



Sikkert Søbad II Sikring mod fækale bakterier og giftige alger i badesøer MUDP-projekt

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Stig Jonassen, Skanderborg Forsyning A/S

Sara Starcke, NIRAS A/S

Michael R. Rasmussen, Aalborg Universitet

Rikke Markfoged, Teknologisk Institut

Lotte Bjerrum Friis-Holm, Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7564-010-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter indenfor miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	6
2.	Sammenfatning og konklusion	7
3.	Summary	9
4.	Introduktion	10
4.1	Formål med projektet	10
4.1.1	Valg af Knudsø som case	10
4.2	Sikkert Søbad I	10
4.3	Badevandskvalitet i søer	10
4.4	Fækale bakterier og blågrønalger	11
4.4.1	Fækale bakterier i søer	11
4.4.2	Blågrønalger	12
4.5	Knudsø	12
4.5.1	Badestrande	13
4.5.2	Regnbetingede udledninger til Knudsø	13
4.5.3	Algeopblomstring	14
5.	Det komplette varslingsystem - overblik	15
6.	Miljøovervågningsbøje	17
6.1	Monitorering af blågrønalger med sensor	17
6.2	Fleksibel multiparameterplatform	20
6.2.1	Kunstig intelligens	21
6.2.2	Intelligent prøvetagning	21
6.2.3	Test af multiparameterplatform	22
6.3	Miljøovervågningsbøje	23
7.	Spredningsmodel	25
7.1	Spredningsmodel for fækale bakterier ved overløb	25
7.1.1	Tilførsel via overløb	25
7.1.2	Vandtransport i Knudsø	25
7.1.3	Stoftransport og henfald	26
7.1.4	Usikkerheder	27
7.2	Spredningsmodel for blågrønalger	27
7.2.1	Placering af miljøbøje for måling af blågrønalger	28
7.2.2	Spredningsmodel for blågrønalger	29
7.2.3	Stoftransport for blågrønalger	30
8.	Varslingsdisplay til badegæster	31
9.	Demonstration af varslings	33
9.1	Varsling af badevandskvalitet i forbindelse med overløb	33
9.1.1	Planlagt prøvetagning vs. prøvetagning i forbindelse med overløb	33
9.1.2	Simuleringer af fækale bakterier i forbindelse med overløb	34

9.2	Varsling om blågrønalger	36
9.2.1	Sensormåling vs. optælling	37
9.2.2	Demonstration af modeldata	37
9.3	Resultater af algevarslingen	39
10.	Forebyggelse af opblomstring	40
11.	Referencer	43
Bilag 1.	Bjergning af miljøbøje fra søbund i Knudsø	44
Bilag 2.	Prøvetagning og resultater ifm. Overløbshændelser i Knudsø	49
Bilag 3.	Overløbsmodel (lineær reservoirmodel)	64
Bilag 4.	Hydrodynamisk strømningsmodel for Knudsø	67
Bilag 5.	Satellitdetektering af blågrønalger	70
Bilag 6.	Spredningsmodel-lering af fækale bakterier	72
Bilag 7.	Skanderborg Kommunes målinger af badevandskvalitet	79
Bilag 8.	Effekt af fager på forsinket opblomstring af blågrønalger	82

1. Forord

Dette er slutrapporten for projektet 'Sikkert Søbad II - Sikring mod fækale bakterier og giftige alger i badesøer' medfinansieret i 2020 under Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), som administreres af Miljøstyrelsen. Projektet bygger oven på projektet Sikkert Søbad I. Begge projekter har haft til formål at udvikle et samlet koncept for sikring og forbedring af badevandssikkerheden. Hvor Sikkert Søbad I havde fokus på fækale bakterier, har Sikkert Søbad II yderligere inkluderet varsling og bekæmpelse af giftige blågrønalger. Kombinationen af de rette tekniske løsninger og intelligent varsling er en ny måde at se helhedsorienteret på de regnbetingede udledninger fra fælleskloak.

I projektet deltog Skanderborg Forsyning A/S, NIRAS A/S, Aalborg Universitet, Aquasense og Teknologisk Institut.

Projektet blev gennemført i perioden februar 2020 til og med december 2022.

Projektets styregruppe

Stig Jonassen, Skanderborg Forsyning A/S
Sara Starcke, NIRAS A/S
Michael R. Rasmussen, Aalborg Universitet
Søren Torsbjerg Møller, Aquasense
Lotte Bjerrum Friis-Holm, Teknologisk Institut

Øvrige aktive projektdeltagere

Christian Møller Nielsen, Skanderborg Forsyning A/S
Thomas Marius Nielsen, NIRAS A/S
Søren Bastholm, Amphi-Bac ApS
Søren L. Thorndahl, Aalborg Universitet
Diana Stephansen, Aalborg Universitet
Janni Mosekær Nielsen, Aalborg Universitet
Yijuan Xu, Teknologisk Institut
Sabine Lindholst, Teknologisk Institut
Rikke Markfoged, projektleder, Teknologisk Institut

Projektets følgegruppe

Helle Kayerød, DANVA
Thomas Bo Sørensen, DANVA
Pernille Groth, Skanderborg Kommune
Hanne Medum Lærke, Skanderborg Kommune
Maibritt Langfeldt Sørensen, Silkeborg Kommune
Sissel Christine Haar Olesen, Rudersdal Kommune
Kathrine Petersen, Rudersdal Kommune

Aarhus, september 2023

2. Sammenfatning og konklusion

I Danmark overvåges kvaliteten af badevandet hen over badesæsonen for at sikre, at badegæster roligt kan hoppe i vandet uden at blive udsat for potentielt sundhedsskadelige bakterier. Badevandskvaliteten overvåges via måling af fækale bakterier via to såkaldte indikatororganismer, *E. coli* og enterokokker, hvis tilstedeværelse i badevandet indikerer, at der kan være forekommet en forurening fra sanitært spildevand eller husdyrsspildevand. Målingerne af de to indikatororganismer danner grundlag for en klassifikation af badevandet, som badegæster kan bruge til vurdering af den generelle badevandskvalitet ved det enkelte badeområde.

Generelt er badevandskvaliteten i Danmark rigtig god, og knap 95 % af alt badevand i Danmark er tildelt den højst mulige klassifikation (data efter badevandssæsonen 2022). Til trods for den høje standard sker det, at badevandet bliver forurenet. Dette sker typisk i forbindelse med kraftig nedbør, hvor der sker afstrømning fra befæstede arealer, eller hvis kloaknettet bliver overbelastet af de pludselige vandmængder. I sidstnævnte tilfælde overskrides den hydrauliske kapacitet af kloaknettet, og det opspædede spildevand udledes via bygværker, der er designet til overløb. Hvis spildevandsoverløbene er lokaliseret i nærheden af et badeområde, kan udledningen påvirke badevandskvaliteten og gøre badevandet uegnet til badning i en periode. Til tider påvirkes badevandskvaliteten i badesøer også af opblomstring af giftige blågrønalger. Algeopblomstring kan ligeledes medføre en sundhedsrisiko ved badning.

I dette projekt er der udarbejdet et system, der kan varsle badegæster, når badevandskvaliteten er forringet, og det dermed kan være forbundet med sundhedsfare at bade. Projektet bygger videre på resultater opnået i 'Sikkert Søbad I'; et projekt om badevandskvalitet i Skanderborg Sø. Projektet Sikkert Søbad I viste ikke kun behov for at varsle ved risiko for høje koncentrationer af fækale bakterier, men også behov for et komplet varslingsystem, der inkluderer varslings om risiko for opblomstring af blågrønalger i søer. Årsagen er, at algeopblomstring i søer typisk er et akut problem, der kan opstå og/eller forsvinde inden for få timer.

Derfor er der her arbejdet med et komplet varslingsystem, der vurderer risikoen fra både spildevandspåvirkning og algeopblomstring. Det komplette varslingsystem er baseret på online målinger af overløbshændelser og algeopblomstringer, og udbredelsen af begge parametre er modelleret i søen, så badegæster kan varsles direkte ved stranden. Varslingen formidles via et onlineforbundet varslingskilt ved stranden, så badegæster visuelt kan se en eventuel varslings, inden de går i vandet.

Projektet har haft stor fokus på alle de driftsmæssige omkostninger til det komplette varslingsystem, da både anlægsomkostninger og ikke mindst driftsomkostninger må sættes i relation til badevandsbudgettet i kommunerne, for at varslingsystemet kan udbredes i Danmark.

Derfor er der i projektet bl.a. undersøgt:

- Muligheden for måling af afledte parametre, der er mindre omkostningstunge at måle
- Vurdering af forebyggelse af algeopblomstring frem for varslings (cyanofager)
- Test af forskellige algesensorer til online måling af algeopblomstring
- Test af målebøje med meget lavt vedligeholdelsesbehov
- Validering af modeller, der ikke er baseret på kommercielle afløbsmodeller, og som er skalerbare og fleksible for nem implementering i andre søer.

Resultaterne af projektet viser en komplet varslingsmodel, der – baseret på online målinger af blågrønalger i søen samt flowmålinger i regnbetingede udløb – kan forudsige risikoen for forringet badevandskvalitet direkte ved badestedet.

3. Summary

Throughout the bathing season, the quality of the bathing water in Denmark is monitored to ensure that bathing without exposure to potentially harmful bacteria.

In general, the bathing water quality in Denmark is very good, and almost 95% of all bathing water in Denmark is assigned the highest possible classification (data after the bathing water season 2022). Despite the high standard, the bathing water can become contaminated. This typically occurs in connection with heavy rainfall, where the sewer systems are overloaded by the sudden amounts of water leading to sewer overflow.

If the sewage overflows are located near a bathing area, the discharge can affect the bathing water quality and make the bathing water unsuitable for bathing. In this project, a system has been developed that can warn bathers about degraded water quality. The project builds on results obtained in "Sikkert Søbad I", a project about bathing water quality carried out in Skanderborg Lake. The project showed a need not only for warnings against the risk of high concentrations of faecal bacteria, but also a need for a complete warning system that includes warnings about blooms of blue-green algae in lakes. Algae blooms are typically an acute problem that can appear and/or disappear within a few hours. This uncertainty undermines the warning system, and creates doubts and uncertainties for bathers.

Therefore, in this project, focus has been on a complete warning system that assesses both the risk from wastewater exposure and the risk of algae blooms. The complete warning system is based on online measurements of sewer overflow and algae concentrations, and the spread of both parameters is modeled in the lake, so bathers can be warned directly at the beach if a situation arises with a risk of deteriorating bathing water quality. The warning is communicated via an online warning sign at the beach, so bathers can visually see any warning before entering the water.

The project has had a strong focus on the operating costs for all elements of the complete warning system since both purchase and operating costs must be put in relation to the bathing water budget in the municipalities for the warning system to be spread in Denmark.

Therefore, the project has had focus on:

- measuring of derived parameters that are less expensive to measure
- assessment of prevention of algal blooms rather than warning (cyanophages)
- Testing of different algae sensors for online measurement of algae blooms
- Test of measuring buoy with very low maintenance requirements
- Validation of models that are not based on commercial models and are scalable and flexible for easy implementation in other lakes

The results of the project show a complete warning system which – based on online measurements of blue-green algae in the lake as well as flow measurements of sewer overflows – can predict the risk of deteriorating bathing water quality directly at the bathing site.

4. Introduktion

Danmark kan generelt bryste sig af en rigtig god badevandskvalitet i landets søer, som yderligere blev sikret med implementering af EU's Badevandsdirektiv i Danmark i 2008. Klimaændringer betyder imidlertid større regnhændelser og dermed flere regnbetingede overløb, som potentielt kan forringe badevandskvaliteten i forhold til forekomst af fækale bakterier. Tilsvarende opleves i dag hyppigere algeopblomstringer med giftige blågrønalger.

De ansvarlige kommuner har meget få redskaber til rådighed, når de skal forudsige, afværge og varsle i tilfælde af forringet badevandskvalitet. Derfor er det vigtigt at udvikle løsninger til en effektiv overvågning af badevandskvaliteten, et varslingsystem ved risiko for forringet badesikkerhed og nye muligheder for at forhindre opblomstring af giftige alger.

4.1 Formål med projektet

Formålet med nærværende projekt har været at implementere hurtig, pålidelig information om badevandskvalitet til badegæster, så de badende kan sikres en sundhedsmæssigt sikker badeoplevelse i de danske badesøer, hvad angår både E. coli (fortsættelse fra projektet Sikkert Søbad I) og giftige blågrønalger. Nye metoder for at mindske opblomstring af giftige blågrønalger ønskes afdækket i projektet.

Implementering af hurtig, pålidelig information opnås ved at udvikle nye løsninger til bedre overvågning af vandkvalitet og datadreven risikoanalyse, som kan formidles online og direkte ved badestranden. Projektet er et samarbejde mellem Skanderborg forsyning, Aalborg universitet, NIRAS, Teknologisk Institut samt sensorleverandøren Aquasense.

4.1.1 Valg af Knudsø som case

I MUDP-projektet Sikkert Søbad I (MST404-00366, 2015-2018) blev der med udgangspunkt i Skanderborg Sø udviklet et avanceret varslingsystem baseret på en kombination af afløbsmodellering, en omfattende strømningsmodel for søen og meteorologiske data. Sikkert Søbad II bygger direkte oven på erfaringerne opnået i Sikkert Søbad I, og med inddragelse af endnu en sø demonstreres varslingsystemets skalerbarhed, fleksibilitet og brede anvendelse. Knudsø er på flere punkter velegnet som case til et kombineret overvågnings- og varslingsystem for både fækale bakterier og blågrønalger. Søen har hele to Blå Flag-strande, som hvert år tiltrækker mange badende, både lokale og turister. Algeopblomstring er et dokumenteret tilbagevendende problem, ligesom flere overløbsbygværker jævnligt aflaster til søen. Et kritisk overløb er placeret tæt på en af badestrandene (Sdr. Ege). Her er der for nylig etableret logging af overløb og flow, hvilket skaber gode betingelser for dataopsamling.

4.2 Sikkert Søbad I

MUDP-projektet Sikkert Søbad I demonstrerede - med succes og for første gang i ferskvands-søer-, at det var muligt at etablere et varslingsystem, der i realtid kunne overvåge og beskytte badende mod kontakt med patogene bakterier. Men projektet afdækkede også, at der er flere udfordringer, der skal adresseres for at sikre de badenes sundhed: a) varslingsmodellerne var relativt komplicerede at opstille og anvende, b) de pludselige opblomstringer af specielt blågrønalger udgør ligeledes en risiko for de badenes sikkerhed, og c) der er fortsat et behov for kunne etablere simple, kosteffektive og driftssikre renseløsninger.

4.3 Badevandskvalitet i søer

Borgere og gæster i Danmark skal kunne være sikre på, at de ikke udsættes for høje koncentrationer af potentielt sygdomsfremkaldende forureninger. Derfor er det i badevandsdirektivet

præciseret, at kommunalbestyrelsen er forpligtet til at varsle badegæster, hvis der er risiko for en kortvarig forurening af badevandet. En kortvarig forurening er defineret som en mikrobiologisk kontamination, der har klart identificerbare årsager, som ikke forventes at påvirke badevandskvaliteten i længere end 72 timer, og som den kompetente myndighed har opstillet procedurer til at forudsige (Direktiv 2006/7/EF). I de fleste tilfælde refererer dette til overløb af opspædende spildevand fra et overløbsbygværk, hvorpå der kan opsættes montering af overløb.

Øgede regnbetingede hændelser og algeopblomstring gør det vanskeligere at leve op til direktivets målsætninger om at sikre de badendes sundhed og rettidig varsling i tilfælde af kortvarig forurening forbundet med overløbshændelser eller algeopblomstring.

De ansvarlige myndigheder, kommunerne, har meget få redskaber til rådighed til at forudsige, afværge og varsle i tilfælde af forringet badevandskvalitet i søerne og ingen automatiserede redskaber. I dag udtager kommuner prøver løbende i badesæsonen på datoer, som er planlagt/bestilt forud for badevandsæsonen. Badegæster henvises desuden til selv at vurdere, om der er tegn på opblomstring af blågrønalger ud fra vandets sigtbarhed og farve. De manglende redskaber kan resultere i et både ressourcetungt og ineffektivt beredskab, der belaster kommunerne uden at sikre, at der udtages prøver, når risikoen er størst.

Varslingen om forringet badevandskvalitet er i projektet baseret på en risikovurdering, hvor med badegæster varsles, når det vurderes, at badning potentielt kan være forbundet med en risiko. Sandsynligheden for at badende gæster oplever gener som følge af badning i vandet under varsling er bestående af mange faktorer og herunder sandsynligheden for, at den badende indtager bakterier i høje koncentrationer og bliver syg som følge heraf. Som eksempel kan det ses, at badevandskriterierne er forskellige mellem fersk og saltvand. Det skyldes, at det antages, at der ikke er bølger i ferskvand, mens det er mere sandsynligt i saltvand. En svømmer vil være mere tilbøjelig til at sluge vand fra bølger og dermed udsætte sig for sygdomsfremkaldende bakterier, end hvis der var vandret vandspejl. En given høj E-coli koncentration er derfor ikke en garanti for infektion – det er en ændring i sandsynligheden. Derfor er badevandskvalitet svær at håndtere uden at tage disse ting med i beregninger. På den anden side er myndighedernes overvågning af badevandskvalitet baseret på en række målinger, som enten er over eller under en grænseværdi. På den måde ligner det de modeller, der er udviklet i dette projekt.

4.4 Fækale bakterier og blågrønalger

4.4.1 Fækale bakterier i søer

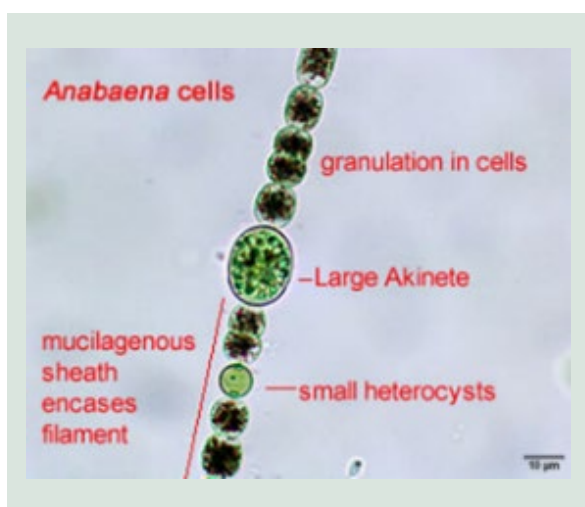
Bakterier som *E. coli* og enterokokker, der lever i tarmsystemet på varmblodede dyr og mennesker, er typiske indikatorer på fækal kontaminering af vandige miljøer.

Bakterierne trives i tarmsystemet, hvor de er beskyttet af værtsorganismen, som sikrer stabile forhold med et fugtigt, varmt, mørkt og næringsrigt miljø. Når bakterierne udskilles fra værtsorganismen til først kloak og videre til en ferskvandskilde, oplever de en øjeblikkelig stresspåvirkning fra det omgivende miljø, hvor væsentlige faktorer i miljøet markant og hurtigt ændres, herunder temperatur, UV-stråling, salinitet og næringsstofgrundlag samt konkurrence fra hjemmehørende arter i det nye miljø i form af prædation (Wcislo og Chrost, 2000). UV-stråling fra sollys er en stressfaktor, der forårsager strukturelle skader på bakteriernes DNA og i sidste ende inaktiverer og/eller dræber cellerne. I et forsøg med måling af *E. coli* efter overløb i en ferskvandssø har solskinsdage vist sig at være en afgørende faktor. På solskinsdage efter overløb blev der målt markant lavere koncentrationer af *E. coli* i søen i kontrast til overløb på overskyede dage (Whitman et al, 2004). UV er imidlertid kun en desinfektionskilde, når strålingen har mulighed for at ramme cellerne. Det betyder, at skygge, skyer og høje algekoncentrationer kan virke som et beskyttende lag, hvorfor høj solindstråling ikke nødvendigvis er afgørende, hvis vejret på dagene op til et overløb har ført til algeopblomstring.

De forringede levevilkår for tarmbakterierne, når de forlader værtsorganismen og ledes med spildevandet, resulterer i, at bakterierne i første omgang stopper med at dele sig (vokse i antal), de fortyndes kraftigt i de store vandmængder og dør relativt hurtigt (også kaldet henfald). De fækale bakterier henfalder eksponentielt, hvorfor en høj startkoncentration i spildevandet formindskes drastisk inden for de første timer efter et overløb. Det er usikkert at antage generelle henfaldstider, da henfaldstiden er afhængig af mange udefrakommende og hurtigt skiftede forhold, omend der i et studie er målt en halveringstid for *E. coli* på ca. 2 dage (Savageau, 1983).

4.4.2 Blågrønalger

Blågrønalger er bakterier, der indeholder klorofyl, og som dermed er i stand til at udføre fotosyntese i lighed med klorofylholdige planter. Som følge af deres tilhørsforhold til bakterierne kaldes de i faglitteraturen oftest cyanobakterier. Morfologisk kan blågrønalgerne se meget forskellige ud, og de arter, der danner opblomstring, findes indenfor alle morfologiske typer. De potentielt giftige blågrønalgeslægter i danske søer er *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* og *Planktothrix*. De producerer gift inde i cellerne, som frigives, når cellerne dør.



FIGUR 1. [Anabaena celler](#).

Ofte har blågrønalgerne vacuoler, som giver dem mulighed for at søge op og ned i vandsøjlen og derved tilpasse sig solindstråling. Når der udtages vandprøver eller måles for blågrønalger, er det således vigtigt at tilpasse dybden efter den mest plausible dybde for cellerne.

Blågrønalgenes vækst er især betinget af næring og solindfald og ses i mindre koncentrationer hele sommeren, mens opblomstringer kan forekomme over en meget kort tidsperiode (timer/dage) og især ses i sensommeren og først på efteråret. I næringsrige søer er algeopblomstringer almindeligt forekommende og kan til tider udgøre et decideret problem for bademulighederne i søerne. I Danmark er opblomstringer af blågrønalger et årligt tilbagevendende fænomen i eutrofe søer i sommer- og efterårsmånederne. Baseret på satellitobservationer blev det konkluderet, at opblomstring af blågrønalger forekommer hvert år i Knudsø og tidligst er detekteret i august (jf. afsnit 7.2.1). Der er ingen nationale krav til kontrol og koncentration af blågrønalger, og det er derfor op til myndigheden i den enkelte kommune at fastlægge værdier for et evt. badeforbud.

4.5 Knudsø

Knudsø ved Ry i Skanderborg Kommune er en af Danmarks reneste søer og tiltrækker badende på alle tider af året. Søen byder på flere badestrande og -broer langs bredderne, og med sin placering i landskabet indtager den en central rolle i det rekreative hverdagsliv for lokale såvel som for turister, der besøger området. Søen, der måler helt op til 29 meter i dybden,

er en af Danmarks dybeste. Søen er forbundet med Gudenåen, hvormed den indgår i åens enorme system af forbundne søer og vandløb på tværs af Østjylland. Søen er direkte forbundet med den endnu dybere Ravnsø, fire kilometer mod øst, hvorfra den forsynes med størstedelen af sin vandmængde via Knud Å. Søens udløb går mod nabosøen Birksø, og herfra fortsætter vandet sit løb nordpå som en del af Gudenåen, der har sit udløb i Randers Fjord.

Badevandskvaliteten ved strandene i Knudsø er særdeles god, og alle strande opnår den bedst mulige klassifikation, hvilket også bekræftes af historiske data. Klassifikationen beregnes på baggrund af badevandsanalyser, der analyseres for to typer af indikatorbakterier (E. coli og enterokokker). Disse typer af bakterier er fækale bakterier, der lever i tarmsystemet på varmblodede dyr, hvorved deres tilstedeværelse andre steder indikerer, at der er sket en fækal forurening.

4.5.1 Badestrande

Knudsø er en attraktiv badesø. Den har 2 offentlige badestrande med blå flag, en ved Knudhule og en ved Sdr. Ege, og en privat strand for gæster på Birkhede Camping (FIGUR 2). Udover strandene er der mange private badebroer til Knudsø. Ry Sejlklub ligger lige nord for Knudhule Strand.



FIGUR 2. Knudsø med badestrande, regnbetingede udløb samt tilløb fra Knud Å og udløb til Birksø.

4.5.2 Regnbetingede udledninger til Knudsø

Til Knudsø er der 3 regnbetingede overløb: U5, U6 og U9 (FIGUR 2).

U5 er overløb fra Ry Renseanlæg. Når renseanlæggets hydrauliske kapacitet er opbrugt, ledes regnvandsfortyndet spildevand først ind et internt sparebassin, og kun når sparebassinets kapacitet er opbrugt, sker der overløb til Knudsø. Jf. gældende udløbsskema for spildevandsplan for Skanderborg Kommune (Spildevandsplan 2016-2020) aflastes en årlig vandmængde på 29.790 m³/år, hvilket dog er kraftigt overestimeret, idet der reelt blev aflastet 12.435 m³ i 2021 og 13.639 m³ i 2022 (januar-november).

U6 er et overløb på en af hovedledningerne til Ry Renseanlæg. Der er et opland på 61,6 ha, hvoraf 9,2 ha er spildevandskloakeret eller separatkloakeret, og dermed er 52,4 ha fælleskloakeret. Der er flere områder, hvor enkelte veje er separatkloakeret, men hvor regnvand og spildevand ledes sammen nedstrøms. Jf. spildevandsplanen aflastes en årlig mængde på 4.824 m³. I 2020 blev der målt et totalt flow på 7.328 m³ og i 2021 et flow på 11.634 m³. I OV36 er der logning af, hvornår der sker overløb, og i første brønd på overløbsledningen ca. 40 m nedstrøms bygværket er der monteret en flowmåler, som logger flowet af overløbet. Udløbsledningen er ca. 250 m lang, og udløbet er forholdsvis tæt på badestranden ved Sdr. Ege, dog adskilt af en mindre pynt.

U9 er et overløb fra et mindre, fælleskloakeret opland på 4,1 ha, som har en lav befæstelsesgrad og derfor (jf. Spildevandsplanen) aflaster en mindre mængde på 7 m³/år. I 2021 blev der målt 12,7 m³.

4.5.3 Algeopblomstring

Algeopblomstring er dokumenteret i Knudsø og varsles af Skanderborg Kommune med et skilt ved badestranden ved Knudhule - der indføres i sjældne tilfælde badeforbud, hvor badestranden lukkes.

5. Det komplette varslingsystem - overblik

Dette afsnit giver et overblik over det komplette varslingsystem udviklet i nærværende projekt. Varslingssystemet er baseret på en kombination af specifik modellering af strømningsmønstre i den givne sø (hydrodynamisk strømningsmodel), sprednings- og henfaldsmodel for celler samt enten tilførsel af fækale bakterier til søen (reservoirmodel) eller realtidsmålinger af blågrønalger og andre kemiske parametre.

En konceptuel beskrivelse af det samlede varslingsystem er vist på FIGUR 3, mens de efterfølgende rapportafsnit, Kapitel 6 (målebøje), Kapitel 7 (spredningsmodel) og Kapitel 8 (varsling) går i dybden med enkeltelementerne i den samlede løsning.

I søer udgør både fækale bakterier og blågrønalger potentielle sundhedsrisici for badende, hvorfor det komplette varslingsystem giver signal om høje koncentrationer af begge organismer i realtid. Forringet badevandskvalitet grundet fækale bakterier eller blågrønalger i badeområder kan forekomme pludseligt, og varigheden af forureningerne er meget varierende. En online realtidsvarsling kan derfor både øge de badenes sikkerhed og minimere varigheden af et badeforbud.

Input til varslingsystemet er en kombination af realtidsmålinger og simuleringer og er opstillet som realtidsmodeller, der automatisk sender signaler til en varslingsstavle, hvis badevandskvaliteten forringes. En varslingsstavle på badestranden informerer øjeblikkeligt de badende om, at badning kan være forbundet med sundhedsrisiko, og denne varsling afblæses, når der igen modelleres lave koncentrationer af bakterier. Visionen er, at systemet nemt kan implementeres i andre badesøer, hvorfor der kun benyttes dels data, som er offentligt tilgængelige, dels data fra de installerede sensorer i målebøjen.

Varslingssystemet er opstillet som to separate systemer, der varsler om henholdsvis fækale bakterier og blågrønalger.

Varslingssystemet til varsling om fækale bakterier er opbygget som en kombination af 3 modeller:

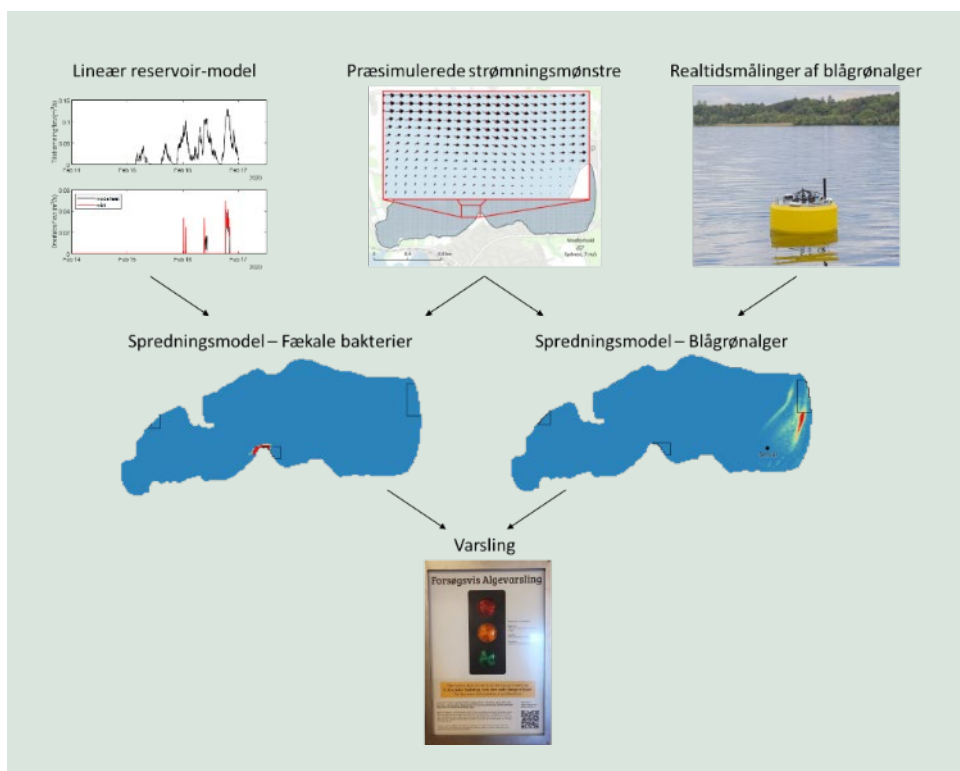
- 1) en lineær reservoirmodel, der i realtid forudsiger aflastningen til søen baseret på oplandet
- 2) en hydrodynamisk strømningsmodel, der fastsætter strømningsmønstre i Knudsø
- 3) en stofspredningsmodel, der i realtid modellerer transporten og henfald af fækale bakterier i Knudsø.

Varslingssystemet for blågrønalger er baseret på en kombination af realtidsmålinger af blågrønalger i Knudsø samt 2 modeller. Realtidsmålinger kan angive tilstedeværelse og til en vis grad koncentration af blågrønalger ved en opblomstring:

- 1) realtidsmålinger af blågrønalger (Kapitel 6)

- 2) en hydrodynamisk strømningssmodel, der fastsætter strømningssmønstre i Knudsø
- 3) en spredningsmodel, der i realtid modellerer transport og henfald af blågrønalger i Knudsø.

I projektet har det været vigtigt at opstille et varslingssystem, som kan drives i realtid uden brug af kommercielle programmer til realtidsmodellering af strømningssmønstre. Derfor blev begge varslingsmodeller baseret på præsimulerede strømningssmønstre i søen ud fra modeller af de styrende forhold for strømninger i søer, nemlig vindforhold og lagdeling. Strømningerne udvælges fra præsimuleringerne baseret på aktuelle vindforhold, som indhentes for området i realtid, og tidspunktet på året, som er afgørende for, om søen er lagdelt.



FIGUR 3. Konceptuel beskrivelse af det samlede varslingssystem.

6. Miljøovervågningsbøje

I nærværende projekt blev der udviklet en fleksibel multiparameterplatform og anvendt en målebøje. Den fleksible multiparameterplatform har den fordel, at den foruden at kunne udføre sensor-målinger i realtid kan anbringes ude på søen i hele sommerperioden uden vedligehold og kan udtage prøver ved behov, mens den mindre og mere simple målebøje er billigere, men ikke helt så fleksibel.

6.1 Monitorering af blågrønalger med sensor

For både den fleksible multiparameterplatform og målebøjen gælder det, at opblomstring af blågrønalger detekteres med en blågrønalgesensor.

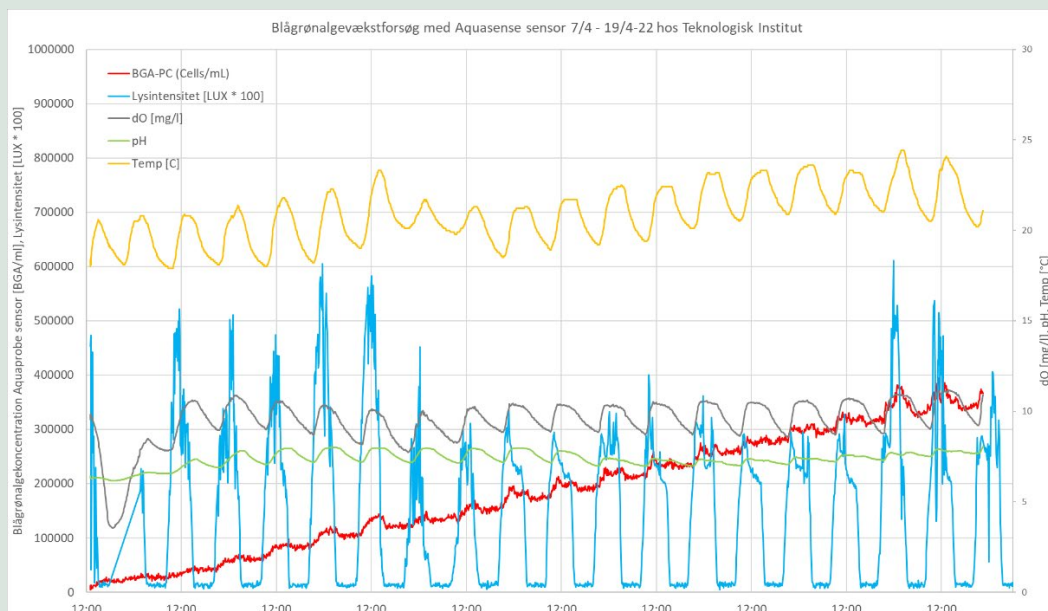
Blågrønalgesensorerne AP-6000 og AP-7000 fra virksomheden Aquaread er anvendt i projektet. Sensorerne har eget, centralt rengøringsystem til at holde de monterede sensorer rene for en reduceret begroning. Begge sensorer er udstyret med pH-, ilt- og temperaturmålere og en optisk sensor for phycocyanin. Pigmentproteinet, phycocyanin, der sidder i blågrønalgernes cellemembran, absorberer lys i det orange/røde område og emitterer ved >650 nm. Signalet kan omregnes til en algekoncentration (BGA/ml – blågrønalgeceller/ml) ud fra antagelser om en celled gennemsnitlige indhold af phycocyanin, hvilket kan præciseres ved kendte renkulturer.

Blågrønalgesensorens linearitet og robusthed over for interferens med de ikke-giftige grøn-alger blev testet i laboratoriet med vand fra Knudsø opdyrket i algevækstmedium (BG-11) (FIS-GUR 4).



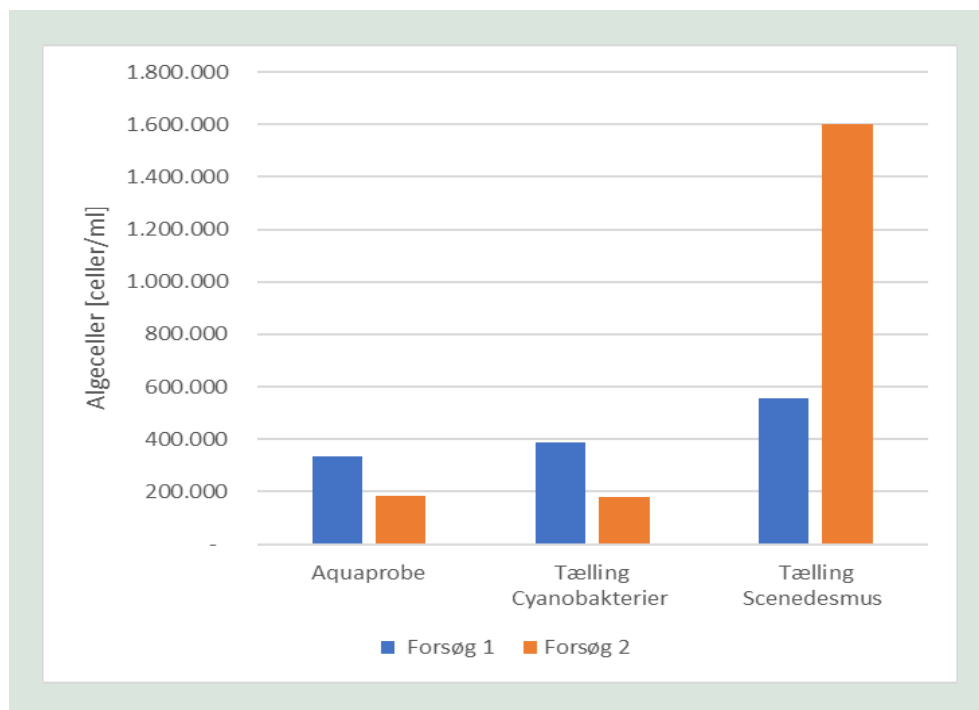
FIGUR 4. Opstilling af afprøvning/kalibrering af AP-6000 i vand fra Knudsø opdyrket i vækstmedie for blågrønalger. Opstilling i nordvendt vindue med tilkoblet lysintensitetssensor.

Opblomstring af blågrønalger kunne følges over en tidsserie på 10 dage med en endelige koncentration på estimeret 387.000 celler/ml. Intensiteten af phycocyanin (omregnet til celler/ml) varierede mellem 10.000 og 15.000 celler/ml, mellem dag og nat, hvilket er et udtryk for cellernes aktivitet og ikke en variation i egentligt celleantal, og dermed også et udtryk for sensorens usikkerhed. Opløst ilt, pH og temperatur fulgte ligeledes dagsvariationen (FIGUR 5).



FIGUR 5. Vækst af blågrønalger fra Knudsø over en periode på 10 dage (målt med AP-6000).

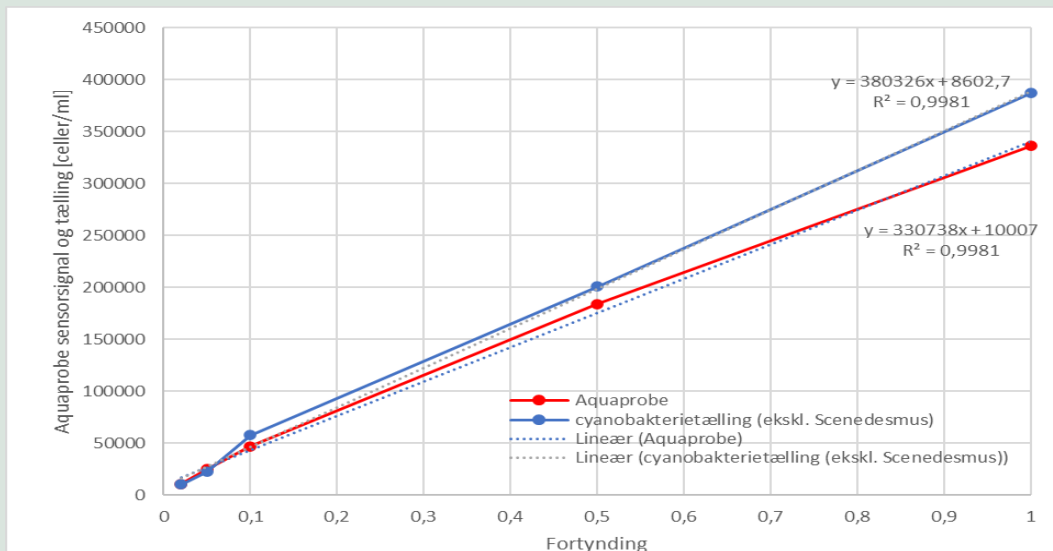
Som angivet på FIGUR 6 er der god overensstemmelse (6-15 % afvigelse afhængigt af nat/dag-aflæsning) mellem den mikroskopitalte koncentration ($3,87 \cdot 10^8$ celler/l) og den estimerede koncentration af blågrønalger ($3,30 \cdot 10^8$ celler/l). Som det kan ses på FIGUR 6, havde grønalgen *Scenedesmus* ikke indflydelse på signalet af AP-6000, på trods af at 90 % af celler tallet var *Scenedesmus* og kun 10 % var blågrønalgen *Microcystis* (tælling venligst udført af Aarhus Universitet, Marin Økologi).



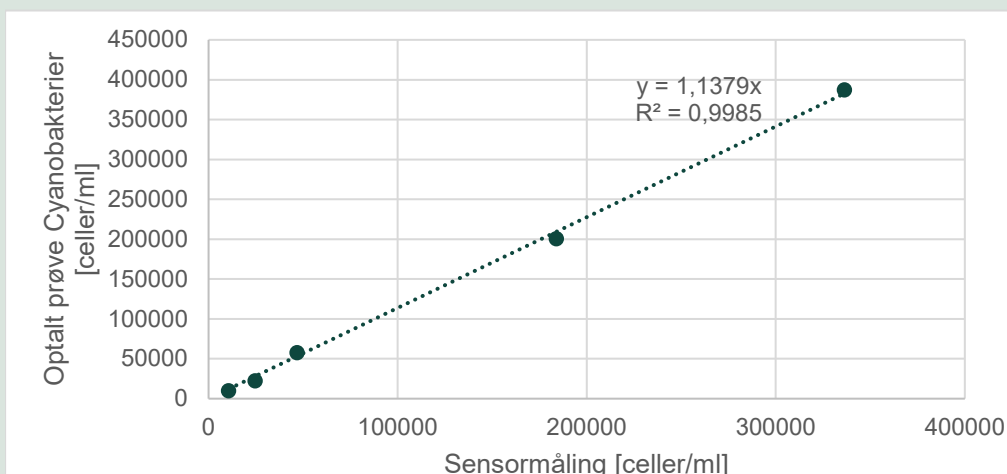
FIGUR 6. Sensormåling og tælling af blågrønalger (cyanobakterier) og grønalger (*Scenedesmus*) i to forsøg med relativt ens koncentration af blågrønalger og tydeligt højere koncentration af grønalger i forsøg 2. Sensor er ikke påvirket af tilstedeværelse af grønalger.

Lineariteten af AP-6000 blev eftervist gennem et fortyndingsforsøg, hvor opblomstring i søvand fra Knudhule blev fortyndet til 0,5; 0,1; 0,05 og 0,02 af udgangskoncentrationen. Blågrønalger i disse 5 prøver blev målt med sensoren og talt i mikroskop. FIGUR 7 viser, at korrelationen mellem sensormåling og manuel tællemetode var god ($R^2 = 0,9981$ i begge tilfælde). I det høje område lå sensorresultatet 8-19 % lavere end i de høje koncentrationer talt i mikroskop (FIGUR 7 og FIGUR 8). Omregning til celletal ud fra signalet af phycocyanin er påvirket af lysintensitet, arten af blågrønalge og sammensætning.

Ud fra testen af opblomstring, influens af grønalger, linearitet og sammenhold mellem estimerede og optalte celletal, vurderes AP-6000 egnet til brug for detektion af blågrønalger og til identifikation af opblomstringsniveau.



FIGUR 7. Linearitetsbestemmelse af sensoren. De anvendte fortyndinger var 1:2, 1:10, 1:20, 1:50 (svarende til fortynding 0,5; 0,1; 0,05; 0,02) af opdyrket søvand fra Knudhule. Fortyndingerne og den ufortyndede prøve blev målt med sensoren (AP-6000) og talt i mikroskop på Aarhus Universitet, Marin Økologi.

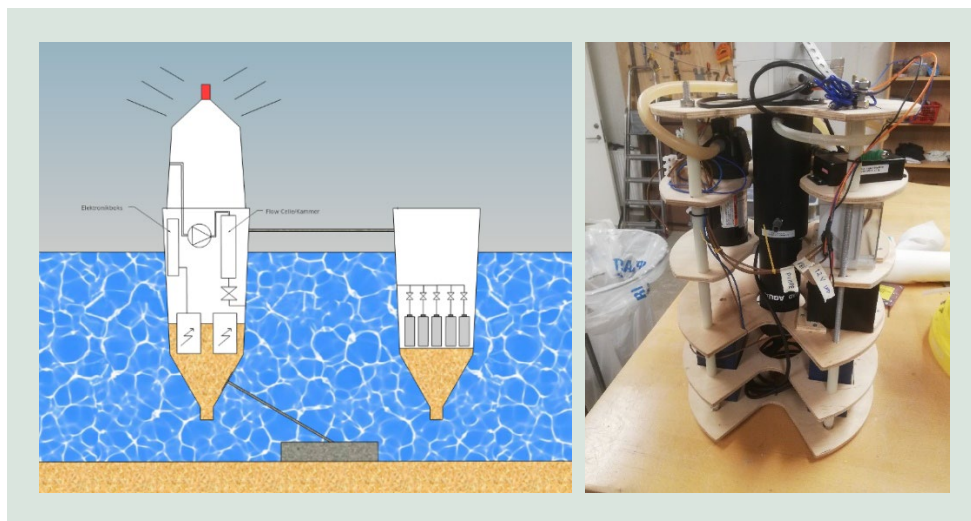


FIGUR 8. Sammenligning mellem data målt med sensoren (AP-6000) og optælling i mikroskop (Aarhus Universitet, Marin Økologi). Data er fra FIGUR 7.

6.2 Fleksibel multiparameterplatform

Fordelen ved en multiparameter målebøjle er, at den kan udfylde flere funktioner på samme tid, og at den ved produktion kan tilpasses det specifikke overvågningsbehov, fx for kommuner, som har ansvaret for overvågning af søen. Ved anvendelse kan den afløse nogle af de tids- og ressourcerkrævende opgaver med miljøovervågning i kommunerne, sikre et onlinesystem, der kan anvendes til realtidsvarsling af pludselig opblomstring af potentielt sundhedsskadelige alger og foretage automatisk prøveudtagning. Desuden kan målebøjlen frit placeres på søen. Fokus for platformen er, at den kræver minimalt vedligehold, leverer korrekte målinger og giver lave etableringsomkostninger (proportionalt med det kommunale budget til miljøovervågning).

Multiparameterplatformen er sammensat af to enheder som angivet på FIGUR 9: en enhed med sensorudstyr, der er koblet til et anker, og en prøvetagningsenhed.



FIGUR 9. Illustration af de to sammenkoblede bøj; miljøbøjen og prøvetagningsbøjen (tv) og den indvendige opbygning af målebøjen (th).

Målebøjen er designet til at foretage en måling af vandkvaliteten hvert 10. minut i 6 måneder uden vedligehold. Foruden viskere på AP-6000/AP7000 sikrer designet af multiparameterplatformen, at der ikke sker begroning med alger, vandplanter eller dyreliv, der kan forstyrre resultaterne af målingerne. Sensoren er beskyttet inden i en flowcelle, hvori måling foretages. Når der skal foretages en måling af vandkvalitetsparametre, pumpes vand fra søen ind i flowcellen. Efter måling pumpes vandet igen ud af flowcellen, der således står tom indtil næste måling.

Målingerne foretaget af sensoren sendes via GSM (Global System for Mobile Communications) til en server, hvor data bliver opsamlet og behandlet.

6.2.1 Kunstig intelligens

AP-6000/AP-7000 sensoren er udvalgt til at kunne monitorere flere vandkvalitetsparametre, der samlet skal bidrage til en bedre forudsigelse af algeopblomstring. Algeopblomstring i søen kan opstå lokalt og meget pludseligt. Det kan derfor være en udfordring at udvælge den mest optimale placering for at opnå en repræsentativ måling af blågrønalgekoncentrationen. De afledte parametre, pH, klorofyl og turbiditet, skal bidrage til bedre forudsigelser af algeopblomstringen, således at man med en primær målestation (blågrønalgesensor) og sekundære målepunkter (billigere fysisk/kemiske parametre) kan blive bedre til at forudsige algeopblomstring over et stort område.

6.2.2 Intelligent prøvetagning

Den rigtige prøve på det rigtige tidspunkt er ofte en undervurderet udfordring, der kan gøre måledata svære at tolke korrekt. Derfor sammenkobles overvågningsbøjen med en prøvetagningsbøje, der er designet til automatisk at udtage et større antal tidsproportionale prøver ved igangsættelse (FIGUR 9 tv.). Prøvetagningsbøjen igangsættes, hvis flere af de målte vandkvalitetsparametre når en fastlagt værdi. Desuden kan prøvetagningen igangsættes via dataserveren, således at prøvetageren fx også kan aktiveres i tilfælde af overløb til søen.

6.2.3 Test af multiparameterplatform

Forud for udsætning af målebøjen i Knudsø gennemgik bøjen en succesfuld test i Aalborg Havnebad (FIGUR 10), hvor bøjen var søsat i 4 uger, for at teste dels bøjens vejrbestandighed, og dels sugecellesystem og datakommunikation.



FIGUR 10. Miljøbøjen blev testet i Havnebadet i Aalborg Havn i en periode på 4 uger.

I forsommeren 2021 blev miljøbøjen udstyret med algesensoren søsat i Knudsø (FIGUR 11). Kommunikation og sugecellesystem til algesensoren blev testet med succes.

I august 2021 blev miljøbøjen vellykket sammenkoblet med prøvetagningsbøjen og leverede data som forventet, indtil et stormvejr trak de to bøjer fra hinanden og efterlod et hul i bøjerne, hvorefter bøjerne fyldtes med vand og sank.

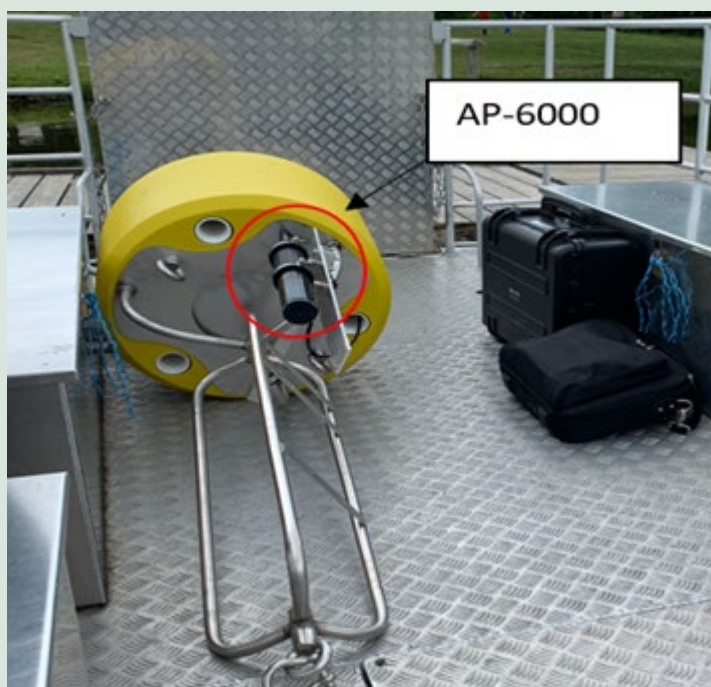
Bøjerne, der var sunket på 20 meters dybde, blev efter mange måneders eftersøgning lokaliseret og bjærget (se beskrivelse i Bilag 1).



FIGUR 11. Miljøbøjen i Knudsø.

6.3 Miljøovervågningsbøje

Imens den fleksible multiparameterplatform ventede på bjærgning fra bunden af Knudsø, blev en overvågningsbøje udsat i Knudsø for demonstration af varsling via online måling og model-
 lering samt varslingstavle på stranden. Denne målebøje havde ikke det samme niveau for
 vedligeholdelsesfri drift og mulighed for prøvetagning.



FIGUR 12. Miljøbøje AP-6000.

Den anvendte miljøovervågningsbøje er produceret af firmaet Nexsens og er designet til installation i søer og med mulighed for at installere en datalogger og valgfrie sensorer (FIGUR 12). Til måling af blågrønalger i Knudsø blev AP-6000 fortsat anvendt og blev installeret, så den målte i en dybde på 40 cm. Til logning af data blev der anvendt en datalogger fra Metasp-
 here. Metaspheres dataloggere har flere forskellige opsætningsmuligheder, så det er muligt at logge flere forskellige parametre på forskellige tidspunkter.

En billigere udgave af blågrønalgesensoren, AP-Lite, blev testet inde ved Knudhule badebro. Fordelen ved denne sensor er, at den kan udsættes af en enkelt person, mens både multiparameterplatformen og miljøbøjen kræver to personer ved udsætning. Ulempen er, at AP-Lite ikke sender data til varslingsystemet og ej heller har integreret selvrensning, hvorfor sensoren kræver et højere niveau af vedligehold.

7. Spredningsmodel

Den online varsling af badevandskvaliteten i søen er en sammenkobling mellem en model for vandtransport i søen, en model for stoftransport afhængigt af vandstrømme og cellernes henfald samt enten estimeret tilførsel af fækale bakterier ved overløb eller målte værdier for blågrønalger ved et eller enkelte punkter i søen.

7.1 Spredningsmodel for fækale bakterier ved overløb

Der findes desværre endnu ikke en kommerciel sensor til måling af E. coli, der er vurderet egnet til projektet. Normalt tager en mikrobiologisk analyse mellem 12 og 24 timer at gennemføre. Derfor er det nødvendigt at estimere koncentrationen af E. coli på anden vis for at opnå realtidsbestemmelse af fækale bakterier ved de udvalgte badestrande i søen. Koncentrationen estimeres ud fra den forventede tilførsel ved konkrete overløb, vandtransport i søen samt stoftransport og henfald (FIGUR 13). Spredningsmodellen sender en varsling til en varslingstavle i situationer, hvor koncentrationen af E. coli eller enterokokker overstiger badevandskravene i badeområdet. Denne varsling afblæses, når koncentrationen er modelleret under grænseværdien i 30 minutter (Kapitel 8).

I det følgende beskrives konceptet for hver delmodel, for yderligere beskrivelse henvises til Bilag 3, Bilag 4, Bilag 5 og Bilag 6.

7.1.1 Tilførsel via overløb

Udløbet nær Sdr. Ege Strand (udløb U6, FIGUR 2) er antaget at have den største påvirkning på badevandskvaliteten ved badeområderne i Knudsø, da det er tæt på badestranden og det er det overløb, der har flest overløbshændelser, hvorfor kun dette overløb medtages i modellen. Oplandet til U6 ved Sdr. Ege Strand udgøres af dele af Ry, som er fælleskloakeret. Aflastede volumener af overløbssvand til og fra udløbet nærmest ved Sdr. Ege er bestemt med en lineær reservoirmodel. Nedbøren i oplandet måles med en regnmåler, hvilket udgør inputtet til den lineære reservoirmodel, som herudfra modellerer det aflastede volumen. Modellen er kalibreret ved brug af flowmålinger foretaget i udløbsrøret og testet som demonstration (afsnit 9.1). Modelopsætning og kalibrering er beskrevet i Bilag 3.

7.1.2 Vandtransport i Knudsø

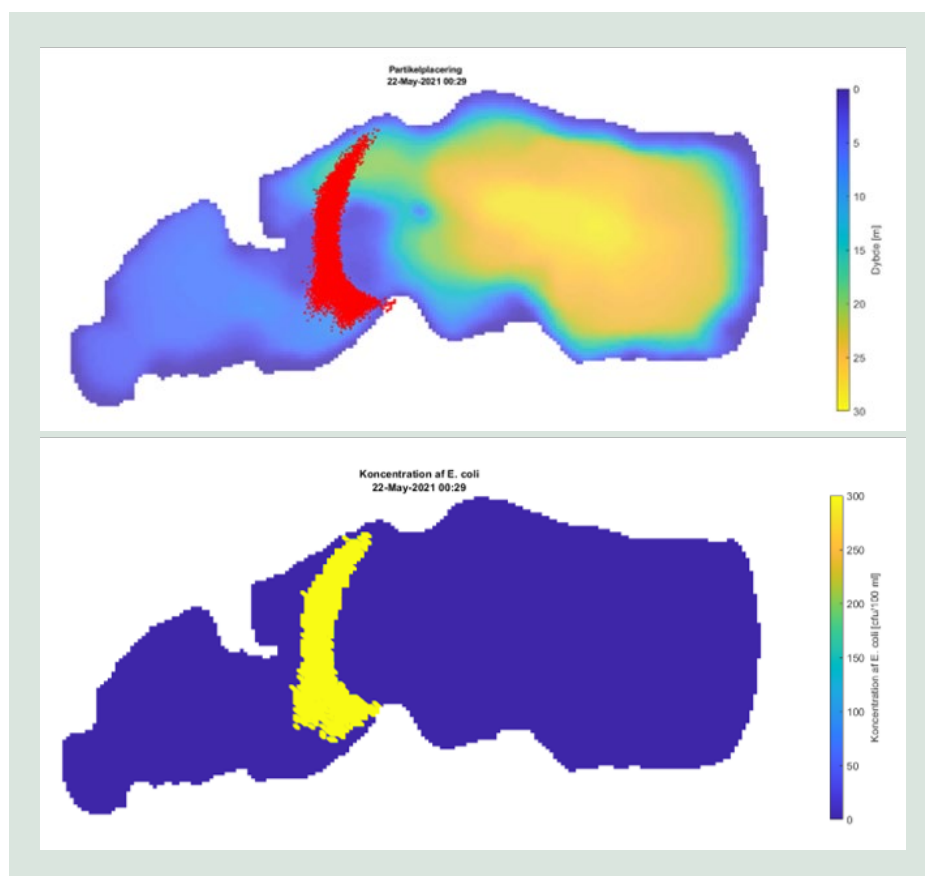
Realtidssimulering af vandtransporten i Knudsø er mulig ved inddragelse af præsimulerede strømningsmønstre. Den hydrodynamiske model til beskrivelse af strømningsmønstre i søen, der er opstillet i programmet MIKE3 fra DHI, er udformet specifikt for Knudsø. Der er dannet præsimulerede strømningsmønstre for vindhastigheder mellem 1 og 12 m/s med intervaller på 1 m/s og for vindretninger med intervaller på 5 grader, ligesom effekt af lagdeling er inddraget. Når modellen skal beregne vandtransport, udvælges en af de præsimulerede strømningsmønstre baseret på årstid (afgørende for, om der er en stabil lagdeling i søen) samt vindforhold (hastighed og retning). For yderligere beskrivelse af modellen refereres der til Bilag 4. I bilaget er det desuden beskrevet, hvordan strømningerne nær vandspejlet er målt ved brug af GPS-logninger. Disse målinger er brugt til at verificere modellen og eftervise, at strømningerne i søen modelleres med høj nøjagtighed. Denne model anvendes til estimering af både fækale bakterier og blågrønalger.

7.1.3 Stoftransport og henfald

En model for beskrivelse af transporten og henfaldet af fækale bakterier i Knudsø er opstillet som en realtidsmodel i Matlab udgivet af MathWorks. Den horisontale og vertikale transport blev modelleret som en random walk-model med advektion og dispersion, hvor et tilfældigt tal trækkes fra en standardnormalfordeling. Random walk-modeller er fordelagtige til partikeltransportmodellering grundet simplicitet, og da der ikke er introduceret numerisk dispersion. I modellen blev der indsat partikler ved udlødningspunktet afhængigt af det aflastede volumen modelleret med den lineære reservoirmodel. Partikeltransporten er beregnet med følgende udtryk:

$$\begin{aligned}x_i &= x_{i-1} + v_x \cdot \Delta t + Z_1 \sqrt{2 \cdot v_h \cdot \Delta t} \\y_i &= y_{i-1} + v_y \cdot \Delta t + Z_2 \sqrt{2 \cdot v_h \cdot \Delta t} \\z_i &= z_{i-1} + v_z \cdot \Delta t + Z_3 \sqrt{2 \cdot v_v \cdot \Delta t}\end{aligned}$$

Hvor x , y og z er partikelposition, i er temporalt indeks, v er vandhastigheden i henholdsvis x -, y - og z -retningen, Δt er tidsskridtet, Z er et tilfældigt tal fra standardnormalfordelingen, og v er hvirvelviskositeten henholdsvis horisontalt og vertikalt. Vandhastigheder og hvirvelviskositeter blev fastsat baseret på præsimuleringer.



FIGUR 13. Eksempel på spredningsmodellering for fækale bakterier i Knudsø.

Koncentrationen af *E. coli* og enterokokker blev i modellen beregnet ved en henfaldsmodel. Henfaldsmodellen er opstillet efter Sagarduy et al. (2019), hvorved henfaldet blev beskrevet afhængigt af vandtemperatur, solindstråling og sigtdybde. Som beskrevet i afsnit 4.4 indvirker flere faktorer på henfaldsraten.

7.1.4 Usikkerheder

De estimerede koncentrationer ved badeområdet er behæftet med usikkerheder. Modelusikkerhederne vil primært skyldes usikkerheder i input om vindforhold, nedbør og målte koncentrationer, usikkerheder i den hydrodynamiske model, numerisk spredning i partikkelmodellering samt nedbrydning og vækst af bakterierne. Specielt koncentrationen af sygdomsfremkaldende bakterier i overløb kan være stærkt variabel. Det skyldes, at såfremt der har været en tør periode forud for overløbshændelsen, vil der sedimentere partikler og bakterier inde i rørsystemerne. Ved kraftig regn bliver disse bakterier suspenderet og kan ende i et overløb. Modelerne i dette projekt antager en lineær sammenhæng mellem aflastede antal bakterier og den efterfølgende bakteriekoncentration på en badestrand. Hvis variabiliteten i udløbskoncentrationen er kendt, kan det overføres til badevandskvaliteten forudsagt af modellen. Således er det ikke nødvendigt at videreudvikle modellen for at håndtere dette, men der skal iværksættes en målekampagne for hvert overløb for at bestemme den statistiske variation i koncentrationerne.

Valideringen af den hydrodynamiske model er beskrevet i Bilag 4, hvoraf det fremgår, at usikkerheder i strømningsforhold ikke forventes at give anledning til betydelige usikkerheder i bakteriekoncentrationerne grundet god overensstemmelse mellem model og målinger. Partikelspredningerne er modelleret med *random walk* konceptet, hvilket ikke introducerer numerisk dispersion grundet stedlig diskretisering. Derudover indeholder simuleringerne en tilfældig partikeltransport afhængig af hvirvelviskositeten, og ved indsættelse af mange partikler reducerer dette konsekvenserne af usikkerhederne ved de præsimulerede strømningsmønstre.

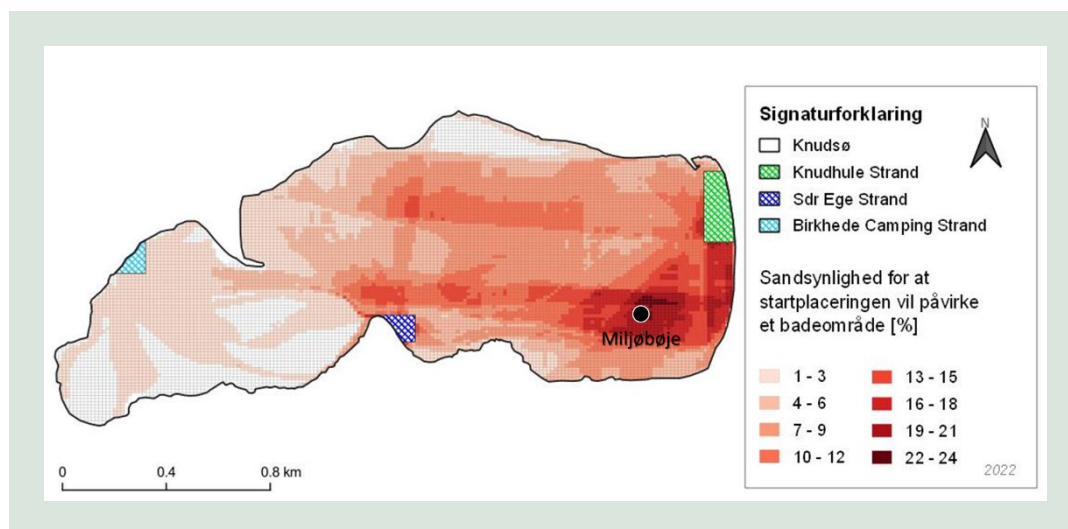
En komplikation, som blev opdaget i projektet – men ikke forfulgt pga. tidsbegrænsninger – var, at spildevand kan have en større densitet end varmt søvand. I det scenarie (sommer) kan det ske, at det køligere og tungere spildevand synker ned på større dybder, end modellerne forudsiger, og derfor fjerner bakterierne fra badende i overfladen. Bakterierne er således ikke forsvundet, men vil så heller ikke kunne måles i overfladen. Dette er helt anderledes end ved marine badeområder, hvor der er køligere saltvand, som har en større densitet end ferskvand (overløb), hvorved spildevandet kommer til overfladen og direkte i kontakt med de badende. På den måde vil modellerne overestimere forureningen i ferskvand og underestimere forureningen i saltvand, hvis opblandingen af lagdelte væsker ikke er præcist modelleret. Kvantificering af konsekvenserne af usikkerheder ved input samt bakterienedbrydning eller vækst kan opnås ved anvendelse af probabilistiske modeller. Herved vil sandsynligheden for forskellige input udtrykkes statistisk, og adskillige output genereres med en given sandsynlighed for hvert enkelt resultat. En sådan tilgang kræver dog store mængder computerkraft og lang processeringstid, og derfor er metoden ikke anvendelig til realtidvarsling om forringet badevandskvalitet. Denne usikkerhed er dog en del af den samlede risikovurdering, som varslingssystemet er baseret på. Ved risikobaseret varsling er kvantificering af modelusikkerheder derfor ikke essentiel at estimere, hvilket fordelagtiggør og muliggør deterministisk modellering af badevandskvalitet ved realtidvarsling.

7.2 Spredningsmodel for blågrønalger

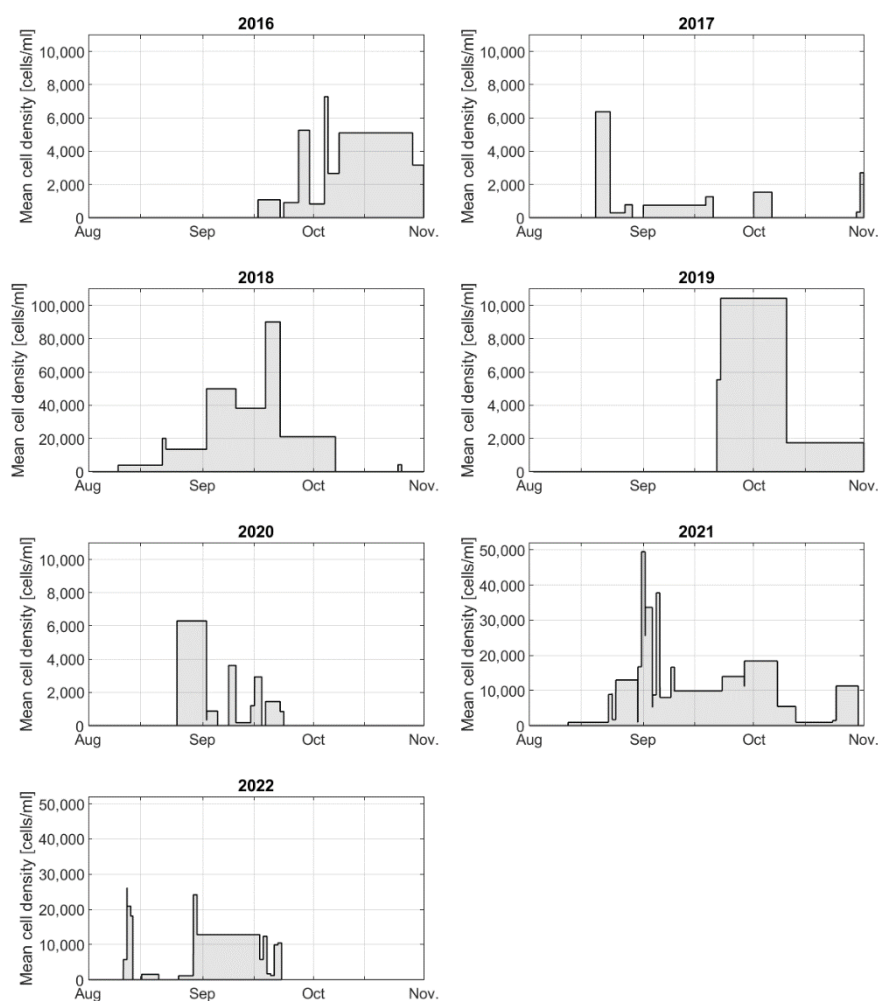
Koncentrationen af blågrønalger kan bestemmes med en blågrønalgesensor, som måler intensiteten af pigmentproteinet phycocyanin (afsnit 6.1). Da disse sensorer er bekostelige, er det urealistisk at have blågrønalgesensorer ved alle badestrande. Derfor er der i projektet udviklet en model, som kan estimere risikoen for badegæster ved de udvalgte badestrande baseret på målinger fra blot ét sted i vandet og koblet med vand- og stoftransportmodel (afsnit 7.1 og Bilag 4). Ved anvendelse af målebøje og model sendes automatisk en besked fra spredningsmodellen til varslingsskiltet på badestranden, hvis koncentrationen af blågrønalger overstiger 20.000 celler/ml (gul varsling) og 100.000 celler/ml (rød varsling). Denne varsling afblæses eller ændres, når koncentrationen estimeres lavere end grænseværdierne i 30 minutter.

7.2.1 Placering af miljøbøje for måling af blågrønalger

Miljøbøjen er placeret i det område, hvor det ud fra satellitdetektering er analyseret, at der er størst risiko for forekomster af blågrønalger, som vil blive transporteret til et badeområde.



FIGUR 14. Sandsynlighed for at blågrønalger vil forekomme og blive transporteret til et badeområde baseret på satellitdetekteringer og modelleringer af partikeltransport ved forskellige vindforhold. Målebøjen er placeret i området med størst sandsynlighed for forekomst af blågrønalger, der vil påvirke et badeområde.



FIGUR 15. Middelkoncentration af blågrønaler i Knudsø ud fra satellitdetekteringer.

Placeringen af miljøbøjen er vist på FIGUR 14. Anvendelse af satellitobservationer giver mulighed for detektering af blågrønaler og estimering af celledensiteter baseret på optiske egenskaber for vandkolonnen, ligesom det giver historiske data om blågrønaler. Baseret på satellitobservationer blev det konkluderet, at blågrønaler forekommer hvert år i Knudsø og tidligst er detekteret i august som vist på FIGUR 15.

I projektet blev satellitobservationer behandlet med en stedlig opløsning på omkring 300 m fra satellitterne Copernicus Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) lanceret af European Space Agency (ESA). Observationer fra Sentinel-3A (lanceret i 2016) og fra Sentinel-3B (lanceret i 2018) blev anvendt til analyserne. Satellitobservationer fra perioden maj til oktober hvert år er behandlet, da risikoen for blågrønalggeopblomstringer i danske søer er størst i denne periode. Satellitdetektering af blågrønaler er yderligere beskrevet i Bilag 5.

7.2.2 Spredningsmodel for blågrønaler

Spredning af blågrønaler ud fra det enkelte målepunkt er modelleret efter følgende princip. Ved detekteringer af blågrønaler med miljøbøjen indsættes partikler i spredningsmodellen for

blågrønalger. Hver partikel tildeles en masse afhængigt af den detekterede koncentration og volumen af den pågældende beregningscelle. Da blågrønalger forekommer i større områder, indsættes partiklerne omkring sensoren i en cirkel med en radius på 900 m. Koncentrationen af blågrønalger indsættes med en Gaussfordeling for at kompensere for den aftagende viden om koncentrationen af blågrønalger med stigende afstand fra miljøbøjen. Standardafvigelsen i modellen er sat til 190 m.

7.2.3 Stoftransport for blågrønalger

Den horisontale transport af blågrønalger er beskrevet ud fra en random walk-model som beskrevet for spredningsmodellen for fækale bakterier (afsnit 7.1). Blågrønalger, som har gasvakuoler, kan kontrollere deres opdrift, hvilket påvirker den vertikale transport, der derfor ikke beskrives fyldestgørende med en random walk-model uden hensyntagen til opdrift. Antagelser om konstant opdrift og derved fastholdelse af blågrønalger ved vandoverfladen leder til den hurtigste transport og mindste vertikale spredning. Dette scenarie er det mest kritiske for badende og blev derfor anvendt i modellen.

8. Varslingsdisplay til badegæster

I det tilfælde, at et af de to varslingsystemer (fækale bakterier og blågrønalger) forudsiger, at der er risiko for forringet badevandskvalitet, er det afgørende, at badegæster på stranden øjeblikkeligt orienteres herom, for derved at kunne tage de rette forholdsregler. Et opsat varslingsskilt kommunikerer online med algesensorerne og spredningsmodellen for blågrønalger og viser risikovurderingen direkte ved stranden.

For at sikre rettidig varslings er der fremstillet et elektronisk varslingsskilt til opsætning på stranden. I badevandsbekendtgørelsen (BEK nr. 917 af 27/06/2016) er beskrevet krav i forhold til varslings af kortvarig forurening forårsaget af fækale bakterier. Her er angivet et symbol, der skal benyttes, samt krav om orientering om forureningens årsag og varighed. Det samme er ikke tilfældet for opblomstring af alger, hvor proceduren for både overvågningen af algevækst og varslings om opblomstring er op til myndigheden i den enkelte kommune.

I nærværende projekt har projektgruppen i dialog med Skanderborg Kommune udarbejdet et varslingsskilt, der formidler tre risikogrupper for opblomstring af blågrønalger ved Knudhule Strand (FIGUR 16). Den risikobaserede tilgang er valgt, da algeopblomstringen kan forekomme både lokalt og meget pludseligt. Et varslingsskilt skal derfor ikke fratage badegæster ansvaret for selv at vurdere de lokale forhold, inden de går i vandet.



FIGUR 16. Varslingsskilt til varslings om risiko for opblomstring af blågrønalger. Skiltet har været opsat ved Knudhule Strand i en forsøgsperiode i sensommeren 2022.

Varslingsskiltet er opbygget med tre risikogrupper, der er formidlet i stil med et trafiklys. Grænseværdierne for hvert risikoniveau er baseret på retningslinjer om sundhedsskadelige niveauer af blågrønalger.

TABEL 1. Varslingsniveau samt tilhørende grænseværdier [celler/ml] for varslingskiltet ved Knudsø.

Varslingsniveau	Formidling på skilt	Grænseværdi [celler/ml]
Grøn	Lav risiko for algeropblomstring	<20.000
Gul	Risiko for algeropblomstring	20.000> - <100.000
Rød	Høj risiko for høje koncentrationer af alger	>100.000

Da der er en usikkerhed på omregning af phycocyanin (pigmentprotein, der detekteres af alge-sensoren), og antallet af celler pr. ml (afsnit 6.1), er der, ud fra et forsigtighedsprincip, indregnet en sikkerhedsfaktor på 10 % på grænseværdierne i de tre varslingsniveauer.

9. Demonstration af varsling

Varsling af risiko for forringet badevandskvalitet i forbindelse med overløb blev demonstreret i forsommeren 2021, mens varsling af blågrønalger med målebøje og spredningsmodel blev demonstreret i sensoren 2021.

Baseret på de registrerede overløbsmængder kunne spredningsmodellen forudsige hvor og hvornår forureningen føres til badestranden, samt om koncentrationen af fækale bakterier var tilstrækkelig høj til at udgøre en sundhedsrisiko for de badende.

9.1 Varsling af badevandskvalitet i forbindelse med overløb

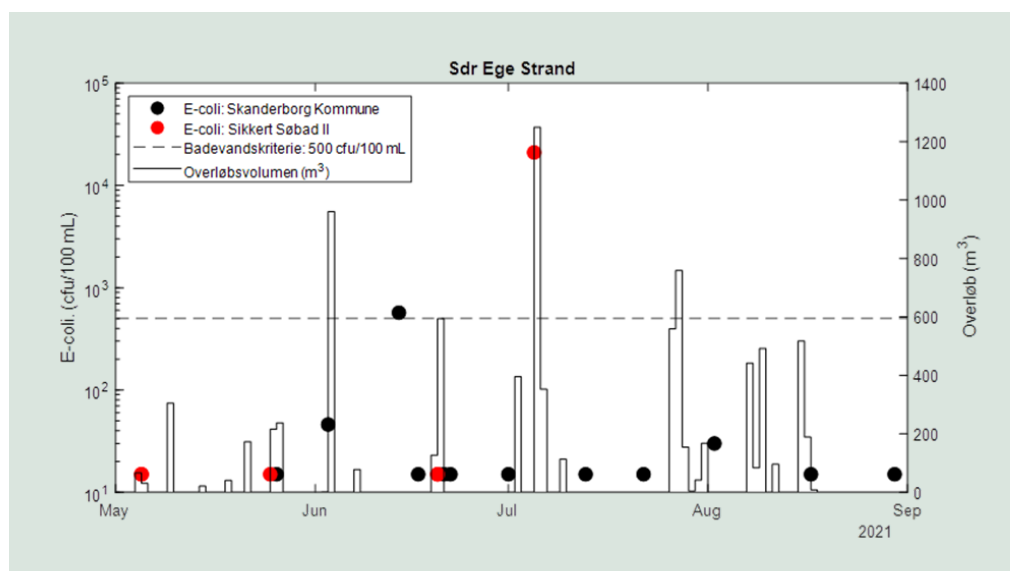
I nærværende projekt blev modellering af badevandskvalitet demonstreret i forbindelse med et antal overløbshændelser. Demonstrationen fordrede en projektgruppe, som stod klar i beredskab, når der var større regnskyl ind over Ry.

9.1.1 Planlagt prøvetagning vs. prøvetagning i forbindelse med overløb

I dag gennemføres kvalitetssikring af badevandet efter følgende metode: Forud for badevandssæsonen planlægges datoer for prøvetagning og analyse af badevand. Dermed udtages badevandprøverne tilfældigt og spredt hen over badevandssæsonen og giver et gennemsnitligt billede af badevandet i det pågældende område. Det kan imidlertid være tilfældigt, om der udtages en badevandsanalyse i forbindelse med en overløbshændelse, og derfor kan badevandsanalyserne alene give et misvisende billede af badevandskvaliteten. Skanderborg Kommunes målinger af badevandskvalitet er vist i Bilag 7 for perioden 2008-2022.

I projektet er der derfor iværksat et prøvetagningsprogram, der er målrettet at udtage badevandsanalyser i forbindelse med overløbshændelser.

I forbindelse med udvalgte overløb blev der udtaget prøver for analyse af E. coli og enterokokker (FIGUR 17 og TABEL 2 samt Bilag 2). Disse blev sammenholdt med overløbsvolumen, der er kendt fra flowregistreringen af overløbene. FIGUR 17 viser de af Skanderborg Kommune indberettede analyser af badevandskvaliteten (E. coli) ved Sønder Ege Badestrand (sort) og E. coli-analyser fra prøver udtaget ved overløb (røde, nærværende projekt) samt de målte daglige overløbsvolumener ved udløb U6 lidt vest for badevandsområdet.



FIGUR 17. Målte koncentrationer af E. coli i sommeren 2021 ved badeområdet i Sønder Ege fra prøver udtaget specifikt i forbindelse med en overløbshændelse (rød), fra planlagte prøveudtag af Skanderborg Kommune (sort) (hentet fra Danmarks Miljøportal, 2022) samt overløbsvolumen (streg).

Ud fra målingerne er det tydeligt, at Skanderborg Kommunes målinger er foretaget regelmæssigt og uden hensyntagen til, hvornår der har været regn eller overløb. Kun en enkelt af standardanalyserne er forholdsvis høj (over 500 cfu/100 mL). Målingerne (markeret med rød på FIGUR 17), som er foretaget i Sikkert Søbad II, er udtaget i forbindelse med overløb. I alle tilfælde er der målt høje koncentrationer ved udløbet U6 (data ikke vist). Kun i ét tilfælde, den 5. juli 2021, måles en høj koncentration af E.coli ved badeområdet. Disse data indikerer både at ikke alle overløbshændelse påvirker badevandskvaliteten ved badeområdet, og at en overløbshændelse kan påvirke badevandskvaliteten i høj grad uden at det kommer til udtryk i standardanalyser.

I det nedenstående eksemplificeres de målte hændelser med overløbs- og spredningsmodellen.

TABEL 2. Oversigt over hændelser med kvantitativ analyse af bakteriekoncentrationer i badeområder efter overløbshændelser.

Dato for overløbshændelse	Badeområde med vandprøve
05. maj 2021	Sdr. Ege Strand og Knudhule Strand
25. maj 2021	Sdr. Ege Strand
20. juni 2021	Sdr. Ege Strand og Knudhule Strand
05. juli 2021	Sdr. Ege Strand

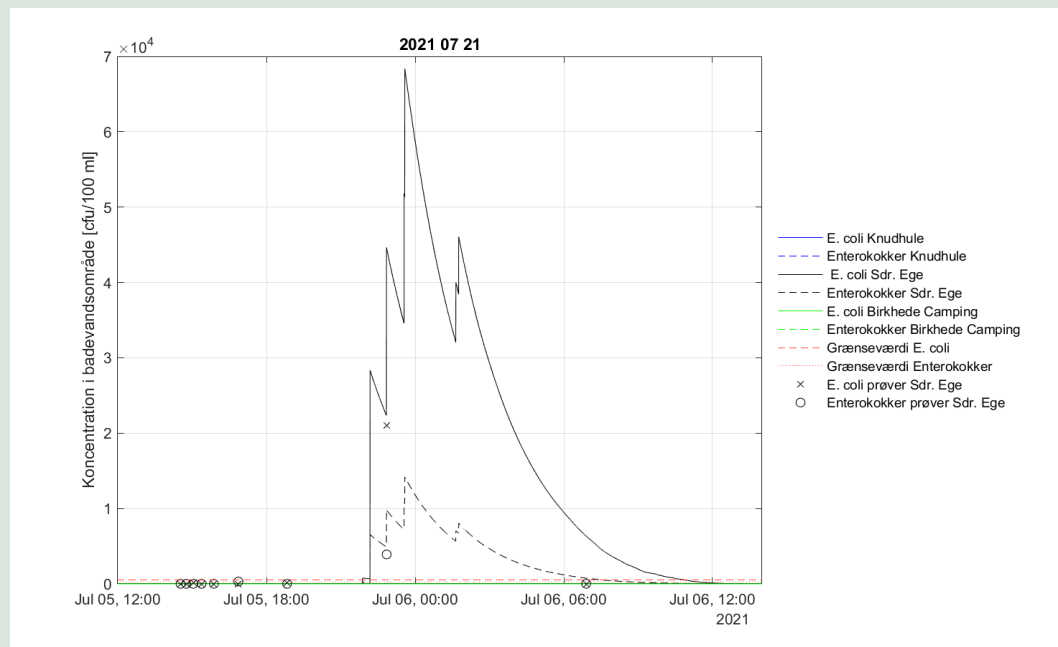
9.1.2 Simuleringer af fækale bakterier i forbindelse med overløb

Simuleringer med spredningsmodellen for fækale bakterier, blev afprøvet for samtlige overløbshændelser, hvor der blev udtaget prøver (TABEL 2).

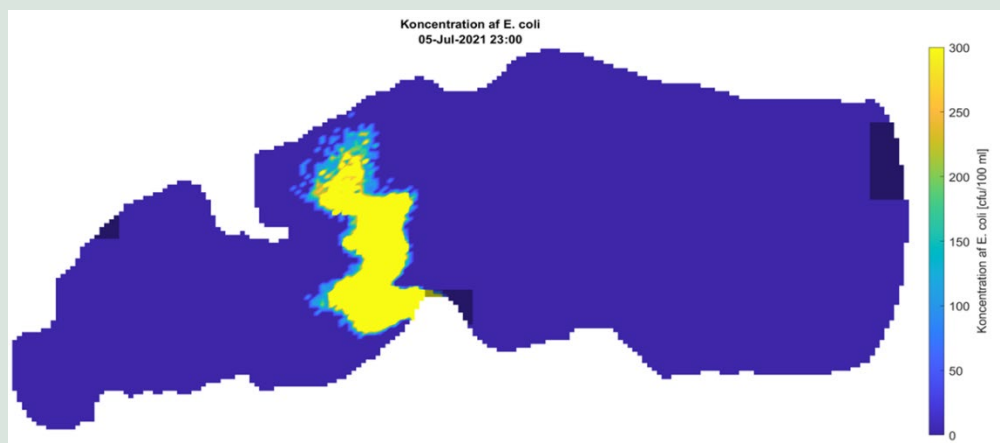
Der er generelt opnået god overensstemmelse mellem modellerede og målte koncentrationer. Resultaterne er nærmere beskrevet i Bilag 6. Løbende over en periode på 6-12 timer blev der i alt udtaget op til 9 vandprøver ved Sdr. Ege Strand, hvor koncentrationer af E. coli og enterokokker blev kvantificeret. Et eksempel på en overløbshændelse, hvor der er udtaget prøver ved Sdr. Ege Strand under hændelsen er vist sammen med de modellerede koncentrationer ved Sdr. Ege Strand på FIGUR 18.

Ifølge modelværktøjet gav overløbshændelsen den 5. maj 2021 anledning til høje koncentrationer af fækale bakterier ved Sdr. Ege Strand, der burde lede til en varsel om forringet badevandskvalitet ved stranden.

Ved overløbshændelsen den 5. juli 2021 var der god overensstemmelse mellem de målte og de modellerede koncentrationer af fækale bakterier (FIGUR 18 og FIGUR 19).



FIGUR 18. Modellerede og målte koncentrationer af fækale bakterier ved badestrandene den 5. juli 2021.



FIGUR 19. Modellerede koncentrationer af E. coli i Knudsø på tidspunktet for prøveudtagning ved Sdr. Ege Strand.

Den efterfølgende morgen blev der udtaget en vandprøve, som efter analyse ikke indikerede fortsat forurening i badeområdet, selvom data fra modellen fortsat estimerede høje koncentrationer af E. coli ved stranden. Dette kan indikere, at henfaldsmodellen antager mindre henfald end det reelle. Der er ikke foretaget kalibrering af henfaldsmodellen baseret på denne måling,

da der ikke foreligger et tilstrækkeligt datagrundlag (se afsnit 4.4 for diskussion om henfaldstider).

Der blev generelt opnået god overensstemmelse mellem modellerede og målte koncentrationer af fækale bakterier for de 4 hændelser (5. maj, 25. maj, 20. juni, 5. juli) med målte koncentrationer i badeområder. Baseret på disse resultater og valideringen af den hydrodynamiske strømningsmodel med GPS-målinger af strømninger (Bilag 4), er det konkluderet, at denne metode er meget anvendelig til varsling om fækale bakterier ved badeområder i realtid.

9.2 Varsling om blågrønalger

Varsling om risiko for forringet badevandskvalitet forårsaget af opblomstring af blågrønalger fungerer principielt på samme måde som varslingsmodellen for fækale bakterier, dog med den forskel, at spredningsmodellen for algeopblomstring modtager målte data for algedensitet fra miljøbøjen i søen frem for modelleret overløbsmonitoring. De tekniske detaljer om spredningsmodellen er beskrevet i afsnit 7.2.

For demonstration af varsling om blågrønalger blev der:

- udtaget vandprøver fra sensorerne til identifikation og optælling af blågrønalger i mikroskop, for validering af sensorerne. Vandprøverne blev konserveret i Lugol og opbevaret mørkt inden optælling
- udsat en miljøovervågningsbøje (afsnit 6.3) på Knudsø, lokation valgt efter historisk høje blågrønalgekoncentrationer (bestemt ud fra satellitdata, afsnit 7.2)
- udsat en AP-Lite blågrønalgesensor ved badebroen ved Knudhule for validering af modellen og for at teste, om den billigere AP-Lite er tilstrækkelig for varsling (FIGUR 20 tv.)
- opstillet et varslingsskilt (Kapitel 8) ved Knudhule strand, som blev aktiveret, hvis modellen indikerede, at koncentrationen af blågrønalger kunne nå et kritisk niveau.

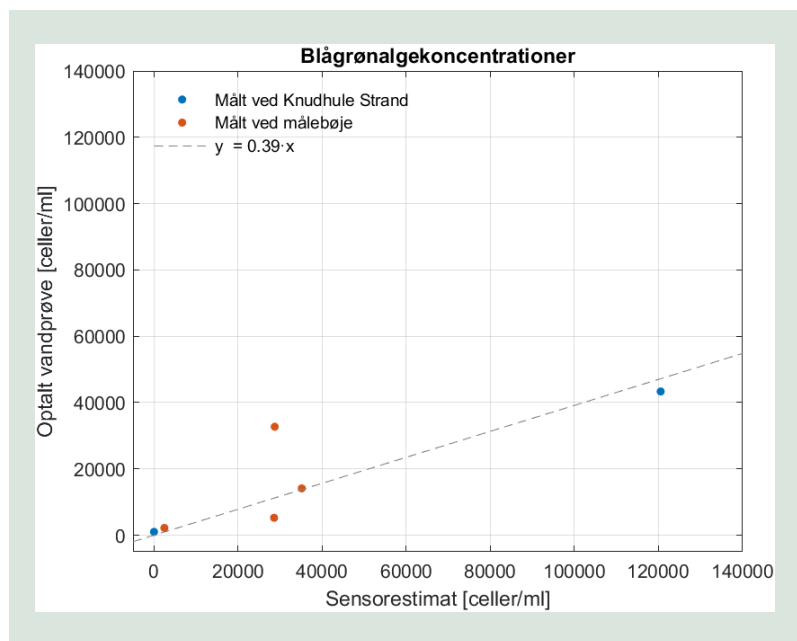
AP-6000-sensoren var programmeret til at måle blågrønalgedensiteten hvert 10. minut, logge måledata ved koncentrationer over 10.000 celler/ml og sende data til varslingssystemet én gang i døgnet ved koncentrationer mellem 10.000 og 20.000 celler/ml hhv. hver halve time ved koncentrationer >20.000 celler/ml.



FIGUR 20. Datalogger og AP-Lite ved Knudhule badebro (tv.) og begroet AP-Lite (th.).

9.2.1 Sensormåling vs. optælling

På FIGUR 21 er koncentrationer i vandprøverne vist i sammenligning med koncentrationen målt med sensorerne (miljøbøje på Knudsø og AP-Lite ved Knudhule badebro). Af figuren fremgår det, at sensorerne generelt er anvendelige til realtidsmålinger af blågrønalger. Dog er der ved særligt en enkelt måling ved Knudhule Strand en stor afvigelse (sensorestimat 120.000 mod optalt prøve 40.000), hvilket kan skyldes stor stedlig variabilitet eller pigmentindhold i cellerne, som afhænger af blandt andet art, vækststadie og sollyspåvirkning (se også afsnit 6.2) eller utilstrækkelig rensning af AP-Lite (FIGUR 20 th.).

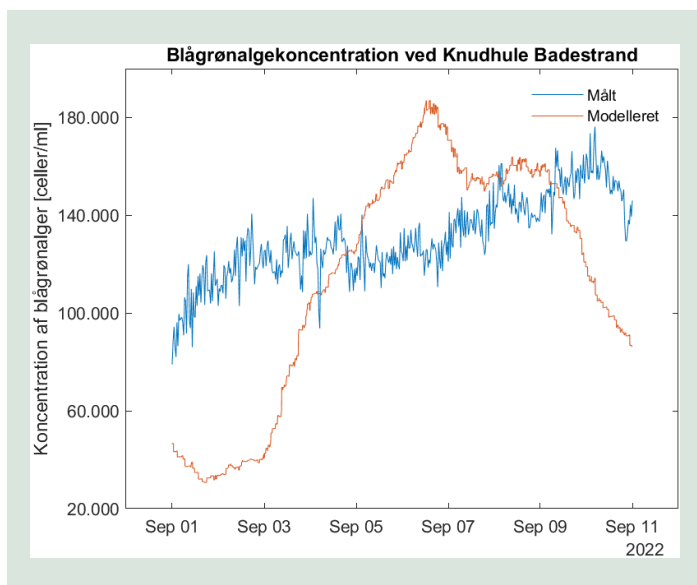


FIGUR 21. Sammenligning af optalte koncentrationer af blågrønalger og sensorestimerede koncentrationer.

Regressionslinjen mellem optalte og målte feltdata er +0,39, og dermed måler sensoren i felten en faktor 2,5 højere end det optalte. Idet sensoren skal bruges til at angive, om badevandet er over/under fastsatte kravværdier og ikke kvantificere det nøjagtige celletal, vurderes denne afvigelse tilstrækkelig til formålet.

9.2.2 Demonstration af modeldata

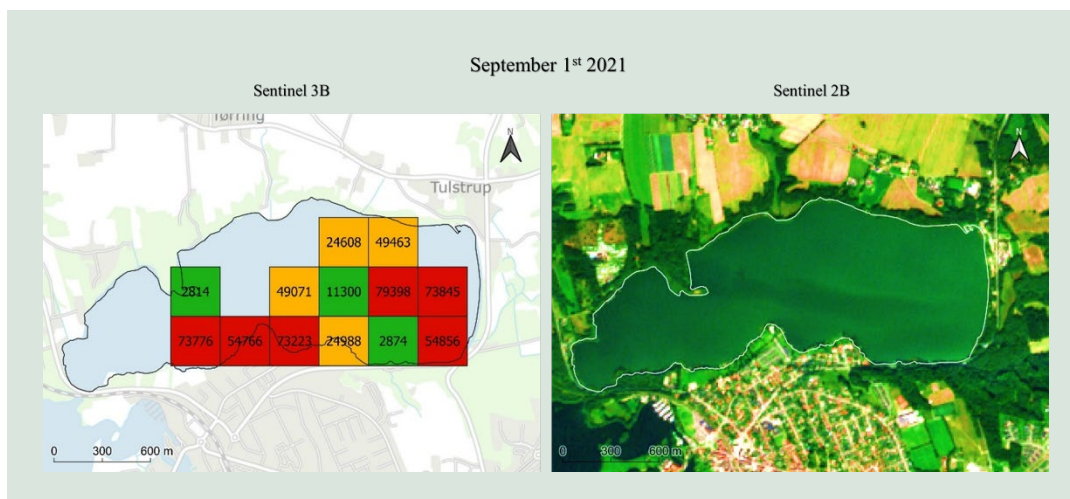
Sensordata fra miljøbøjen på Knudsø blev anvendt til at demonstrere og validere koncentrationer simuleret med spredningsmodellen for blågrønalger med målte koncentrationer ved badebroen i vækstperioden 1. september 2022 til 11. september 2022. Målinger ved bøjen er anvendt som input til modellen, og de modellerede koncentrationer ved badeområdet er sammenlignet med de af sensoren (AP-Lite) aflæste værdier (FIGUR 22).



FIGUR 22. Modellerede og målte koncentrationer af blågrøn-alger ved Knudhule Strand.

De simulerede og målte koncentrationer ved Knudhule Strand fremgår af FIGUR 22. Der er generelt god overensstemmelse mellem de to koncentrationer. Dog er der særligt i starten af perioden væsentlige forskelle, hvilket kan skyldes modelusikkerheder eller usikkerheder i sensormålingerne. Det er muligt, at der har siddet blågrøn-alger på AP-Lite-sensoren, som giver forkerte målinger.

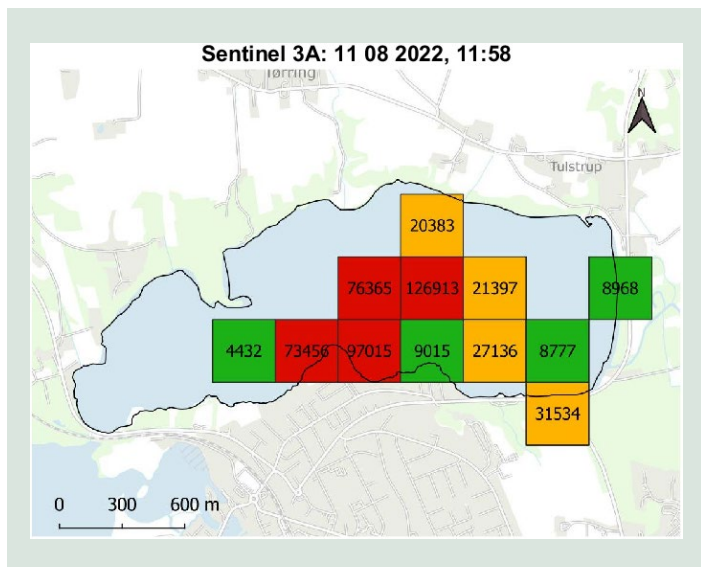
Sammenligningerne viser generelt gode resultater og blev i projektet anvendt til validering af observationer med Sentinel-3. Som det fremgår af FIGUR 23, er der observeret blågrøn-alger i større dele af Knudsø, hvilket er i overensstemmelse med misfarvninger observeret med Sentinel-2 på samme tidspunkt.



FIGUR 23. Venstre: Satellitdetektering foretaget med Sentinel-3B af blågrøn-alger med estimerede koncentrationer angivet i celler/ml. Højre: Satellitdetektering af misfarvninger foretaget med Sentinel-2B.

Satellitdetekteringerne af blågrøn-alger er sammenlignet med koncentrationer målt med sensoren på målebøjen. For en sammenligning er satellitobservationen vist på FIGUR 23, hvor celledensitet fra satellitmålinger er estimeret 9.000-27.000 celler/ml nær målebøjen og på samme

tidspunkt målt til 14.870 celler/ml af målebøjen. Sammenligningerne viste i projektet, at satellit-detektering af blågrønalger er en meget anvendelig metode, hvor der generelt opnås gode og pålidelige resultater. Desværre er satellitdata ikke tilgængelige i realtid og kan derfor ikke anvendes som daglig varslingsplatform for badevandskvalitet.



FIGUR 24. Satellitdetektering af blågrønalger med Sentinel-3A. Koncentrationer er angivet i celler/ml.

9.3 Resultater af algevarslingen

I forsøgsperioden (sommeren 2022) blev der målt koncentrationer af blågrønalger imellem 20.000 og 100.000 celler/ml i størstedelen af forsøgsperioden, hvilket betyder, at algevarslingen har varslet 'gult varslingsniveau' i lange perioder hen over sommeren.

Det vurderes, at det er nødvendigt med et nuanceret varslingsniveau for blågrønalger, mens man for koncentrationen af fækale bakterier bedre kan definere en grænseværdi, der udløser 'badning frarådes'. For den komplette varslingsplatform, der både varetager opblomstring af blågrønalger og forhøjede koncentrationer af fækale bakterier, vil det derfor være nødvendigt at opdele formidlingen af varslingsplatformen i to dele; en til formidling af risikoen for opblomstring af blågrønalger og en til varslingsplatform om forringet badevandskvalitet forårsaget af spildevandsoverløb. Løsningen kan fint integreres i samme varslingsplatform, men formodentligt ikke med samme symbolik.

10. Forebyggelse af opblomstring

Blågrønalger kan meget hurtigt opblomstre, når de rette betingelser opstår, og en opblomstring må derfor forhindres, hvis der ønskes bedre badevandskvalitet.

Bakteriofager (fager) er naturligt forekommende virus som inficerer og dræber bakterier. De er allestedsnærværende i miljøet, har høj værtsspecificitet og er uskadelige for dyr og planter. Cyanofager er virus, som inficerer cyanobakterier (blågrønalger), og findes naturligt i både ferskvands- og havmiljøer. De spiller en vigtig rolle i at kontrollere populationer af blågrønalger og sæsonvariationer i naturen. I modsætning til marine cyanofager, der er undersøgt i en række nylige undersøgelser, har der været meget lidt opmærksomhed på ferskvandscyanofager.

I nærværende projekt blev det undersøgt, hvorvidt det er muligt at reducere omfanget af algeblomstring med tidlig intervention via fager. Forsøgene er udført i laboratoriet og ikke efterprøvet i Knudsø.

I forsøget blev anvendt cyanobakterier/fager: *Nostoc* sp. (ATCC 27893) og *Nostoc* sp. fag A-1(L) (ATCC 27893-B16). Forsøgene havde to overordnede formål:

- For at undersøge om bakteriofager kan forsinke/tilbageholde opblomstring, blev den samme mængde fag tilsat i blågrønalgekultur af stigende koncentrationer.
- For at undersøge, om en lav koncentration af fager kan forsinke opblomstring, blev faldende koncentrationer af fager tilsat til den samme mængde af blågrønalger.

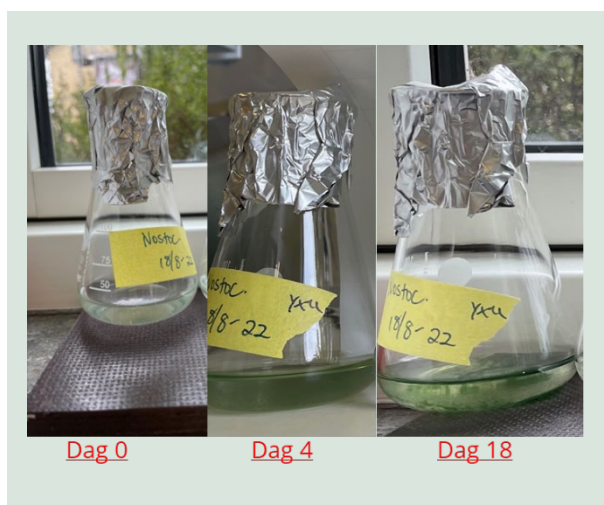
Opstillingen var 16 prøver bestående af en 4x4 matrix af blågrønalger og fager (10x seriel fortyndingsrække) (TABEL 3). Den højeste bakteriekoncentration (10^0) blev bestemt til 47.500 celle/ml ved celletælling. Det var ikke muligt at bestemme den absolutte fagkoncentration i projektet. Kontrollen for vækst var en blågrønalgekultur 10^0 uden tilsat fag. Forsøgene blev udført i Erlenmeyerflasker uden omrøring ved stuetemperatur på nordvendt vindueskarm i laboratorie i perioden 18/8/2022-29/9/2022.

TABEL 3. Prøverne til fagforsøg. Prøver 10^0 (ufortyndet prøver) blev brugt til fremstilling af 10^{-1} til 10^{-3} fortyndinger.

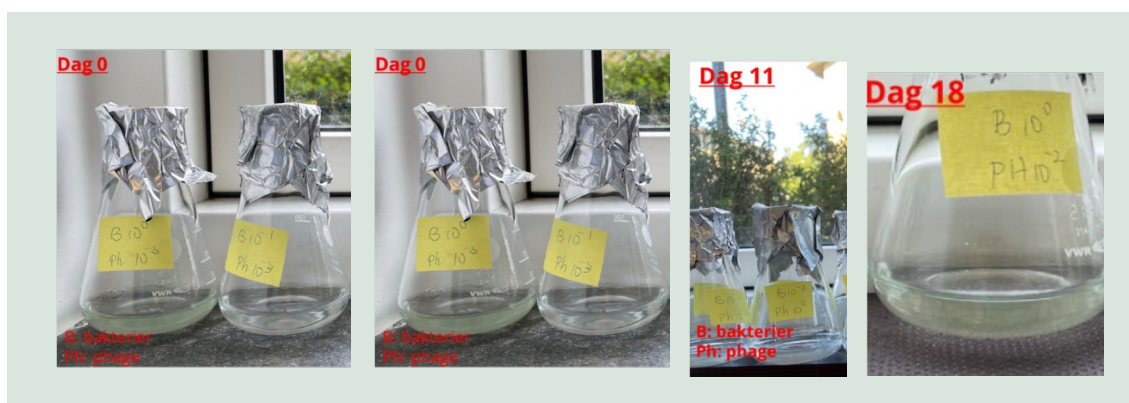
Cyanobakterieprøver					
		10 ⁰ (47.500 celle/mL)	10 ⁻¹ (4.750 celle/mL)	10 ⁻² (475 celle/mL)	10 ⁻³ (47,5 celle/mL)
Fagprøver	10 ⁰	x	x	x	x
	10 ⁻¹	x	x	x	x
	10 ⁻²	x	x	x	x
	10 ⁻³	x	x	x	x

Resultatet viser, at fager kan forhindre opblomstring af blågrønalger. Kontrollen uden fag viste tydelig vækst allerede på dag 4 (FIGUR 25), mens alle 16 prøver med fag var klare uden synlig tilstedeværelse af blågrønalger fra dag 0 til dag 11 (FIGUR 26 og Bilag 8), hvorved fager forsinkede opblomstring i mindst 7 dage i sammenlignet med kontrollen. På dag 18 viste cyanobakteriekontrollen uden fag kraftig vækst (FIGUR 25), mens det kun var prøverne med den

højeste koncentration af cyanobakterier, som viste tegn på vækst (FIGUR 26, Bilag 7). Selv en lav koncentration af fag (10^{-3}) forsinkede væksten (FIGUR 27).



FIGUR 25. Vækst af kontrollen, som ikke blev tilsat fag over forsøgsperioden.



FIGUR 26. Tidsserie med tilbageholdelse af opblomstring af blågrønalger. Flere billeder kan ses i Bilag 8.

Ligesom startkoncentrationen af blågrønalger havde betydning for, hvor længe en opblomstring kunne tilbageholdes, havde en startkoncentration af fag ligeledes en øget forsinkelse af opblomstring (FIGUR 27).

Det vurderes at en tilsætning af de rigtige fager til en vandmatrice kunne forsinke opblomstring af blågrønalger med 1-3 uger. I felten kræver en sådan tilsætning en varieret sammensætning af fager, og at der løbende tilsættes fager, så de bliver i vandfasen. Dette er første test af muligheder, og der er fortsat lang vej til anvendelse i fuldskala i en sø.

Dag 33



B: bakterier
Ph: phage

FIGUR 27. Eksempel på prøver ved forsøg dag 33. (A) Væsken i B 10^0 -prøver viser en kraftig vækst af cyanobakterier. (B) Væsken i B 10^{-1} -prøver havde stigende intensitet af grønne tråde i Ph 10^0 til Ph 10^{-3} . (C-D) Væsken i B 10^{-2} - og B 10^{-3} -prøver havde et lille antal grønne celleklumper.

11. Referencer

Aarsnes, Tobias Sandegaard, Nielsen, Mikkel Ledet (2022) Desinficering af overløbsvand til Knudsø med henblik på forbedring af badevandskvalitet. Kandidatspeciale Aalborg Universitet vand og Miljø, juni 2022

Danmarks Miljøportal, 2022. Danmarks Miljøportal. Spildevand og Badevand –

PULS, 2022. [URL](#)

Whitman RL, Nevers MB, Korinek GC, Byappanahalli MN. Solar and temporal effects on Escherichia coli concentration at a Lake Michigan swimming beach. Appl Environ Microbiol. 2004 Jul;70(7):4276-85. doi: 10.1128/AEM.70.7.4276-4285.2004. PMID: 15240311; PMCID: PMC444827.

Petersen F, Hubbart JA. Physical Factors Impacting the Survival and Occurrence of Escherichia coli in Secondary Habitats. *Water*. 2020; 12(6):1796.

Savageau, M. A. (1983). Escherichia coli Habitats, Cell Types, and Molecular Mechanisms of Gene Control. The American Naturalist, 122(6), 732–744.

Price PB, Sowers T. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival. Proc Natl Acad Sci U S A. 2004 Mar 30;101(13):4631-6. doi: 10.1073/pnas.0400522101. PMID: 15070769; PMCID: PMC384798.

Wcislo R, Chrost RJ. (2000). Survival of Escherichia coli in freshwater. Polish Journal of Environmental Studies 9:215-222.

Wei C, Zhao X. Induction of Viable but Nonculturable Escherichia coli O157:H7 by Low Temperature and Its Resuscitation. Front Microbiol. 2018 Nov 13;9:2728. doi: 10.3389/fmicb.2018.02728. PMID: 30555428; PMCID: PMC6282054.

<https://miljoegis.mim.dk/spatialmap?profile=vandrammedirektiv3basis2019>

Richard P. Stumpf and P. Jeremy Werdell, 2010. Adjustment of ocean color sensor calibration through multi-band statistics. Optical Society of America 2010.

Kaylan Randolph, Jeff Wilson, Lenore Tedesco, Lin Li, D. Lani Pascual, Emmanuel Soyeux, 2008. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin. Remote Sensing of Environment (RSE), Volume 112, Issue 11, 15 November 2008, Pages 4009-4019.

Bilag 1. Bjærgning af miljøbøje fra søbund i Knudsø

Da bøjerne sank, blev der straks igangsat en eftersøgning af bøjerne. Søen er imidlertid 20 meter dyb på det sted, hvor bøjerne var sat ud, og da bøjernes præcise lokation var vanskelig at bestemme, blev bjærgningen kompliceret.

Historik

Umiddelbart efter at bøjerne sank, blev der i en lille gummiåb med motor trukket kroge hen over bunden i det område, hvor bøjen var blevet forankret. Det lykkedes efter nogle timer at få fat i ankerlinen, og en lille bøje blev sat fast til ankerlinen.

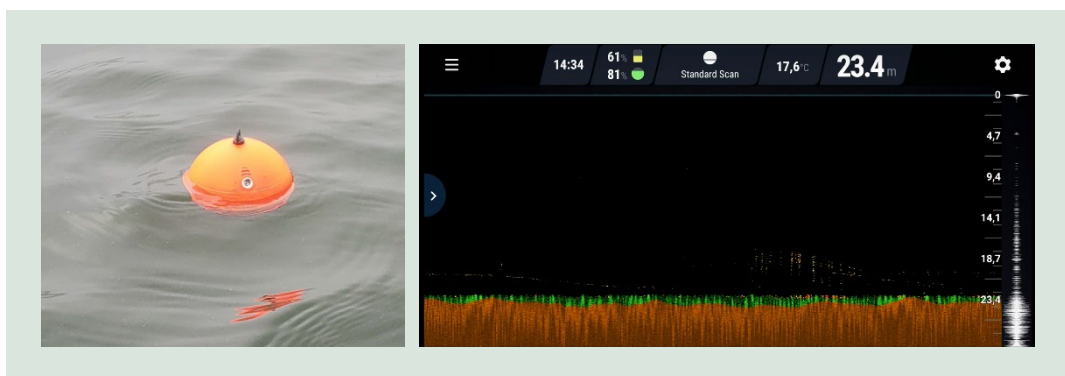


FIGUR 28. Billeder af de både, der blev brugt til at trække vod i søen.

Dagen efter blev en større båd sejlet ud på placeringen for at trække bøjerne op til overfladen. Forsøget mislykkedes, da bøjen var så tung, at ankerlinen sprang, umiddelbart inden bøjerne brød overfladen. Under bjærgningsforsøget blev bøjerne flyttet fra den oprindelige position, da båden drev i den hårde vind.

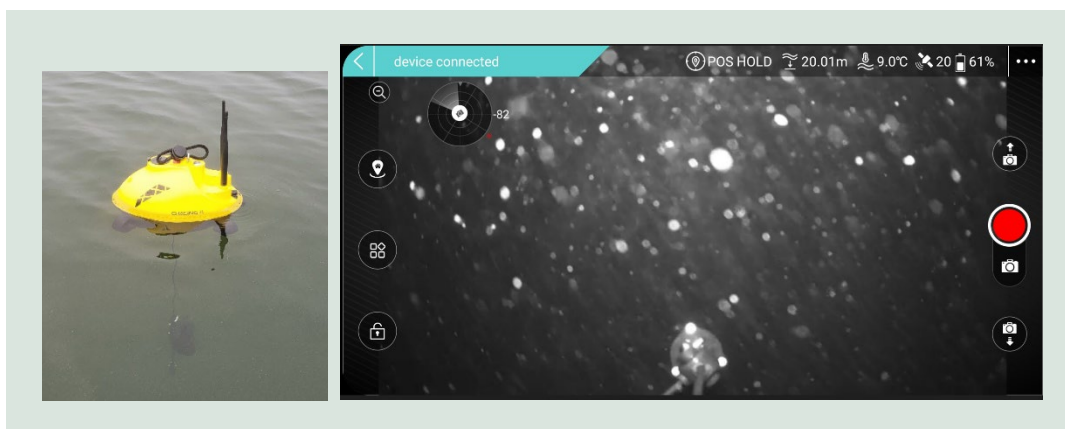
I løbet af efteråret 2021 blev der, for at finde bøjernes nye position, gentagne gange trukket kroge hen over bunden.

Da det ikke lykkedes at lokalisere bøjerne ved at trække vod over bunden, blev en stor del af bunden scannet vha. en Deeper Smart Sonar, som normalt anvendes til at scanne havet for fisk.



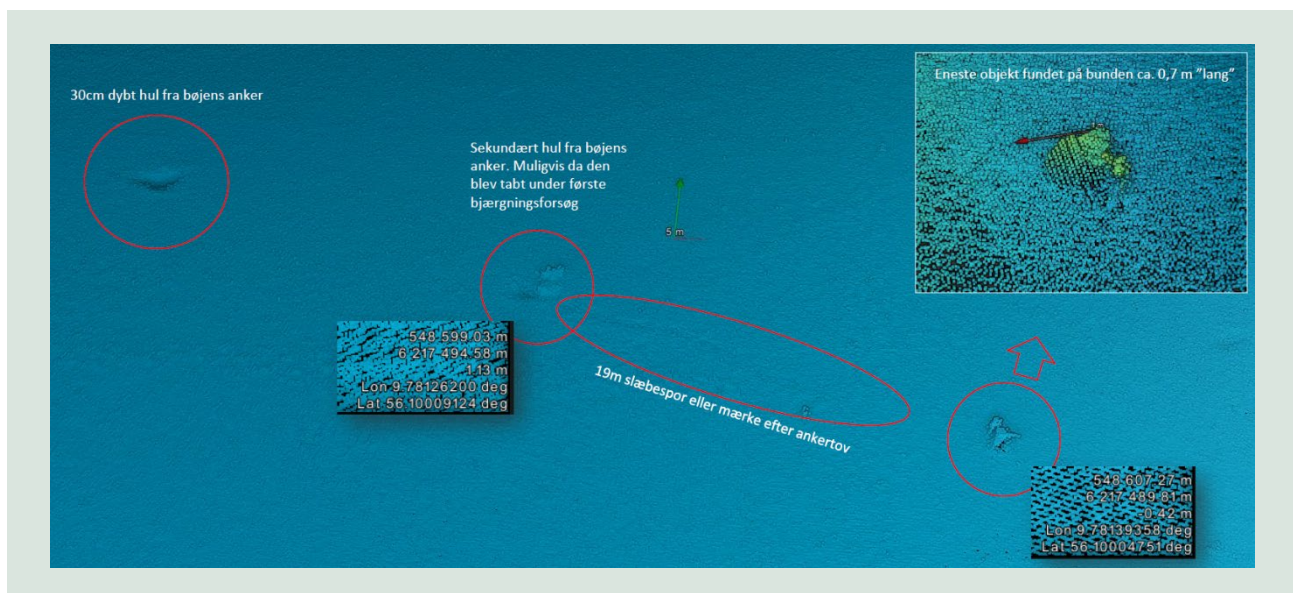
FIGUR 29. Deeper Smart Sonar og eksempel på scanningsbillede.

Sammen med Deeper Smart Sonar blev der anvendt en drone, Chasing F1 Fish Finder Sonar. Dronen kan sejles hen på en bestemt position og sænke et kamera ned mod bunden for at lede efter fisk eller andre genstande. Det var ikke muligt at filme søens bund, fordi partikler i søen blev overeksponeret af lyset på kameraet.



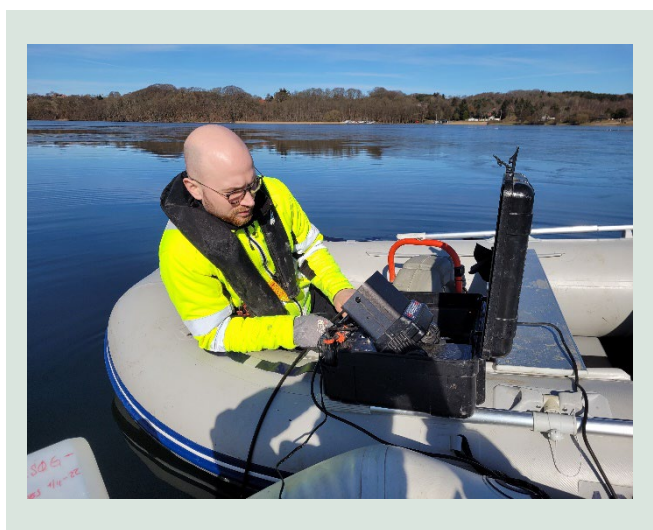
FIGUR 30. Sonar Drone og eksempel på billede taget med drones kamera på søens bund.

I oktober 2021 blev bunden af Knudsø scannet af Geopartner. Den præcise scanning kunne identificere markeringer på bunden af Knudsø, der kunne stemme overens med forventningerne. Der blev lokaliseret to huller på bunden, der vurderes at stamme fra bøjens anker. Ikke så langt fra den oprindelige placering kunne et aftryk af et objekt ses. Objektet vurderes at være det bedste bud på bøjen.



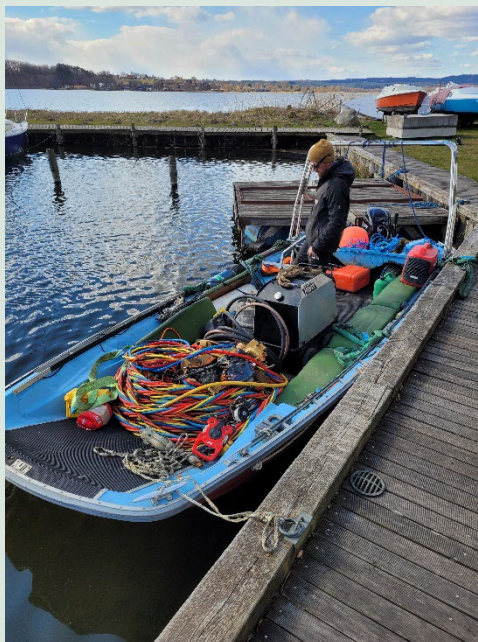
FIGUR 31. Scanningsbillede af bunden af Knudsø udført af Geopartner. På scanningsbilledet ses huller i bunden fra bøgens anker samt et objekt, der er på størrelse med bøjen.

For at undersøge, om det objekt, der var blevet lokaliseret på bunden, var bøjen, blev det endnu en gang forsøgt at finde bøjen. Først blev bunden undersøgt på den nye lokalitet med sonardronen og senere ved hjælp af et SeeSnake-kamera. Det lykkedes ikke at bekræfte, at objektet var miljøbøjen.



FIGUR 32. Filmoptagelse af bunden på ny lokalitet med SeeSnake-kamera.

Til trods for at det ikke lykkedes at bekræfte, at objektet på bunden var miljøbøjen, blev det besluttet at sende et dykkerhold ud på den nye lokalitet. Et dykkerhold bestående af tre personer sejlede ud fra Knudhule i foråret 2022.



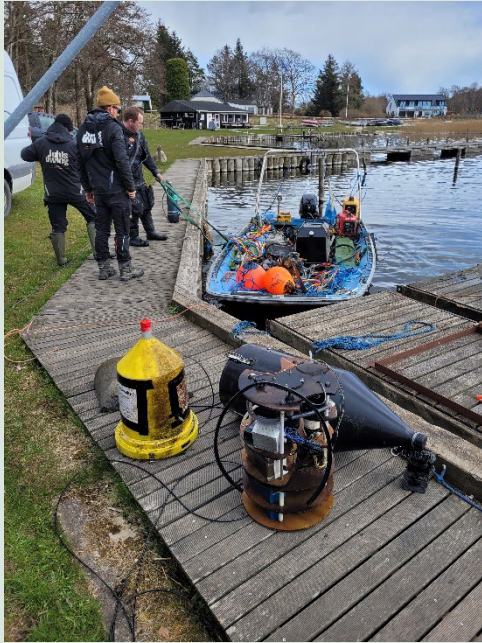
FIGUR 33. Billeder af erhvervsdykkeren, der forbereder eftersøgning af bøjen.

Dykkeren blev klargjort og dykkede ned ved positionen angivet via Geopartners scanning. Efter kort tid, kunne dykkeren bekræfte at objektet fra scanningen var den sunkne bøje.



FIGUR 34. Billede af dykkeren og billede af bøjen, der blev lokaliseret og efterfølgende bjærget.

Bøjen blev trukket op til overfladen og fikseret til bådens ræling. Båden blev sejlet tilbage til Ry Sejlklub og trukket på land.



FIGUR 35. Billede af bøjen efter bjærgning.

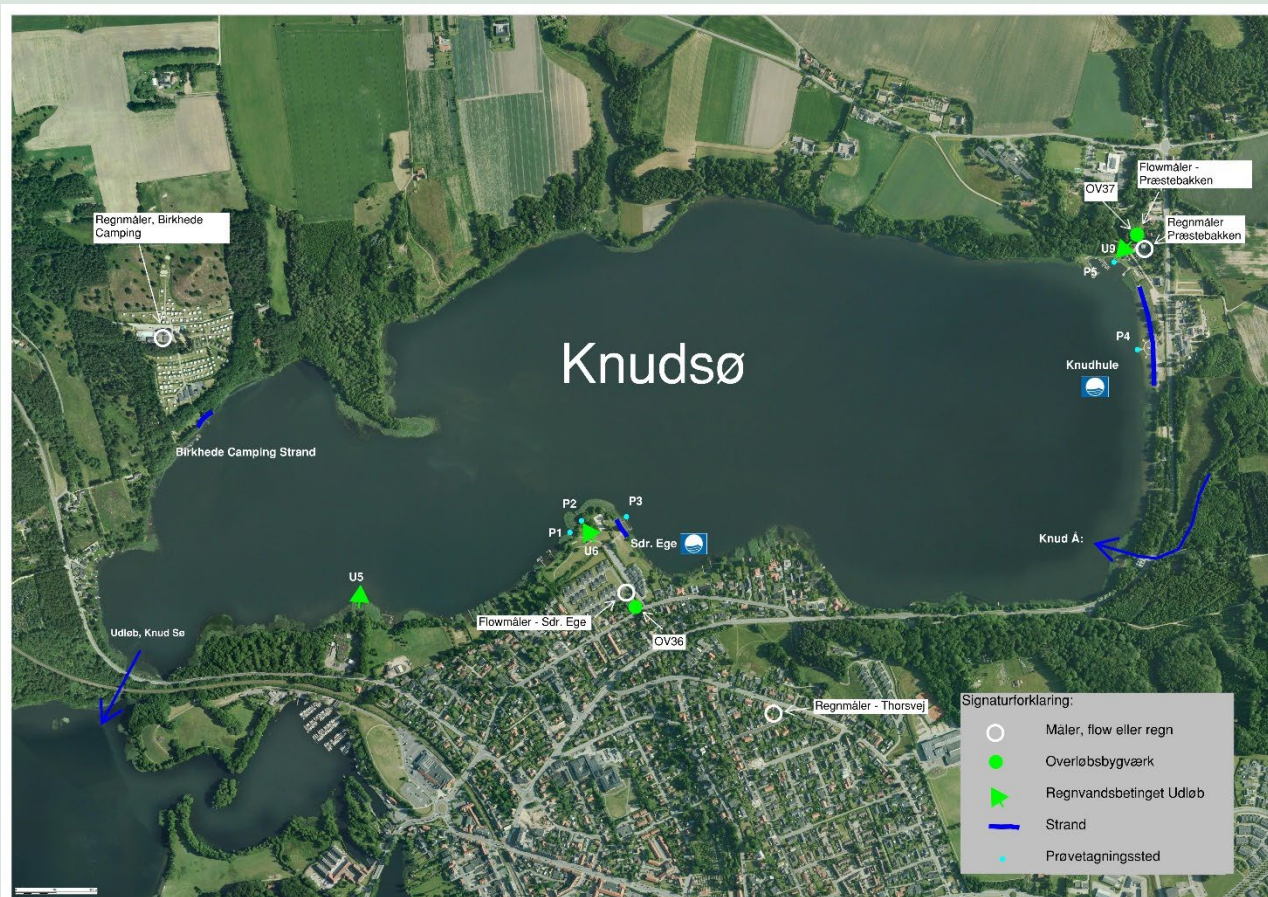
Bilag 2. Prøvetagning og resultater ifm. Overløbshændelser i Knudsø

I dette bilag beskrives, hvordan regnbetingede overløb til Knudsø logges. Desuden findes i bilaget en oversigt over Skanderborg Kommunes måling af badevandskvaliteten. Data fra disse målinger er listet og sammenlignet med data for, hvornår der sidst har været registreret en overløbshændelse. Derudover er det beskrevet, hvordan projektets prøver er udtaget, ligesom de indsamlede prøver med analyseresultatet er listet.

Logning af overløb i Knudsø

Til overvågning af, hvor ofte og hvor meget der aflastes til Knudsø fra de regnbetingede overløb, har Skanderborg Forsyning etableret overløbsloggere, flowmålere og regnmålere rundt om søen. Alle indsamlede data fra logningen gemmes og kan vises på en FTP-server, der hostes af Danova A/S, som også har leveret måleudstyr og står for opsætning og drift af udstyret. Bagerst i bilaget under 'Måleudstyr til logning af overløb' er det anvendte udstyr listet.

På nedenstående figur ses Knudsø med de 3 regnvandsrelaterede overløb, U5 ved Ry Renseanlæg, U6 ved Sdr. Ege og U9 ved Ry Sejlklub tæt på Knudhule badestrand.



FIGUR 36. Knudsø. Placering af overløbsbygværker og udløb samt placering af måleudstyr.

Sdr. Ege, OV36, U6

Ved Sdr. Ege sker det regnbetingede overløb fra overløbsbygværk OV36, som via et 250 m langt $\varnothing$ 1000 betonrør aflaster til Knudsø. Selve aflastningspunktet ligger i Søbrinken og er ikke hegnet ind. Nedenstående ses billeder af udledningspunktet. Oplandet til OV 36 består af den nordøstlige del af Ry. Oplandet er samlet på 61,2 ha, hvoraf 9,2 ha er separatkloakeret eller spildevandskloakeret, og 52,4 ha er fælleskloakeret.

I overløbsbygværk OV36 er der etableret en niveaumåler, som logger, hvornår vandstanden i bygværket er højt nok til, at der sker overløb – loggeren sender en sms til udvalgte projektdeltagere, når der registreres et overløb. Ca. 40 m nedstrøms OV36 i overløbsledningen er der monteret en flowmåler, som logger flow og volumen af overløbet.



FIGUR 37. Udløb i Knudsø: Fra venstre: U6 ved Sdr. Ege, udløb i vegetation og U6 ved kraftigt overløb. Mod Højre: U9 i bolværket ved Ry Sejlklub (ikke synlig).

Præstebakken

På Præstebakken er overløbsbygværket OV37, som gennem en 75,4 m Ø250 plastledning aflaster til Knudsø. Aflastningspunktet er placeret i bolværket ved Ry Sejlklub ca. 0,5 m under søens overflade. Der er placeret en niveaumåler i overløbsbygværket, og umiddelbart nedstrøms bygværket er der placeret en flowmåler i overløbsledningen. Oplandet til OV37, som er på 4,1 ha, er fælleskloakeret.

Ry Renseanlæg

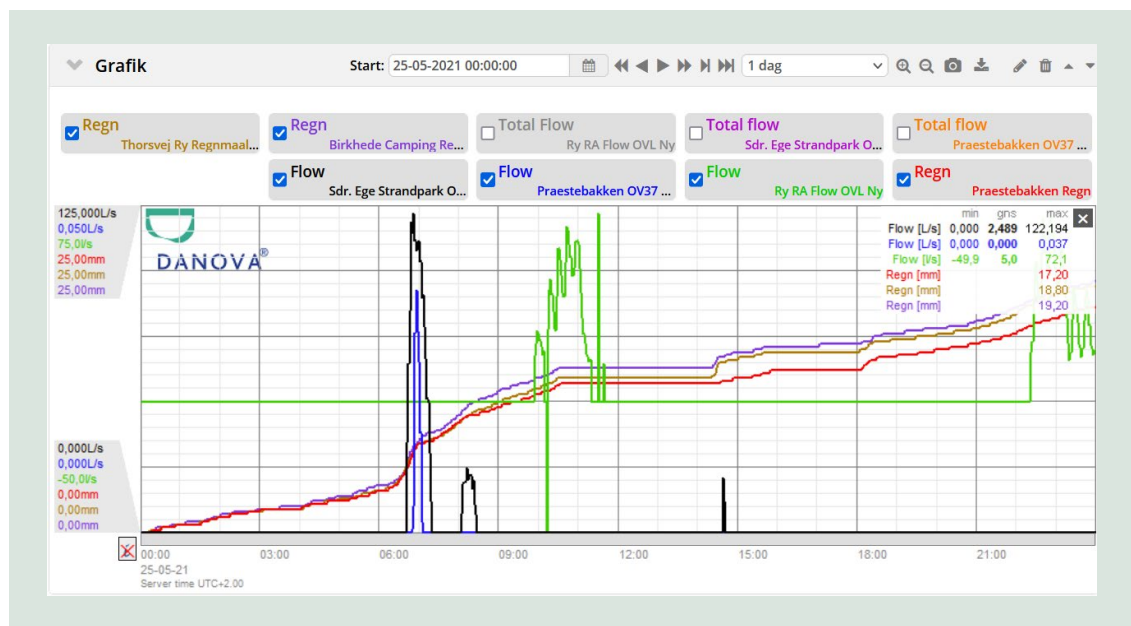
Når Ry Renseanlæg ved kraftig regn ikke har kapacitet til at håndtere tilløbsmængden, bliver det overskydende fællesvand pumpet op i et åbent betonsparebassin, som er koblet til et åbent jordbassin – det samlede volumen kendes ikke præcist, men det anslås, at der er et sparevolumen på 1250 m³. Er sparevolumen tilstrækkeligt, graviterer fællesvandet retur til renseanlægget. Er sparevolumen ikke tilstrækkeligt, aflastes der til Knudsø via en overløbsledning i dimension Ø400, som ender ca. 75 m ude i søen. I overløbsledningen fra sparebassinet

er der monteret en flowmåler til logning af flow og volumen af overløbet. Kotten på overløbsledningen er under vandspejlet på søen, hvorfor flowmåleren også måler negativt flow, når søen slår tilbage. Det har været kompliceret at få flowmåleren monteret – derfor er der kun data fra måleren fra medio marts 2021.

Regnmålere

Som supplement til logningen af overløb er der etableret 3 regnmålere omkring Knudsø. Der er monteret en regnmåler ved Birkhede Camping, en ved Præstebakken og en i oplandet til overløb OV36 på Thorsvej 41.

På FIGUR 38 ses en typisk graf med de parametre, der logges ved et overløb. Grafen er hentet fra Danovas FTP-server.



FIGUR 38. Logning af overløb den 25. maj 2021. Farvekode for Flowkurver: Sort: OV36, Sdr. Ege. Blå: OV37, Præstebakken. Grøn: U5, Ry Renseanlæg. Farvekode for regnkurver: Lilla: Birkhede Camping. Rød: Præstebakken. Brun: Thorsvej.

Skanderborg Kommunes målinger

I denne rapport er der medtaget prøver for badevandskvaliteten, som Skanderborg Kommune har udtaget i Knudsø i perioden 2020-2022. Skanderborg Kommune udtager prøver ved hhv. Knudhule, Sdr. Ege og Birkhede Camping. Analyserne i form af badevandsrapporter er offentligt tilgængelige og kan ses på kommunens hjemmeside.

Skanderborg Kommune registrerer en række faktorer i søen såsom sigtedybde, temperatur, pH, strømninger mv., men her er alene medtaget analyserne for bakterier.

I nedenstående skema er analyseresultaterne fra Skanderborg Kommune for badevandets indhold af E. Coli og enterokokker listet. Kommunens data er sammenholdt med data for, hvornår der sidst har været et registreret overløb fra Skanderborg Forsynings logger på Sdr. Ege. Der er ikke medtaget overløb fra præstebakken, OV37.

Af tabellen ses, at der ikke er fundet høje koncentrationer af fækale bakterier ved Knudhule.

Ved Birkhede Camping er der i en enkelt prøve udtaget den 31-8-2020 fundet en koncentration af E. Coli, der adskiller sig fra baggrundsniveauet ved at være lidt højere (130 E.coli/100

ml). Dette kan være en lav påvirkning fra overløbet fra U6, som er sket 62 timer inden prøvetagning. Det kan dog også være naturlig variation.

Ved Sdr. Ege er koncentrationen af fækale bakterier generelt lav. I en enkelt prøve udtaget 14-6-2021 er der målt en middelhøj koncentration (570 E. coli/100 ml). Prøvetagningen er foretaget ca. 175 timer efter et overløb, hvorfor det ikke synes realistisk, at det er overløbet, der har medført stigningen.

TABEL 4. Analyseresultater for E. Coli og enterokokker ved Knudsøs badestrande for 2020-2022. Data fra overløbet før prøvetagningen er indskrevet i skemaet, og i kolonnen 'Tid før Prøvetagning' er det angivet, hvor mange timer der er gået fra overløbshændelsen er indtruffet, til at prøven er udtaget.

Birkhede Camping			Sdr. Ege Strand		Knudhule Strand		Antal timer mellem overløb og prøvetagning	Udledningspunkt	Dato	Tid		Volumen, Peak aflastet pr. overløb	Peak
Dato for prøvetagning	E.coli/100 ml	Enterokokker/100 ml	E.coli/100 ml	Enterokokker/100 ml	E.coli/100 ml	Enterokokker/100 ml				[timer]	Dato for overløb		
26-05-2020	<15	<15	<15	<15	<15	<15	85	U6	22-05-2020	20:09	20:59	200	151
23-06-2020	<15	<15	<15	<15	<15	<15	95	U6	19-06-2020	12:11	12:51	82	44
02-07-2020	<15	<15	-	-	<15	<15	43	U6	30-06-2020	12:54	13:16	64	79
14-07-2020	<15	<15	<15	<15	15	<15	168	U6	07-07-2020	11:41	12:32	557	435
23-07-2020			<15	<15	<15	<15	385	U6	07-07-2020	11:41	12:32	557	435
03-08-2020	<15	<15	<15	<15	<15	<15	154	U6	28-07-2020	04:28	05:39	251	137
17-08-2020			<15	<15	<15	<15	487	U6	28-07-2020	04:28	05:39	251	137
31-08-2020	130	<15	<15	<15	<15	<15	62	U6	28-08-2020	20:57	00:00	1691	956
26-05-2021	<15	<15	15	<15	15	<15	7	U6	26-05-2021	05:53	09:50	237	60
03-06-2021	-	-	46	<15	<15	<15	7	U6	03-06-2021	04:38	06:27	917	416
14-06-2021	-	-	570	77	<15	<15	175	U6	07-06-2021	05:20	05:44	78	82
17-06-2021	-	-	<15	<15	-	-	247	U6	07-06-2021	05:20	05:44	78	82
21-06-2021	-	-	<15	<15	-	-	30	U6	20-06-2021	10:20	12:09	593	184
22-06-2021	<15	<15	15	15	<15	<15	50	U6	20-06-2021	10:20	12:09	593	184
01-07-2021	-	-	<15	<15	15	<15	266	U6	20-06-2021	10:20	12:09	593	184
13-07-2021	<15	15	15	<15	<15	<15	98	U6	09-07-2021	14:19	14:40	112	151
22-07-2021	-	-	15	<15	<15	<15	311	U6	09-07-2021	14:19	14:40	112	151
02-08-2021	<15	15	30	<15	<15	<15	52	U6	31-07-2021	12:00	12:23	165	231

Projektets målinger

I projektperioden er der udtaget vandprøver til analyse for E. coli og enterokokker i forbindelse med overløb.

Der er udtaget 5 prøveserier. Der er i projektet ikke anvendt transportabelt analyseudstyr, hvilket har medført, at prøvetagningen har været afhængig af, at udtagne prøver kunne modtages og analyseres af laboratoriet indenfor 24 timer efter udtag. Det betyder, at det logistisk ikke har været muligt at udtage prøver fx fredag og lørdag.

Prøvetagningen er foretaget manuelt af en af projektdeltagerne med kort transportstand til Knudsø og er igangsat ud fra regnhændelser og SMS'er udsendt af logningsudstyret ved overløb, se evt. afsnittet 'Logning af overløb i Knudsø'.

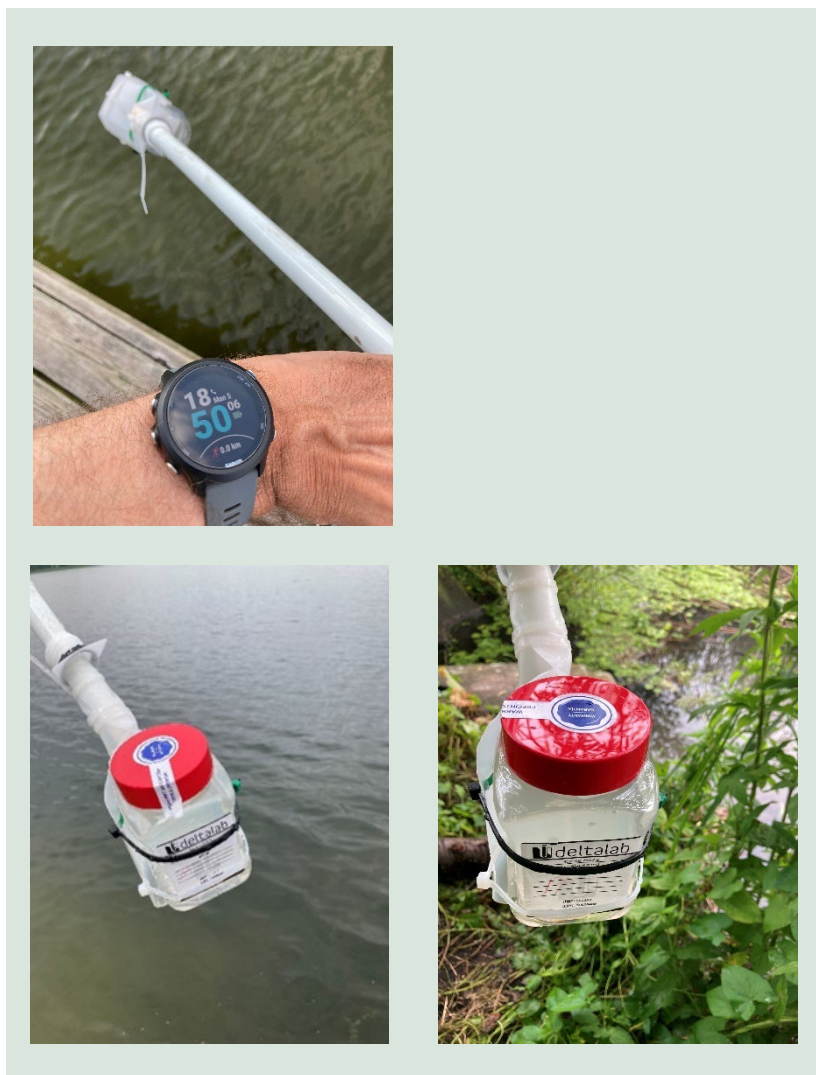
I badesæsonen 2022 har Aquasense haft en automatisk prøveudtager installeret ved U6. Udstyret kunne udtage flowproportionale prøver ud fra egen flowmåler. På grund af afhængigheden af at kunne få analyseret prøverne inden for et døgn er det ikke lykkedes at få udtaget en brugbar prøveserie med det automatiske udstyr.

Udtagning af vandprøver

Ved udsigt til regn med en forventelig høj intensitet er prøvetagningsudstyret klargjort, og ved modtagelse af en alarm fra logningsudstyret om overløb er der udtaget prøver ved forskellige lokaliteter. Lokaliteterne fremgår af FIGUR 36.

Prøverne er udtaget i 500 ml sterile plastprøveflasker. Prøveudtagningen er foregået ved, at en nummereret prøveflaske er monteret i en stang med en holder, hvorefter låget er skruet af, og der er udtaget en prøve ca. 40 cm under overfladen. Prøverne er efter prøvetagning opbevaret i en lystæt kølekasse med køleelementer indtil analyse. Alle prøver er analyseret indenfor 24 timer efter prøvetagning.

På nedenstående billede ses en prøveflaske i prøvetagningsstangen og to udtagne prøver.



FIGUR 39. Øverst foto af tidspunkt umiddelbart før en prøvetagning og nederst billeder af fyldte prøveflasker.

Der er udtaget vandprøver til analyse ved 4 overløbshændelser på datoerne 5. maj 2021, 25. maj 2021, 20. juni 2021 og 5. juli 2021.

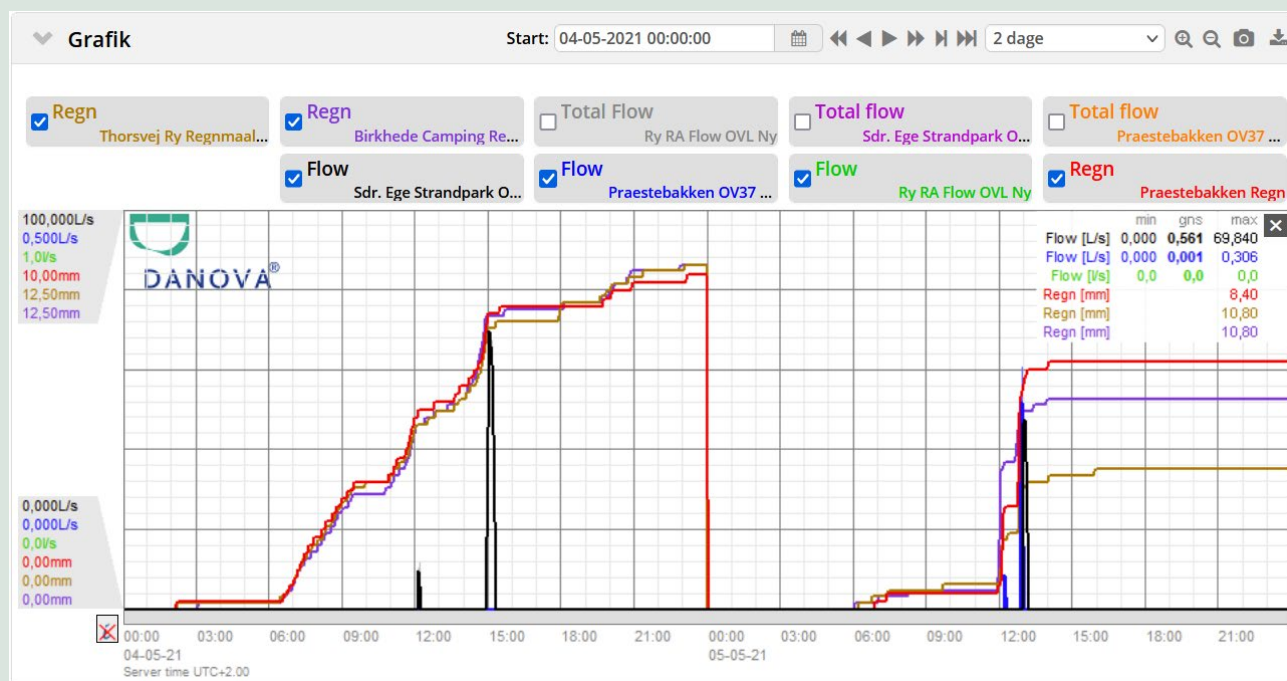
Prøvetagning og analyseresultater i projektet

Nedenstående er de enkelte prøvetagningsserier vist i skema sammenholdt med måledata fra det fysisk nærmeste overløb. I Bilag 6 er de 4 overløbshændelser modelleret ud fra overløbsmodellen beskrevet i Bilag 3.

Prøvetagning den 5. maj 2021

TABEL 5. Resultat af prøvetagning den 5. maj 2021.

Prøvetagning den 5. maj 2021								
Prøvetagning				Analyse	Overløbshændelse før eller under prøvetagning			
Nr.	Sted	Bemærkning	Tid	E. coli/100 ml	Dato	Tid	Qmax [l/s]	Volumen [m ³]
1	P2	U6	12:25	144.000	04-05-2021	14:56- 15:17	69,8	62
2	P2	U6	12:27	87.000	04-05-2021	14:56- 15:17	69,8	62
3	P1	Bro tv U6	12:29	<100	04-05-2021	14:56- 15:17	69,8	62
4	P3	Sdr. Ege Badebro	12:33	<100	04-05-2021	14:56- 15:17	69,8	62
5	P4	Knudhule Badebro	12:41	<100	04-05-2021	14:56- 15:17	69,8	62
6	P2	U6	12:56	103.000	04-05-2021	14:56- 15:17	69,8	62
7	P2	U6	12:59	96.000	05-05-2021	12:58 - 13:11	49,0	31
8	P1	Bro tv U6	13:02	<100	05-05-2021	12:58- 13:11	49,0	31
9	P3	Sdr. Ege Badebro	13:06	<100	05-05-2021	12:58- 13:11	49,0	31
10	P4	Knudhule Badebro	13:16	<100	05-05-2021	12:52-13:01	0,3	<1
11	P5	U9	13:23	3.200	05-05-2021	12:52-13:01	0,3	<1



FIGUR 40. Overløbshændelser ved prøvetagningsserien den 5. maj 2021.

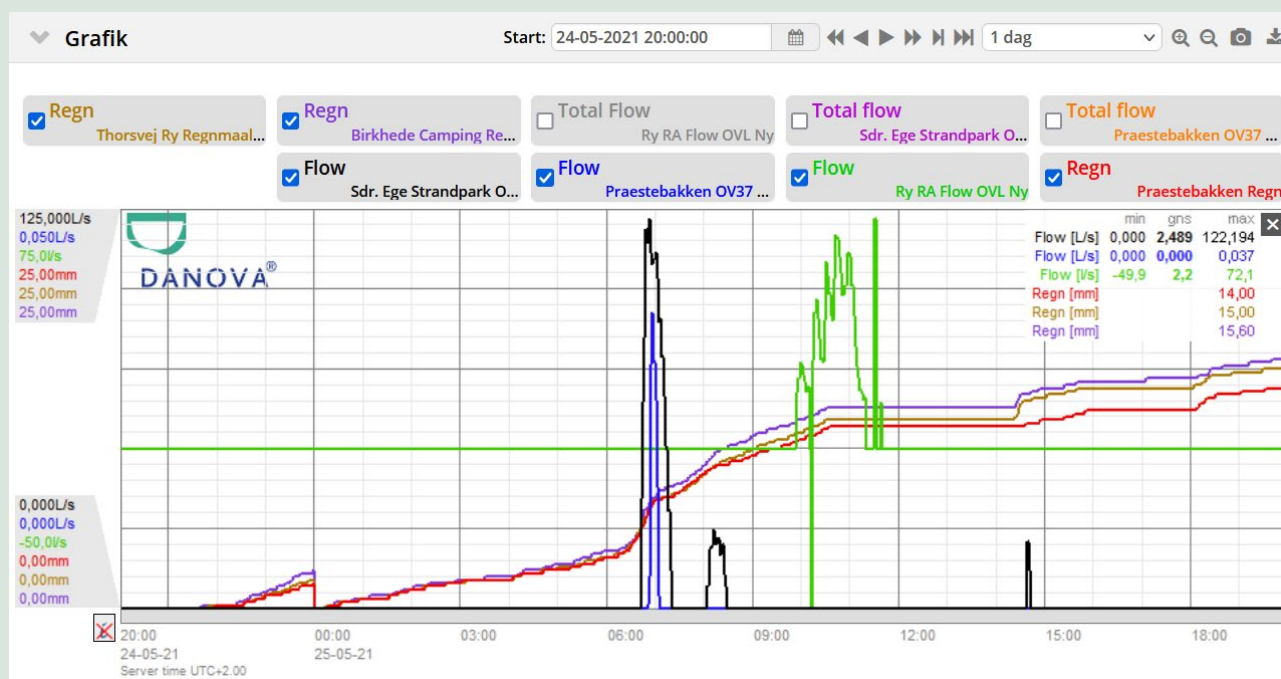
Kommentar til observation

Prøvetagningsserien viser at der, som forventet, måles meget høje koncentrationer af E. coli ved udløbet U6. Indenfor prøvetagningsperioden er der ikke tegn på at overløbet påvirker badevandskvaliteten ved Knudhule eller Sdr. Ege strand.

Prøvetagning den 25. maj 2021

TABEL 6. Resultat af prøvetagning den 25. maj 2021.

Prøvetagning den 25. maj 2021								
Prøvetagning				Analyse	Overløbshændelse før eller under prøvetagning			
Nr.	Sted	Bemærkning	Tid	E. coli /100 ml	Dato	Tid	Qmax [l/s]	Volumen [m³]
1	P2	U6, l rør munding	07:27	59.000	25-05-2020	6:42 - 7:19	122,2	186
2	P1	Bro tv U6	07:30	<100	25-05-2020	6:42 - 7:19	122,2	186
3	P3	Sdr. Ege Badebro	07:34	<100	25-05-2020	6:42 - 7:19	122,2	186
4	P4	Knudhule badebro	07:43	100	25-05-2020	6:49-7:06	0,037	0



FIGUR 41. Overløbshændelser ved prøvetagningsserien den 25. maj 2021.

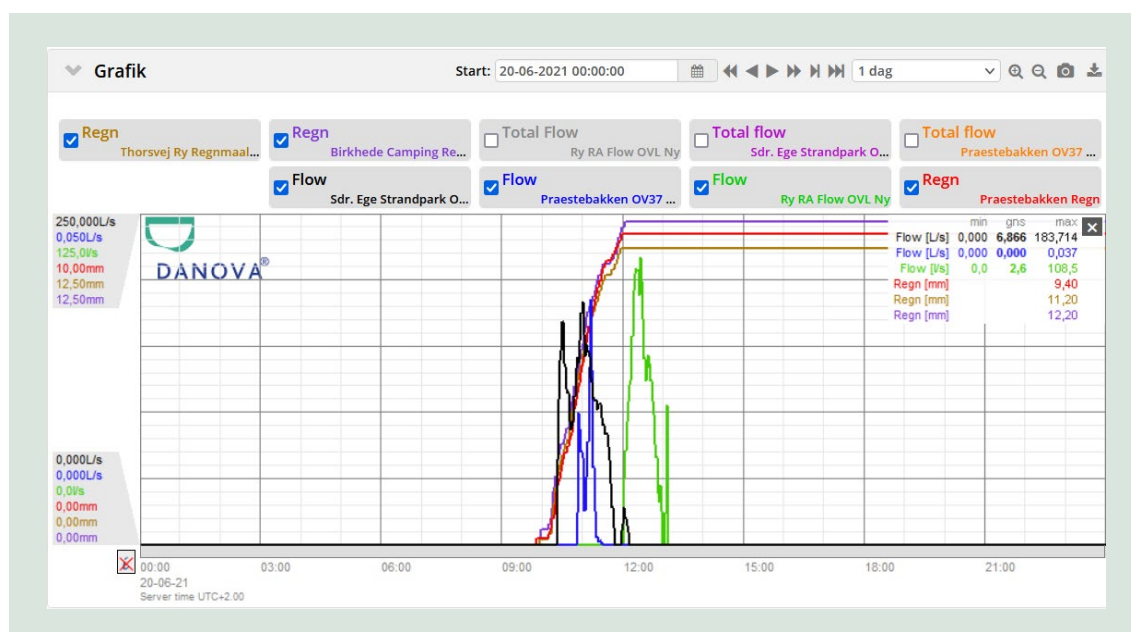
Kommentar til observation

Igen måles meget høje koncentrationer af E.coli ved udløbet af overløbet. Overløbet ses ikke at påvirke badevandet ved de nærliggende badebroer.

Prøvetagning den 20. juni 2021

TABEL 7. Resultat af prøvetagning den 20. juni 2021.

Prøvetagning den 20. juni 2021								
Prøvetagning				Analyse	Overløbshændelse før eller under prøvetagning			
Nr.	Sted	Bemærkning	Tid	E. coli /100 ml	Dato	Tid	Qmax [l/s]	Volumen [m³]
1	P2	U6	10:36	380.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
2	P2	U6	10:42	1.020.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
3	P2	U6	10:48	310.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
4	P2	U6	10:54	60.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
5	P2	U6	11:02	50.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
6	P1	Bro tv U6	11:07	<100	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
7	P3	Sdr. Ege Badebro	11:11	<100	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
8	P2	U6	11:41	59.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
9	P2	U6	11:46	140.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
10	P4	Knudhule badebro	12:00	<100	20-06-2021	10:51-11:20	0,04	0
11	P5	U9	12:06	1.100	20-06-2021	10:51-11:20	0,04	0
12	P5	U9	12:28	500	20-06-2021	10:51-11:20	0,04	0
13	P2	U6	12:39	34.000	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
14	P1	Bro tv U6	12:44	<100	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593
15	P3	Sdr. Ege Badebro	12:49	<100	20-06-2021	10:21 - 11:47	183,7	593

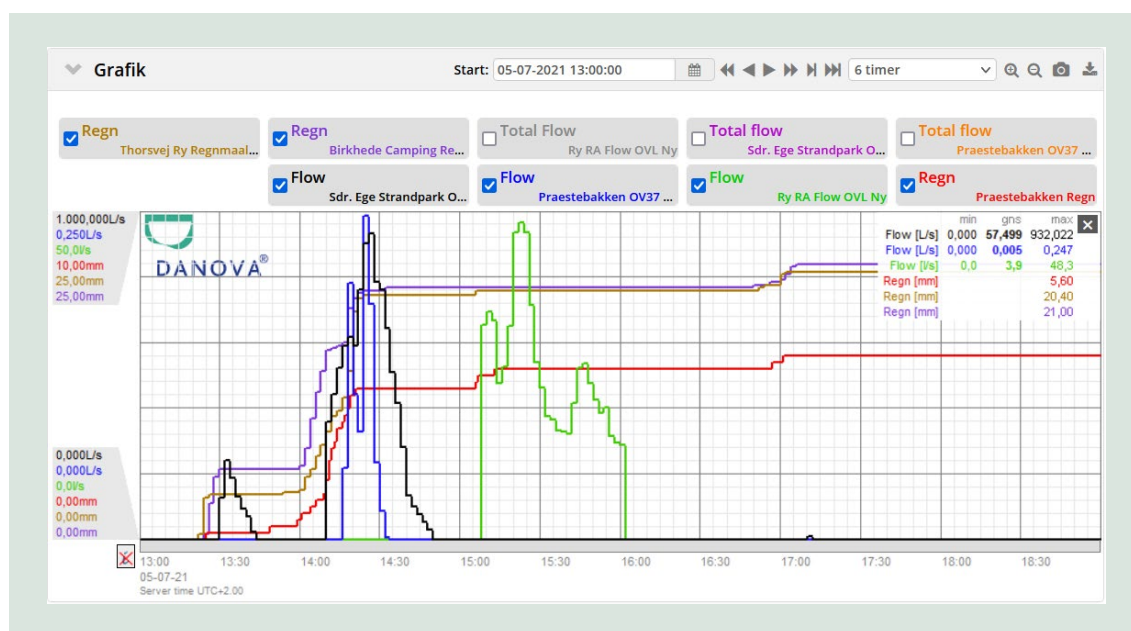


FIGUR 42. Overløbshændelser ved prøvetagningsserien den 20. juni 2021.

Kommentar til observation

Under denne prøvetagning er der udtaget prøver af overløbet i en tidsserie, hvor det ses, at koncentrationen af E.coli er meget høj i starten af overløbet (first flush). Dette stemmer

Prøvetagning den 5. juli 2021 og 3 prøver den 6. juli 2021								
Prøvetagning				Analyse	Overløbshændelse før eller under prøvetagning			
Nr.	Sted	Bemærkning	Tid	E. coli /100 ml	Dato	Tid	Qmax [l/s]	Volumen [m³]
14	P2	U6	15:47	71.000	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
15	P1	Bro tv U6	15:49	<100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
16	P3	Sdr. Ege Badebro	15:53	<100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
17	P2	U6	16:46	102.000	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
18	P1	Bro tv U6	16:47:50	100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
19	P3	Sdr. Ege Badebro	16:51:50	<100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
20	P2	U6	18:45:10	47.000	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
21	P1	Bro tv U6	18:46:30	<100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
22	P3	Sdr. Ege Badebro	18:50:10	100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
23	P2	U6	22:46:20	30.000	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
24	P1	Bro tv U6	22:47:30	200	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
25	P3	Sdr. Ege Badebro	22:51:20	21.000	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
25,2	P2	U6	06-07-21 06:48:20	<100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
26	P1	Bro tv U6	06-07-21 06:49:55	100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125
27	P3	Sdr. Ege Badebro	06-07-21 06:54:00	<100	05-07-2021	14:09 -14:50	932,0	1125



FIGUR 44. Overløbshændelser ved prøvetagningsserien udtaget den 5. og 6. juli 2021.

Kommentar til observation

Ved U6 er der udtaget en prøve i starten af overløbet. Her er koncentrationen af E.coli meget høj, mens flowet ikke er så højt. Ved 2. peak, hvor flowet er registreret til 932 l/s, er koncentrationen af bakterier i overløbssvandet faldet, da spildevandsmængden er kraftigt fortyndet. Dette er illustreret på FIGUR 45.

Som set ved de andre prøvetagninger, måles der ikke en påvirkning af badevandet ved Sdr. Ege i starten af overløbet, hvor koncentrationen af E. coli ellers er meget høj. Prøvetagningen er ved denne runde foretaget over en længere periode end de foregående prøvetagningsrunder, og ca. 8,5 timer overløbets start, er der en stor påvirkning ved Sdr. Ege badebro. Dette indikerer, at overløb kan påvirke badevandskvaliteten ved Sdr. Ege, men at der er en længere tidsforskydning mellem overløb og påvirkningen.



FIGUR 45. E. coli koncentrationen sammenholdt med overløbshændelsen. Og billede af udløbet ved lille flow (1. peak) og højt flow (2. peak).

Måleudstyr til logning af overløb

Alt anvendt udstyr til logning af overløb er leveret, monteret og driftet af Danova ApS:

Sdr. Ege OV36, U6 og Præstebakken OV37, U9

- Flowmåling: Nivus PCM4 med Nivus CSM Wedge Sensor. Krydskorrelationsprincip til helt og delvist fyldte kanaler
- Niveaumåling/overløbsregistrering: Danova D LOG M mobil datalogger med Endress+Hauser FMR10-radar.

Ry Renseanlæg, U5

- Flowmåling: Nivus NivufLOW Mobile 750 med Nivus CSM Wedge Sensor. Krydskorrelationsprincip til helt og delvist fyldte kanaler.

Regnmåling ved Thorsvej 41, Birkhede camping og Præstebakken

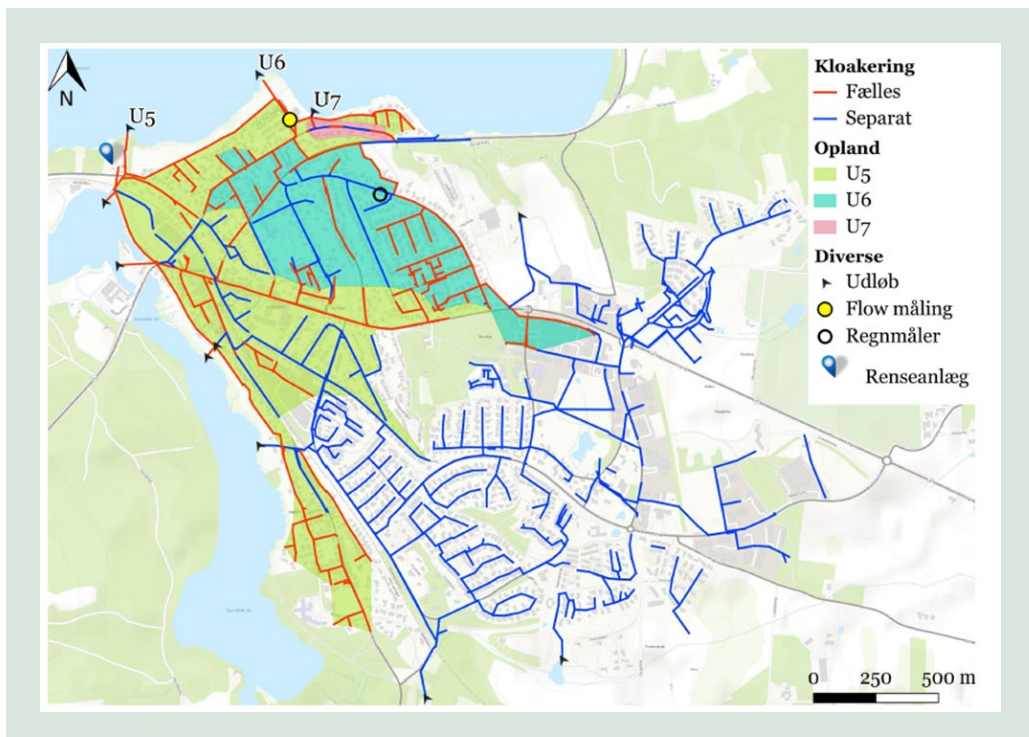
- Pronamic Professional rain gauge, opløsning 0,2 mm pr. Vip
- Danova D Log M mobil datalogger

Opsamling, visualisering og videredistribueret af data

- Danova Data Cloud.

Bilag 3. Overløbsmodel (lineær reservoirmodel)

FIGUR 46 viser et kort over afløbssystemet i Ry med de udløb, der er til Knudsø. Der er i Sikker Søbad II fokuseret på udløbet U6, som fungerer som udløb for det overløbsbygværk, som aflaster fra størstedelen af det fælleskloakerede afløbssystem, og som ligger tæt på badevandsområdet ved Sdr. Ege Strand.



FIGUR 46. Afløbssystemet i Ry og udløb til Knudsø. Figur er udarbejdet af Aarsnes og Nielsen (2022).

Der findes kommercielle hydrauliske afløbsmodeller, fx Mike Urban, der dynamisk kan simulere afstrømning af regn og spildevand i afløbssystemet og beregne overløbs vandføringer og volumener. Da vi i dette projekt ikke er interesserede i, hvor meget vand der strømmer i hver enkelt ledning i afløbssystemet, men blot ønsker at vide, hvor meget vand der aflastes til Knudsø, anvender vi i stedet for en kommerciel afløbsmodel en simpel lineær reservoirmodel. Denne model har som inputs regnintensitet over oplandet, det bidragende oplandsareal, en tidskonstant (reservoirkonstanten, k) samt videreførende ledningskapacitet (til renseanlægget). Når afstrømningen fra oplandet overstiger den videreførende ledningskapacitet, beregnes overløbsvandføringen.

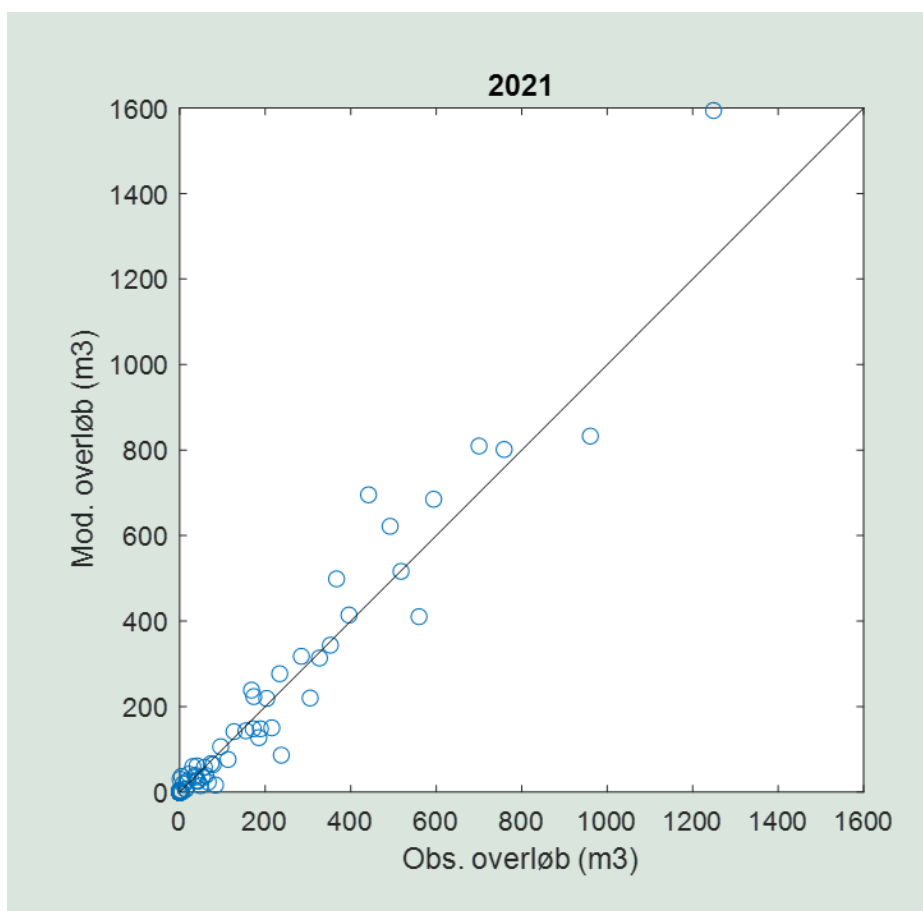
$$q(t) = q(t-1) + k(i(t-2) Fr - q(t-1))\Delta t$$

$$q_{ov}(t) = q(t) - q_{vidrf}$$

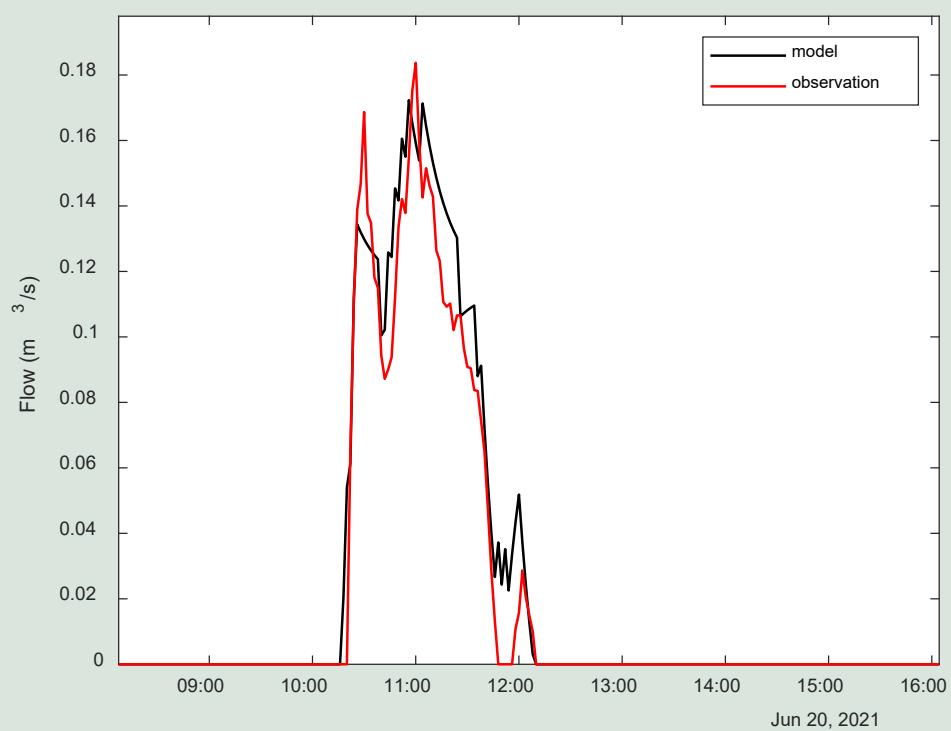
hvor:

q: vandføring (afstrømning fra hele oplandsarealet)
i: regnintensitet
Fr: bidragende oplandsareal
 Δt : tidsskridt
 Q_{ov} : overløbsvandføring
 Q_{vidrf} : videreførende ledningskapacitet

Af de parametre, der indgår i modellen, er det kun reservoirkonstanten, k som ikke kendes på forhånd. Denne bestemmes ved at kalibrere målte overløbsvolumener op imod beregnede overløbsvolumener for en række hændelser, så de i gennemsnit giver det samme. Et eksempel på dette ses i FIGUR 47. FIGUR 48 viser et eksempel på modellerede og observerede overløbsvandføringer for en hændelse den 20. juni 2021. Ud fra de i projektet udførte målinger af E-coli og enterokokker er der fundet en gennemsnitlig koncentration af hver bakterie, som ganges med overløbsvandføringerne for at få en bakteriekoncentration i udløbet.



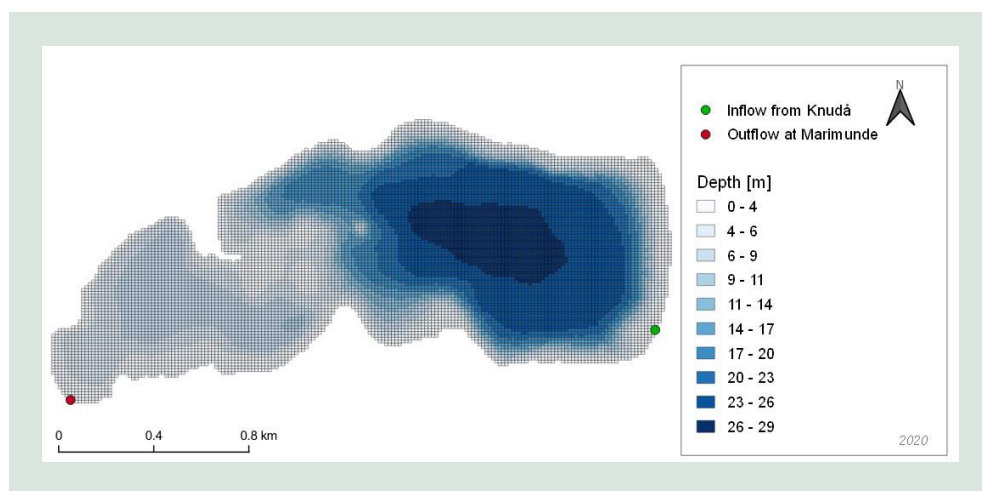
FIGUR 47. Observerede og modellerede overløbsvolumener (ved U6) i 2021.



FIGUR 48. Observerede og modellerede overløbsvandføringer ved U6 den 20. juni 2021. Under hændelsen er der faldet 11,2 mm regn.

Bilag 4. Hydrodynamisk strømningsmodel for Knudsø

Den hydrodynamiske model er opstillet med et rektangulært mesh med dimensionerne 14x12 m baseret på en vægtning mellem nødvendig nøjagtighed og simuleringstid. Det vertikale mesh er opstillet som et kombineret sigma- og z-level-mesh med 3 sigmalag med en maksimal lagtykkelse på 0,5 m og 69 z-levellag med en lagtykkelse på 0,4 m. Dette resulterer i 376.271 elementer i modellen.



FIGUR 49. Den hydrodynamiske model opstillet for Knudsø.

Knudsø har et tilløb fra Knudå i den sydøstlige del af søen. Det er, baseret på den hydrauliske opholdstid i søen, konkluderet, at vindpåvirkninger er styrende for strømningerne i søen i modsætning til tilledning fra vandløbet. Dog er Knudå og udløbet Marimunde i den sydvestlige del af søen inkluderet i modellen for at tage hensyn til eventuelle lokale påvirkninger.

Der blev opstillet to hydrodynamiske modeller henholdsvis med og uden lagdeling. Baseret på temperaturmålinger er det beregnet, at der er en stabil lagdeling i Knudsø i perioden midt juni til slutningen af september i en dybde på omkring 11,5 m fra vandoverfladen. Varslingsmodellen anvender derfor præsimulerede strømningmønstre modelleret med lagdeling inden for denne periode, hvorimod simuleringer uden lagdeling anvendes den resterende del af året.

Der blev foretaget præsimuleringer for 4 forskellige vindhastigheder og 8 forskellige vindretninger i modellen med og uden lagdeling, hvilket resulterer i 64 præsimuleringer. Den maksimale vindhastighed, der er foretaget simuleringer for, er 12 m/s, da højere vindhastigheder sjældent forekommer i området, og sandsynligheden for badende gæster under disse vindforhold samtidig er lav. Vindforholdene, der er foretaget simuleringer for, er angivet i TABEL 9. Alle simuleringer er kørt, indtil der er opnået stationære forhold, hvilket er 2 dage for vindhastighederne 3, 7 og 12 m/s og 2,5 dage for vindhastigheden 1 m/s.

TABEL 9. Vindforhold, for hvilke der er foretaget simuleringer.

Vindhastighed [m/s]							
1		3		7		12	
Vindretning [grader]							
0	45	90	135	180	225	270	315

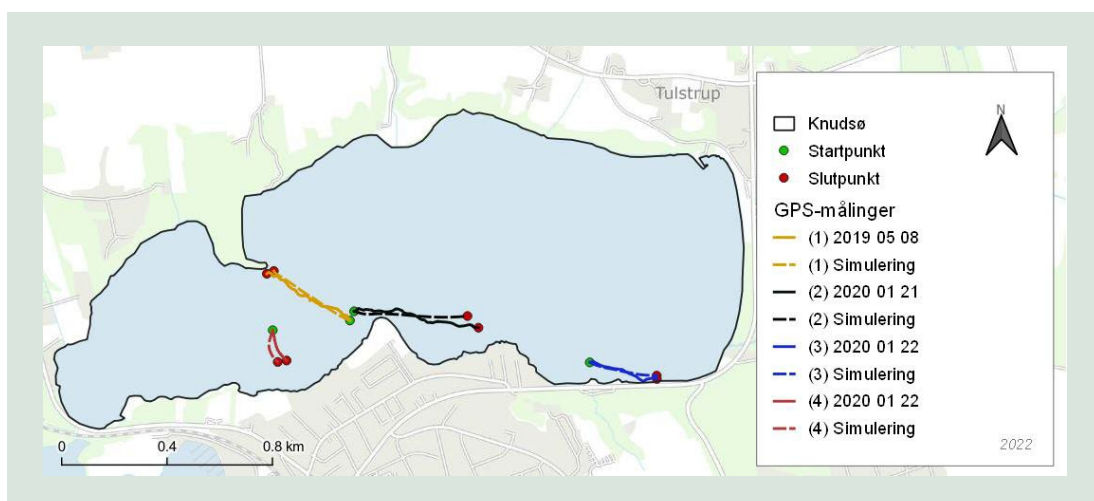
For at opnå præsimulerede strømningsmønstre for vindhastigheder med intervaller på 1 m/s og vindretninger med intervaller på 5 grader, blev der interpoleret mellem præsimuleringerne. Dette resulterede i 1.728 simulerede strømningsmønstre. Interpolationerne blev foretaget med lineær interpolation for hver celle ved opdeling af strømningshastigheder og hvirvelviskositeter i komponenter.

De præsimulerede strømningsmønstre er valideret ved at sammenligne resultaterne med målte strømningsretninger og -hastigheder nær vandoverfladen. Strømningsretningerne og -hastighederne blev målt med en mobiltelefon placeret i en vandtæt beholder som vist på FIGUR 50.



FIGUR 50. Måling af strømningsretningerne og -hastighederne med mobiltelefon placeret i en vandtæt beholder.

Mobiltelefonen uploadede GPS-koordinater til en Dropboxmappe hvert minut ved brug af et gratis software. For at sikre, at mobilen blev transporteret med strømningsretningerne og ikke med vinden, blev der fastgjort et drivanker 40 cm under beholderen. Nøjagtigheden på GPS'en var 5-15 m, og for at kompensere for denne usikkerhed blev hver af mobilens positioner beregnet som et glidende gennemsnit over 5 målepunkter. Modelvalideringen blev foretaget ved at indsatte en partikel i mobilens startpunkter og modellere partikeltransporten baseret på vandstrømningsretningerne i de samme perioder, som mobilens position blev tracket i søen. Der blev foretaget 4 målinger af strømningsretningerne nær vandoverfladen som vist på FIGUR 51. De 4 målinger er foretaget ved forskellige vindhastigheder og -retninger. Resultaterne fra partikelsimuleringerne viste god overensstemmelse med målingerne i søen for alle 4 målinger.



FIGUR 51. Målinger af strømningerne nær vandoverfladen.

Bilag 5. Satellitdetektering af blågrønalger

Anvendelse af satellitobservationer giver mulighed for detektering af blågrønalger og for at estimere celledensiteter baseret på optiske egenskaber af vandkolonnen. Til detektering af blågrønalger er der anvendt satellitobservationer fra satellitterne fra Copernicus Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument (OLCI), der er lanceret af European Space Agency (ESA) med en spatial opløsning på omkring 300 m. Observationer fra Sentinel-3A (lanceret i 2016) og fra Sentinel-3B (lanceret i 2018) er behandlet. Satellitobservationer fra perioden maj til oktober hvert år er behandlet, da risikoen for blågrønalgeopblomstringer i danske søer er størst i denne periode.

Alle satellitobservationer med skydække over Knudsø er forkastet og ikke behandlet yderligere. Ligning (1) er anvendt til at fastsætte blågrønalgeindekset baseret på den anden afledte spektrale form (SS) (Stumpf and Werdell, 2010).

$$SS(\lambda) = R(\lambda) - R(\lambda^-) + (R(\lambda^-) - R(\lambda^+)) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda^-}{\lambda^+ - \lambda^-} \right)$$

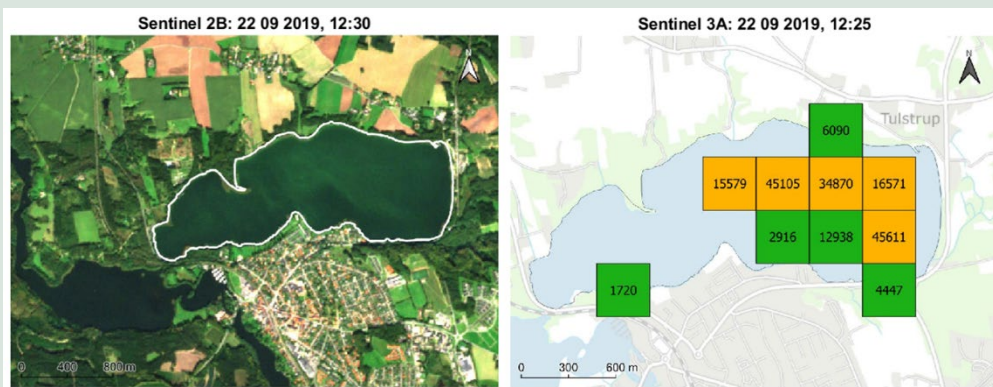
hvor R er reflektanten, λ er den centrale bølgelængde, λ^- er den nedre bølgelængde, og λ^+ er den øvre bølgelængde. Vi har beregnet blågrønalgeindekset som den spektrale form omkring 665 nm med $\lambda=665$ nm, $\lambda^-=620$ nm og $\lambda^+=681,25$ nm. Disse bånd er anvendt af (Matthews et al., 2021) til at separere blågrønalgeopblomstringer fra øvrig fytoplankton. Båndet centreret omkring en bølgelængde på 620 nm er følsomt over for pigmentproteinet phycocyanin, som er unikt for blågrønalger (Randolph et al., 2008).

Reflektansen er bestemt ved anvendelse af Rayleigh atmosfærekorrektion ved brug af programmet SNAP udgivet af ESA. Alle observationer er reprojekteret til lokalt koordinatsystem med resampling med nærmeste nabo. Celletallet er estimeret ved brug af ligning (2), der er eftervist af Lunetta et al., 2015 at give tilfredsstillende estimater af blågrønalgekoncentrationer.

$$Cell\ density\ [cells/ml] = SS(\lambda) \cdot 10^8$$

Der er i projektet desuden hentet observationer fra Copernicus Sentinel-2 satellitter, som ikke observerer i spektre, der muliggør estimater af celletal. Dog har disse satellitter en højere spatial opløsning og giver mulighed for detektion af misfarvning af vandoverfladen. Opblomstringer af blågrønalger eller anden fytoplankton kan medføre sådanne misfarvninger, og derfor er Sentinel-2-observationer sammenlignet med observationer fra Sentinel-3 og anvendt til validering af satellitobservationerne. Der er processeret observationer fra Sentinel-2 i den samme periode, som gjort for Sentinel-3.

Der er detekteret blågrønalger i 82 observationer fra Sentinel-3 i perioden 2016-2022. Med Sentinel-2 er der i de 7 år observeret misfarvninger i 33 observationer. Et eksempel på observationer fra de to typer satellitter er vist på FIGUR 52.



FIGUR 52. Venstre: Satellitobservation fra Sentinel-2. Højre: Satellitobservation fra Sentinel-3 med estimerede koncentrationer angivet i celler/ml.

Bilag 6. Spredningsmodel- lering af fækale bakterier

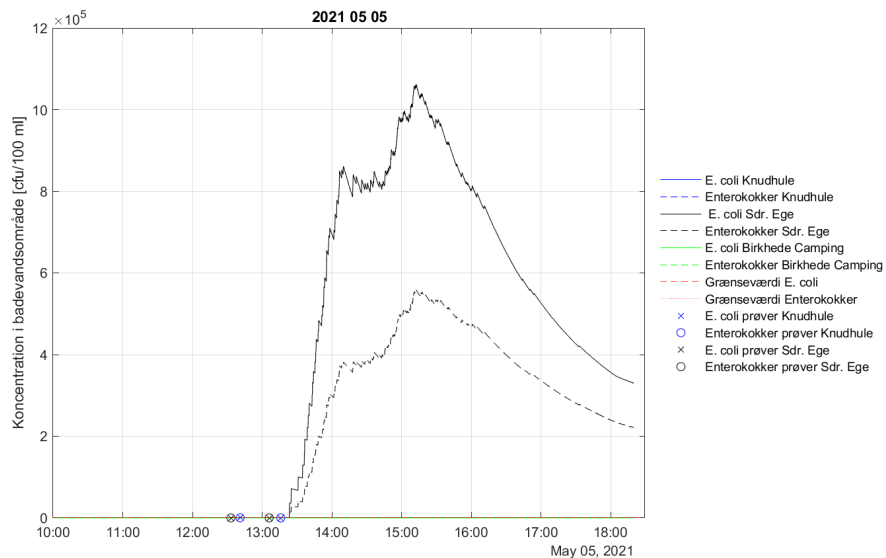
I løbet af projektet blev der udtaget vandprøver ved badestrande ved 4 overløbshændelser. Hver af disse 4 hændelser er modelleret med overløbsmodellen som beskrevet i Bilag 3. De 4 hændelser, hvor der er udtaget vandprøver og kvantificeret koncentrationer af fækale bakterier, er præsenteret i TABEL 10.

TABEL 10. De 4 hændelser, hvor der er udtaget vandprøver og kvantificeret koncentrationer af fækale bakterier.

Dato for overløbshændelse	Badeområde med vandprøve
5. maj 2021	Sdr. Ege Strand og Knudhule Strand
25. maj 2021	Sdr. Ege Strand
20. juni 2021	Sdr. Ege Strand og Knudhule Strand
5. juli 2021	Sdr. Ege Strand

Hændelsen den 5. maj 2021

Umiddelbart efter overløbshændelsen den 5. maj 2021 blev der udtaget vandprøver ved Sdr. Ege Strand og Knudhule Strand. Der blev udtaget 2 vandprøver ved hvert badeområde, og i alle vandprøverne blev det ved analyse konkluderet, at der ikke var forurening med fækale bakterier.

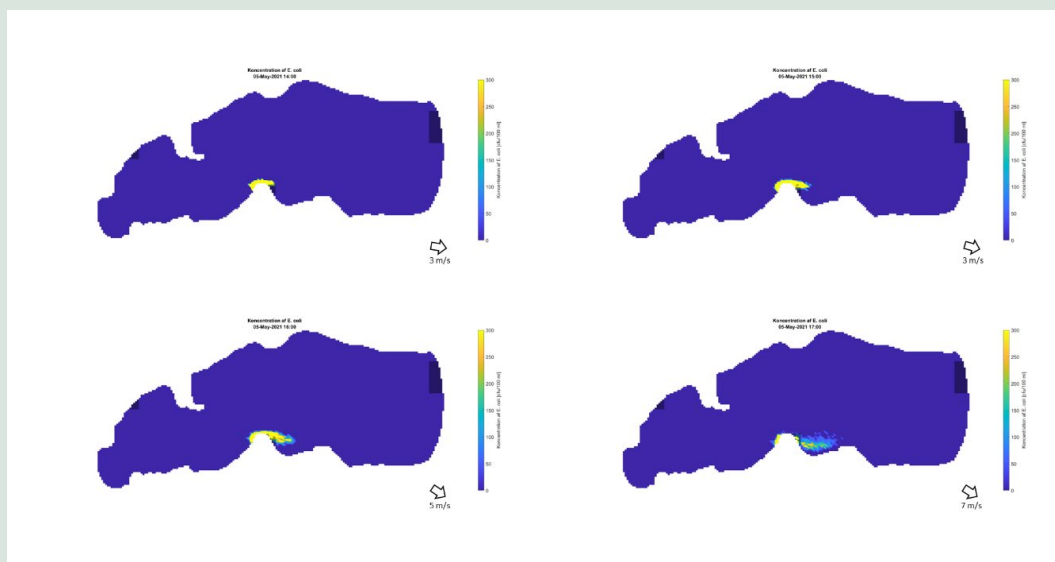


FIGUR 53. Modellerede og målte koncentrationer af fækale bakterier ved badestrandene den 5. maj 2021.

Spredningen af bakterier i søen er modelleret for denne hændelse, og de modellerede og målte koncentrationer er vist på FIGUR 53.

Der er overensstemmelse mellem de modellerede og målte koncentrationer. Dog blev det modelleret, at der efter prøveudtagningerne forekom høje koncentrationer ved Sdr. Ege Strand, og disse resultater har det ikke været muligt at verificere, da der ikke er udtaget vandprøver. Det er muligt, at badevandskvaliteten i badeområdet ved Sdr. Ege har været forringet som følge af denne hændelse på trods af, at dette ikke er eftervist med målingerne.

Under hændelsen var der nordvestenvind, hvilket er i overensstemmelse med de modellerede koncentrationer ved Sdr. Ege Strand. Spredningen af bakterier i Knudsø i løbet af denne hændelse er illustreret på FIGUR 54.

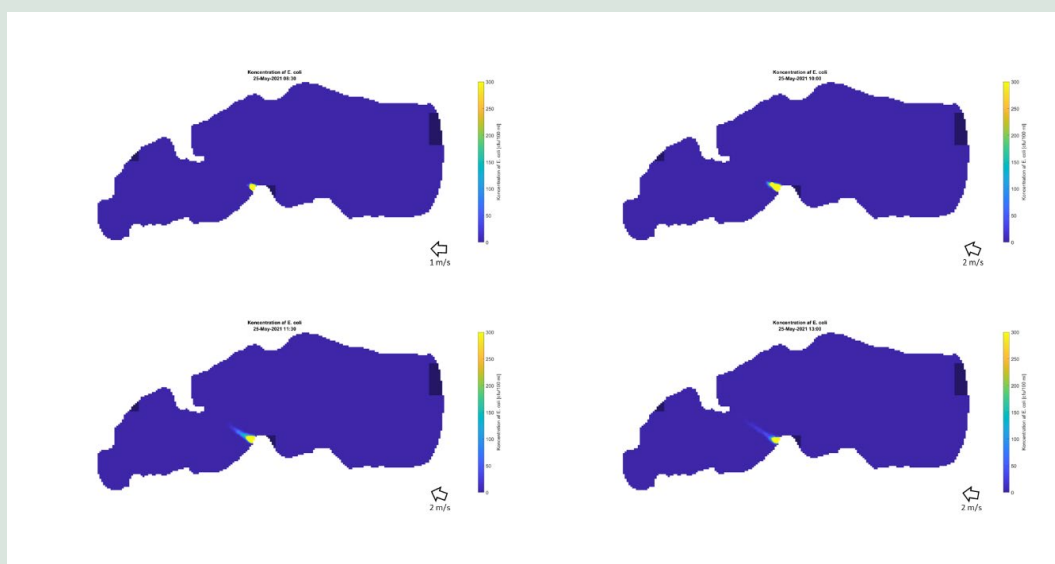


FIGUR 54. Modellerede koncentrationer af fækale bakterier i Knudsø den 5. maj 2021.

Hændelsen den 25. maj 2021

Den 25. maj blev der modelleret overløb med overløbsmodellen, og under denne hændelse blev en vandprøve udtaget ved badeområdet ved Sdr. Ege. Det blev ved analyse af prøven konstateret, at der ikke var forurening med *E. coli* eller enterokokker ved badebroen. Den modellerede overløbsmængde blev anvendt som input til spredningsmodellen, hvorved det blev modelleret, hvorvidt hændelsen gav anledning til forurening i badeområdet.

Af simuleringseresultaterne fremgik det, at der ikke blev modelleret *E. coli* eller enterokokker i badeområdet. Under hændelsen var der vind mod øst, hvilket ikke har medført transport af fækale bakterier til Sdr. Ege Strand. Spredningen af fækale bakterier er vist på FIGUR 55.

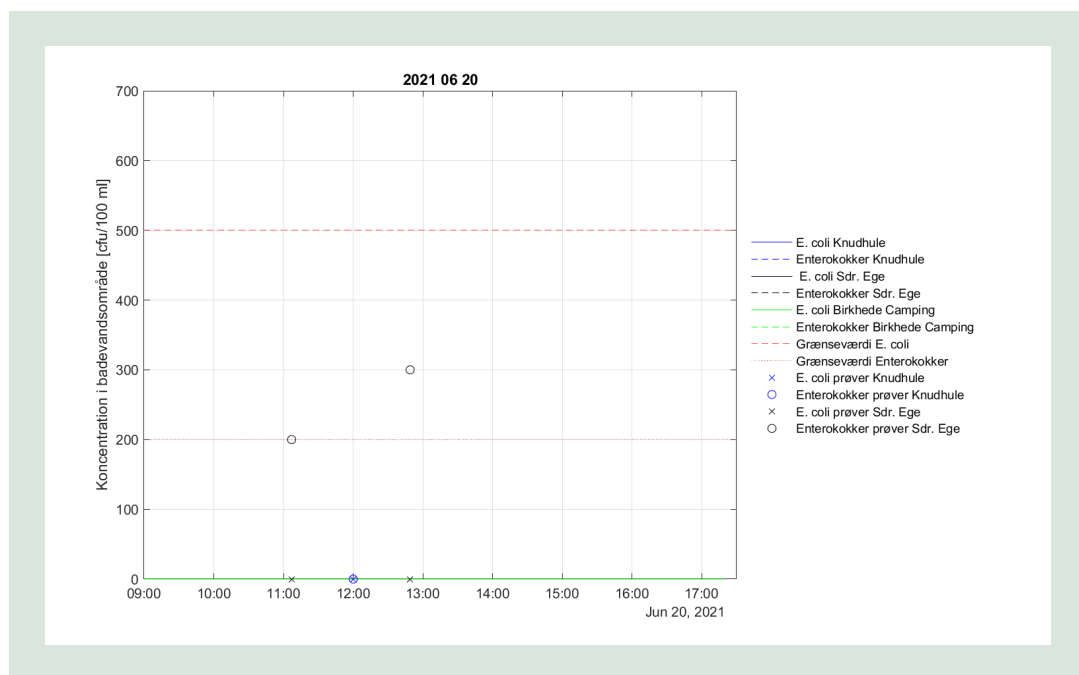


FIGUR 55. Modellerede koncentrationer af fækale bakterier i Knudsø den 25. maj 2021.

Hændelsen den 20. juni 2021

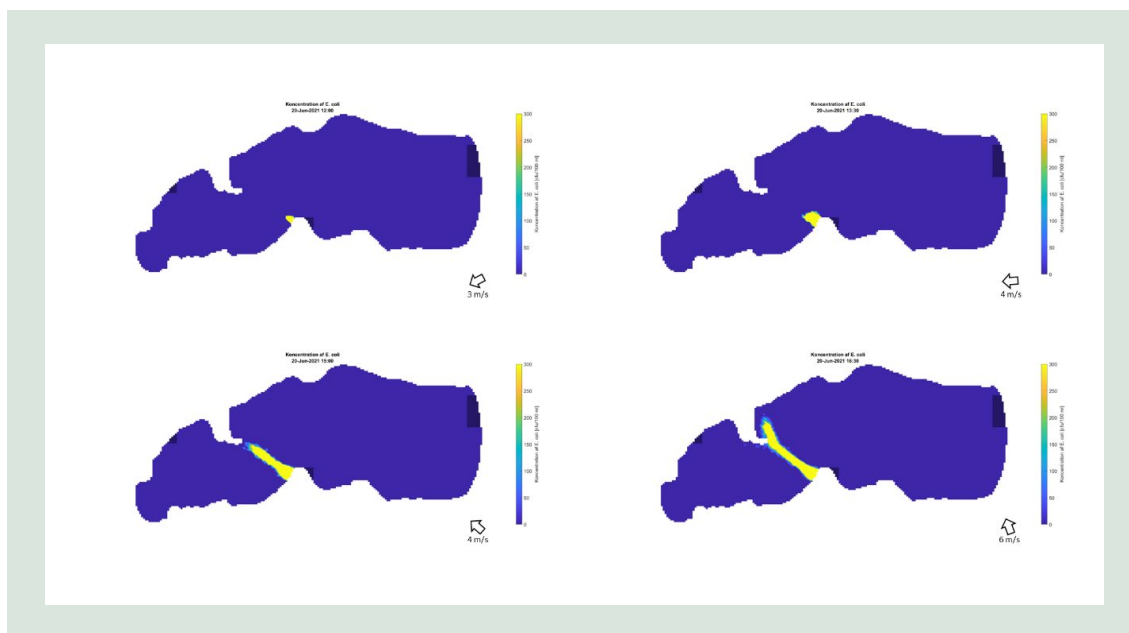
Efter overløb den 20. juni 2021 blev der udtaget vandprøver ved Sdr. Ege Strand og Knudhule Strand. I alt blev der udtaget 3 vandprøver ved badeområderne. Analyser af prøverne viste, at der var fækale bakterier i en af vandprøverne. Dog var der ikke koncentrationer, som oversteg kriteriet for badevand i søer. Målingerne indikerede dermed, at der ikke burde gives en varsling til badende som følge af denne hændelse.

Resultater fra spredningsmodellen efter denne hændelse viste, at der ikke var forurening med fækale bakterier i badeområderne. Dette er vist på FIGUR 56 sammen med resultaterne af vandprøverne.



FIGUR 56. Modellerede og målte koncentrationer af fækale bakterier ved badestrandene den 25. maj 2021.

De lave koncentrationer af fækale bakterier, som blev målt i vandprøverne, er ikke modelleret med spredningsmodellen. Dog viser både model og målinger, at der ikke bør varsles ved badeområderne, hvilket viser, at afvigelsen ved denne hændelse ikke medfører en manglende varsling. Bakterietransporten i søen under hændelsen er illustreret på FIGUR 57.



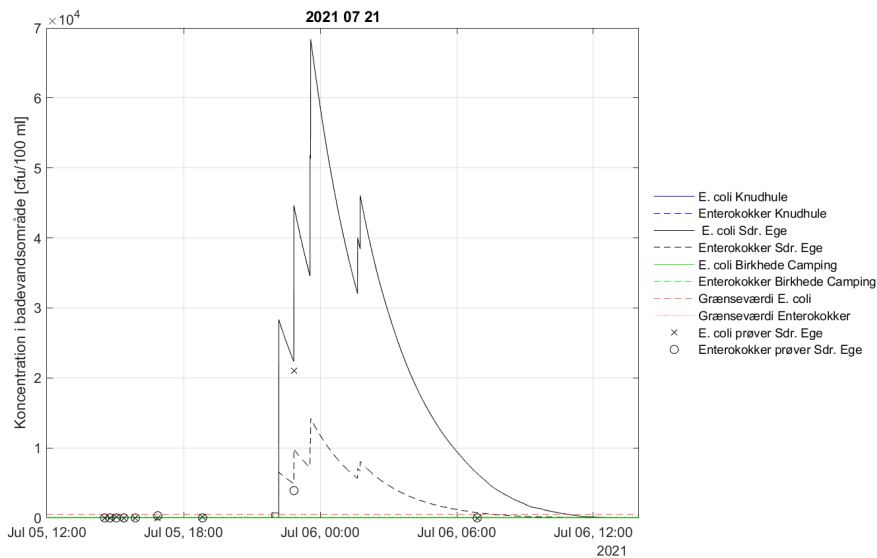
FIGUR 57. Modellerede koncentrationer af fækale bakterier i Knudsø den 20. juni 2021.

Hændelsen den 5. juli 2021

Den 5. juli 2021 gav nedbør anledning til overløb, hvilket er modelleret med overløbsmodellen. Efter denne hændelse blev der udtaget i alt 9 vandprøver ved Sdr. Ege Strand, hvor koncentrationer af fækale bakterier blev kvantificeret.

De første omkring 5,5 timer efter overløbshændelsens start blev der ikke målt fækale bakterier ved Sdr. Ege Strand. Ved en vandprøve udtaget omkring 9,5 timer efter overløbshændelsens start blev der målt koncentrationer af *E. coli* og enterokokker, som er væsentligt højere end badevandskriteriet. Der blev udtaget en vandprøve ved badeområdet igen den efterfølgende dag omkring 18 timer efter overløbshændelsen. I denne vandprøve blev der ikke målt forurening med fækale bakterier.

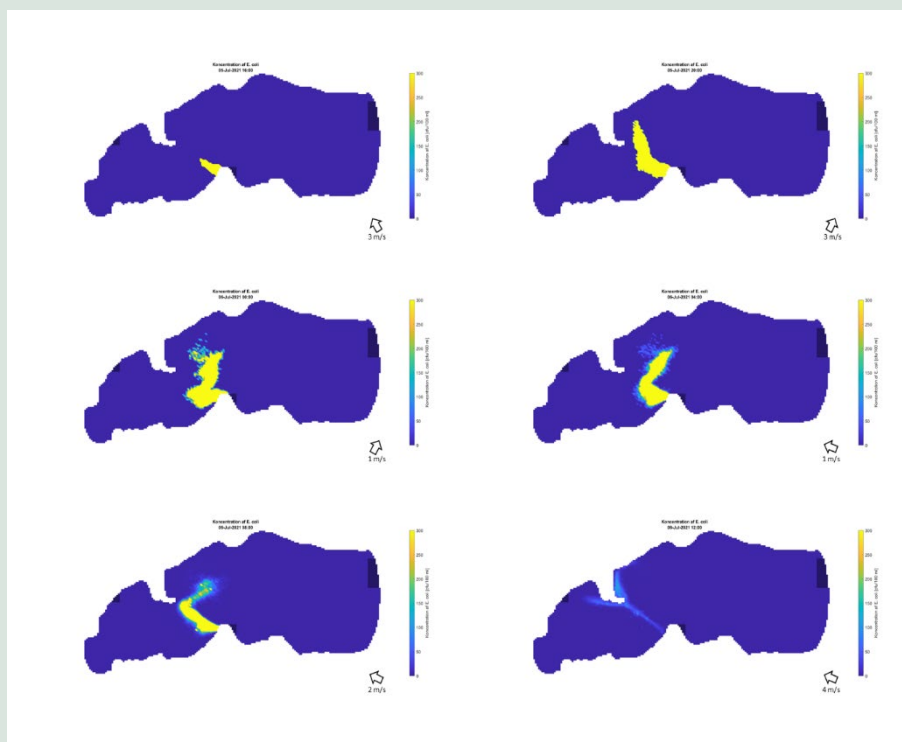
De målte og modellerede koncentrationer i badeområderne er vist på FIGUR 58. Det fremgår, at der er god overensstemmelse mellem resultaterne fra modellen og målingerne i perioden, hvor der ikke er målt fækale bakterier ved badeområdet. Målingen omkring klokken 23, som viste høje koncentrationer, er i god overensstemmelse med modellen. Både måling og modelresultater indikerer, at der bør gives en varsel ved badeområdet. Derudover er forholdet mellem *E. coli* og enterokokker meget ens i målingerne og i modellen. Der er mindre afvigelser i koncentrationer, hvilket kan skyldes usikkerheder i spredning, udledte koncentrationer, henfald eller prøvetagningssted. Det konkluderes dog, at der er meget god overensstemmelse ved denne måling.



FIGUR 58. Modellerede og målte koncentrationer af fækale bakterier ved badestrandene den 5. juli 2021.

I modellen modelleres fortsat høje koncentrationer omkring klokken 7 den efterfølgende dag, hvor der er udtaget en vandprøve, som ikke viser forurening. Denne sammenligning indikerer, at det modellerede henfald muligvis er lavere end det reelle. Der er dog ikke tilstrækkeligt datagrundlag for at foretage en kalibrering af henfaldsmodellen.

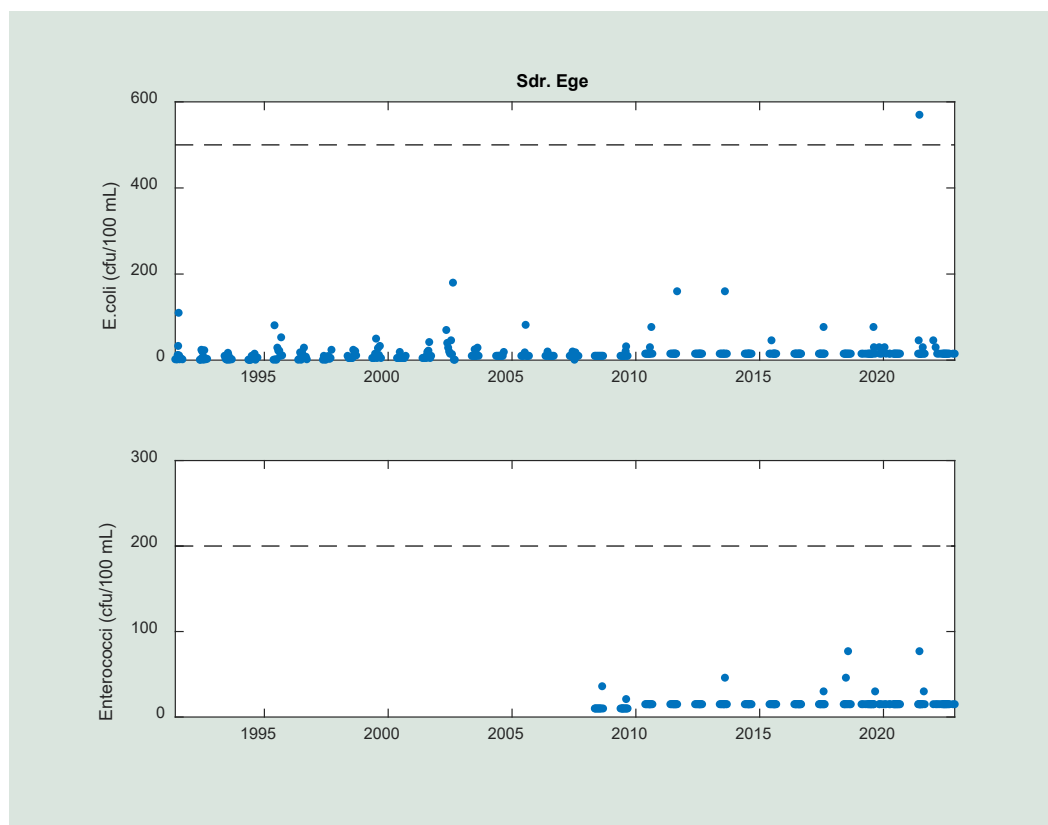
Det er eftervist, at denne hændelse burde give anledning til en varslings ved badeområdet i Sdr. Ege. Det samme resultat opnås med spredningsmodellen. Baseret på dette resultat er det vurderet, at spredningsmodellen giver pålidelige resultater.



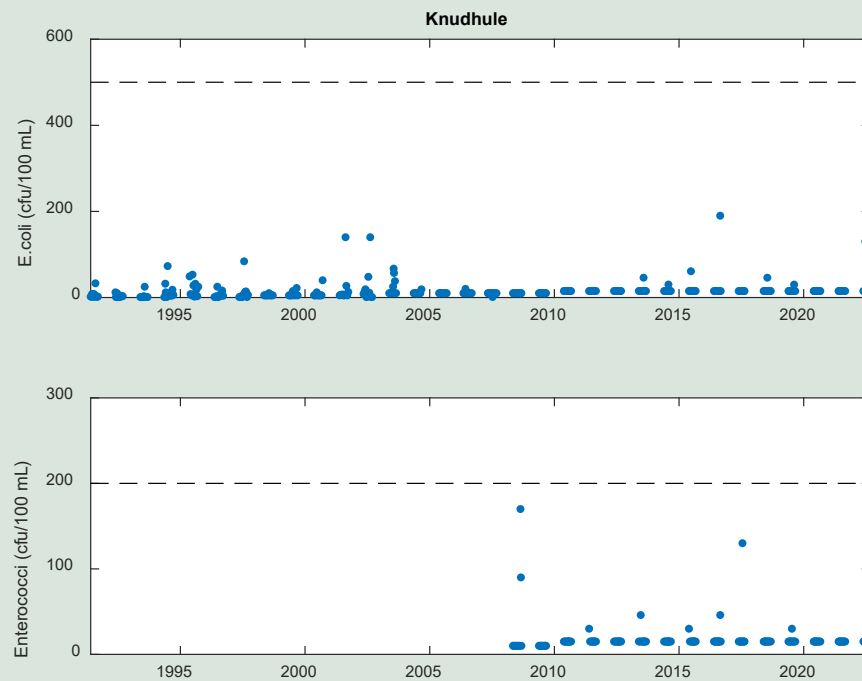
FIGUR 59. Modellerede koncentrationer af fækale bakterier i Knudsø den 5. juli 2021.

Bilag 7. Skanderborg Kommunes målinger af badevandskvalitet

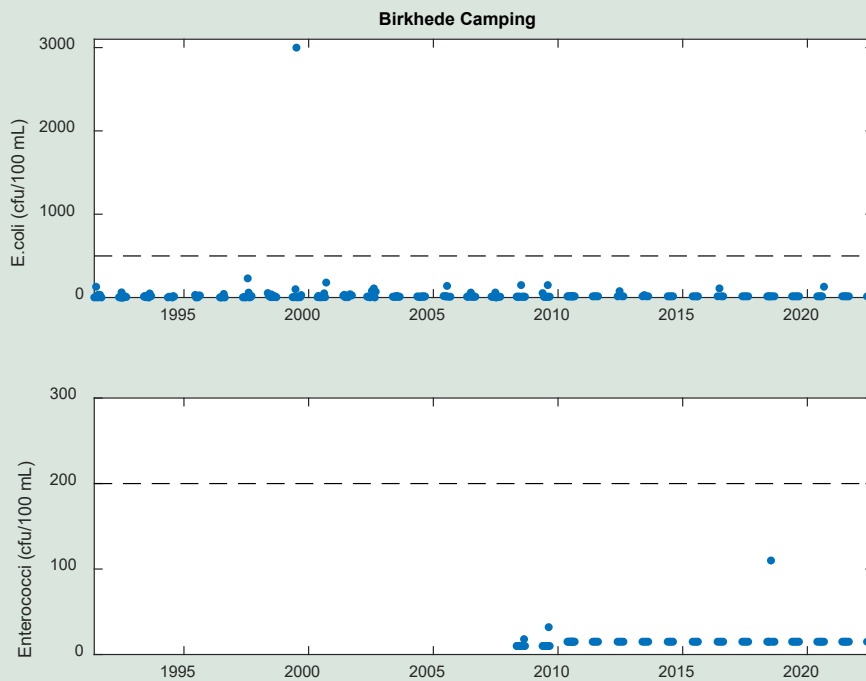
Nedenstående figurer viser de af Skanderborg Kommune indberettede målinger af E. coli og enterokokker målt i Knudsø i perioden 1991-2022.



FIGUR 60. Målte koncentrationer af E. coli og enterokokker ved Sdr. Ege i perioden 1991 til 2022. Danmarks Miljøportal, (2022).



FIGUR 61. Målte koncentrationer af *E. coli* og enterokokker ved Knudhule ved Knudsø i perioden 1991 til 2022. Danmarks Miljøportal, (2022).



FIGUR 62. Målte koncentrationer af *E. coli* og enterokokker ved Birkhede Camping ved Knudsø i perioden 2008 til 2022. Danmarks Miljøportal (2022).

Bilag 8. Effekt af fager på forsinket opblomstring af blågrønalger

Resultater (billedemateriale) fra forsøg med tilbageholdelse af opblomstring af blågrønalger ved tilsætning af varierende fagkoncentrationer til varierende startkoncentrationer af blågrønalger. Resultater diskuteres i Kapitel 9.



FIGUR 63. Et udsnit af prøver ved forsøgsstart (dag 0). Væsken var svag grønlig i prøverne med den højeste koncentration af blågrønalger tilsat (B 10⁰) og klar i de øvrige prøver.



FIGUR 64. Udsnit af prøver ved forsøg dag 4. Væsken var klar i alle prøver inkl. B 10⁰-prøver med den højeste koncentration af blågrønalger tilsat.



FIGUR 65. Udsnit af prøver ved forsøg dag 11. Væsken var klar i alle prøver inkl. B 10^0 -prøver med den højeste koncentration af blågrønalger tilsat.



FIGUR 66. Eksempel på prøver ved forsøg dag 18. Væsken begyndte at have et svagt grønligt skær i B 10^0 -prøver med den højeste koncentration af cyanobakterier.

Sikkert Søbad II

I projektet Sikkert Søbad 2 udvikles et varslingsystem, der overvåger bakterier og blågrønalger for at sikre sund badevandskvalitet. Der anvendes online målinger og omkostningseffektive metoder for at muliggøre bred implementering i danske søer.

Badevandskvaliteten i Danmark er generelt meget høj, og i 2022 opnåede knap 95 % af badevandet den bedste klassifikation. Dog kan forurening forekomme, især ved kraftig nedbør, hvor afstrømning fra befæstede arealer eller overbelastning af kloaknettet kan føre til overløb af opspædet spildevand. Hvis sådanne overløb sker tæt på badeområder, kan badevandet midlertidigt blive uegnet til badning. Desuden kan opblomstring af giftige blågrønalger i søer udgøre en sundhedsrisiko, da disse opblomstringer kan opstå og forsvinde inden for få timer.

Dette projekt har udviklet et komplet varslingsystem, der kan advare badegæster om forringet badevandskvalitet forårsaget af enten spildevand eller algeopblomstring. Systemet bygger videre på erfaringerne fra projektet 'Sikkert Søbad I' og kombinerer online målinger af spildevandsoverløb og algeopblomstringer med modeller, der vurderer udbredelsen af disse i søen. Badegæster varsles via et onlineforbundet skilt ved stranden, der visuelt angiver, om det er sikkert at bade.

Projektet har haft fokus på at reducere driftsomkostningerne ved varslingsystemet for at sikre, at det kan implementeres bredt i Danmark. Dette inkluderer blandt andet undersøgelser af billigere målemetoder, forebyggelse af algeopblomstring (cyanofager), test af lavvedligeholdelsesbøjer og validering af fleksible modeller, der kan implementeres i forskellige søer.

Resultatet er en varslingsmodel, der kan forudsige risikoen for forringet badevandskvalitet direkte ved badesteder og dermed øge sikkerheden for badegæster.



Miljøstyrelsen
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk