærens effekt på det registrerede signal minimeres, så billederne viser den aktuelle reflektans ved overfladen.

De to softwarepakker indeholder en række forskellige tilgange, der varierer i kompleksitet og behov for input. Det er tidligere bemærket, at atmosfærekorrektion er et centralt element i bestemmelsen af parametre omkring vandkvalitet. I analysen blev en række af de simple metoder testet og forskellen mellem de to scener i hvert 'billedpar' minimeret ved at normalisere dem i forhold til hinanden efter atmosfærekorrektion. De simple metoder bygger enten på meget simplistiske forhold, hvor der kun tages højde for solens aktuelle placering i forhold til jorden eller metode, hvor standard atmosfæremodeller (svarende til den 'typiske situation for en given lokalitet for et givent tidspunkt) bruges til at korrigere for atmosfærens effekt.

En mere detaljeret atmosfærekorrektion ved brug af modellerede samt aktuelle atmosfæredata for en enkelt scene blev testet, uden at det gav mærkbart effekt på resultatet. I forhold til operationelt brug i en evt. monitoringsfase vil det dog være nødvendigt med en mere detaljeret tilgang til atmosfærekorrektionen f.eks. med inddragelse af information om aktuelle atmosfæreforhold, så en kalibrering kan bruges uafhængigt af forholdet mellem enkelte scener.



Figur 8 Sammenhæng mellem beregnet reflektans ved 605 nm (14. april) og målte klorofylkoncentrationer (15. april).

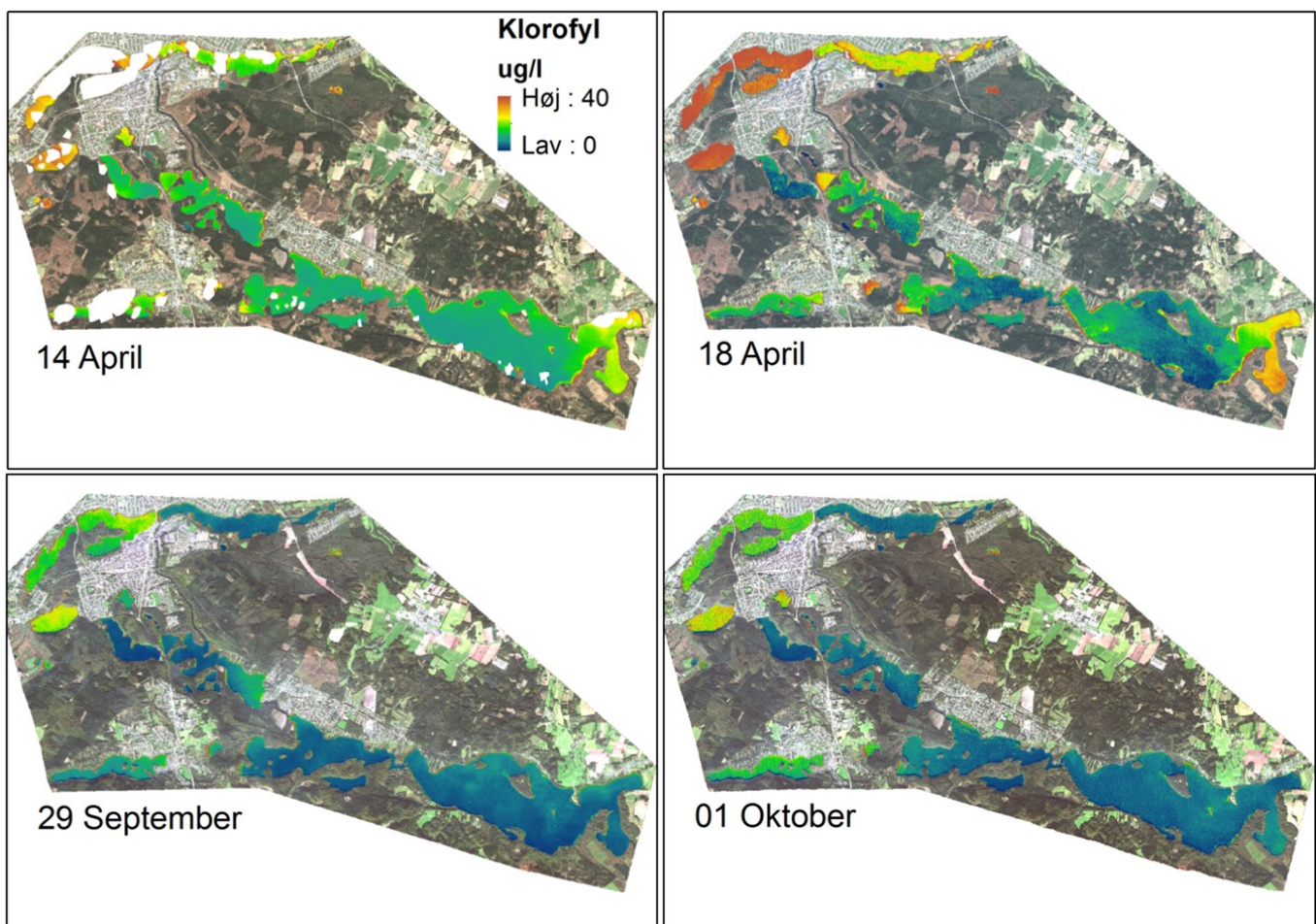
Den empiriske tilgang er som tidligere beskrevet benyttet i mange sammenhænge tidligere. Der er således en række tilgange beskrevet i litteraturen, der kan danne basis for en test af mulighederne vha. WorldView-2. I databehandlingen har vi undersøgt forskellige variationer af 'ratio-tilgangen' (Gordon *et al.* 1983, O'Reilly *et al.*, 2000, Stumpf *et al.*, 2003, Kovalevskaya *et al.*, 2010).

4.2 Resultater

For at undersøge informationsmængden i både de enkelte bånd samt i de forskellige 'ratio-metoder', der er beskrevet i litteraturen, blev der udført en multipel regressionsanalyse. Analysen viste, at der var størst sammenhæng mellem de målte klorofylkoncentrationer og reflektansen i det gule bånd på WorldView-2 for alle 4 billeder (området omkring 585 – 625 nm med center i 605 nm). De forskellige ratiotilgangen gav alle dårligere relation med de målte koncentrationer. Det skal bemærkes at det passer fint rent teore-

tisk, at det netop er området omkring 605 nm der bruges til at estimere koncentrationerne hvilket illustreres på Figur 2 (s. 9). Her er vist en 'typisk' signatur for klorofylholdigt vand (øverst) samt forskellige målte spektrale signaturer for klorofylholdigt vand med varierende mængde suspenderet materiale. Her ses tydeligt den markante reflektanstop i området omkring 580 – 600 nm. At det gule bånd bidrager kraftigere til forklaringsgraden end det grønne bånd tyder endvidere på, at søerne er påvirket af både klorofyl samt varierende mængde suspenderet materiale. Dette skulle teoretisk pege mod bedre forklaringsgrad ved hjælp af ratio-tilgangene. En grund til at dette ikke er tilfælde, kunne skyldes at søernes optiske egenskaber i højere grad påvirkes af f.eks. organisk materiale også, men flere data er nødvendige for at kunne konkludere på dette.

Den etablerede sammenhæng mellem satellit-reflektans for billedet fra d. 14. april og de



Figur 9 Beregnede klorofylkoncentrationer for søerne i søhøjlandet omkring Silkeborg baseret på WorldView-2 billeder i 2 meters opløsning. De fire figurer er vist med den samme farveskala. De hvide områder på billedet fra den 14. april er skyer, der er blevet masket væk. De samhörrende vandprøver til klorofyl a bestemmelse er indsamlet d. 15. april og d. 30. september.

målte koncentrationer fra målekampagnen d. 15. april er vist i Figur 8. Det ses, at der er begrænset sensitivitet ved meget lave reflektanser, hvilket kan skyldes usikkerheder i f.eks. satellitbilledets kalibrering, atmosfære korrektionen samt det faktum, at der er ca. 24 timer mellem satellitbilledet og målekampagnen. I forhold til at vurdere høj eutrofieringsgrad er tendensen imidlertid meget tydelig og perspektivrig i forhold til monitorering af f.eks. vandblomst i relation til Vandrammedirektivet.

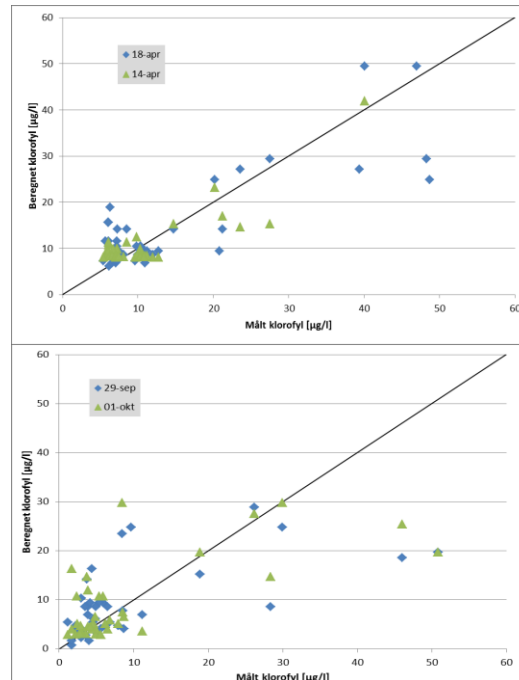
Beregnete klorofylværdier

Ud fra den fundne relation mellem målte klorofylværdier og de beregnede reflektanser blev WorldView-2 billederne omsat til klorofylværdier. På Figur 9 ses de beregnede klorofylkort for søhøjlandets søer i 2 meters opløsning.

Optagelserne viser, at de næringsrige søer Ørn Sø, Lyngsø og Silkeborg Langsø i billedernes øverste del, som forventet har de højeste klorofylkoncentrationer, hvorimod eksempelvis Almind Sø og Slåen Sø (for placering se Figur 3 s. 20) som nogle af de reneste søer i Danmark har lave klorofylkoncentrationer omkring 10 µg/l eller mindre. De store søer Julsø, Borre Sø og Brassø, som gennemløbes af Gudenåens relativt næringsrige vand, havde i 2011 forholdsvis lave klorofylkoncentrationer på 10 – 20 µg/l i modsætning til få år siden, hvor indholdet af klorofyl a var langt højere. Indvandringen af vandremusling i store mængder sørger nu for, at vandet filtreres i sådan grad, at der er væsentligt lavere klorofyl a koncentrationer end forventet ud fra næringsstofindholdet.

På Figur 10 ses resultatet af en direkte sammenligning af de målte og beregnede klorofylværdier. Der er en relativ god overensstemmelse mellem målt og beregnet klorofylbestemmelse (udtrykt ved en R²-værdi på henholdsvis 0,74 og 0,69) for april billederne. For september/oktober aktiviteterne er forklaringsgraden noget svagere (R² på 0,48 og 0,40), men tendensen dog stadig tydelig. Tager man højde for de usikkerheder, der er knyttet til billedbehandlingen, samt at der ikke er direkte sammenfald mellem de målte værdier og satellitdata (data er optaget før og efter måledagen) er de opnåede resultater dog ganske opmuntrende. Specifikt for september/oktober billederne ser det ud som om, at der er en ganske tynd dis henover billedet, der er med til at van-

skelligøre klorofylbestemmelsen. De absolutte værdier ligger dog stadigvæk inden for det forventede, og den rumlige variation viser tydeligt de indbyrdes forskelle både mellem søerne indbyrdes samt indenfor den enkelte sø.



Figur 10 Sammenhæng mellem målte og beregnede klorofylværdier for de fire WorldView-2 billeder.

Rumlig variation

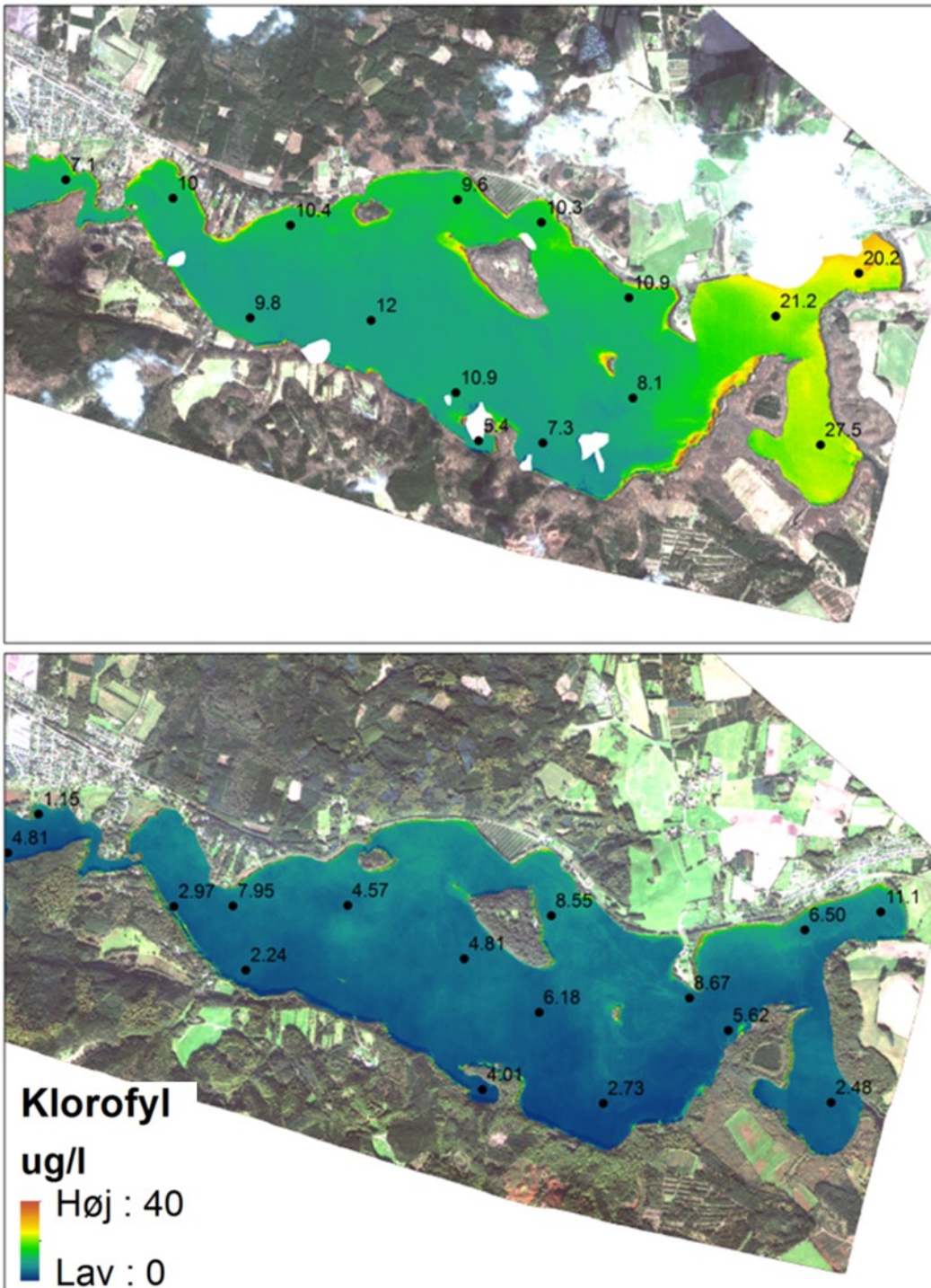
Trods rolige vindforhold ses en betydelig variation i klorofylkoncentrationen i de satellitbaserede klorofylkort (Figur 9) i perioden fra d. 14. til d.18. april 2011, hvorimod forholdene på eftersommerens to optagelsesdage ikke varierede i tilsvarende grad. Derudover er der også relativt stor variation i klorofylindhold imellem de enkelte søer samt en stor rumlig variation i den enkelte sø - specielt for de lidt større søer. Eftersom klorofyl a bestemmelsen ved traditionel overvågning foretages på én lokalitet i hver sø, giver billederne således betydelig ekstra information omkring dynamikken i de enkelte søer.

Under målekampagnen d. 15. april blev der i Julsø målt 14 forskellige steder. Værdierne i de 14 prøver varierer mellem 5,4 og 27,5 µg/l. Denne variation i klorofylkoncentration dokumenteres yderligere gennem satellitoptagelsen fra d. 14. april, hvor det er meget tydeligt, at der er en betydelig rumlig variation i søen,

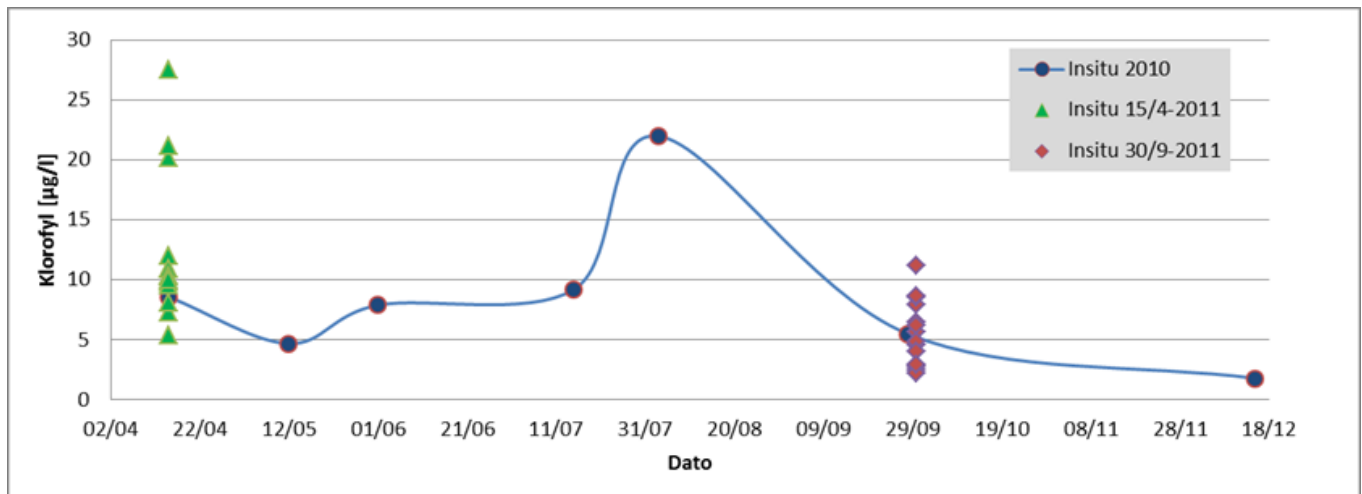
der ikke fanges i den traditionelle overvågning (Figur 11).

For yderligere at illustrere den ekstra information omkring den rumlige variation i de enkelte søer, som det er muligt at udlede fra satellitdata, er der i Figur 12 vist et plot af de målte klorofylværdier fra monitoringsprogrammet i 2010 for Julsø

foretaget ca. midt i søen. Kurven viser et forventet forløb med relativt lave koncentrationer i klarvandsperioden sen-forår/tidlig-sommer og en opblomstring henover sommeren. På figuren er målingerne fra de to målekampanjer for Julsø tilføjet. Der ses en betydelig rumlig variation, der ikke fanges ved den nuværende monitoringsmetode. Dette er også rele-



Figur 11 Udsnit over Julsø af de beregnede satellitbaserede klorofylkort for 14. april (øverst) og 29. september (nederst). Punkterne angiver, hvor der er lavet traditionel klorofylmåling samt den målte værdi.



Figur 12 Måleværdier fra monitoringsprogrammet fra Julsø i 2010 (blå punkter plus kurve). Værdierne for de to målekampagner i 2011 fra april og september er plottet for at illustrere den naturlige rumlige variation i fordelingen af klorofyl i søen, der ikke fanges i det traditionelle monitoringsprogram.

vant i forhold til monitoring af vandblomst, hvor en algeopblomstring i en del af søen ikke nødvendigvis dækkes gennem den nuværende målemetode.

4.3 Konklusion

Denne test blev udført i løbet af sommerperioden 2011, der var den vådeste (og dermed og mest skyede) i mands minde, hvilket gav en række udfordringer i forhold til at få optaget de ønskede billeder. På trods af disse udfordringer lykkedes det at få optaget 4 velegnede billeder samt foretage to målekampagner umiddelbart omkring optagetidspunkterne.

Resultaterne viser gode muligheder for at anvende de højopløselige satellitbilleder til monitoring af klorofyl i danske søer. Der er en relativ god overensstemmelse mellem målt og beregnet klorofylbestemmelse for april billederne (udtrykt ved en R^2 -værdi på henholdsvis 0,74 og 0,69). For september/oktober aktiviteterne er forklaringsgraden noget svagere (R^2 på 0,48 og 0,40), men tendensen dog stadig tydelig.

Tager man højde for de usikkerheder, der er knyttet til billedbehandlingen samt at der ikke er direkte sammenfald mellem de målte værdier og satellitdata (data er optaget før og efter måledagen) er de opnåede resultater omend særdeles opmuntrende.

Resultaterne viser endvidere tydeligt fordelene ved at bruge satellitmålinger, hvor det er muligt at estimere klorofyl a for hver pixel i et billede på hyppig basis. Der måles altså på en flade frem for

blot punktbasert som i traditionel prøvetagning. Samtidig er det nemt at måle variationer ved at sammenligne billeder fra forskellige tidspunkter. På den måde vil det være muligt at kortlægge om en parameter udviser en stigende eller faldende trend ved at koble analyserne til historiske data. I forhold til monitoring af vandblomst er dette yderst relevant, da man således vurderer på søernes totale areal og ikke blot ud fra et enkelt målt punkt.

I forhold til den almindelige overvågning af søer er en detaljeringsgrad på 2 meter som brugt her sjældent nødvendig. Her vil data i en lavere opløsning (f.eks. 10 – 30 meter) dække behovet. Med de satellitter og datatyper, der er på vej, vil en metodik, som demonstreret her kunne udrulles til at dække større områder til en betydeligt lavere pris end en WorldView-2 baseret løsning, hvor data købes kommercielt.

5 Satellitovervågning af søer – mellemopløselige billeder (Landsat)

Der er i udlandet flere eksempler på brug af mellemopløselige satellitdata til mere systematisk monitorering af vandkvalitet i søer (se afsnit 2.4). I forbindelse med anskaffelse af input data til modelleringen af Furesøen blev en serie Landsat billeder i 30 meters opløsning analyseret. I det følgende beskrives fremgangsmåden og resultatet.

5.1 Metode

Datatilgængelighed

For at undersøge det potentielle datagrundlag for en historisk vurdering af vandkvalitet i de danske søer blev der lavet en datasøgning i Landsat-arkiverne. I Tabel 2 er samlet en opgørelse over tilgængelige Landsat scener af brugbar kvalitet (subjektiv vurdering ud fra et mindre quicklook) dækkende området med de udvalgte søer omkring Silkeborg.

Tabel 2 Opgørelse over tilgængelige skyfri scener for området omkring søerne i Silkeborg området.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
1982										1			1
1983													0
1984					1		1	1					3
1985								1					1
1986						1							1
1987				2		1	1					1	5
1988					1								1
1989					1			1					2
1990*						1							1
1999*								1					1
2000				2	2				1			1	6
2001						1	2	1					4
2002	1	2		1		2	1			1			8
2003		1	1	1	1			2	1	4			11
2004		1		2		1					1		5
2005				2	1	1			1				5
2006						2	4		2				8
2007			1	1	1	1					1		5
2008			1			1	2						4
2009					1	2	1	1	1	1			7
2010				1		3	1	1		2			8
2011				2	1					2			5

* I perioden fra 1990 til 1999 blev data optaget og distribueret af lokale nedtagestationer og de europæisk nedtagne scener var ved datasøgningens udførelse kun tilgængelige på kommercielle vilkår (de er i dag frit tilgængelige gennem ESA) og derfor udeladt i tabellen.

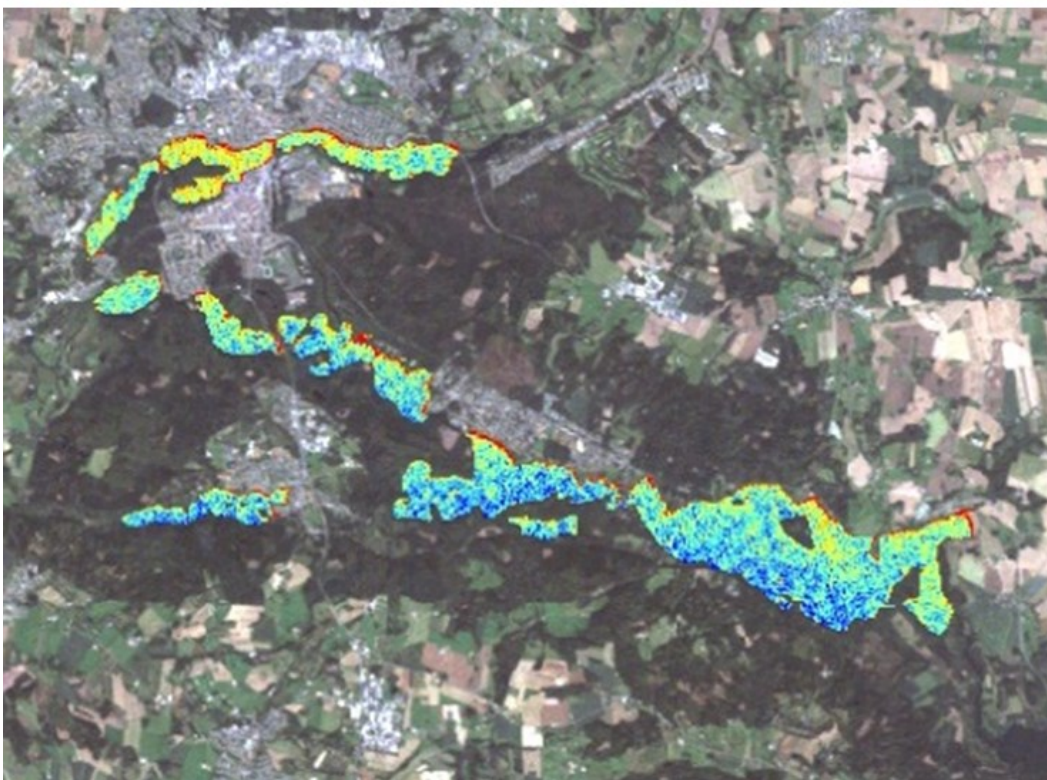
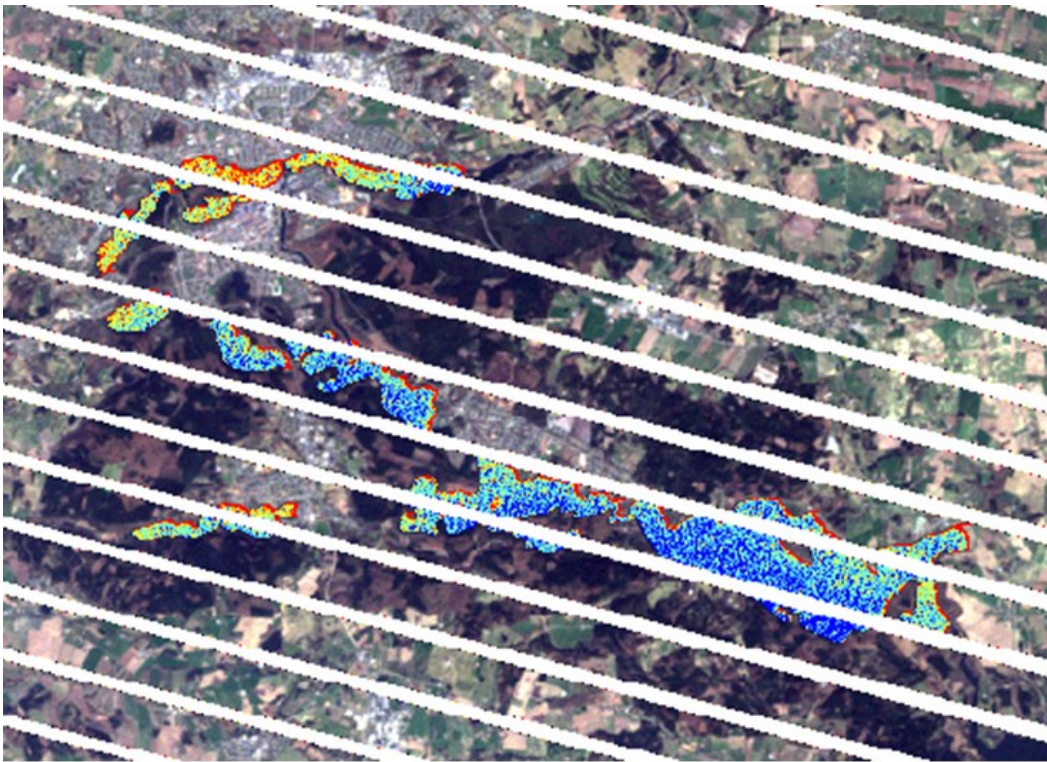
Opgørelsen er opgjort månedsvis og inkluderer data fra flere af Landsat satellitterne (Landsat systemet består af flere satellitter opsendt siden 1972). I opgørelsen er medtaget alle tilgængelige scener uden at skelne hvilke sensorer, der er mest optimale - i praksis er data bedre desto bedre sensoren er. Landsat 7 er således at foretrække frem for Landsat 5 osv. Undtagelse er dog, at netop Landsat 7 fik et problem i 2003, der medfører at data siden er systematisk stribede. Fra 2003 og frem kan man derfor overveje om Landsat 5 er at foretrække fremfor Landsat 7.

Som det fremgår af Tabel 2 er der på trods af at Landsat har en temporal opløsning på 16 dage en rimelig dækning henover sæsonen (bemærk at både Landsat 5 og Landsat 7 er medtaget i opgørelsen).

Billedbehandling af Landsat data

Adskillige Landsat scener blev downloaded fra arkiverne over områderne omkring Silkeborg samt omkring Furesøen. De ubehandlede Landsat scener blev vha. billedbehandlingsprogrammerne ENVI 4.9 processeret til brugbare input i analysen via en række processe-ringstrin, der overordnet omhandler:

- Georeferering af data. Den absolutte geocode på billederne blev optimeret vha. en række nøjagtige fikspunkter.



Figur 13 Kalibreret radiansbillede baseret på Landsat data over søerne i søhøjlandet omkring Silkeborg. Øverst: Landsat 7 fra den 19. april 2011. Nederst Landsat 5 fra d. 20. august 2009.

- Kalibrering af data. De 'rå' billeddata konverteres til radians vha. aktuelle kalibreringskoefficienter.
- Atmosfærisk korrektion samt beregning af reflektans. Atmosfærens effekt på det regi-

strerede signal minimeres, så billederne viser den aktuelle reflektans ved overfladen.

Som tidligere omtalt er reflektans-estimering over vandoverflader meget følsomt, da vandet

har en lav reflektans i alle de tilgængelige bånd. I kraft af at Landsat data optages som 8-bit data (dvs. den fulde reflektans mellem 0 – 1 skaleres mellem 256 værdier) betyder det f.eks., at Landsat data har begrænset følsomhed i forhold til f.eks. WorldView-2 data.

På Figur 13 er vist to eksempler på georefererede og kalibrerede radiansbilleder over søerne omkring Silkeborg. Det øverste billede er optaget d. 19. april 2011 – dvs. dagen efter det sidste WorldView-2 billede blev optaget. Det nederste er optaget d. 20. august 2009. Striberne i det øverste billede skyldes en fejl på Landsat 7 satellittens skanningsmotor der opstod i 2003; på trods af striberne er det stadig muligt at danne sig et overordnet billede af signalet i de enkelte søer. Begge billeder fremstår 'grynet' i farverne i søerne, hvilket skyldes en kombination af en opløsning på 30 x 30 m samt den førnævnte begrænsning i følsomhed i data.

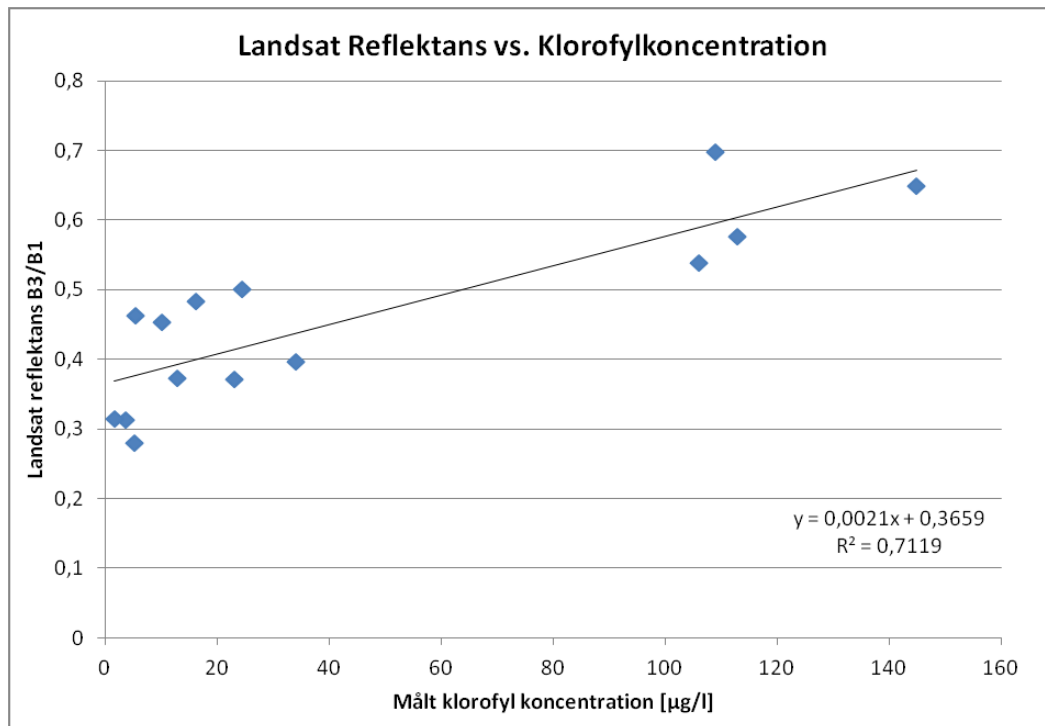
De to billeder er vist med en relativ farveskala baseret på beregnet radians. De relative forskelle mellem de enkelte søer stemmer overens med det forventede. For billedet fra den 19. april 2011 er der således også god overensstemmelse med fordelingen af klorofyl fundet på WorldView-2 billedet fra d. 18. april (se Figur 9 s. 25).

For at vurdere muligheden for absolut klorofylbestemmelse ved hjælp af Landsat data blev en serie på 22 scener dækkende Sjælland downloaded og konverteret til reflektans. Selve reflektansberegningen blev udført ved brug af FLAASH modulet (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) i ENVI billedbehandlingsprogrammet.

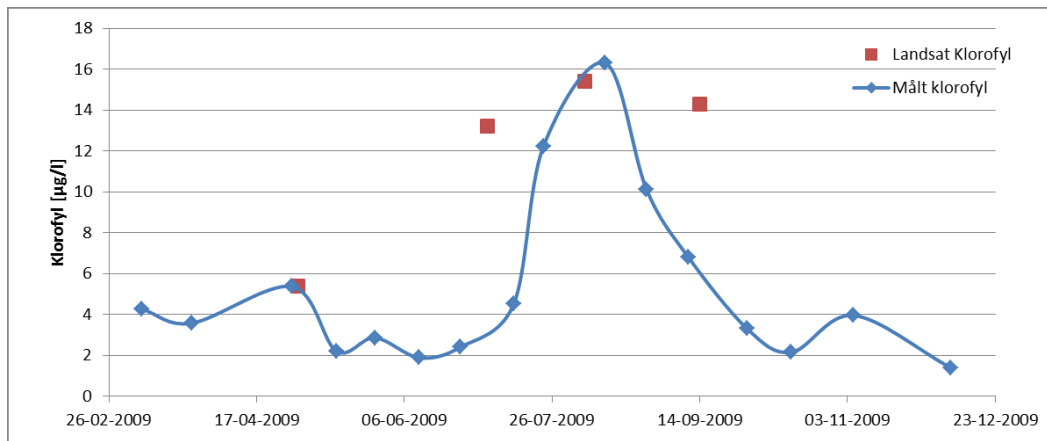
5.2 Resultater

Måledata er hentet fra det nationale overvågningsprogram for søer (NOVANA) og brugt til at identificere match ups mellem satellitdata og måleværdier. Definitionen på et match up blev defineret forholdsvist løst til at være indenfor +/- 3 dage mellem måling og satellitoptagelse. Der blev fundet i alt 14 tilfælde af skyfri Landsat data med tilhørende målt klorofylkoncentration.

Sammenhængen mellem Landsat reflektansen og målt klorofylkoncentration blev undersøgt ved en regressionsanalyse tilsvarende metoden brugt til behandling af WorldView-2 data (se afsnit 4). Regressionsanalysen viste at bedste forklaringsgrad blev fundet ved at benytte forholdet mellem bånd 3 og bånd 1 (rød/blå) – relationen er vist i Figur 14. De 14 fundne



Figur 14 Relation mellem Landsat reflektansbaseret forhold og målt klorofylværdi for en række større søer på Sjælland. Data dækker perioden 2007 - 2011.



Figur 15 Klorofylkoncentration i Furesøen. Den blå farve markerer data fra monitoringsprogrammet opsamlet henover 2009 sæsonen, mens de fire røde punkter er de beregnede Landsat koncentrationer. Landsat værdierne er opgjort som gennemsnitsværdier for hele søen eksklusiv skyede områder samt områder med urealistisk høje værdier langs kanten af søen.

punkter var placeret i følgende søer: Furesø (7), Arresø (4), Haraldsted sø (1), Tuelsø (1) og Gurre sø (1).

Den fundne sammenhæng mellem Landsat reflektansen og klorofylkoncentration blev efterfølgende brugt til at beregne absolutte klorofylværdier for Landsat scener med skyfri eller delvist skyfri forhold over Furesøen med henblik på at integrere de satellitbaserede klorofylkort med DHIs økologiske model for Furesøen. Modellen for Furesøen er opstillet for år 2009, og for det år findes der 1 skyfri scene fra maj og 3 med mindre skyer fra juli, august og september. Scenerne fremstår med et grynet udtryk, som skyldes den føromtalt lave sensitivitet i Landsat data grundet den 8-bit begrænsningen i data (Figur 26 s. 45). På trods af begrænsningerne med 8-bit data er resultatet for de 4 billeder henover 2009 sæsonen konsistente med de målte koncentrationer fra monitoringsprogrammet (Figur 15). Der er nogen afvigelse for juli og september værdierne men overordnet set ser størrelsesordenen på niveauet i sommerblomsten ud til at være fint repræsenteret.

I Figur 15 ville det naturligvis være ønskeligt med flere satellitbaserede punkter til vurdering af klorofylkoncentrationens forløb henover sommeren. Landsat satellittens overflyvningsfrekvens på 16 dage kombineret med det danske vejr i sommerperioden betyder imidlertid, at der for Furesøen i 2009 kun var fire brugbare passager – med inddragelse af både Landsat 5 og Landsat 7 data. Til sammenligning omfatter den nationale søovervågning seks månedlige prøvetagninger gen-

nem sommerperioden i udvalgte søer hvert 6. år. Selv ganske få målinger vil således bidrage med vigtig yderligere information om søernes økologiske tilstand både i de søer som er omfattet af overvågningsprogrammet men specielt de søer, hvori der ikke foretages anden måling.

I 2012 er Landsat 5 satellitten taget ud af drift grundet tekniske problemer og Landsat 7 er langt over den planlagte levetid. Efterfølgeren i Landsat programmet (Landsat Data Continuity Mission - LDCM) er imidlertid på vej (planlagt til opsendelse primo 2013) og med LDCM vil begrænsningen omkring følsomhed være løst, da data fra denne sensor vil være i 12-bit – dvs. 16 gange så følsomme som de nuværende Landsat data i 8-bit.

Den temporale opløsning vil i den nærmeste fremtid også blive kraftigt forbedret med opsendelsen af den Europæiske Sentinel-2. Der er i øjeblik lidt tvivl om opsendelsestidspunktet for den første af de to Sentinel-2 satellitter, men det forventes at blive primo-2014. Når begge Sentinel-2 satellitter er i orbit vil data i 10-20 m. opløsning således være tilgængelig over Danmark hver anden/tredje dag.

5.3 Konklusion

Aktiviteterne under RASK projektet omkring brug af Landsat data til monitoring af klorofyl i danske søer har vist, at der er stort perspektiv i inddragelsen af satellitdata i denne opløsning (10 – 30 meter). Baseret på resultaterne fra de

største søer på Sjælland er det blevet påvist, at det er muligt at udtrække information omkring vandkvalitet fra Landsat data. Furesø eksemplet har desuden illustreret, at det eksempelvis er muligt at udtrække information omkring niveauet af fytoplanktonets forårs- og sensommeropblomstring på trods af begrænsningen omkring datafølsomheden i de brugte data og skyforhold kontra lav overflyvningsfrekvens.

Med de nye data der er på vej fra NASA (Landsat Data Continuity Mission) og ESA (Sentinel-2) vil det indenfor de kommende år blive muligt at kortlægge de danske søer med en væsentlig højere nøjagtighed og frekvens. Det er vores forventning af Sentinel-2 især kommer til at spille en afgørende rolle i monitoreringen af den danske natur i de kommende år fremover.

Værktøjer til håndtering, processering og fortolkning af data er imidlertid nødvendige for at blive i stand til at udnytte teknologien på en systematisk og omkostningseffektiv måde.

6 Satellitovervågning af søer – lavtopløselige billeder (MERIS FR)

Data fra MERIS sensoren på den Europæiske ENVISAT satellit har de seneste år vist sig som et helt unikt værktøj til monitorering af de marine områder. Med en kombination af 300 meter opløsning på data og tæt på daglig overflyvning er MERIS data endvidere yderst relevante i forhold til monitorering af de største søer i Danmark.

Der er de seneste år udviklet flere metoder til behandling af MERIS data med specifik fokus på søer, herunder især det ESA finansierede MERIS LAKE projekt, hvor søer i Finland og Spanien samt Bodensee i Tyskland, Østrig, Schweiz indgik i træningen af det neurale netværk, der danner basis i dataprocesseringen samt til validering af metoden. Valideringsøvelsen fra projektet viste, at netværket er i stand til at levere fornuftige resultater over en række forskellige betingelser (Koponen *et al.*, 2008, Ruiz-Verdú *et al.* 2008). Under RASK projektet har vi undersøgt mulighederne for brug af MERIS til monitorering af vandkvalitet i de større danske søer.

6.1 Metode

Neuralt netværk

I forbindelse med MERIS LAKES projektet blev der udviklet to sø-specifikke neurale netværk dækkende henholdsvis boreale forhold og eutrofiske forhold. Derudover findes der to hovedmetoder til brug for de marine områder. De fire metoder er baseret på et neuralt netværk, der er

trænet med tilgængelige in-situ værdier – de fire metoder har derfor også deres specifikke gyldighedsområde, både geografisk og økologisk set (Tabel 3). Eftersom den boreale metode ikke forventes at gælde for danske forhold (Boreale søer er brunvandede og derfor er boreale netværk meget influeret af CDOM), har fokus været på at teste metoden der er tilpasset eutrofe forhold.

Anvendt data

MERIS data findes tilgængeligt i to rumlige opløsninger: reduceret opløsning (RR) på 1200 meter og fuld opløsning (FR) på 300 meter. Adgang til MERIS data sker gennem ESA hvor man ansøger om adgang til et specifikt formål. Under RASK projektet har vi benyttet det interne arkiv af MERIS FR data, der findes hos GRAS. Her er data dækkende Danmark i perioden 2009 – 2010 blevet processeret og analyseret. Totalt er næsten 800 scener blevet processeret svarende til ca. 350 GB data.

Processering af data

Selve dataprocesseringen er foregået på en højtydende dataserver hos GRAS hvor hele datasættet for perioden kan processeres på ca. fem dage. Processeringen af en enkelt FR scene ville på en 'high-end' 64-bit PC med store mængder RAM (minimum 8 GB) tage minimum en time. Selve processeringen består af en række trin:

Tabel 3 Gyldighedsområde for de fire mest brugte tilgængelige neurale netværk baserede metoder til estimering af vandkvalitetsrelaterede parametre baseret på MERIS data (Pedrero, 2009). Tallene angiver det spænd i in-situ værdier der er brugt til træningen af de neurale netværk, og dermed hvilket gyldighedsområde man kan forvente ved metoderne.

Concentration	Coastal	Boreal	Eutrophic	Water
Chl a [mg/m^3]	0.016 - 43.18	0.5 - 50	1 - 120	0.05 - 50.0
TSM [g/m^3]	0.0086 - 51.6	0.1 - 20	0.005 - 5	0.05 - 50.0
CDOM [m^{-1}]	0.005 - 5	0.25 - 10	0.1 - 3.0	0.005 - 1.0

- Radiometry Correction. Radiometrisk korrektion af data der blandt andet indeholder nyeste kalibreringsmetode, 'smile-effect' korrektion samt 'equalisation' (fjernelse af striber i data samt korrektion for systematisk variation mellem forskellige områder i de enkelte scener).
- ICOL korrektion. Overgangszonen mellem land/vand er ofte influeret af "stray light" – dvs. lys der egentlig reflekteres fra landområder men registreres som en del af vandsignalet. Dette giver nogle problemer for atmosfærekorrektionen (atmosfære effekten overestimeres) og dermed også for f.eks. de beregnede klorofylværdier. ICOL korrektionen er beregnet til at fjerne denne effekt.
- MERIS LAKE processor (Eutrophic). Den Neuralt netværk baserede metode der konverterer radiansværdierne i MERIS data om til fysiske parametre – f.eks. klorofylkoncentrationer. Indeholder netværk til atmosfære korrektionen samt til estimering af vandets optiske egenskaber. Ud fra en separering af de enkelte absorptions, reflektans of spredningskilder i vandet kan de fysiske parametre estimeres.
- Reprojection og formatkonvertering. Sidste led i processeringen er en reprojektion af data til et defineret koordinatsystem (f.eks. UTM, WGS84) samt eksport til et rater format der kan læses i f.eks. et GIS.

Af de nævnte processer er det især ICOL korrektionen samt de neurale netværk, der er relativt tunge og tidskrævende regneprocesser.

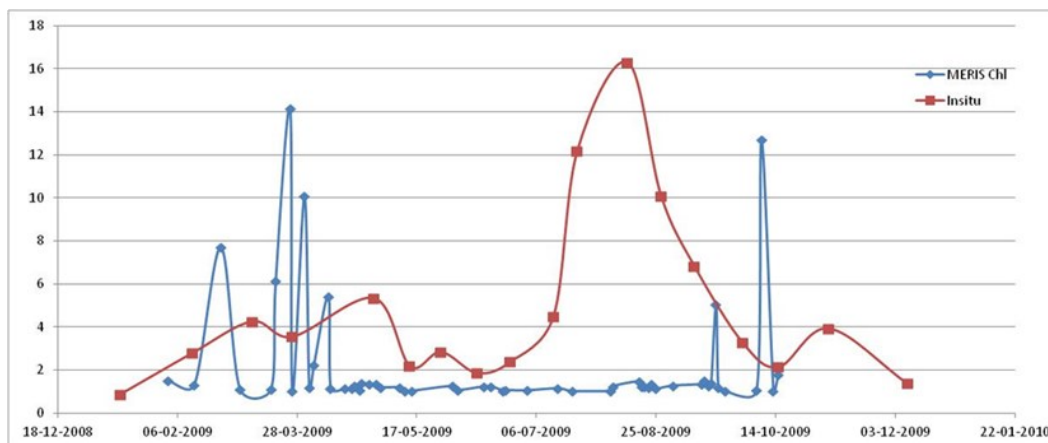
6.2 Resultater

I forhold til vurdering af mulig anvendelse af MERIS data til monitoring af klorofyl i søerne i Danmark var fokus på Furesø og Ravn Sø, hvor henholdsvis DHI og Århus Universitet har opsatte økologisk modeller. Formålet var blandt andet at undersøge, hvordan de to forskellige datakilder kan supplere hinanden og give yderligere information om sæsondynamikken (Afsnit 7). Især for Furesøen var en god klorofylbestemmelse forventet grundet søens størrelse.

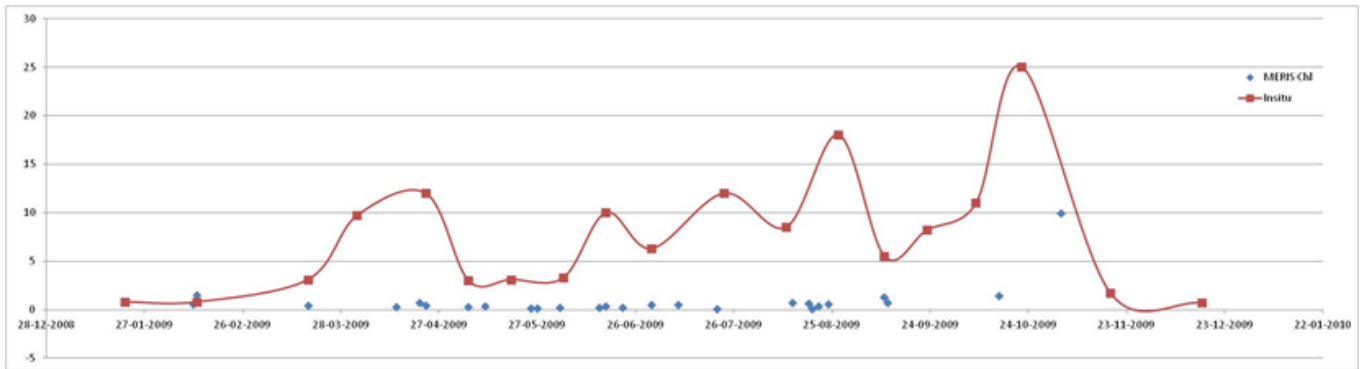
I forbindelse med de neurale netværk bruges en række 'hjelpe-lag' i data; herunder klassifikation af land/vand og identifikation af problematiske områder (f.eks. atmosfærekorrektion udenfor det forventede resultat, reflektanser udenfor forventet niveau mm.). Disse lag kan bruges til at vurdere kvaliteten af data samt til at optimere processeringen af data. I denne analyse - kvalitetstesten - blev alle 'suspekter' områder ekskluderet fra data for at sikre bedst mulig vurdering af potentialet i data.

Analyse af klorofyl data

For begge søer blev de beregnede klorofylværdier for alle scener, der bestod kvalitetstesten, udtrukket. En sammenligning med målte klorofylkoncentrationer viste imidlertid at de MERIS beregnede koncentrationer stemte meget dårligt overens med de målte. På Figur 16 og Figur 17 er data for begge søer for sæsonen 2009 vist. For Furesøen (Figur 16) ses en del spredte toppe i starten og slutningen af sæsonen, mens der henover hele sommer peri-



Figur 16 Sammenligning mellem MERIS beregnede (blå) og målte (rød) klorofylkoncentrationer for 2009 sæsonen for Furesøen. Enheden på y-aksen er mg/m³.



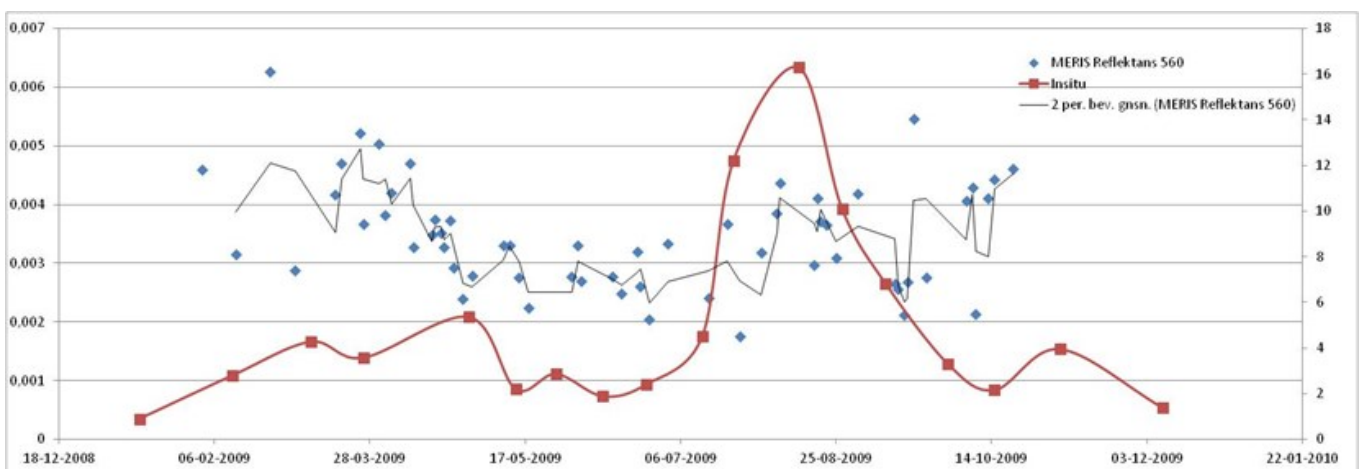
Figur 17 Sammenligning mellem MERIS beregnede (blå) og målte (rød) klorofylkoncentrationer for 2009 sæsonen for Ravn Sø. Enheden på y-aksen er mg/m^3 .

oden er en konstant lav koncentration. For Ravn Sø (Figur 17) er forløbet tilsvarende dårligt med meget lave koncentrationer henover sæsonen og ingen sæsonvariation at spore.

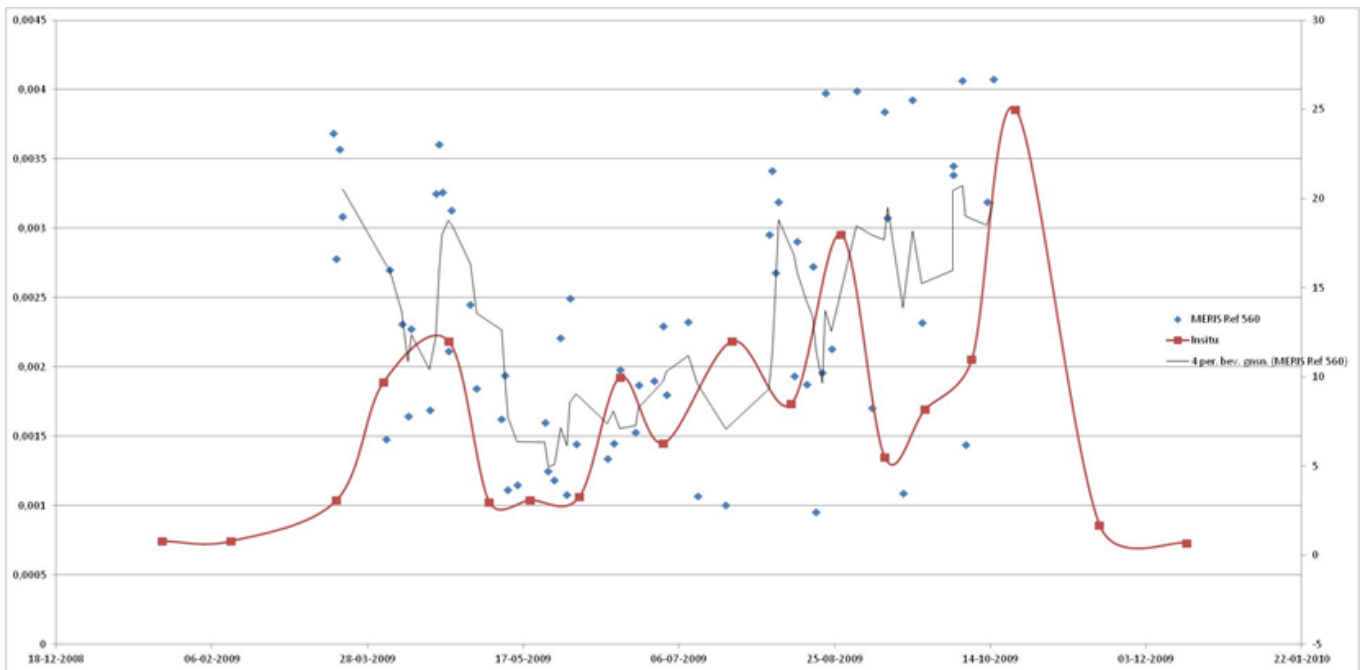
Baseret på resultaterne fra eksempel MERIS LAKE projektet (Koponen *et al.*, 2008) var resultatet overraskende dårligt. For at identificere en evt. årsag til den manglende overensstemmelse, blev flere muligheder undersøgt. MERIS processeringen via de neurale netværk sker i to arbejdsgange. Den første del involverer atmosfærekorrektionen, der leverer input til estimeringen af vandets optiske egenskaber og herigennem afledte produkter som f.eks. klorofylkoncentration. For at undersøge om det evt. var i det sidste led, at årsagen til den manglende information skulle findes, blev de atmosfærekorrigerede reflektanser (fra første del af processeringen) undersøgt. Reflektanserne i de forskellige bånd blev plottet sammen med de målte klorofylværdier for først at undersøge, om det heller ikke i reflektanserne var muligt at finde en sæsonvariation samt

for at undersøge hvilket bånd, der evt. beskriver sæsonvariationen bedst.

Modsat klorofylværdierne kunne man for begge søer se en vis variation henover sæsonen i reflektanserne (Figur 18 og Figur 19). Umiddelbart er det også båndet omkring 560 nm (hvor der findes et absorptionsminimum i reflektanskurven for klorofyl) der gav størst udslag henover sæsonen. Signalet er ikke entydigt men peger i retning af, at det er i det sidste led af klorofylestimeringen årsagen til de manglende klorofylværdier skal findes. For at undersøge dette nærmere blev der lavet en statistisk analyse af reflektansdata over Ravn Sø for perioden 2009-2011, hvor de første to år blev anvendt til de statistiske analyser og 2011 som et uafhængigt datasæt til validering af de fundne sammenhænge (Afsnit 7.2).



Figur 18 Sammenligning mellem MERIS beregnede reflektanser ved 560 nm (blå) og målte klorofylkoncentrationer (rød) for 2009 sæsonen for Fure-søen. Den sorte linje angiver et løbende gennemsnit på reflektansværdierne.



Figur 19 Sammenligning mellem MERIS beregnede reflektanser ved 560 nm (blå) og målte klorofylkoncentrationer (rød) for 2009 sæsonen for Ravn Sø. Den sorte linje angiver et løbende gennemsnit på reflektansværdierne.

6.3 Konklusion

De i øjeblikket mest brugte og mest lovende metoder til bestemmelse af klorofyl ud fra MERIS data er blevet testet på Ravn Sø og Furesø baseret på MERIS FR data for perioden 2009 – 2010. Resultatet viste desværre, at det ikke er muligt at udtrække klorofylldata for de danske søer. Der var indikationer på et muligt sæsonsignal i reflektansværdierne fra MERIS FR filerne, men signalet er ikke entydigt og kræver yderligere analyse for en evt. empirisk relation kan be- eller afkræftes.

Efter kontakt med bl.a. udviklerne af softwaren bag processeringen og MERIS LAKES konsortiet blev konklusionen, at den mest sandsynlige årsag til at det ikke har været muligt at udtrække brugbar information for de danske søer primært er relateret til land/vand klassifikationen i processeringen - de danske søer er tilsyneladende for små i forhold til de i øjeblikket implementerede landmaske-filer i softwaren (personlig kommunikation, Koponen 2011). Dette stemmer også overens med at alle pixels i søerne er klassificeret som land-pixels i filernes kvalitetslag.

MERISdata anvendes som tidligere nævnt til estimering af klorofylniveauet i blandt andet finske søer og der er således ikke nogen grund til at antage, at en tilsvarende anvendelse i de største danske søer ikke kan finde sted, hvis processerings-softwaren tilrettes danske forhold.

Der sker da også en løbende udvikling af både metoderne (forbedret automatisk detektion af land/vand, bedre ICOL korrektion mm.) samt de brugte hjælpelag (som f.eks. mere detaljerede landmasker), og det vil naturligvis ud fra danske interesser være relevant, at det på et senere tidspunkt kan blive muligt at benytte MERIS FR data til klorofylestimering i danske søer. Gennem RASK projektet er problemet blevet identificeret, og udviklerne er nu blevet gjort opmærksomme på begrænsninger i den øjeblikkelige metode.

7 Modelintegration

7.1 Validering af økologiske modeller og dataassimilering

Udvikling og brug af økologiske modeller er en stadigt voksende disciplin indenfor forskning og forvaltning af vandkvalitet i søer. Modellerne opsættes typisk på baggrund af måledata fra en enkelt station fra centrum af søen, med måledata indsamlet i en frekvens på to uger, en måned eller længere. Videreudvikling, kalibrering og validering af sø-modellerne kan potentielt styrkes markant ved brug af satellitbaseret data i forhold til temperatur, suspenderet stof og fytoplanktonbiomasse. Satellitdata kan således bidrage til: 1) validering af modellernes forudsigelser af den horisontale fordeling af fytoplanktonbiomasse, samt 2) bidrage med valideringsdata i en højere tidslig opløsning (potentielt med daglig frekvens) i forhold til traditionel overvågning.

Eksisterende erfaringer med brug af satellitbaseret data i forbindelse med økologisk modellering er stadig begrænset og har især været fokuseret på marine områder. Indenfor de seneste fem år er der i litteraturen beskrevet enkelte eksempler på brug af satellitdata til opsætning og validering af modeller både indenfor det marine miljø (Alvarez *et al.* 2007; Spillman *et al.* 2007) og søer (Fragoso *et al.* 2008). Disse studier har alle fokuseret på valideringen af modellernes beskrivelse af den horisontale fordeling af temperatur og fytoplanktonbiomasse på enkelte dage i store områder. Potentialet for at bruge satellitdata til at genere valideringsdata i en højere tidslig opløsning er således endnu uudforsket.

På grund af datamangel samt begrænsede ressourcer er økologiske modeller på nuværende tidspunkt ikke anvendt i vandplansammenhæng i Danmark (Trolle og Søndergaard, 2010). Dog har både DHI og DMU (Århus Universitet) i en årrække arbejdet med økologiske modeller som et værktøj til at stille prognoser for udviklingen af vandkvaliteten særligt for marine områder, men også for en række søer (e.g., Trolle *et al.* 2008a,b; Krogsgaard Jensen og Closter, 2011). Dette arbejde har blandt andet været afhængigt af frekvensen af inputdata. Udvikling af algoritmer og

værktøjer til at omsætte højfrekvente satellitdata til klorofyl kan øge frekvensen af inputdata og derigennem forbedre mulighederne for en mere præcis kalibrering af de økologiske modeller og disses mulighed for at beskrive udviklingen i vandkvaliteten i danske søer. Dette projekt sigter derfor imod at undersøge muligheden for at udnytte den forøgede information om klorofylkoncentrationen, som satellitter potentielt kan generere. Der tages udgangspunkt i udvalgte søer, hhv. Furesøen og Ravn Sø, til test af økologiske modellers simuleringsegenskaber og til at vurdere, hvorvidt satellit data kan anvendes til videreudvikling af modellerne, således de bliver bedre prognoseværktøjer for udviklingen i vandkvalitet.

Andre erfaringer med at anvende satellitdata i økologiske modeller baserer sig på dataassimilering. Dataassimilering foregår i en analytisk cyklus, hvor observationerne af eksempelvis klorofyl læses ind i modellen som et mønster, der kombineres med modellens resultater. Med begyndelsesbetingelserne fra denne dataassimilering fremskrives herefter modellen i tid ved hjælp af prognosedata for de drivende meteorologiske kræfter, hvilket giver en prognose for udviklingen i klorofylkoncentration (Hansen *et al.*, 2008).

Opstilling af en økologisk model giver således i kombination med dataassimilering mulighed for at stille en mere præcis prognose for udviklingen af algeopblomstringer. Sådanne model- og dataassimileringsværktøjer anvendes i de marine områder omkring Danmark, hvor en økologisk model i kombination med dataassimilering varsler havbrug om opblomstring af giftige alger (<http://havbrug.algevarsling.dk>) og miljøcentre mere generelt om fytoplanktonbiomasser i danske farvande (<http://havudsigten.dk>).

Dataassimilering foregår i dag typisk ved at modellens klorofylkoncentration opdateres med værdier fra satellitdata og efterfølgende

opdateres de øvrige tilstandsvariable. Næste generation af assimileringsskemaer opdaterer udover tilstandsvariable også et udvalg af kalibreringskonstanter, som f.eks. fytoplanktonvækstrater. Sådanne assimileringsskemaer forventes at kunne medvirke til at kalibrere modellerne og generelt bidrage til en øget viden om det økologiske system og til mere præcise algeopblomstringsprognoser.

I dette projekt testes forskellige modelkoncepter, idet Århus Universitet koncentrerer sig om 1D-model for Ravn Sø og DHI om 3D-model for Furesø. De anvendte modeltyper er baseret på en beskrivelse af grundlæggende fysiske, kemiske og biologiske processer og elementer i søernes økosystem, og inkluderer elementer som temperatur, iltforhold, flere forskellige fraktioner af næringssalte, forskellige fytoplankton typer (f.eks. kiselalger, blågrønalger og furealger), forskellige dyreplankton typer (f.eks. dafnier og vandlopper), fisk osv. Modellerne bygger således på en lang række sammenhængende massebalancer, hvor interaktioner mellem de forskellige elementer i søernes økosystem beskrives via modellernes matematiske sammenhænge. De eksisterende modeller evalueres med satellitdata; dels undersøges simuleringsegenskaber i forhold til højfrekvente satellitbaserede estimater af klorofyl (for 1D model) og dels undersøges effekten af dataassimilering på modelresultater (for 3D model).

For at belyse en mulig anvendelse af forskellige søtyper, blev det besluttet at undersøge anvendeligheden af to typer satellitdata: MERIS data med en rumlig opløsning på 300 m og tidlig opløsning på en dag og Landsat data med en rummelig opløsning på 30 m og tidlig opløsning på 16 dage. MERIS data giver således mulighed for høj tidlig opløsning og Landsat data mulighed for høj horisontal opløsning.

Derimod er højt opløselige World View 2 billeder ikke anvendt i denne sammenhæng.

Analyserne har til formål at afdække potentialet for brug af disse to typer satellitdata til forbedring af modelopsætninger for danske ferskvandsmiljøer. Gennem analyserne ønskes det afklaret om:

1. Eksisterende satellitbilleder kan anvendes som supplement til traditionelle monitoringsdata i forbindelse med kalibrering og

validering af økologiske modeller for danske søer. Herunder at bidrage med data i en højere tidlig opløsning, samt med viden om horisontal fordeling af klorofyl, hvor vi nu typisk kun har punktmålinger fra et centralt sted i de enkelte søer.

2. Dataassimilering kan bidrage til stærkere prognoseværktøjer for klorofylkoncentration med hensyn til timing, varighed og størrelse af algeopblomstringer og med hensyn til eventuelle horisontale fordelingsmønstre.

7.2 Ravn sø – 1D modellering

Ravn Sø er en del af det midtjyske søhøjland og er beliggende i Skanderborg kommune, ca. 5 km øst for Ry (Figur 20). Ravn Sø har et overfladeareal på ca. 1,8 km², og er en af Danmarks dybeste søer med en maksimal dybde på 33 m. Da søen er meget dyb og beliggende i en vindbeskyttende tunneldal, dannes der hver sommer en temperaturlagdeling af vandmasserne, som afhængigt af vejret typisk varer 4-5 måneder. Siden 1989 har Ravn Sø indgået i det Nationale Program for Overvågning af Vandmiljøet. I NOVANA-programmet, som trådte i kraft fra 1. januar 2004, er Ravn Sø udvalgt som en intensiv overvågningssø, hvilket betyder, at der bl.a. foreligger målinger for tilførslen af næringssalte via vandløb. Desuden er der indsamlet måledata i søens overfladevand samt bundvand i en ca. månedlig frekvens for bl.a. næringssalte, zoo- og fytoplankton, temperatur og ilt. I nogle af overvågningsårene er der endvidere udført biologiske undersøgelser omfattende undervandsplanter, fisk og bunddyr.

Modelopsætning

Den anvendte model for Ravn Sø er baseret på DYRESM-CAEDYM (DYCD) modellen. DYCD er en 1-dimensional økosystemmodel udviklet af Centre for Water Research (CWR) ved The University of Western Australia. Modellen består overordnet af to komponenter: en 1-dimensional hydrodynamisk model (DYRESM: Dynamic Reservoir Simulation Model), som beskriver den vertikale opblanding og den resulterende fordeling af temperatur, salinitet og densitet i søer, samt en akvatisk økosystem model (CAEDYM: Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model), som simulerer

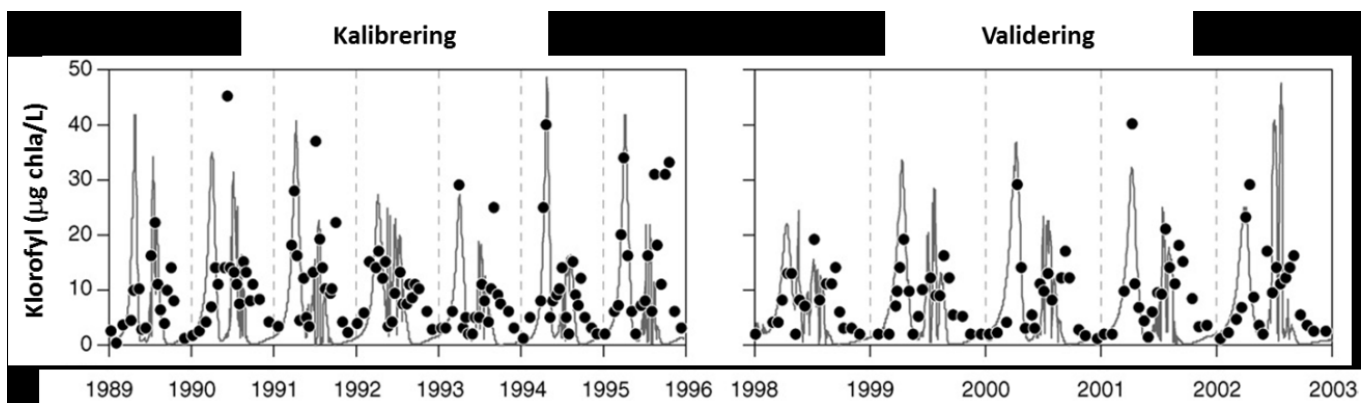


Figur 20 Lokaltiteten af Ravn Sø i det midtjyske søhøjland.

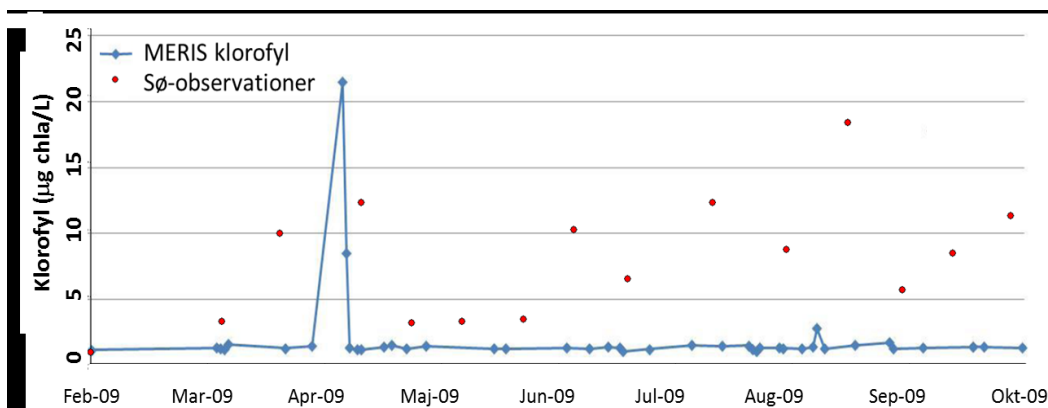
en række biologiske og kemiske tilstandsvariable, herunder ilt, uorganiske og organiske fraktioner af kulstof, fosfor og kvælstof, op til syv forskellige fytoplanktongrupper, op til fem forskellige zooplanktongrupper, fisk, muslinger osv. (Hipsey *et al.*, 2007). CAEDYM kan også kobles med en 3-dimensional hydrodynamisk model (ELCOM: Estuary, Lake and Coastal Ocean model). I både 1D og 3D opsætninger er den økologiske model samlet set publiceret i mere end 70 internationale studier (Trolle *et al.*, 2012), og er typisk anvendt til at forudsige effekten af ændret næringsbelastning (e.g., Hamilton, 1999) eller fremtidigt klima (e.g., De Stasio *et al.*, 1996) på vandkvalitet i søer eller drikkevandsreservoirs. Modelopsætning for Ravn Sø er beskrevet i yderligere detaljer

i en række forskellige studier (Trolle *et al.* 2006; Trolle *et al.* 2008a,b; Trolle og Søndergaard 2010).

Modellen er tidligere kalibreret for perioden 1989 til 1996 og valideret på perioden 1998 til 2003 (Figur 21). I dette projekt er Ravn Sø modellen opdateret, således grænsebetingelser (indløb og klima) og dermed modelkalibrering og valideringsperioder strækker sig over en periode, hvor MERIS satellitdata også er tilgængeligt. Modellen kan således nu simulere hele perioden 1989-2010.



Figur 21 Model-simuleret klorofyl (linjer) i forhold til månedlige observationer (punkter) fra Ravn Sø (modificeret efter Trolle *et al.* 2008a)..



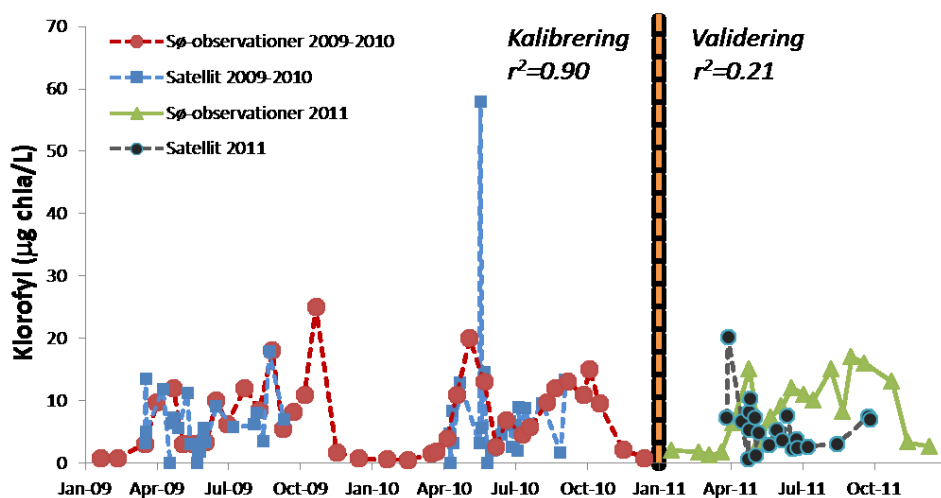
Figur 22 Klorofyl data fra MERIS satellit i forhold til de månedlige observationer i overvågningsprogrammet. MERIS klorofyldata er baseret på en konvertering af satellitdata til klorofyl via neurale netværk.

Satellitbilleder

MERIS data er som udgangspunkt særligt interessant for Ravn Sø modellen, da MERIS potentielt kan levere data i en daglig frekvens. DYCD modellen, som giver et dagligt output indikerer generelt, at der forekommer forholdsvis store variationer i klorofylindholdet i Ravn Sø, særligt i sommerperioden. De månedlige dataindsamlinger igennem overvågningsprogrammerne fanger ikke disse hurtige variationer. Det er derfor interessant, om MERIS data kan bekræfte, at disse variationer aktuelt forekommer i Ravn Sø, eller om dette er en uhensigtsmæssig effekt i modellen. Samtidig er det interessant at undersøge, om forudsigelserne af DYCD vil ændre sig (f.eks. forudsigelse af effekterne ved at ændre den eksterne næringssalt belastning), når modellens kalibrering opdateres ved brugen af satellitbaseret klorofyldata. Sidstnævnte kan potentielt få

stor betydning for handleplaner, som evt. baseres på modellens resultater. Satellitdata fra MERIS blev i første omgang konverteret til klorofyldata ved brug af neurale netværksmetoder, som tidligere har været anvendt for søer (e.g., Odermatt *et al.* 2010, Koponen *et al.* 2008).

Dette gav ikke umiddelbart noget brugbart resultat, idet de satellitbaserede klorofyldata ikke kunne fange de reelle klorofylsæsonvariationer, som forekommer i Ravn Sø (Figur 22). I stedet blev det forsøgt, at konvertere MERIS satellitdata til klorofyl via en empirisk model. Vi anvendte i den forbindelse Eureka programmet (Schmidt og Lipson 2009), som anvender genetiske optimeringsalgoritmer, til at søge imellem tusindvis af forskellige empiriske matematiske sammenhænge mellem forskelligt



Figur 23 Klorofyl data fra MERIS satellit i forhold til de månedlige observationer i overvågningsprogrammet. MERIS klorofyldata er baseret på en konvertering af satellitdata til klorofyl via en empirisk model i Eureka programmet (Schmidt og Lipson 2009).

input data. Vi brugte data fra alle tilgængelige bånd fra MERIS satellitten, og kalibrerede imod de månedlige klorofylobservationer i perioden 2009-2010, hvorefter vi validerede modellen for 2011 (Figur 23).

I kalibreringen ser resultaterne umiddelbart lovende ud, men valideringen afslører, at den empiriske model ikke kan beskrive en god og reel sammenhæng mellem satellitdata og klorofyl. Dette er et udtryk for, at den empiriske model er over-parameteriseret, og dermed i stand til at give et godt statistisk resultat for kalibreringsperioden, på trods af at der tilsyneladende ikke forekommer nogen god sammenhæng mellem satellitdata og klorofyl.

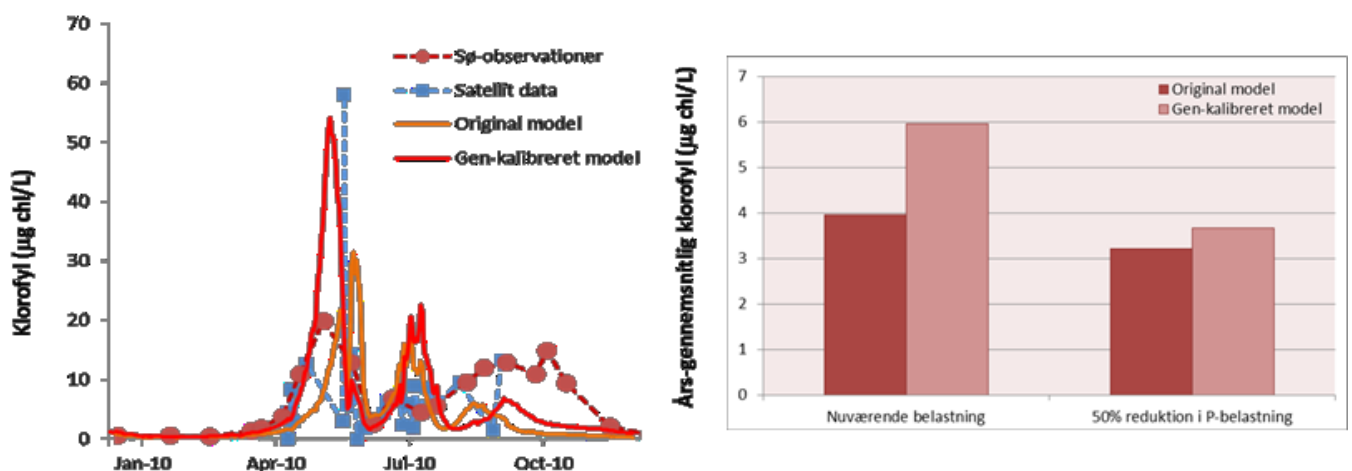
Det er tidligere i rapporten beskrevet, at årsagen til at det ikke har været muligt at oversætte MERIS satellitdata til klorofylkoncentration er en manglende tilpasning af processerings-softwaren til danske forhold, hvilket betyder at det ikke har været muligt indenfor rammerne af dette projekt, at få bearbejdet MERIS satellit-data til at levere klorofyldata i en kvalitet, som er brugbar i Ravn Sø.

Dette er imidlertid ikke nødvendigvis et udtryk for, at MERIS satellitdata ikke er anvendelige, da MERIS-baseret klorofyl tidligere har vist lovende resultater for søer (e.g. Odermatt *et al.* 2010). De manglende resultater er dog også et udtryk for, at bearbejdningen af satellitdata kan være omsiggribende, hvilket underbygges af Binding *et al.* (2011), som i et større studie har undersøgt flere forskellige satellit-bearbejdnings-metoder.

Resultater

Da de tilgængelige satellitdata ikke umiddelbart kunne levere brugbar information omkring klorofyl i Ravn Sø, opstilles her i stedet et modeleksempel, som udtrykker den effekt, vi vil forvente at opnå, hvis klorofyldata er tilgængelige i en daglig frekvens. Vi tager udgangspunkt i året 2010 i kalibreringsperioden for den empiriske model, der konverterer MERIS satellitdata til klorofyl, og ignorerer (for eksemplets skyld), at de satellitbaserede klorofyldata ikke nødvendigvis er repræsentative for dynamikken i Ravn Sø. Satellitdata for dette år indikerer, at der har været en høj klorofylkoncentration i slutningen af foråret, hvilket ikke er fanget med den traditionelle overvågning. Vi genkalibrerer modellen med de nye klorofyldata, og undersøger om modelforudsigelserne ændrer sig i forhold til den originale modelopsætning, som er blevet kalibreret ud fra de månedlige observationer i overvågningsprogrammet (Figur 24). Genkalibreringen blev gennemført ved at justere på fytoplankton vækstraterne.

I dette eksempel opnår vi naturligvis, at den genkalibrede model angiver et gennemsnitligt højere klorofyl niveau end den originale model, idet genkalibreringen tager udgangspunkt i højere klorofylværdier genereret af MERIS satellitten (Figur 24). Samtidig er det tydeligt, at modellens egenskaber ændrer sig væsentligt, idet den genkalibrede model reagerer anderledes på en reduceret fosforbelastning. Således foreslår den originale model, at den



Figur 24 Observeret og simuleret klorofyl a i den originale Ravn Sø model (kalibrering baseret på månedlige observationer) og for den gen-kalibrede model (venstre), samt effekten af at reducere den eksterne belastning af fosfor med 50% ifølge den originale og den gen-kalibrede model (højre).

årgennemsnitlige klorofyl koncentration vil falde med ca. 20 %, som følge af en reduktion i den eksterne fosforbelastning på 50 %, hvorimod den genkalibrerede model foreslår, at den årgennemsnitlige klorofyl koncentration vil falde mere markant med ca. 40 %. Dette tyder på, såfremt man kan generere pålidelige klorofyl data fra satellitter, at man kan opnå en modelopsætning, som er mere repræsentativ for algedynamikken i en sø, samtidig med at modellens forudsigelser vil blive mere pålidelige.

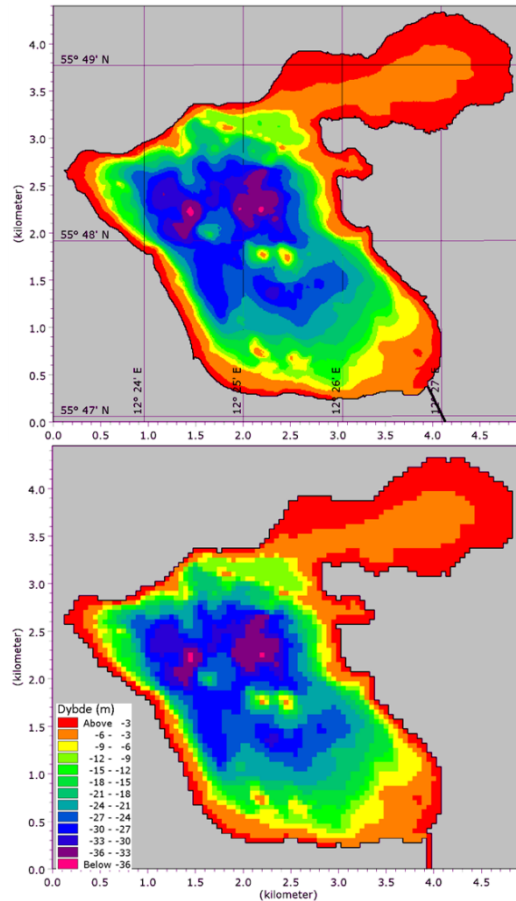
7.3 Furesø – 3D modellering

Furesø er en del af Mølleåsystemet og er Danmarks dybeste sø med en maksimal dybde på 37,7 m (Københavns Amt, 2004). Søen har set med danske øjne et relativt stort overfladeareal på 941 hektar og en middeldybde på 13,5 m. Søbunden er meget kuperet og har således flere dybe huller og to ”bakketoppe” centralt i søen (Figur 25). Søens nordøstlige hjørne kaldes for Store Kalv og er et større lavvandet område med en maksimal dybde på 4 m og middeldybde på 2,5 m. Furesø er en internationalt kendt sø, og de første videnskabelige undersøgelser af søen blev allerede foretaget i limnologiens barndom af Wesenberg-Lund i slutningen af 1800-tallet (Wesenberg-Lund *et al.* 1917, Sand-Jensen, 2003). Furesø er også et rekreativt område og anvendes som badesø og til sejlad.

Furesø udvikler om foråret et stabilt temperaturspringlag, der først nedbrydes hen på efteråret. Furesø var før 1950’erne en oligotrof sø, med klart vand, rig makrofytvegetation og iltholdigt bundvand. Men på grund af forurening, primært fra husholdningsspildevand er søen blevet eutrof, med iltsvind i bundvandet om sommeren, kraftig reduktion af makrofytvegetationen og algeopblomstringer af især blågrønalger, der generer sommerens badegæster. Den begyndende eutrofiering af Furesø blev allerede registreret af Berg *et. al* i 1950-54 (Berg *et al.*,1958). For at genskabe søens oligotrofe tilstand blev der i 2002 iværksat et restaureringsprojekt, med opfiskning af skidtfisk og iltning af søens bundvand. Projektet har medført, at makrofytvegetationen er på vej tilbage og den fortsatte iltning af søens bundvand opretholder acceptable iltniveauer henover sommeren. Dog svinger søen mellem år hvor makrofytvegetation

trives og år hvor fytoplanktonopblomstringer holder makrofytvegetationen nede.

Furesø er blevet monitoreret regelmæssigt siden 1971 ved en station på søens dybeste sted. Der er således ringe kendskab til horisontal variation af bl.a. fytoplankton. Inddragelse af satellitbilleder som supplement til monitoringsdata forventes at forbedre kalibreringsgrundlaget for en tidligere opsat model for Furesøen.



Figur 25 Furesøs dybdeforhold (venstre) og modellens opløsning med 50 m gridceller (højre).

Modelopsætning

Den anvendte model på Furesøen er baseret på MIKE 3 Classic, som er en 3-dimensional, ikke-hydrostatisk model baseret på Reynolds-averaged Navier-Stokes ligninger og konserverer masse og temperatur (Rasmussen, 1991). Modellen er blevet kalibreret i forbindelse med tidligere projekter, hvor søens bathymetri er opdelt i 200 x 200 m gridceller i det horisontale og 1 m i det vertikale (Krogsgaard Jensen og Closter, 2011). Bathymetrien er i forbindelse med dette projekt blevet opgraderet til 50 m grid og efterfølgende genkalibreret (Figur 25).

Den finere horisontale opløsning giver en bedre beskrivelse af søens komplicerede bathymetri og dermed strømningsforhold især i hypolimnion.

Den hydrodynamiske model drives af meteorologiske data fra 2009. Vindhastighed og -retning, lufttemperatur og relativ luftfugtighed er målt ved Sjælsmark station (ca. 8,5 km fra Furesø) og skydække ved Kastrup (ca. 25 km fra Furesø).

Tidligere opstillede vandbalancer for søen viser, at der typisk er grundvandsindsivning i forårs- og sommermånederne (Københavns Amt, 2004). Temperaturprofilerne tyder også på, at dette har været aktuelt i 2009, idet bundtemperaturen er homogen og ikke jævnt faldende med dybden (Krogsgaard Jensen og Closter, 2011). Da placeringen af ind- og udsivningen er ukendt, er grundvandet tilført i søens tre dybe områder med en total kildestyrke på 0,07 til 0,21 m³/s varierende over perioden fra marts til oktober.

Den økologiske model er beskrevet i ECO Lab, som er fuldt integreret med MIKE 3 Classic, og dermed koblet til den hydrodynamiske models beskrivelse af advection-dispersion, strømningsforhold og temperatur. Modellen beskriver generelle økologiske processer som f.eks. fytoplankton primærproduktionens afhængighed af lys, næring og temperatur, zooplanktongræsning, dødt organisk materiale, koncentration af næringsstoffer og iltforhold (DHI, 2009). Den økologiske model er udvidet med fire algegrupper, to zooplanktongrupper samt fraktioner af svært nedbrydelige og lettilgængelige humusstoffer og består således af 46 tilstandsvariable fordelt på 32 i vandsøjlen og 14 i sedimentet.

I 2009 blev Furesø tilført 474 tons ilt fordelt på søens tre dybe områder i perioden fra 28/5 til 26/10, hvilket er tilført som tørstofdeponering til modellens bundlag i de tre dybe områder. Stoftilførsel fra laterale bidrag beskrives som produktet af vandføringen og stofkoncentrationen. Furesø belastes med næringsstoffer fra Farum Sø, Dumpedalsrenden, Vejlesø, Stavnsholt Renseanlæg, separate og fælles kloakeringer samt atmosfærisk deponering og diffust umålt opland (Københavns Amt, 2003; Krogsgaard Jensen og Closter, 2011). Det eneste afløb fra søen er Frederiksdal i søens sydøstlige hjørne, hvor vandføringen styres i henhold til målt vandstand.

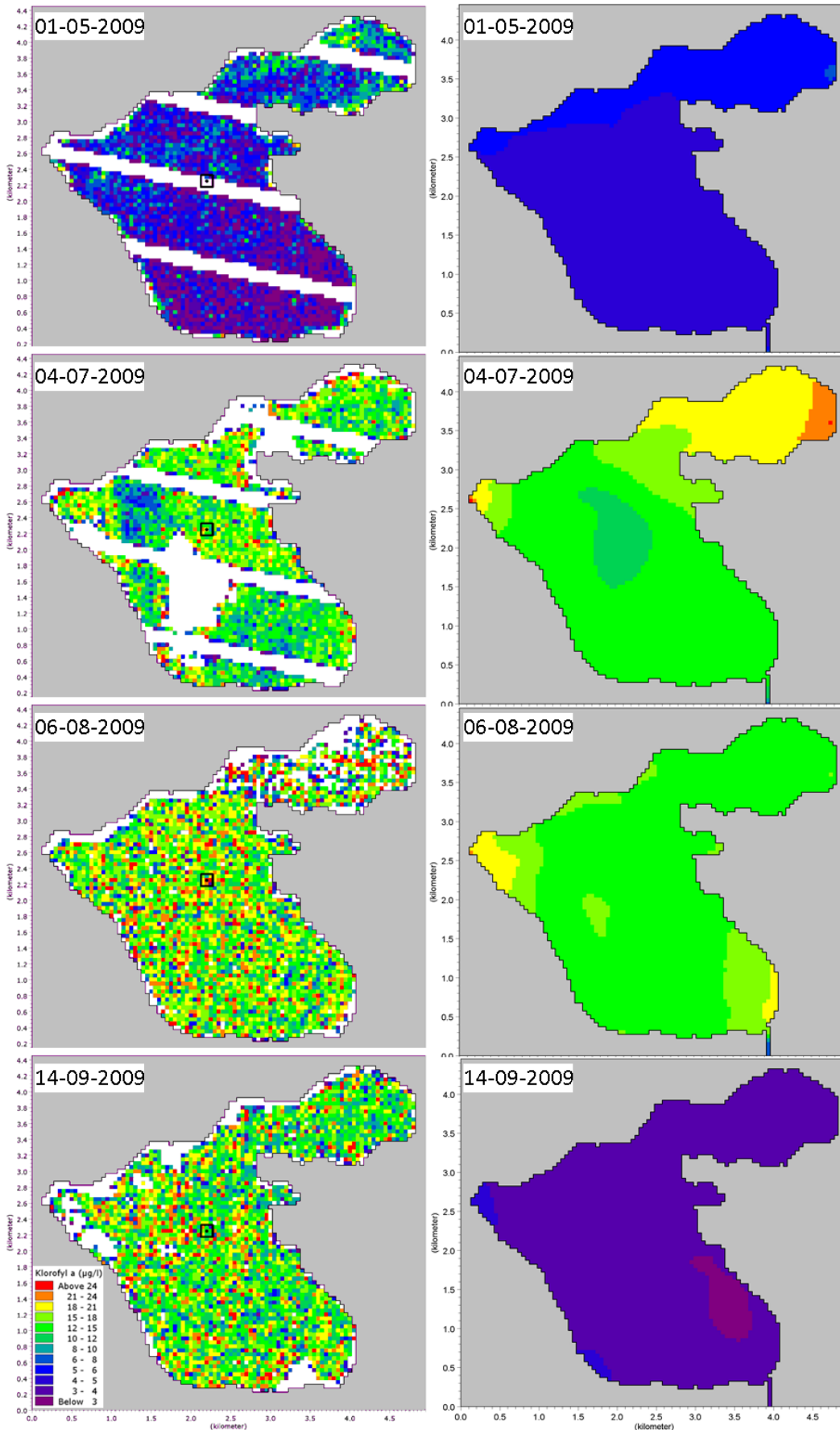
Satellitbilleder

Det har ikke været muligt at oversætte MERIS satellitdata til klorofylkoncentration for udvalgte danske søer heriblandt Furesø (afsnit 6 og afsnit 7.2). Det er derfor besluttet udelukkende at anvende Landsat satellitdata i forbindelse med analyser af Furesømodellen (afsnit 5). Modellen er opstillet for år 2009, hvor der findes én skyfri scene og tre med mindre skyer. Det begrænsede datamateriale giver et beskedent datagrundlag for dataassimilering, men anvendes som illustration for effekten af dataassimilering og desuden som supplement til de traditionelle målinger anvendt til kalibrering af modellen.

På billeder med skyer giver tolkningen af Landsat satellitdata til klorofyl a koncentrationer nogle områder med usandsynligt høje værdier større end 30 µg/l, hvilket ligeledes er tilfældet langs randen af søen. Disse værdier er frasorteret og herefter er data nedskaleret fra Landsats opløsning på 30 m til modellens opløsning på 50 m (Figur 26).

Resultater

Satellitbilledet fra maj er det billede med bedst kvalitet, idet her ikke er nogen skyer, der generer signalet. Billedet viser lidt højere klorofylkoncentrationer i Store Kalv (gennemsnitligt 8 µg/l) og en svag tendens til en horisontal gradient i den dybe del af søen med gennemsnitligt 5 µg/l i den nordlige del og 4 µg/l i den sydlige del (Figur 26). På de tre øvrige billeder fra juli, august og september er der ingen horisontale forskelle i klorofyl a koncentrationen. Det generelt gryede udtryk skyldes den lave sensitivitet i Landsat data grundet 8-bit begrænsningen i data. Modellen beskriver også en svag tendens til horisontal variation i klorofylkoncentrationen den 1. maj med 4-5 µg/l i den centrale og sydlige del af søen og 5-6 µg/l i den nordlige del og Store Kalv (Figur 26). Modelresultatet fra den 4. juli beskriver også horisontale forskelle med 10-15 µg/l i hovedbassinet og 18-24 µg/l i Store Kalv. Niveauet er det samme i satellit billedet men det bekræfter ikke de horisontale forskelle beskrevet i modellen, formentligt på grund den lavere kvalitet af satellitbilledet pga. de halvskyede vejrforhold.



Figur 26 Landsat klorofyl a i nedskalleret til 50 m opløsning og frasorteret værdier større end 30 mg/l (venstre) og modelleret klorofylkoncentration (højre). Målestationens position (sort prik) og omgivende 9 gridceller (sort firkant) er også vist (venstre).

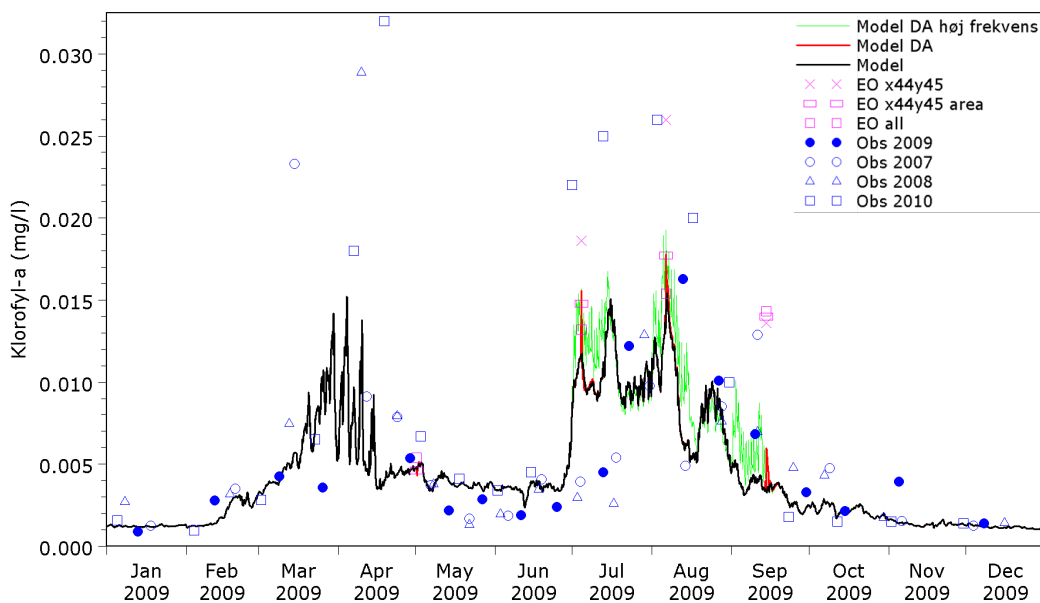
Den 6. august beskriver modellen 12-15 $\mu\text{g/l}$ i det meste af søen med lidt højere koncentration på 15-21 i den nordvestlige del og sydøstlige del af søen og det er det samme niveau der beskrives af satellitten. Den 14. september er modellens koncentration på 3-4 $\mu\text{g/l}$ lavere end satellittens på 14 $\mu\text{g/l}$, hvor det virker som om satellitten overvurderer klorofylkoncentrationen.

Landsat satellitdata vil kunne anvendes til at beskrive horisontale variationer i større søer, på dage hvor det er muligt at få billeder af høj kvalitet uden skyer. Den næste satellit i Landsat serien (LDCM) der opsendes i starten af 2013 vil således have en betydeligt højere følsomhed og derfor være meget bedre egnet til tolkning af horisontale variationer end data fra Landsat 5 og Landsat 7, som der er brugt her. Man kan generelt forvente at fremtidige satellitter vil kunne levere billeder af endnu højere kvalitet og med hyppigere overflyvninger, de vil kunne anvendes til at be-/afkræfte horisontale mønstre i klorofylkoncentrationen, som især afhænger af vejr- og strømningforhold og evt. vandplanter i lavvandede områder.

Som supplement til kalibreringsdata er tre værdier fra satellitdata udtrukket til sammenligning med målestationen og modellens resultat; nemlig en værdi fra målestationens position, en gennemsnitsværdi for de ni gridceller, der omgiver stati-

onen og en gennemsnitsværdi for hele søen (Figur 26). Værdien fra maj måned stemmer godt overens med de observerede værdier på ca. 5 $\mu\text{g/l}$ (Figur 27). Satellitdata bekræfter også et sensommerklorofylmaksimum, som strækker sig fra juli til september. Dog beskriver satellitdata 5-10 $\mu\text{g/l}$ højere koncentrationer end observeret.

Modellen beskriver en forårsopblomstring maksimum koncentration i slut marts til midt april, som ikke bekræftes af observationerne, som kan skyldes at der i perioden med opblomstring kun er indsamlet én prøve. Modellen beskriver i perioden meget varierende koncentrationer og de lavest simulerede værdier er ikke betydeligt forskellige fra den ene observerede værdi i slutningen af marts. Målingerne fra 2009 antyder således en lille forårsopblomstring med maksimalt 5-6 $\mu\text{g/l}$ i slutningen af april. Typisk er der dog en forårsopblomstring i perioden fra midt februar til slut april med maksimale koncentrationer på 23-32 $\mu\text{g/l}$ som f.eks. i 2007, 2008 og 2010 (Figur 27). I 2009 er der målt i slutningen af marts og igen i slutningen af april, og i den mellemliggende periode er det muligt at der har været en opblomstring som det f.eks. er tilfældet i 2010. Her ville supplerende satellitdata være anvendelige, for at kunne be- eller afkræfte modellens forårsmaksimum.



Figur 27 Modelleret klorofyl a koncentration uden og med dataassimilering (sort og rød linje) samt effekten af dataassimilering ved øget frekvens af satellitdata (grøn linje). Desuden vises observerede værdier fra 2009 (blå fyldte prikker) og 2007, 2008 og 2010 (blå cirkel, trekant og kvadrat) samt Landsat data ved målestationen, gennemsnit af omgivende 9 gridceller og gennemsnit for hele søen (pink kryds, rektangel og kvadrat).

Dataassimilering medfører en justering af modellens klorofyl a koncentration mod det observerede niveau i satellitdata. Effekten er dog kun kortvarig og modellen svinger hurtigt (i løbet af få dage) tilbage til udgangspunktet (Figur 27).

For at undersøge effekten af øget frekvens af satellitdata, er satellitdata fra juli, august og september kopieret, således at hvert billede dækker de første 14 dage af hver måned med daglig frekvens. Den daglige frekvens medfører at modellens klorofylkoncentration fastholdes i de højere niveauer der er i satellitdata, men i perioden uden satellitdata falder klorofylkoncentrationen igen og der ses en kort periode med lavere klorofylkoncentrationer end før. Det skyldes at sommerens fytoplanktonbiomasse i høj grad styres af zooplanktonets græsningstryk. De højere koncentrationer af fytoplankton ved dataassimileringen medfører også en lidt højere zooplanktonpopulation, og dermed også et højere græsningstryk.

Under antagelse af at satellitbillederne beskriver en mere korrekt klorofylkoncentration, kan dette implementeres i modellen ved dataassimilering, således at modellen også har mere korrekte klorofylkoncentrationer. Dog viser eksemplet her, at nogle af modellens kalibreringsparametre, som f.eks. græsningsrater også bør justeres for at opnå og fastholde de højere koncentrationer beskrevet i satellitdata. Dette bliver muligt i næste generation af dataassimilering, der pt. er under udvikling hos DHI, således at det ikke blot er tilstandsvariable der justeres men også udvalgte kalibreringsparametre som f.eks. vækstrater og græsningsrater. En sådan type dataassimilering giver mulighed for at optimere forskellige raters sæsonvariationer og bidrager hermed til yderligere forståelse af de økologiske systemer.

7.4 Konklusion

Eksisterende satellitbilleder fra MERIS kunne ikke umiddelbart anvendes til beskrivelse af klorofylkoncentrationen i de undersøgte søer. Det konkluderes dog, at yderligere bearbejdning af satellitdata vil kunne give mere pålidelige estimater af klorofylkoncentrationen (afsnit 6).

Landsat data gav en bedre beskrivelse af klorofylkoncentrationen, men frekvensen af data med den nuværende overflyvningsfrekvens på ca. 16

dage er for lav til at give et solidt bidrag til beskrivelsen af dynamikken i søer. Data vil kunne anvendes til at hente enkelte øjeblikbilleder over året og giver mulighed for at få information om evt. horisontale mønstre. Følsomheden i Landsat data er desuden for lav til at give en detaljeret beskrivelse af den horisontale fordeling, men det vil blive markant bedre med den næste generation, der bliver tilgængelig i 2013.

Et satellitprodukt med højere horisontal opløsning som Landsat eller bedre, højere opløsning i antal bånd, højere radiometrisk følsomhed og høj tidslig frekvens (ugentlig) skønnes at kunne bidrage med værdifuld viden til brug for kalibrering og validering af modellerne.

En assimilering rutine baseret på f.eks. data med en detaljeringsgrad som ved WorldView-2 data og med tilsvarende radiometrisk følsomhed ville være utroligt interessant at teste, da man derved ville kunne kortlægge selv meget små variationer i den horisontale fordeling, samt få en meget detaljeret beskrivelse af modellens præcision i forhold til det observerede. Ravn Sø var således ikke dækket af optageområdet omkring Silkeborg fra 2011, og under RASK projektet har det desværre ikke været muligt at fremskaffe VHR data for Ravn Sø eller Furesøen for de perioder hvor modellerne er kalibrerede.

En automatisering af indsamling og behandling af satellitdata kan bidrage til, at modeller i højere grad kan valideres, og dermed forbedre det faglige grundlag for forvaltningsmæssige handleplaner.

Modellerne sammenfatter viden fra forskellige typer af data, dels fra traditionelle monitoringsdata, som modellerne typisk kalibreres og valideres imod og dels fra nye teknikker såsom satellitdata, der kan anvendes som supplement til kalibreringsdata. Herudover kan dataassimilering optimere modellens udgangspunkt for at stille prognoser, hvor effekten af dataassimilering ligeledes styrkes af høj tidslig frekvens af satellitdata. Modellernes integration af mange forskellige typer af data giver dermed et stærkt analyse- og prognoseværktøj.

8 Paralleller til anden teknologi

8.1 Automatisk sampling

Faste målestationer

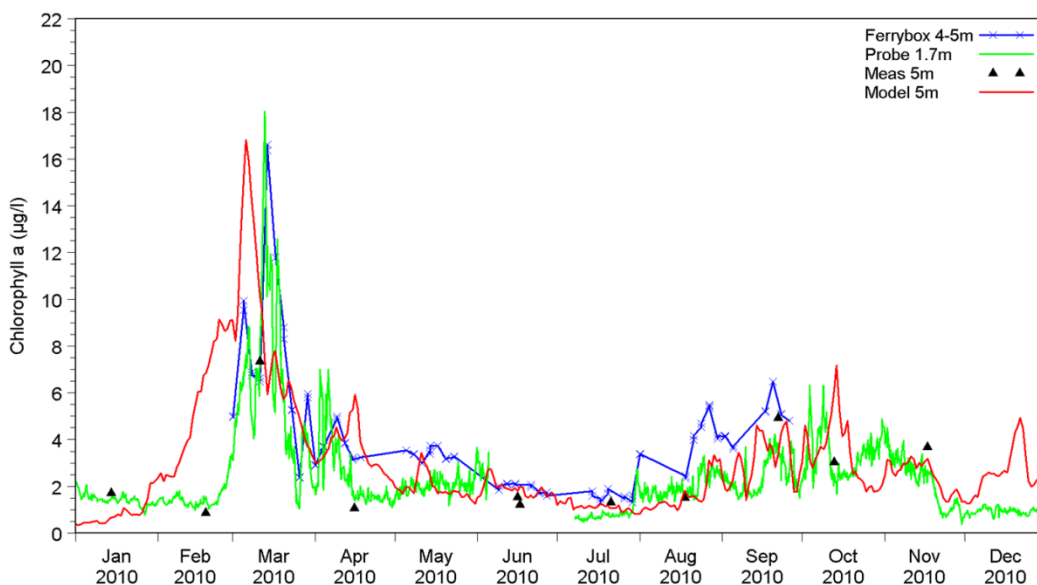
I større monitoringsprogrammer i de åbne farvande måles klorofylkoncentrationen kontinuerligt fra et antal faste stationer (bøjer). Klorofylkoncentrationen bestemmes ud fra målinger af fluorescens og kan ved en god kalibrering af sammenhængen mellem fluorescens og klorofylkoncentration give præcise data i høj tidlig opløsning (Figur 28). Ved målinger i vandoverfladen kan fluorescensen dog være påvirket af "quenching", hvor stærkt sollys nedsætter fluorescensintensiteten. I sådanne situationer ses en tydelig variation over døgnet med lave værdier om dagen og høje værdier om natten. Kvaliteten af data kan øges ved at sortere dagsværdierne fra.

De fleste danske søer er ret næringsrige og det kan give problemer med overbegroning på bøjerne. Foreløbige erfaringer fra enkelte søer tyder også på, at det kan være vanskeligt at opnå tilstrækkeligt pålidelige data. Herudover er bøjerne for pristunge til at indføre i et stort antal søer, men vil med fordel kunne implementeres i en-

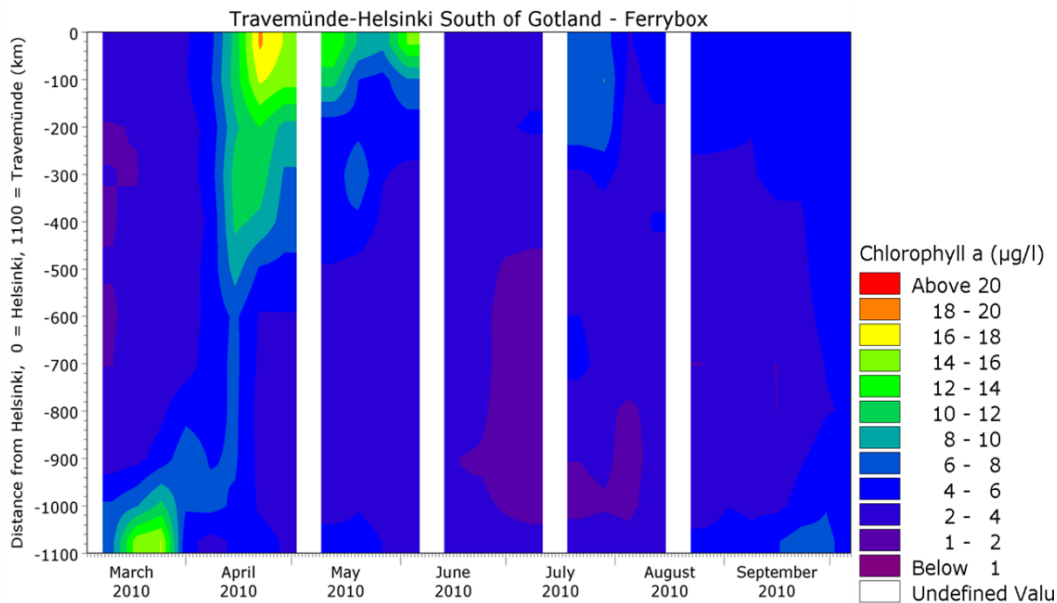
kelte søer, såfremt der er behov for øget kendskab til den tidlige variation og såfremt pålidelige data kan opnås.

Færger

Enkelte færger måler også fluorescens-klorofyl, fra et indtag i 4-5 m's dybde. Således målte færgen mellem Helsinki i Finland og Travemünde i Tyskland temperatur, saltholdighed, turbiditet, fluorescens-klorofyl og phycocyanin-fluorescens (cyanobakterier) i 2010 (Seppälä *et al.*, 2007). Data måles med en frekvens på 20 sekunder hvilket svarede til 250 m og giver altså grundlag for transekter i høj rumlig opløsning. Den tidlige opløsning er også høj, idet ruten tager ca. 30 timer og der sejles således flere gange ugentlig. Data kan anvendes til at trække tidsserier ud fra definerede områder, f.eks. i umiddelbar nærhed af en målestation (Figur 28), hvilket giver et godt supplement til de traditionelle målinger. Transektet giver også mulighed for at analysere de rumlige variationer, som f.eks. kan sammenlignes med modelresultater (Figur 29). Målingerne af phycocyanin-fluorescens giver tillige



Figur 28 Klorofylkoncentration fra station MS03 i Femern Bælt. Figuren angiver periodiske målinger (sorte trekkanter), kontinuerlige klorofyl-fluorescens målinger fra en stationær bøje (grøn linje), ferrybox klorofyl-fluorescens (blå linje) og foreløbige resultater fra ikke færdigkalibreret model for Østersøen (CoBiOS-coarse, rød linje).



Figur 29 Ferrybox klorofyl-flourescense koncentration, målt fra en færge der sejler mellem Helsinki i Finland og Travemünde i Tyskland. Farvekonturerne angiver klorofylkoncentrationens variation i tid (x-aksen) og rum (y-aksen, afstand fra Helsinki ved 0 km) til Travemünde ved 1100 km)

mulighed for at analysere opblomstringer af blågrønner givet at disse fanges af instrumentet, som er placeret i 4-5 m's dybde. Som med målingerne af fluorescens-klorofyl på faste stationer kan kvaliteten af ferrybox målingerne også være under indflydelse af "quenching". Dette er dog mindre udpræget med indtaget i 4-5 m's dybde i forhold til faste målestationer der måler i 1-2 m's dybde.

Anvendelsen af denne type data er dog begrænset til større søer med fast færgetrafik, som kun foregår i ganske få søer i Danmark. Dog har nogle større søer fast båd fart om sommeren som f.eks. søerne i Mølleåsystemet og Frederiksborg Slotssø. Her er der altså en mulighed for data i høj rumlig og tidlig opløsning, men det er ikke et alternativ der kan implementeres på et stort antal søer.

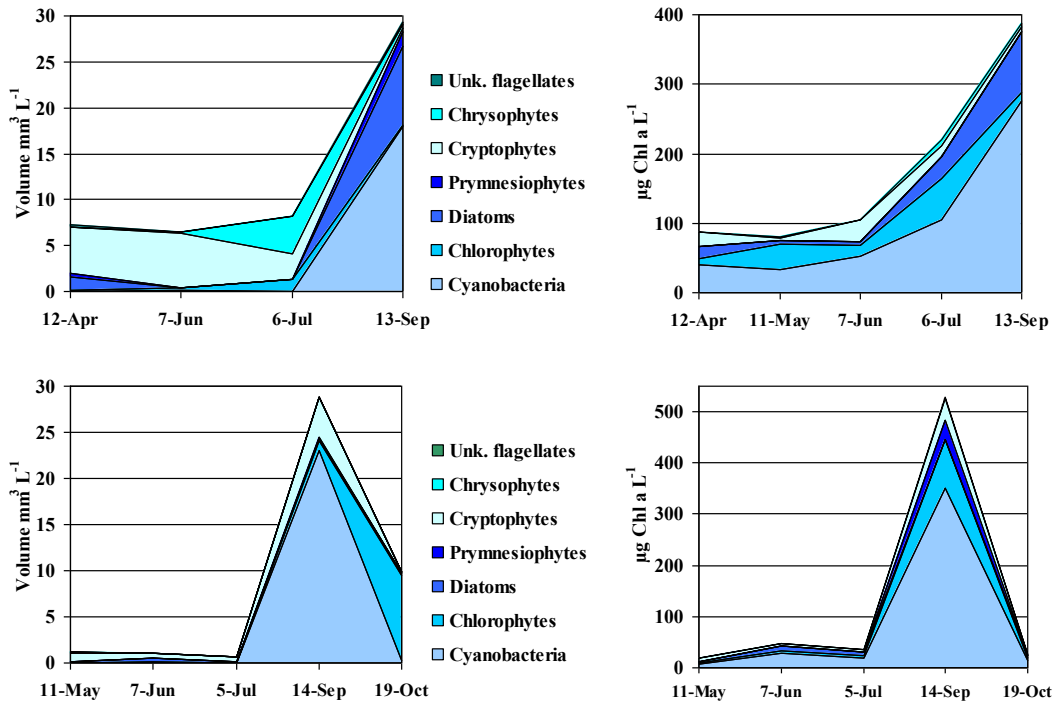
Droner

Frekvensen af satellitdata begrænses af skydække. Et alternativ til store flademålinger kan derfor være målinger fra fly, der kan styres fra jorden og måler under skyerne. Der sker således i øjeblikket en del udvikling inden for billedoptagelse fra forskellige former for ubemandede droner. Disse flyver som regel i meget lav højde – op til 100m – og kontrolleres af en operator på jorden. Med denne type droner er det muligt at optage billeder i meget høj opløsning (pixelstørrelse på et par cm). Problemet er

imidlertid, at egentlige multispektrale sensorer ikke endnu kan monteres på disse droner, samt at deres rumlige rækkevidde er meget begrænset.

8.2 HPLC

HPLC (High Performance Liquid Chromatography) anvendes i dag rutinemæssigt til analyse af pigmentindholdet af fytoplankton for derved at bestemme biomassen og sammensætningen af de enkelte fytoplanktonklasser. Pigmentanalyse er i modsætning til traditionel mikroskopering en objektiv, hurtig og dermed en billig metode til bestemmelsen af fytoplanktonbiomassen. Hvor de mindste fytoplanktonceller med en størrelse på omkring et par mikrometer er for små til at kunne identificeres med normale mikroskoperingsmetoder, og derfor enten overses eller bliver karakteriseret som 'ukendte', bliver alle alger ved HPLC-analyse bestemt med én og samme metode. Ved analysen bliver koncentrationen af klorofyl a samt ca. 30 andre accessoriske pigmenter bestemt, og klorofyl a-biomassen af de overordnede fytoplanktonklasser og væsentligste funktionelle grupper kan efterfølgende beregnes ud fra koncentrationerne af de enkelte pigmenter og pigment/klorofyl a-ratioerne i algegrupperne (f.eks. Higgins *et al.* 2011).



Figur 30 Sammenligning mellem mikroskopering (venstre side) og HPLC-analyse (højre side) af fytoplankton fra Væng Sø (øverst) og i Stigsholm Sø (nederst) (efter Schlüter *et al.* 2006).

I Figur 30 er vist et eksempel på sammenligning mellem algetælling og HPLC-analyse af prøver indsamlet i to eutrofe danske søer. Ved mikroskopering er både identifikationen og bestemmelsen af cellevolumen fejlbehæftet, og variationskoefficienter på mellem 15 og 50 % er ikke ualmindelige (Vilhelm *et al.* 1991; Schlüter *et al.* 2000). Desuden er klorofyl a en dynamisk parameter, der, i modsætning til algecellernes volumen, varierer hurtigt i forhold til ændringer i lys og næringsforhold, og sammenligningen mellem de to metoder er derfor ikke optimal. Der var dog generelt en god overensstemmelse mellem metoderne omkring de detekterede algegrupper og biomasseudviklingen, og begge metoder viste, at blågrønalger (cyanobakterier) opblomstrede sidst på sommeren (Figur 30). Stilkalger (Prymnesiophytes) var tilsyneladende for små til at blive identificeret i mikroskop i prøverne fra Stigsholm Sø (Figur 30 nederst); tilstedeværelsen af denne gruppe blev afsløret af deres markørpigment (19'-hexanoyloxyfucoxanthin) med HPLC-metoden. Ved HPLC-analyse kan variationskoefficienter på omkring 1 % opnås (samme laboratorium), mens en interkalibrering med 8 deltagende laboratorier viste en variation på de primære pigmenter på 7.4 % (Hooker *et al.* 2005).

HPLC-metoden egner sig således godt til "ground truthing" af satellitbilleder og kan anvendes som

et vigtigt supplement til satellitdata, da HPLC-analysen ud over at bestemme klorofyl a-koncentrationen præcist også kan anvendes til at bestemme biomassen af de overordnede fytoplanktongrupper.

For pigment-analyse er *in situ* prøvetagning nødvendig. Prøvetagningen kan foregå med automatisk prøvetager eller med en vandhenter. Vandprøverne filtreres ned på filtre, hvorefter pigmenterne ekstraheres og analyseres på HPLC. Udtagne prøver skal filtreres indenfor nogle timer, hvilket betyder, at automatisk prøvetagning har begrænset anvendelighed, da prøvetageren skal tømmes og prøverne fikseres ved filtrering og frysning kort tid efter prøvetagning. Filtrerede prøver kan imidlertid opbevares i fryser, indtil HPLC-analyse er passende. HPLC-analysen er kun omkring 12 min. per prøve, men tid til prøveekstraktion samt resultatopbehandling skal dog medregnes.

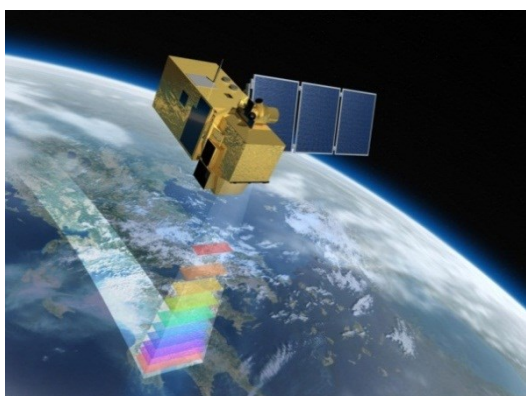
Den hurtige analysetid betyder, at HPLC-metoden er meget velegnet til at bestemme både den tidlige og den rumlige variation af algepopulationer og metoden har for eksempel været anvendt i en baselineundersøgelse i forbindelse med forundersøgelser af havmiljøet før konstruktionen af en fast forbindelse

over Fehmarn Bælt. Gennem to år blev fytoplanktonpopulationerne bestemt på 12 havstationer og 10 kystnære stationer i Fehmarn Bælt ved hjælp af månedlige prøvetagninger og HPLC-analyser. Prøverne blev suppleret af kontinuerede klorofylmålinger foretaget på målebøjer på faste stationer (afsnit 8.1), der gav væsentlig information om det generelle niveau af klorofylkoncentrationen i området i mellem prøvetagningsperioderne og indsigt i fytoplanktonopblomstringernes intensitet og varighed. Ved at screene prøverne i mikroskop blev de mest betydningsfulde fytoplanktonarter tilmed bestemt (DHI, 2011).

8.3 Synergi mellem monitoringsparametre baseret på samme datakilde

Under RASK projektet har fokus været på monitorering af klorofyl i søer. I forhold opsætning af et automatisk system til behandling af satellitbilleder - evt. baseret på indkøb af kommercielle satellitdata - vil der være mulighed for store synergieffekter ved at 'genbruge' data og ressourcer til behandling af data. En betydelig del af billedbehandlingen vil f.eks. være den samme uanset om man er interesseret i monitorering af det terrestriske eller akvatiske miljø (download, kalibrering, geometrisk opretning, atmosfære korrektion mv.). De meget detaljerede WorldView-2 data der blev optaget over Silkeborg området vil således kunne anvendes til forskellige formål, som f.eks. rørskovens udbredelse eller eventuel forekomst af blågrønalg men også eksempelvis kortlægning af "landuse" i området, udviklingen i afgrøder over tid, opdatere baggrundskort til kommunale myndigheder osv. En overordnet integreret inddragelse af satellitdata i monitoringsprogrammet ville således totalt set blive mere kosteffektiv (der er flere til at dele udgiften til systemet) samt betyde mere data til relevante myndighedsopgaver og organisationer.

9 Fremtidsperspektiver – hvor er vi i 2015?



Figur 31 Visualisering af en af ESA's Sentinel-satellitter, hvoraf den første forventes opsendt i 2014

9.1 Nye satellitter

RASK-projektet har demonstreret et betydeligt potentiale for brug af satellitinformation til vurdering af klorofyl i danske søer. De væsentligste begrænsninger i forhold til videre implementering er dels bedre satellitdata, dels bedre integration af satellitdata, in situ data og modeller. Imidlertid er der gode muligheder for at komme afgørende videre på begge områder indenfor de nærmeste år og indtil starten af næste planperiode og det tilhørende monitoringsprogram i 2015. En række af de planlagte satellitopsendelser vil i langt højere grad kunne opfylde behovet for monitoring af vandkvalitet og samtidig bliver teknologien langt mere tilgængelig både i form af hyppigere observationer og generelt faldende prisniveau.

I de kommende år vil en lang række jordobserva-

tionssatellitter blive opsendt. Aktørerne er såvel nationale rumfartsmyndigheder i en lang række lande samt rent kommercielle aktører, som dog ofte reserverer en stor del af deres kapacitet til militære kunder. Rent geografisk dominerer de sædvanlige aktører som USA, Italien, Frankrig, Tyskland, Kina, Japan og Indien, men også en række nyere rumfartsnationer som eksempelvis Nigeria, Thailand og Algeriet vil kunne tilbyde satellitservices.

En vigtig komponent i det fremtidige europæiske rumprogram bliver de europæiske Sentinel satellitter, der opsendes af ESA (European Space Agency) og som bliver den vigtigste infrastruktur i GMES (Global Monitoring of Environment and Security, Figur 31). I forbindelse med monitoring af søer i Danmark bliver især Sentinel-2 vigtig. De to satellitter (Sentinel 2A og 2B) forventes opsendt i 2014 og når begge satellitter er i kredsløb, vil de levere billeder i 10-30 meter opløsning ca. 2-3 gange ugentligt over Danmark. Dvs. at der er tale om en markant forbedring af den tidlige optagefrekvens og samtidig sikres kontinuitet med f.eks. Landsat missionerne, da den spektrale konfiguration ligner Landsat (Tabel 4).

Den officielle datapolitik omkring Sentinel data, der bliver en vigtig del af GMES fremover, er endvidere, at data gøres frit tilgængelige, hvorved udgifter til eventuel brug i monitoringsprogrammet bliver reduceret til databehandling og – analyse (ESA, 2009).

Tabel 4. Sammenfatning af de vigtigste satellitsensorer i forhold til fremtidig monitoring under danske forhold.

Sensor	Spektral	Rumlig	Radiometri	Temporal	Økonomisk
WorldView-2	☺☺	☺☺☺	☺	☺	☹☹☹
Landsat 5 / 7	☺	☺	☹	☹	☺
LCDM	☺☺	☺	☺☺	☹	☺
Sentinel – 2	☺☺	☺	☺☺	☺☺	☺
Sentinel – 3	☺☺☺	☹	☺☺	☺☺☺	☺

Også Sentinel-3 satellitterne vil være relevante for de større danske søer. Sentinel-3 kommer til at ligne MERIS sensoren om bord på Envisat, som er forsøgt anvendt i dette projekt. Den rumlige opløsning på 300 m gør dog, at denne satellit kun er relevant for de største danske søer.

Også fra NASA opsendes en satellit, der vil være velegnet til sømonitoring. Landsat Data Continuity Mission (LDCM) følger op på Landsat missionerne og LDCM forventes opsendt i januar 2013. Alt tyder på, at data fra Landsat programmet fortsat vil være gratis tilgængelige. Den tidlige frekvens er på 16 dage.

En række private aktører er ligeledes på vej med nye højopløselige satellitter. WorldView-2 satellitten, som har været central i nærværende projekt, efterfølges af WorldView-3, som forventes opsendt i 2014. Den vil have 16 spektrale bånd (dog ikke flere bånd i de korte bølgelængder end WorldView-2 allerede har) og mulighed for daglige optagelser.

Ud over WorldView-3 vil en række andre højopløselige satellitter blive opsendt. Det gælder eksempelvis de amerikanske GeoEye-2 (tidligt i 2013) og Geoeye-3, som dog kun har 4 spektrale bånd. Samme konfiguration har de franske Pleiades satellitter, hvoraf den første blev opsendt allerede i slutningen af 2011. Det øgede antal højopløselige satellitter kan forventes at give udslag i faldende priser på markedet generelt.

En anden interessant udvikling sker indenfor såkaldte hyperspektrale sensorer, som måler i op til flere hundrede bånd og derfor giver mulighed for at udtegne meget detaljerede spektre. Teknologien kan som nævnt i kapitel 8 blandt andet bruges til at skelne mellem forskellige algetyper. Sådanne sensorer har indtil nu ikke været monteret på satellit - ud over en amerikansk forskningssatellit med meget begrænset kapacitet - men har primært opereret fra fly. Men fra omkring 2014 sendes en række hyperspektrale satellitter op, herunder den tyske ENMAP, italienske PRISMA og amerikanske Hysperi. Disse satellitter vil give vigtig viden, som kan bruges til kalibrering med almindelige multispektrale satellitter, men de må dog forventes at have en begrænset anvendelighed til egentlig storskala monitorering.

9.2 GMES – Global Monitoring of Environment and Security

GMES er et europæisk initiativ, der skal fremskaffe informationer, som er nødvendige for at kunne overvåge og varsle om udviklinger indenfor miljøområdet samt emner, der vedrører civil sikkerhed. Sentinel-satellitterne, som er nævnt ovenfor, udgør den vigtigste data-infrastruktur i GMES, og derudover bliver der udviklet en lang række serviceydelser, som gør brug af såvel satellitdata som in-situ data omkring miljø og sikkerhed. GMES er allerede i gang i en såkaldt præ-operativ fase, og den egentlige opstart har været planlagt til 2013, hvor opsendelse af de første Sentinel satellitter er planlagt.

Potentielt kan man forestille sig en række ydelser – såkaldte GMES downstream services - der leverer information om vandkvalitet i søer til europæiske brugere ydelser – såkaldte GMES downstream services – der leverer information om vandkvalitet i søer til europæiske brugere på baggrund de satellitbilleder, som EU stiller til rådighed. I en opstartsfasen vil det givetvis også være muligt at få støtte fra EU til udvikling og konsolidering af downstream services, men på sigt skal sådanne services finansieres af brugerne. Et eksempel på en sådan service er det igangværende FRESH-MON projekt. På det marine område findes ligeledes et række projekter (MyOcean, Aquamar, CoBIOS).

Det skal nævnes, at der siden slutningen af 2011 har hersket stor usikkerhed omkring EU's godkendelse af den nødvendige ramme til at starte den operationelle fase af GMES og dette kan forsinke projektet - eller i værste fald betyde at det må aflyses. Diskussion omkring den videre finansiering ventes afsluttet i den sidste del af 2012.

9.3 Kontrolovervågning / operationel overvågning

Vandrammedirektivets overvågningsprogram for søer er sammensat af kontrol – og operationel overvågning. Kontrolovervågningen skal beskrive den generelle tilstand og udvikling i Danmark ud fra repræsentative målinger mens den operationelle overvågning er rettet mod søer, hvor målet i Vandrammedirektivet om

”god økologisk tilstand” ikke forventes opfyldt eller hvor der er gennemført en indsats. Anvendelse af satellit teknologi kan bidrage til at fokusere denne overvågning til netop de relevante søer og ikke ”spilde” ressourcer på søer, der enten er langt fra at opnå den ønskede målsætning eller ligger stabilt i en god økologisk tilstand.

Søer som på baggrund af tidligere målinger er vurderet til ”god økologisk tilstand” og til ikke at være i risiko for en forringet tilstand vil ikke nødvendigvis være omfattet af kontrolovervågningen. Disse søer overvåges dermed ikke og man risikerer at eventuelle forværringer ikke registreres. Her vil en satellitbaseret overvågning give mulighed for en ”early warning” og være relevant, uanset om denne er så detaljeret, at der beskrives egentlige klorofylkoncentrationer eller blot en udvikling i et relativt klorofylniveau.

9.4 Overvågning på forskellige niveauer

Præcis bestemmelse af klorofylkoncentration med horisontal variation og udvikling er optimal, men det kan være relevant at indhente oplysninger, der beskriver mængde og udvikling i klorofylindhold på andre niveauer.

I denne rapport er det beskrevet, hvordan man med udgangspunkt i en gruppe af søer med gode resultater kan anvende højt opløselige data og udvikle algoritmer ud fra samtidige traditionelle klorofylmålinger (kapitel 4).

I relation til udvikling af et administrationsværktøj (kapitel 11) og dette værktøjs præcisionsniveau er det imidlertid også relevant at vurdere, hvornår det er tilstrækkeligt at anvende et generelt værktøj, der er etableret ved hjælp af generelle algoritmer udviklet eksempelvis på en bestemt søtype og hvornår det er nødvendigt at prioritere et værktøj med sø-specifikke algoritmer og kalibrering.

I mange tilfælde vil det ikke være nødvendigt at have en meget høj detaljeringsgrad i den enkelte sø for den enkelte måling. Optagelser i større pixels kan være tilstrækkelige, hvis informationsbehovet primært er rettet imod en mere overordnet beskrivelse af klorofylniveau og -udvikling.

Det kan således være relevant at begrænse informationsniveauet til en indbyrdes sammenligning af klorofylniveau i en lang række søer og eventuelt udviklingen i søerne med henblik på at gruppere søerne for at være i stand til at målrette den traditionelle overvågning og opnå større kosteffektivitet. Dette kunne også foregå i søer uden forhåndskendskab. Søgrupperinger kunne eksempelvis være - søer med forskelligt klorofylindhold - søer inddelt efter algetyper, indholdet af farvestof - lavvandede og dybe søer eller lignende.

I staten Maine i USA har de kombineret højteknologisk remote sensing og et folkeligt engagement på græsrodsniveau, ved at konvertere sigtgydemålinger foretaget af lokale ”amatører” i et stort antal søer til klorofylkoncentration og miljøtilstand. ”Amatørregistreringerne” bliver dermed integreret i den statslige miljøovervågning.

9.5 Integreret program med in situ-satellit- og modeldata

Kvaliteten af det eksisterende monitoringsprogram dataindsamling er høj, idet prøvetagningen sker ved brug af standardiserede metoder og analyserne tjekkes ved hyppige interkalibreringer. Den tidsmæssige variation i dele af naturen og miljøet er imidlertid så stor, at måleresultaterne ofte ikke er repræsentative. Selv den mest omhyggelige prøvetagning og analyse kan give et misvisende resultat, hvis prøverne ikke tages hyppigt nok. I forhold til søovervågning er der gennemført en beregning af præcisionen på gennemsnit af klorofyl a målingerne i henholdsvis kontrol og operationel overvågning (Søren E. Larsen 2009). Resultatet af beregningerne viser, at der er en usikkerhed på 100 % eller mere (90 % acceptniveau) ved bestemmelse af et klorofyl-sommergennemsnit på baggrund af 6 prøver, hvorimod bestemmelsen er mere sikker for den intensive kontrolovervågning (15 prøver i sommerhalvåret).

De enkelte målinger er som udgangspunkt præcise i punktet til det tidspunkt de er målt, men den lave prøvetagningsfrekvens giver begrænset viden om tidslige variationer og dynamikker. Derudover måles der typisk på en målestation på søens dybeste punkt, hvilket

medfører, at der ikke er kendskab til eventuelle horisontale mønstre, som blandt andet illustreret ved målingerne i Julsø (afsnit 4). Satellitdata giver viden om horisontale forskelle og potentielt øget viden om tidlig variation, hvorimod klorofylkoncentrationen beskrives mindre præcist og afhænger af gode algoritmer, hvor in situ data er uundværlige. Modellerne integrerer og samler viden fra de forskellige typer af data og interpolerer mellem hullerne. De forskellige typer af data supplerer således hinanden.

Dataassimilering mellem satellitdata og modeller, er, som tidligere beskrevet, allerede operationel for modeller af de marine områder omkring Danmark til forudsigelse af algeopblomstringer (<http://havbrug.algevarsling.dk> og <http://havudsigten.dk>). Der er således stort potentiale for, at en parallel udvikling kan forekomme for de større danske søer (f.eks. med badevandsinteresse), hvor datamaterialet tillader opsætning af dynamiske økosystemmodeller.

Dette projekt viser, at der er potentiale for at opsætte et komplet og operationelt system for integration mellem satellitdata og sømodeller, som med fordel kan implementeres i Danmark. Model-eksemplerne i dette projekt antyder således, at når satellitdata anvendes til kalibrering eller dataassimilering, kan dette give en markant forskel i modelegenskaber i forhold til modeller, som baseres udelukkende på traditionel lavfrekvent monitoring. Erfaringer fra New Zealand viser desuden, hvordan satellitbilleder med fordel kan anvendes til at kalibrere modellernes egenskaber til bedre at beskrive temperatur, suspenderet stof såvel som klorofyl (f.eks. Allan *et al.* 2011), men der er på dette tidspunkt endnu ikke opsat et automatiseret og operationelt system, som integrerer satellitdata og modeller.

Satellitdata og modeller kan derfor bruges til at øge den tidlige og rumlige opløsning betragteligt og dermed reducere usikkerhederne på de gennemsnitskoncentrationer, som ligger til grund for fastlæggelse af søernes målsætning og vurdering af målopfyldelse.

9.6 Automatiseret dataindsamling, bearbejdning og præsentation

Det er nødvendigt, at datahåndtering (indsamling og bearbejdning) er smidig og operationel for at

kunne anvendes i den daglige miljøadministration. Danmark har en lang tradition for at udvikle integrerede datasystemer, som inddrager relaterede natur – og miljøparametre. På tilsvarende vis vil det være nødvendigt at udvikle et administrationsværktøj, som kan anvende satellitdata i sammenhæng med øvrige sødata.

Ligeledes vil det være vigtigt, at præsentationen af satellitdata og den information om miljøtilstanden, som kan udtrages på baggrund af disse, er så enkel som mulig, således at miljøsagsbehandleren kan bruge værktøjet i sit daglige arbejde. Men eventuelt også således at det samtidig er muligt for lægmand at indhente satellitbaseret miljøinformation.

Som tidligere beskrevet er der i Danmark betydelige erfaringer med operationel integrering af forskellige datatyper samt præsentation af data fra den marine monitoring. Her sker der en løbende udvikling af både de bagvedliggende metoder samt måden informationen præsenteres på. Sidstnævnte sker i tæt dialog med brugerne af systemerne, for bedst muligt at ramme brugernes behov samt maksimere deres udbytte af de enkelte services. Denne erfaring vil i stort omfang kunne inddrages i udvikling af et tilsvarende værktøj for monitoring af søer.

9.7 Overvågning af algeblooms

Forekomst af algeopblomstringer indgår som en af de fytoplanktonparametre, der skal undersøges for at vurdere den økologiske kvalitet i søer jf. Vandrammedirektivet. Grænsen mellem god og moderat tilstand går her imellem om der en "slight" eller "moderate increase in the frequency and intensity of planktonic blooms". I den moderate tilstand kan "persistent blooms occur during summer months".

Det vil altså være nødvendigt med et relativt intensivt overvågningsprogram for at kunne vurdere forekomsten af blooms både i forhold til den tidlige og den rumlige udstrækning. Algeopblomstringer er kendetegnet ved hurtige ændringer (indenfor få dage) og store rumlige variationer, som blandt andet afhænger af vind- og vejrforhold som lokalt i en sø kan føre til kraftige opkoncentreringer, mens

forekomsten samtidigt i andre dele af søen er meget mindre.

Det er endnu ikke afgjort, hvordan registreringen af algeopblomstringer skal foretages og hvordan den indarbejdes i overvågningen af søer, men anvendelsen af remote sensing vil uden tvivl være et godt supplement til den traditionelle overvågning, fordi den giver mulighed for både en god rumlig og tidlig opløsning.

I takt med at kvaliteten af satellitdata øges og analysemetoder udvikles vil det sandsynligvis i højere grad være muligt at adskille forskellige typer af fytoplankton pga. klassespecifikke forskelle i forekomsten af pigmenter. Især identificeringen af cyanobakterier (blågrønner) har store perspektiver, fordi flere af disse arter er potentielt toksiske og kan være årsag til, at der må udstedes badeforbud i dele af sommeren.

9.8 Datakrav og muligheder

Som nævnt er der en række områder, hvor den nuværende overvågning af de danske søer medfører en betydelig usikkerhed i fastlæggelsen af den økologiske kvalitet og dermed i søernes for-

valtning. Der er en række rumlige og tidsmæssige begrænsninger i det nuværende overvågningsprogram, hvor anvendelsen af remote sensing ville være særdeles relevant.

I Tabel 5 er opstillet en opsamlende oversigt over perspektiver for brug af satellitdata til estimering af klorofylkoncentrationen i danske søer. Anvendelsen af remote sensing til at frembringe klorofylldata og information om søers miljøtilstand vil fremover være yderst interessant. Teknologien kan blive et væsentligt element i søovervågningen og dermed i forvaltningen af de danske søer. Dette gælder både i forhold til rumlige, tidlige og kvalitetsmæssige aspekter af fremtidens databehov og management af søer (Tabel 5).

For de fleste af problemstillingerne nævnt i Tabel 5 giver anvendelsen af satellitdata store perspektiver for en forbedret beskrivelse af tilstand og udvikling i søerne.

9.9 Udfordringer/forhindringer/begrænsninger/faldgruber

I tidligere kapitler er den planlagte opsendelse

Tabel 5. Fremtidige datakrav og muligheder i forhold til klorofylldata.

Ønske	Problemstilling	Perspektiver og muligheder med remote sensing
Bedre rumlig opløsning (både indenfor den enkelte sø og landsdækkende)	Overvågningen af søer sker i dag ved én punktmåling fra en centralt beliggende station, men der kan være store fladevariationer, som bl.a. illustreret i Figur 9. Kun omkring 13 % af de større danske søer dækkes ved den årlige overvågning, og der er et stort behov for en bedre dækning for at kunne give et landsdækkende billede	Meget store, teknologisk tilrådighed
Bedre tidlig opløsning	I de fleste søer tages der kun månedlige prøver om sommeren, hvilket giver et usikkert forvaltningsgrundlag, eftersom der kan ske store ændringer i søers indhold af klorofyl a indenfor få dage. De fleste søer undersøges kun hvert 6. år, hvilket også bidrager til en usikker databaggrund, da der kan være store variationer i såvel kemiske - som biologiske forhold fra år til år.	Meget store, teknologisk tilrådighed
Data om specifikke algetyper (f.eks. blågrønner)	Jvf. Vandrammedirektivet skal forekomsten og graden af algeopblomstringer indgå i vurderingen af søers vandkvalitet, men den nuværende overvågning tillader kun dette i meget begrænset omfang.	Store, inden for teknologisk rækkevidde, men kræver mere udvikling
Automatiseret dataindsamling, bearbejdning og præsentation	Et optimalt forvaltningsprogram omfatter en opdateret, dækkende, nem og hurtig dataadgang, som kun findes i et begrænset omfang i dag.	Meget store, inden for teknologisk rækkevidde men kræver udvikling

af forskellige satellitter gennemgået. Og det er beskrevet at der ikke er grund til at tvivle på at de relevante datatyper er tilgængelige og at der vil være mere tilgængeligt i løbet af en kortere år-række.

Men uanset at de nødvendige satellitdata er til rådighed vil der være en række begrænsninger og forbehold ved at anvende satellitdata i miljøadministrationen. Det vil være vigtigt at have for øje hvilke typer satellitdata der kan anvendes i hvilke søtyper og med hvilket præcisionsniveau informationen bliver tilgængelig.

Eksempelvis vil det være problematisk at vurdere klorofylindholdet i klarvandede, lavvandede søer og områder af søer, hvor undervandsplanter vil give et kraftigt (og misvisende) klorofyl a signal, hvis der ikke korrigeres herfor. Det vil også give udfordringer at isolere reflektans fra trådalger og flydebladsvegetation i overfladen, ligesom lyset i klarvandede søer uden planter på bunden kan reflekteres fra den mørke bund og give et misvisende signal.

Generelt vil der være relativt flere usikkerheder på klorofylestimatet desto mere klarvandede og rene søerne er. De klarvandede søer opfylder imidlertid oftest målsætningen. Det største potentiale ligger formentligt snarere i de mere næringsrige søer, som er i risiko for ikke at opfylde målsætningen og som er mål for den operationelle overvågning. I disse søer vil klorofylkoncentrationen typisk være høj og som det er vist i kapitel 4 ligge indenfor det klorofylniveau som bedst bliver beskrevet ud fra satellitbillederne.

I dybe søer eller dybe områder af lavvandede søer, vil metoden dog også være anvendelig i de mere næringsfattige søer. Registreringen af remote sensing data kan evt. kobles til et dybdekort over søen, så lavvandede partier undgås. Metoden er derimod sandsynligvis ikke anvendelig i brunvandede søer.

Under alle omstændigheder vil det være nødvendigt at afklare eksempelvis ovenstående forhold og tage højde for eventuelle usikkerheder inden satellitdata kan anvendes i miljøadministrationen. Indtil videre kan dette kun afklares via feltobservationer, og der er således ingen tvivl om, at der er behov for yderligere udvikling af

metoden, inden det er muligt at tage teknikken i brug i en administrativ sammenhæng.

Brugen af satellitbaserede målinger kan derfor ikke fuldstændig erstatte den traditionelle prøvetagning, men supplere denne med ekstra data i forhold til hyppighed, rumlig variation samt dækning af søer, der i dag ikke er en del af monitoringsprogrammet. De traditionelle målinger er udover deres nuværende brug samtidig helt nødvendige for at sikre kalibrering af satellitdata og dermed modellernes nøjagtighed.

Videre skal man også gøre sig klart at der i forbindelse med udvikling af algoritmer stadig er en række udfordringer. Det drejer sig blandt andet om nøjagtigheden på atmosfærekorrek-tionen af data – vil man bruge data operationelt skal data behandlingen baseres på en metode hvor relevant atmosfæreinformati-on tilsvarende er tilgængeligt operationelt eller kan modelleres/estimeres med tilstrækkelig nøjagtighed. De kommende års stadigt stigende antal relevante sensorer der bliver tilgængelige kunne endvidere tale for udviklingen af et sensor-uafhængigt værktøj til estimeringen af klorofyl. Ved at inddrage data fra flere sensorer vil man øge sandsynligheden for tilgængeligt data i den ønskede kvalitet.

Kortlægning af klorofyl fra satellit baseres på optiske satellitter hvilket betyder, at der kun kan observeres under skyfri forhold. Dette er en begrænsning for metoden især i et område som Danmark med hyppig forekomst af skyer. Af samme grund er modelintegration vigtig, da en model fortsat kan levere opdateret information selvom der er skyer. Så snart brugbare informationer fra satellit igen er tilgængelige, kan disse integreres og modellen kan kalibreres på plads.

En ting som medvirker til at reducere problemet med skyer er, at antallet af satellitpassager generelt forøges i takt med at teknologien udvikler sig. Satellitter med lav rumlig opløsning optager dagligt eller flere gange dagligt. Selvom det samme principielt er muligt for de meget højtopløselige satellitter er det ikke muligt rent prismæssigt på nuværende tidspunkt. Imidlertid forventes priserne generelt at falde efter hånden som flere og flere højtoplø-

selige satellitter opsendes og konkurrencen skærpes, samtidig med at optagekapaciteten generelt bliver bedre og bedre.

I denne rapport er der ridset en række usikkerheder og begrænsninger op, som er nødvendige at have for øje ved inddragelse af satellitteknologi som supplement til traditionelle overvågningsmetoder. For en egentlig implementering i overvågningssammenhæng skal disse usikkerheder og begrænsninger kvantificeres.

10 Behov for mere viden

Som det tidligere er beskrevet, er der kun ganske få erfaringer omkring anvendelse af satellitdata til fastlæggelse af klorofylniveauer i søer og stort set ingen fortilfælde for en administrativ anvendelse af denne information. I Danmark har satellitdata ikke været anvendt i søer og derfor skal RASK også ses som et første skridt til opbygning af erfaring og udvikling af metoder til håndtering af satellitdata for søer og vurdering af miljøtilstand på baggrund heraf.

Resultaterne i RASK, som er beskrevet i denne rapport, skal derfor nødvendigvis suppleres med yderligere undersøgelser inden en implementering kan finde sted i den danske miljøadministration. Nogle af de yderligere undersøgelser, som med fordel kan igangsættes er følgende:

- Kalibrering af højtopløselige satellitdata (Landsat opløsning 30 m eller bedre) på søtypeniveau med henblik på at udvikle algoritmer, der er operationelle i en administrativ sammenhæng til bestemmelse af klorofylkoncentration i flere søer.
- Analyse af eventuel effekt af signal fra søbund, makrofytter eller trådalger i forskellige søtyper.
- Analyse af betydningen af suspenderet stof og vandets egenfarve for estimering af klorofylkoncentrationen.
- Analyse af udviklingen i klorofylkoncentrationen nationalt/regionalt gennem den seneste ti årige periode ved anvendelse af udviklede Landsat-algoritmer og en sammenligning med den udvikling, som er beskrevet på baggrund af de traditionelle målinger i kontrolovervågningens intensive søer.
- Pixelstørrelse og søernes randeffekt vil have størst betydning i mindre søer. Det er relevant at analysere denne randeffekt for satellitbilleder med henblik på at udvikle metode til håndtering/kompensering af denne, således at satellitovervågning kan bringes i spil i forhold til mindre søer ned til 1 hektar.
- Nærmere analyse af usikkerheder og variationer på data og analyse af resulterende præcisionsniveau ved en kombination af satellitdata og traditionelle monitoringsdata.
- Fastlæggelse af relative klorofylniveauer mellem søer til beskrivelse af tilstand og udvikling i enkelt søer vil i visse tilfælde dække informationsbehovet.
- Muligheden for at anvende satellitdata til andre overvågningsformål, for eksempel til at vurdere forekomsten af undervandsplanter i søer.
- Case study i udvalgte søer/søtyper i Danmark i samarbejde med Naturstyrelsen til test af muligheder/vilkår for implementering af remote sensing i det danske overvågningsprogram.
- Case study til beskrivelse af udfordringer for implementering i det øvrige EU.

11 Administrationsværktøj til satellitovervågning af søer

Effektiv administration af de danske søer bygger på viden om tilstand og udvikling skabt på baggrund af monitoringsdata. Monitoring foretages som tidligere nævnt i dag med relativ lille frekvens og sjældent på mere end en station per sø. Anvendelse af satellitdata som et supplement til de traditionelle monitoringsdata vil øge vidensniveauet i både tid og rum. Ved at indbygge satellitbillederne i et operationelt værktøj kan de traditionelle monitoringsdata ekstrapoleres til en generelt øget viden om søernes status og udvikling.

Et kosteffektivt administrationsværktøj skal være i stand til at håndtere store mængder af data og tilgodese miljøsagsbehandlerens behov for viden inklusive muligheder for beskrivelse af statistisk variation.

I det følgende vil et eksempel på de muligheder som et administrationsværktøj kan indeholde blive gennemgået. Det antages, at værktøjet indeholder og præsenterer klorofylldata indhentet såvel via traditionel prøvetagning som fra satellitbilleder uanset i hvilket forhold data måtte forekomme.

I værktøjet præsenteres søerne på et oversigtskort, hvor søens tilstand i forhold til klorofyl indikeres ud fra en farveskala. Oversigtskortet skaber et visuelt overblik over forskelle mellem

søerne og i tilfælde, hvor satellitdata med tilstrækkelig høj horisontal opløsning er tilgængelige, kan også horisontale variationer i de enkelte søer vises. De horisontale variationer i en sø kan beskrives med f.eks. angivelse af gennemsnit, minimum, maksimum og standard afvigelse (Tabel 6) baseret på dels satellitbillederne og dels på monitoringsdata. Ved at analysere data fra en sæson eller over en årække kan udviklingen i søerne følges og dokumenteres. Via GIS-baserede pc-løsninger og gennem enkle procedurer gør værktøjet det muligt at vurdere tilstanden og følge udviklingen i et givent vandområde.

Et fagligt velfunderet værktøj kan implementeres i den danske miljøforvaltning og anvendes til overvågning af tilstanden i kendte større søer og til ny viden om mindre vandområder med ringe eller intet forhåndskendskab. Værktøjet vil desuden give mulighed for i højere grad at opdage og følge algeopblomstringer.

Administrationsværktøjet kan implementeres i forskellige niveauer, der afhænger af vidensbehov og datatilgængelighed fra henholdsvis satellit og traditionel monitoring:

- Niveau 0: Vandområdets udbredelse og udvikling i udbredelse.

Tabel 6 Eksempel på statistisk data fra WorldView billedet 18-04-2012 (Figur 9). nd = søer hvor data ikke kunne beregnes pga. sigt til bund.

Sø	Gennemsnit	Minimum	Maksimum	Standard afvigelse
Slåen Sø	8,9	0,3	15,2	2,8
Julsø	10,2	0,3	31,7	7,4
Borre Sø	8,0	0,3	26,7	4,9
Brassø	9,6	0,3	18,5	4,3
Almind Sø	5,0	0,3	13,5	3,2
Ørn Sø	40,8	26,7	56,4	4,7
Silkeborg Langsø øst	24,1	6,9	33,3	4,0
Silkeborg Langsø vest	39,2	23,4	46,5	4,3
Schoubyes Sø	nd	nd	nd	nd
Lyngsø	29,0	26,8	35,0	3,3

- Niveau 1: Overordnet tilstandsbeskrivelse.
- Niveau 2: Klorofylkoncentration (overordnet algoritme).
- Niveau 3: Klorofylkoncentration (finjusteret algoritme).
- Niveau 4: Klorofylkoncentration (specifikke algoritmer).

De lavere niveauer (0-2) kan implementeres de fleste steder i verden og vil især i områder uden eller med ringe viden om vandområdernes tilstand kunne bidrage til øget viden om tilstand og udvikling. Således vil Niveau 0 være egnet til områder, hvor man ønsker at kortlægge vandressourcer, vandmangel eller oversvømmelser. Niveau 1 og 2 kan implementeres i områder, hvor der er et ønske om at opbygge et kendskab til den økologiske tilstand men med minimal tradition for indsamling af monitoringsdata. Niveau 3 vil være basisniveau i lande med tradition for monitoring og hvor administrationsværktøjet skal virke som supplement til eksisterende monitoringsprogrammer som f.eks. Danmark. Niveau 4 implementeres for søer med høj prioritet.

Niveau 0: Vådområdets udbredelse og udvikling

Niveau 0 repræsenterer det laveste niveau, der giver et satellitbaseret overblik over vådområdernes udbredelse - altså en simpel opdeling i vand og land. Således registreres vådområdernes udbredelse og det kan analyseres om vandområderne øges eller mindskes inden for et år og mellem forskellige år. Dette kan illustreres med et kort, der angiver procentdelen af tid et område er dækket af vand inden for en given tidsramme. Det vil også være muligt at angive om vådområdet er under udvikling eller svinder ind i forhold til tidligere år.

Niveau 1: Overordnet tilstandsbeskrivelse

I Niveau 1 udvides informationsniveauet med oplysninger om søernes miljøtilstand inddelt i 5 kategorier på baggrund af satellitdata for klorofyl a, men også sigtddybe, suspenderet stof og indhold af blågrønalg, hvis data giver mulighed for dette. Miljøtilstanden kategoriseres ud fra de indbyrdes forskelle mellem søerne, således at basisværktøjet kan anvendes i områder, hvor der er ringe viden om vandområdernes tilstand og kun få data (det vil sandsynligvis være nødvendigt at indhente et minimum af data). Med flere registreringer vil der kunne påvises en udvikling i

søernes miljøtilstand (uændret, stigende eller faldende) inden for en given periode eller for de enkelte søer.

Niveau 2: Klorofylkoncentration (overordnet algoritme)

Dette niveau anvendes i områder, hvor der er vidensbehov for et egentligt klorofylniveau og hvor der er et minimum af monitoringsdata tilgængeligt til kalibrering af satellitdatas algoritmer. På baggrund af data fra et mindre antal søer udvikles algoritmer, der anvendes på alle søerne i området som et overslag over aktuelle klorofylkoncentrationer. Klorofylkoncentrationen for de forskellige isolerede vandområder angives som et gennemsnit over området inden for intervalspring på f.eks. 10 µg/l (<10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 og > 50).

Niveau 3: Klorofylkoncentration (finjusteret algoritme)

Dette niveau kan oprettes i områder, hvor der er behov for en mere præcis angivelse af klorofylkoncentrationen og eventuelt med ønske om udvidet kendskab til de enkelte søers rumlige variationer. For at udvikle og finjustere algoritmerne til bestemmelse af klorofylkoncentrationen med stor sikkerhed er data fra monitoringsprogrammer for et stort antal søer i området påkrævet. Algoritmerne til estimering af klorofylkoncentrationen finjusteres på baggrund af historiske og nye data for et udvalg af søer, der repræsenterer forskellige typer (lavvandede/dybe, oligotrofe/eutrofe osv.). Efterfølgende analyseres, hvorvidt algoritmerne kan overføres til søer af samme type, for mindre omkostningstungt at kunne inddrage flere søer under en mere sikker beskrivelse af klorofylkoncentrationen. Præcisionsniveauet af klorofylkoncentrationen er øget og horisontale variationer inden for de enkelte søer vil kunne angives og analyseres. Øget frekvens af data (hyppige satellitoverflyvninger) og information om horisontale variationer giver et stærkt værktøj, der kan anvendes som supplement og i sammenhæng med de traditionelle monitoringsdata.

Niveau 4: Klorofylkoncentration (specifikke algoritmer)

I søer med høj prioritet, hvor der ønskes detaljviden finjusteres algoritmerne til estimering af klorofylkoncentrationen i den pågæ-

dende sø. Finjusteringen kan indeholde en undersøgelse af om inddragelse af støtteparametre, som f.eks. vandets egenfarve, indhold af suspenderet stof, dybdeforhold (signal fra bund) og makrofytter øger algoritmens styrke. Herudover undersøges tillige om andre satellitdata vil kunne bidrage til øget viden og forståelse for søens tilstand og udvikling, som f.eks. sigtddybde, suspenderet stof og indhold af blågrøn alger og om data kan angives med kvalitetssikringsniveau. I søer hvor effekten af et indgreb (f.eks. reduceret næringsstofbelastning eller øget gennemstrømning) ønskes belyst, kan økologiske modeller anvendes som analyseredskab. Øget frekvens og kendskab til horisontale variationer af klorofyl styrker grundlaget for kalibrering af modellerne. Modellerne kan også anvendes som prognoseværktøj, som styrkes ved at optimere modellens initialfelt med satellitdata af høj kvalitet.

11.1 Tidshorisont og omkostninger

Generelt er satellitter med lav rumlig opløsning og med forholdsvis mange spektrale bånd bedst egnede til monitorering af klorofyl. Det skyldes deres hyppige, globale dækning samt muligheden for med de såkaldt smalle elektromagnetiske bånd at diskriminere de forskellige bestanddele i vandet. Samtidig er de fleste af disse datatyper gratis.

Til monitorering af mindre søer vil satellitter i høj eller mellem opløsning imidlertid være nødvendige.

Det vurderes, at de krævede datatyper med opsendelsen af Landsat Data Continuity Mission i februar 2013 og den første af to planlagte Sentinel-2 satellitter i 2014 vil være tilgængelige inden næste vandplanperiode fra 2016.

I områder med hyppig forekomst af skyer vil antallet af brugbare billeder være reduceret. Der kan være sæsonvariationer, således at optageforholdene i nogle sæsoner er gode mens de i andre sæsoner er mindre gode. Sæsonvariationer gør sig også gældende med hensyn til vinteroptagelser, idet perioder med lave solvinkler ikke er egnede til monitorering af vand fra satellit. Under danske forhold gælder det perioden oktober/november til februar/marts.

Udviklingsbehov

Til etablering af monitoringsværktøj er følgende faser nødvendige:

- Programmering af front-end til administrationsværktøj
- Videreudvikling og tilpasning af algoritmer til klorofylbestemmelse fra satellit
- Integration af satellitbilleder og måledata i nær real tid

Omkostningen vil være lavest for et værktøj der kan beskrive svarende til niveau 0, mens betydeligt mere tid er påkrævet for at udvikle et værktøj som kan lave beskrivelser på niveau 4.

Tidsplan

Det er muligt at udvikle et administrationsværktøj, så det kan være klart til indfasning i den danske vandforvaltning i løbet af den næste planperiode. Imidlertid kræver det hurtig igangsætning af de nødvendige forberedende aktiviteter.

Optimering af ressourcer

En analyse af omkostningerne til at opbygge et administrationsværktøj til brug i den nationale vandforvaltning ligger uden for dette projekt. For at illustrere omkostningerne til levering af relevante tjenesteydelser af et færdigudviklet værktøj, hvor den nødvendige udvikling af rutiner og infrastruktur til datahåndtering er på plads, skønnes det meget groft at kunne drives indenfor en ramme af størrelsen et halvt mandår. Imidlertid er dette i meget høj grad afhængig af krav om indhold, funktionalitet i værktøjet, analyser der skal gennemføres mv. Skønnet skal derfor tages med al mulig forbehold og det kan gøres såvel dyrere som billigere. En nærmere afklaring vil kræve nærmere dialog om specifikationer.

12 Markedspotentiale

Satellitovervågning er velkendt i blandt andet marine miljøer. I ferskvand er der om muligt endnu større behov for viden om vandressourcers og disses miljøkvalitet. Indtil for ganske få år siden har teknikken imidlertid ikke gjort det muligt at anvende satellitbilleder til tilstrækkelig præcis information. Indenfor ganske få år vil det være muligt at hente tilstrækkeligt højt opløselige data i hyppig frekvens og til en konkurrencedygtig pris, således at det vil være muligt at anvende satellitbilleder til overvågning i ferskvand. Dette giver en unik mulighed for at positionere dansk ekspertise internationalt på dette område. Der er i dag forholdsvis begrænset forskning og anvendelse tilgængelig omkring estimering af klorofyl i søer baseret på satellitdata. De aktiviteter, der er undervejs på europæisk plan, har endvidere ofte et bredere perspektiv og savner muligheden for lokale tilpasninger i forhold til lokale brugeres behov. DHI og GRAS er førende indenfor assimilering af klorofyl på det marine område og med denne viden er dansk teknologi gunstigt stillet også med hensyn til eksportpotentialet for satellitovervågning i ferskvand og udvikling af et integreret administrativt overvågningssystem.

Med henblik på markedsføring af en nyudviklet satellitbaseret monitorings teknik er det afgørende at kunne dokumentere, at metoderne er velkalibrerede, videnskabelig solidt underbyggede samt anvendelige i forhold til en forlængelse af eksisterende historiske tidsserier. For anvendelse i overvågnings-programmet er det ligeledes vigtigt, at metoderne er operationelle og brugervenlige.

12.1 Danmark

Der er et stort behov for opdateret viden om tilstand og udvikling i danske søer og vådområder. Begrænsede ressourcer gør det nødvendigt at supplere den traditionelle prøvetagning med ny teknologi og i den forbindelse er det relevant at anvende satellitbilleder til information om miljøstatus og udvikling. Vandrammedirektivet stiller store krav til vidensniveau.

I henhold til Vandrammedirektivet skal der således ske en overvågning af dels biologiske kvalitetsparametre herunder klorofyl men også af udviklingen af algeopblomstringer. Særligt i forhold til udvikling i algeopblomstring vil der være behov for viden om såvel fladeudbredelse som udvikling med hyppig datafrekvens, hvilket stiller store udfordringer til overvågningsteknologien.

Det vurderes således at der vil være efterspørgsel efter et kosteffektivt værktøj som kan øge vidensniveauet om danske søer i såvel tid som rum.

Det er imidlertid afgørende at et administrationsværktøj er målrettet til anvendelse i den nationale overvågning og vandplanlægning. Udvikling og implementering skal derfor ske i tæt samarbejde med slutbrugeren, som primært er staten og Naturstyrelsen men også kommunerne kan være relevante samarbejdspartnere i denne sammenhæng.

Igangværende forskningsaktiviteter og udviklingsprojekter indenfor området har i udpræget grad storskala fokus – f.eks. europæisk eller globalt. Erfaringer fra tidligere og nuværende GMES services der har tilsvarende storskala tilgang viser, at der ofte er behov for yderligere tilpasning til lokale forhold (f.eks. lovgivning, tradition, sprog, data format) for at information skal blive bredt tilgængelig. Det er således afgørende at et dansk monitoringsværktøj baseres på danske aktørers erfaringer med danske forhold – evt. som en overbygning på kommende europæiske services.

12.2 EU

Vandrammedirektivets krav i Danmark er også gældende i det øvrige EU. I enkelte lande er det eksisterende vidensniveau nogenlunde som i Danmark. Her vil der tilsvarende være et behov for information om de enkelte søer og en

mere præcise beskrivelse af status, udvikling og rumlig variation.

I andre EU-lande vil det eksisterende vidensniveau være begrænset og her vil der sandsynligvis i højere grad eksistere et behov som beskrevet for administrationsværktøjets niveau 2.

Under alle omstændigheder er der en bred erkendelse i hele EU om den store udfordring man står overfor i relation til at opfylde dokumentationskravene i Vandrammedirektivet på en kosteffektiv måde. En udfordring som realistisk set kun kan løses ved inddragelse af ny teknologi – herunder satellitbaserede data.

I forhold til danske aktørers muligheder på EU niveau vil mulighederne formentlig primært ligge i tilpasning og overbygning af funktioner baseret på mere generelle storskala projekter. Storskala projekter ses ofte alene på grund af deres størrelse at være relativt ufleksible i forhold til lokale tilpasninger og til enkelte brugeres specifikke behov.

12.3 Udland i øvrigt

Internationalt er der ligeledes store perspektiver i udvikling af satellitbaseret overvågning. I områder med svag institutionel og logistisk infrastruktur samt svag kemisk og biologisk analysekapacitet er traditionelle registrerings- og overvågningsprogrammer meget vanskelige at gennemføre. Remote sensing teknologier vil her kunne give værdifulde kvalitetsdata, der kan anvendes i vandressourceforvaltningen til registrering og udvikling, planlægning, overvågning og evaluering. Det vurderes derfor, at der vil være et marked for remote sensing teknologien, ikke alene i den fattige del af den 3.verden, men også i udviklingsbrændpunkter som Kina, Indien og Brasilien

Der har i de seneste år været en lang række bi- og multilaterale udviklingsprojekter, der har haft til målsætning at kortlægge overfladevandforekomster og kvalitet. Remote sensing teknologi kunne med stor fordel have været sat i spil her.

13 Samlet konklusion

Der er store perspektiver i at anvende satellitbilleder til overvågningen af søer. Begrænsede ressourcer til natur- og miljøovervågning sætter behovet for dokumentation under pres og en øget anvendelse af ny teknologi kan forbedre mulighederne for øget overvågning i såvel tidsmæssig som rumlig opløsning og med data fra flere lokaliteter og hyppigere målinger.

Indtil videre vurderes søers økologiske tilstand og opfyldelse af Vandrammedirektivets målsætninger udelukkende på baggrund af indhold af klorofyl α i søvandet. Vandrammedirektivets anvendelse af klorofylkoncentrationen som parameter for målopfyldelse gør brug af satellitbilleder i miljøadministrationen indlysende. Spektralanalyse af satellitbilleder kan netop estimere indholdet af klorofyl α og er derfor meget relevant både for at øge overvågningsfrekvensen og for at dække flere søer. Satellitbaseret overvågning har været anvendt i en årrække i marine vandområder. I de senere år er nøjagtighed og detaljeringsgrad blevet forbedret, så det nu også er muligt at anvende teknikken i ferskvandsmiljøer. Samtidig bliver de nødvendige datakilder billigere og lettere tilgængelige.

Allerede i dag er det muligt at få information om klorofylkoncentrationer i vore søer på et meget detaljeret niveau. RASK's analyse af Worldview 2 satellitdata med 2 meters opløsning over søerne i Silkeborgområdet viser, at det er muligt at foretage både en detaljeret bestemmelse af klorofylkoncentrationen samt en detaljeret kortlægning af den horisontale variation i søer med varierende økologisk kvalitet.

Ud fra de højtopløselige satellitbilleder kunne eksempelvis de høje klorofylkoncentrationer i de belastede Silkeborgsøer som Ørn Sø og Silkeborg Langsø beregnes og tilsvarende de meget lave klorofylniveauer i de rene søer Almind Sø og Slåen Sø. Videre gav satellitbillederne en værdifuld ekstra information omkring den horisontale variation og dynamikken i søerne over tid.

I forhold til den almindelige overvågning af søer er en meget stor detaljeringsgrad dog sjældent

nødvendig – her vil data i en lavere opløsning (f.eks. 10 – 30 meter) sandsynligvis dække behovet og hvor det må forventes, at højtopløselige data også i de kommende år skal købes vil billeddata i den lidt mindre opløsning blive gjort tilgængelige under en 'open data policy' og vil ydermere være betydeligt mere sensitive end de nuværende datakilder med tilsvarende opløsning. Det vurderes, at særligt Sentinel-2 satellitten vil blive en yderst vigtig og brugbar kilde til information om miljøet i ferskvand fremover. Indtil Sentinel-2 opsendes i 2014 vil den nyeste Landsat satellit (LDCM, opsendes februar 2013) være en værdifuld informationskilde. Med den øgede sensitivitet på Sentinel-2 og LDCM vil man f.eks. bedre kunne kortlægge både absolutte klorofylværdier og den horisontale fordeling. Men allerede nu viser vore analyser at det med de tilgængelige satellittyper er muligt at fastlægge klorofylkoncentrationer i søer og for de større søer også påvise variationen i klorofylniveauet i de forskellige dele af søerne.

Der er imidlertid også begrænsninger ved metoden og det vil eksempelvis være problematisk at vurdere klorofylindholdet i klarvandede, lavvandede søer/områder, hvor undervandsplanter vil give et kraftigt (og misvisende) klorofyl α signal. Her vil det være nødvendigt med særlige undersøgelser og algoritmer. Brugen af satellitbaserede målinger kan derfor ikke erstatte den traditionelle prøvetagning, men typisk supplere denne med ekstra data i forhold til hyppighed, rumlig variation samt dækning af søer, der i dag ikke er en del af monitoringsprogrammet. De traditionelle målinger er udover deres nuværende brug samtidig helt nødvendige for at sikre kalibrering af satellitdata og dermed modellernes nøjagtighed.

Udvikling af et administrationsværktøj der kan kombinere satellitdata med traditionelle klorofylmålinger kan ske med udgangspunkt i de satellitdata, der er tilgængelige i dag og kan være på plads, når de forbedrede satellitdata

med hyppigere frekvens vil være tilgængelige i løbet af en kortere årrække. Det vil således være realistisk at kunne anvende remote sensing i overvågningen i den kommende planperiode (2015 – 2018), således at resultaterne kan anvendes til udformning af 3. generation vandplanen. For at sikre at værktøjet kan anvendes i den danske miljøadministration skal produktudviklingen ske i dialog med de relevante danske myndigheder og tilpasses Vandrammedirektivets behov for dokumentation.

Sammenfattende vurderes det at remote sensing i søer kan anvendes i relation til:

- bedre rumlig opløsning på landsplan og indenfor den enkelte sø.
- indhentning af information fra de mere end 3000 søer over 1 ha, der er i Danmark.
- bedre tidlig information over sæsonen og mellem år
 - der kan være meget stor variation i klorofylniveau mellem år. Det gennemsnitlige klorofylniveau danner baggrund for vandplanernes målsætning og er derfor afgørende i forhold til administration af de enkelte søer.
- I Vandrammedirektivet er der krav om at følge eventuelle algeblooms. Dette medfører et behov for et kendskab til blandt andet frekvens og størrelse af blooms.
 - der kan være meget store variationer indenfor den enkelte sø
 - Det er svært at se alternativer til remote sensing for indhentning af denne information.

Men før dette vil være muligt skal der gennemføres en egentlig produktudvikling af et ”remote sensing værktøj”.

RASK skal således ses som første skridt og grundlaget for at være i stand til at vurdere klorofylindholdet i søer med brug af satellitoptagelser for en omkostningseffektiv miljøadministration og miljøindsats.

14 Referencer

- Alvarez, G.A., Salinas, R.A., og Malthus, T.J. (2007).** Integrating CFD modelling, neural networks and remote sensing: controlled prediction of chlorophyll-a concentration in the Mejillones of South Bay. *Computer Vision, IET*, 1, 55-65.
- Allan, M., D. P. Hamilton, B. J. Hicks, and L. Brabyn. (2011).** Landsat remote sensing of chlorophyll a concentrations in central North Island lakes of New Zealand. *International Journal of Remote Sensing* 32:2037-2055.
- Berg, K., Järnefelt, H., Strøm, K. og Thunmark, S. (1958).** Furesøundersøgelser 1950-1954. *Limnologiske Studier over Furesø's Kulturpåvirkning. Folia Limnologica Scandinavica*. No. 10: 7-189
- Binding, C., T. Greenberg, J. Jerome, R. Bukata, and G. Letourneau. (2011).** An assessment of MERIS algal products during an intense bloom in Lake of the Woods. *Journal of Plankton Research* 33:793-806.
- Dall'Olmo, G. og Gitelson, A. A. (2005).** Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Appl. Opt.* 44. 412-422
- Dekker, A. (1993).** Detection of the optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. PhD Thesis, Free University, Amsterdam, The Netherlands
- De Stasio, B.T., Hill, D.K., Kleinhans, J.M., Nibbelink, N.P. og Magnuson, J.J. (1996).** Potential effects of global climate change on small North-temperate lakes: physics, fish, and plankton. *Limnology and Oceanography* 41: 1136-1149.
- DHI (2009).** DHI eutrophication model 1 – Including sediment and benthic vegetation. ECO Lab template. A scientific description. Ed. 3.1. DHI rapport, DHI, Hørsholm, Denmark.
- DHI (2011).** FEMA-FEHY (2011). Fehmarnbelt fixed Link EIA. Fauna & Flora Baseline –Marine Biology Volume IV. Water Quality, Plankton and Jellyfish of the Fehmarnbelt Area. Report No. E2TR0020. 206 pp.
- Doerffer, R. og Schiller, H. (2007).** The MERIS Case 2 water algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, Nos. 3-4, 517-535.
- Doerffer, R. og Schiller, H. (2008).** MERIS Regional Coastal and Lake Case 2 Water Project - Atmospheric Correction ATBD, GKSS Research Center 21502 Geesthacht Version 1.0 18. May 2008
- ESA (2006).** MERIS Handbook. <http://envisat.esa.int/handbooks/meris/>
- ESA (2009).** ESA Member States approve full and open Sentinel data policy principles. http://www.esa.int/esaEO/SEMXX570A2G_environment_o.html
- Fragoso, Jr.C.R., Marques, D.M.L.M., Collischonn, W., Tucci, C.E.M. og van Nes, E.H. (2008).** Modelling spatial heterogeneity of phytoplankton in Lake Mangueira, a large shallow subtropical lake in South Brazil. *Ecological Modelling*, 219:125-137.
- Gordon H.R. et al. (1983).** Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied Physics* 22 (1). 20-36.
- Guanter, L., Ruiz-Verdu, A., Odermatt, D., Fgiardino, C., Simis, S., Estelles, V., Heege, T., Dominguez-Gomez, J.A. og Moreno, J. (2010).** Atmospheric correction of ENVISAT/MERIS data over inland waters: Validation for European lakes Remote Sensing of Environment, Volume 114, Issue 3, 15 March 2010, Pages 467-480
- Hamilton, D.P. (1999).** Numerical modelling and lake management: applications of the DYRESM model. In Tundisi, J.G. and Straskraba, M. (eds), *Theoretical Reservoir Ecology and Its Applications*. Backhuys Publishers, The Netherlands: 153-174.
- Hansen, L. B., Tornfeldt Sørensen, J. V., Erichsen, A. C., Kronborg, M., Larsen, J. og Kaas, H. (2008).** Operational data assimilation and marine forecasting based on ENVISAT data covering Danish waters (2006 – 2007). Proceedings, 2nd MERIS/(A)ATSR User Workshop, 22 – 26 September 2008.

- Higgins, W.H., Wright, S.W. & Schlüter, L. (2011).** Quantitative interpretation of chemotaxonomic pigment data. *In* *Phytoplankton Pigments: Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography*. Eds. Roy, S., Llewellyn, C.A., Egeland, E.S., & Johnsen, G.. Cambridge Univ. Press, SCOR.
- Hooker S.B., Van Heukelem L., Thomas C.S., Claustre H., Ras J., Barlow R., Sessions H., Schlüter L., Perl J., Trees C., Stuart V., Head E., Clementson L., Fishwick J., Llewellyn C. & Aiken J. (2005)** The Second SeaWiFS HPLC Analysis Round-Robin Experiment (SeaHARRE-2). NASA Technical Memorandum 2005-212785, pp. 112. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- Koponen, S., Ruiz-Verdu, A., Heege, T., Heblinski, J., Sorensen, K., Kallio, K., Pyhälähti, T., Doerffer, R., Brockmann, C. og Peters, M. (2008).** Development of MERIS lake water algorithms – Validation report. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology Version 1.01, 26 June 2008.
- Kovalevskaya, N., Kirillov, V. og Drost, H. (2010).** WorldView-2-based evaluation of algorithms for water quality detection in case of eutrophic reservoir (Southwest Siberia). Submitted for the Digital Globe 8-band Challenge competition.
- Krogsgaard Jensen, J. og Closter, R.M. (2011).** Rent vand i Mølleåsystemet. Supplerende beregninger i relation til VVM for projektet. DHI-Rapport. DHI, Hørsholm, Danmark. ID: 11808823.
- Københavns Amt (2004).** Vandmiljøovervågning Furesø 2003. Københavns Amt, Teknisk Forvaltning
- MarCoast (2010).** Service Provider Validation Report - Water Quality Monitoring (S3). Available from www.gmes-marcoast.info (contact ESA for permission)
- Martimort, P., Berger, M., Carnicero, B., Del Bello, U., Fernandez, V., Gascon, F., Silvestrin, P., Spoto, F., Sy, O., Arino, O., Biasutti, R. og Greco, B. (2007).** ESA Bulletin 131: Sentinel-2.
- Odermatt, D., C. Giardino, and T. Heege. (2010).** Chlorophyll retrieval with MERIS Case-2-Regional in perialpine lakes. *Remote Sensing of Environment* 114:607-617.
- O'Reilly J.E. et al. (2000).** SeaWiFS Post Launch Calibration and Validation Analyses: Part 3. Hooker, S.B., Firestone, E.R. NASA Tech. Memo. 11, 2000-206892. NASA Goddard Space Flight Center.
- Pulliainen, J., Kallio, K., Eloheimo, K., Koponen, S., Servomaa, H., Hannonen, T., Tauriainen, S. og Hallikainen, M. (2001).** A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data. *Sci. Total Environ.* 268. 79-93
- Rasmussen, E.B. (1991).** A finite difference scheme for three dimensional modelling of fluid dynamics. *Proceedings of IAHR, Madrid, Spain.* 1991. 339-348.
- Ruddick, K.G., Gons, H.J., Rijkeboer, M. og Tilstone, G. (2001).** Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties. *Appl. Opt.* 40. 3575-85
- Ruiz-Verdú, A., Koponen, S., Heege T., Doerffer, R., Brockmann, C., Kallio, K., Pyhälähti, T., Peña R., Polvorinos, Á., Heblinski, J., Ylöstalo, P., Conde, L., Odermatt, D., Estellés, V. og Pulliainen, J. (2008).** Development of MERIS lake water algorithms: Validation results from Europe. *Proc. of the '2nd MERIS / (A)ATSR User Workshop', Frascati, Italy 22-26 September 2008 (ESA SP-666, November 2008)*
- Sand-Jensen, K. (2003).** Den sidste naturhistoriker. Naturforkæmperen og videnskabsmanden Carl Wesenberg-Lund. Gad, København, 240 s.
- Schmidt, M. og Lipson, H. (2009).** Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data. *Science*: 324: 81-85
- Schlüter, L., T.L. Lauridsen, T. Jørgensen & G. Krogh (2006).** Identification and quantification of phytoplankton groups in lakes using new pigment ratios - a comparison between pigment analysis by HPLC and microscopy. *Freshw. Biol.* 51: 1474-1485.
- Schlüter, L. F. Møhlenberg, H. Havskum & S. Larsen (2000).** The use of phytoplankton pigments for identifying and quantifying phytoplankton groups in coastal areas; testing the influence of light and nutrients on pigment/chlorophyll a-ratios. *Mar.Ecol.Prog.Ser.* 192: 49-63.
- Schroeder, Th., Behnert, I., Schaale, M., Fischer, J. og Doerffer, R. (2007).** Atmospheric correction algorithm for MERIS

- above case-2 waters, *International Journal of Remote Sensing*, 28:7, 1469 – 1486
- Seppälä, J., Ylöstalo, P., Kaitala, S., Hällfors, S., Raateoja, M. and Maunula, P. (2007).** Ship-of-opportunity based phycoerythrin fluorescence monitoring of the filamentous cyanobacteria bloom dynamics in the Baltic Sea. *Euarine, Coastal and Shelf Science*. 73: 489-500
- Silva, C., DelValls, T. A. og Martín-Díaz, M.L. (2011).** Environmental monitoring and mapping in a tidal salt marsh creek affected by fish aquaculture using Worldview-2 multispectral imagery. *Geospatial World Forum 2011 - Dimensions and Directions of Geospatial Industry*. 18-21 January 2011, Hyderabad, India.
- Spillman, C.M., Imberger, J., Hamilton, D.P., Hipsey, M.R., og Romero, J.R. (2007).** Modelling the effects of Po River discharge, internal nutrient cycling and hydrodynamics on biogeochemistry of the Northern Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*, 68, 167-200.
- Stumpf, R.P. og Tyler M.A. (1988).** Satellite detection of bloom and pigment distributions in estuaries. *Remote Sens. Environ.* 24. 385-404
- Stumpf, R.P., Holderied, K. og Sinclair, M. (2003).** Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48 (1), 547-556.
- Trolle, D., Jeppesen, E. og Jørgensen, T.B. (2006).** Modelling af scenarier for næringsstofforførelsen påvirkning af den økologiske kvalitet i Ravn Sø – Lake Agwapan. Rapport til Aarhus Amt af Danmarks Miljøundersøgelser, januar 2006, 56 sider.
- Trolle, D., Skovgaard, H. og Jeppesen, E. (2008a).** The Water Framework Directive: Setting the phosphorus loading target for a deep lake in Denmark using the 1D lake ecosystem model DYRESM-CAEDYM. *Ecological Modelling*, 219: 138-152.
- Trolle, D., Jørgensen, T.B. and Jeppesen, E. (2008b).** Predicting the effects of reduced external nitrogen loading on the nitrogen dynamics and ecological state of deep Lake Ravn, Denmark, using the DYRESM-CAEDYM model. *Limnologica*, 38: 220-232.
- Trolle, D., og Søndergaard, M. (2010).** Udvikling og anvendelse af empiriske og dynamiske sømodeller. Rapport til Naturstyrelsen (www.nst.dk), december 2010, 35p.
- Wesenberg-Lund, G. et al. (1917).** Furesøstudier - en bathymetrisk, botanisk zoologisk undersøgelse af mølleaaens søer. Det Kongelige Danske Videnskabers Selskabs Skrifter R8 3: 1-208.
- Wilhelm C., Rudolph I. & Renner W. (1991).** A quantitative method based on HPLC-aided pigment analysis to monitor structure and dynamics of the phytoplankton assemblage – A study from Lake Meerfelder (Eifel, Germany). *Archiv für Hydrobiologie*, 123: 21-35.



Naturstyrelsen
Haraldsgade 53
DK-2100 København Ø
Tlf.: (+45) 72 54 30 00

www.nst.dk