



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Sikkert søbad

Overvågning, rensning og varsling af regnvandsbetingede overløb



MUDP

Juli 2018

Udgiver: Miljøstyrelsen

ISBN: 978-87-93710-53-5

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for 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.

Indhold

1.	Forord	4
2.	Sammenfatning og konklusion	5
3.	Summary and Conclusions	6
4.	Introduktion	7
5.	Kortlægning af bakterielle kilder og udbredelsen i Skanderborg Sø	9
5.1	Logning af overløb	9
5.2	Udvikling af drone til prøvetagning	9
5.3	Observerede bakteriekoncentrationer	11
5.4	Bakteriel kildesporing	15
6.	Udvikling af varslingsmodellen	17
6.1	Hydraulisk belastningsmodel	17
6.2	Strømningsmodel	19
6.3	Stofsprednings- og vandkvalitetsmodel for Skanderborg Sø	22
6.4	Online varslingsystem	23
6.5	Interaktivt varslingsdisplay til badegæster	25
6.6	Sammenkobling mellem rensning og varsling	26
7.	Udvikling af renseløsninger koblet til overløb	27
7.1	Valg af testsite	27
7.2	Valg af renseløsninger	28
7.2.1	Naturnær renseløsning	29
7.2.2	Kompakt renseløsning	31
8.	Afprøvning og vurdering af renseløsningerne	34
8.1	Vurdering af renseløsningerne baseret på badevandskvalitetskrav	34
8.2	Det beplantede filter	35
8.2.1	Anlægsomkostninger og dimensionering	36
8.3	Den kompakte løsning	37
8.3.1	Anlægsomkostninger og dimensionering	38
9.	Perspektivering	39
	Bilag 1.Teknologioversigt – Rensning og desinfektion af overløbsvand	40
	Bilag 2.Info-ark omkring beluftede, beplantede filteranlæg	43
	Bilag 3.Analyseresultater for det beplantede filter ved varierende flow	44
	Bilag 4.Dimensioneringsark til Stjernholm RO-rist	45

1. Forord

Dette er slutrapporten for projektet "Sikkert Søbad - Overvågning, rensning og varsling af regnvandsbetingede overløb" under Miljøstyrelsens tilskudsordning "MUDP 2015". Projektet havde til formål at udvikle et samlet koncept til overvågning, varsling og rensning af overløbsvand til sikring af badevandssikkerheden og forbedring af vandkvaliteten i recipienter. Kombinationen af de rette tekniske løsninger og intelligent varsling er en ny måde at se helhedsorienteret på de regnvandsbetingede udledninger fra fælleskloak.

I projektet deltog Skanderborg Forsyning A/S, Amphi-Bac ApS, Kilian Water ApS, Stjernholm A/S, Aalborg Universitet og Teknologisk Institut.

Projektet blev gennemført i perioden februar 2016 til og med marts 2018.

Projektets styregruppe bestod af:

Jens Bastrup, Skanderborg Forsyning A/S
Søren Bastholm, Amphi-Bac ApS
Rene Kilian, Kilian Water ApS
Kaj Stjernholm, Stjernholm A/S
Michael R. Rasmussen, Aalborg Universitet
Lotte Bjerrum Friis-Holm, projektleder, Teknologisk Institut

Øvrige aktive projektdeltagere:

Stig Jonassen, Skanderborg Forsyning A/S
Kurt Olesen, Skanderborg Forsyning A/S
Jens Pors, Kilian Water ApS
Sara Starcke, Amphi-Bac ApS
Søren L. Thorndahl, Aalborg Universitet
Michelle Lison Rebsdorf, Teknologisk Institut

Aarhus, april 2018

2. Sammenfatning og konklusion

For at sikre god badevandskvalitet og på samme tid imødekomme den stigende efterspørgsel på hurtigt implementerbare klimatilpasningsløsninger introducerer projektet Sikkert Søbad et nyt koncept for overvågning, tidlig varsling og rensning af overløbsvand fra kloaksystemet til recipienter, der er underlagt krav til badevandskvalitet.

Med udgangspunkt i Skanderborg Sø og med fokus på badevandskvalitet har projektet haft til formål at udvikle en helhedsløsning. Den udviklede løsning kombinerer risikovurdering af individuelle overløb med et avanceret varslingsystem, som kobler mikrobiologiske data, vejr- og vinddata samt de hydrauliske forhold i opland og sø. Derudover er der udviklet og testet to prototyper af renseløsninger til behandling af overløbsvand; en naturnær plantebaseret filterløsning og en kompakt modulær mekanisk/kemisk rensemetode.

Resultaterne af projektet er en varslingsmodel, der ud fra reelle data i Skanderborg og en kompliceret modellering nu varsler badegæsterne ved søbadet via en automatisk varslingsstavle, hvis der er risiko for, at bakterier fra overløb nedsætter badesikkerheden.

Derudover har testen af de to renseløsninger givet et indblik i fordele og ulemper med hhv. en beplantet løsning og en ristløsning i kombination med desinfektion. Det beplantede filter fra Kilian Water har en pæn og rekreativ fremtoning og er uden lugtgener. Anlægget kræver lidt mere plads, hvor det etableres, dog har den i projektet testede løsning indlagt beluftning, hvilket mindsker det nødvendige areal af anlægget. Det beplantede filter har vist sig meget effektiv til at reducere både organisk stof og kvælstof ved vandflow op til 12 m³/dag. Her ses også kraftig reduktion af *E.coli* og Enterokokker og udledningskravene kunne overholdes. Med denne løsning ses dog en udfordring ved sporadiske og meget kraftige flow, som ses ved store regnhændelser. Her kunne den testede prototype ikke følge med med samme renseseffekt med nuværende design.

Med den mekaniske løsning filtreres overløbsvandet igennem en rist (Stjernholm RO-rist) på 0,4 mm. Risten kunne tilbageholde større urenheder samt reducere COD ved opbygning af en slamkage. Det er vigtigt, at dimensioneringen af en sådan type rist, styres og driftes korrekt i forhold til hydraulisk belastning og krav og i forhold til ønsker til renseseffekt. Den udviklede løsning kan opstilles og placeres i eksisterende og nye overløbsbygværker, hvor filtreringen kan foretages i forhold til renskrav. Hvis der, som i dette projekt, er krav om badevandskvalitet, kan risten kombineres med en desinfektionsløsning. Dosering af pereddikesyre (15 µg/L) efter filtreringen har således vist en reduktion af *E.coli*, der er tilstrækkelig til, at badevandskvaliteten kan overholdes.

En vigtig observation i projektforsøget har været, at Skanderborg sø er utrolig ren, når det gælder mængden af colibakterier, der selv ved overløbshændelser kun har været at finde i meget lave koncentrationer i søen.

3. Summary and Conclusions

To ensure a good bathing water quality and at the same time meet the increasing demand for fast implementable climate adaptation solutions, the project "Safe Recreational Lake Waters" (Sikkert Søbad) introduces a new concept for monitoring, early warning and treatment of overflow water from sewer system to the recipients with requirements for bathing water quality.

Based on Skanderborg Lake and focusing on bathing water quality, the aim of the project has been to develop a complete solution that combines risk assessment of individual overflows with an advanced warning system that connects microbiological data, weather and wind data as well as hydraulic conditions in the surrounding area and lake. Furthermore, two prototypes of treatment solutions for sewer overflows have been tested; a natural plant-based filter solution and a compact molecular mechanical/chemical treatment method.

The project has resulted in a warning system model, based on real data from Skanderborg and complicated modelling. Now, this system gives warnings to bathing guests at the lake via an automatic warning board if there is a risk that the bacteria from overflows reduce the bathing water safety. Furthermore, tests of the two treatment solutions provide an insight into the advantages and disadvantages of among others a planted root zone solution and a grid solution combined with disinfection. The planted filters from Kilian Water have a nice and recreational appearance, but require some space where they are established. The solution tested in this project had an embedded aeration that reduces the required space for the equipment. The planted filters have proven to be very effective in reducing both organic substances and nitrogen in a water flow up to 12 m³/day. Here, a strong reduction can also be observed in *E.coli* and Enterococci as a result of retention. However, this solution raises a challenge in case of sporadic and very strong flows at heavy rainfalls. In this situation, the tested prototype could not operate with the same treatment effect.

With the mechanical solution, the overflow water is filtered through a grid (Stjernholm RO grid) of 0.4 mm. The grid could withhold large impurities and reduce COD by creating a sludge cake. It is important to note that the dimensioning of this type of grid is monitored and operated according to hydraulic load and requirements, and the demands regarding the treatment effect. The developed solution can be installed and placed in existing and new overflow building constructions, where the filtering can be carried out according to existing environmental requirements. If certain requirements for bathing water quality exist, as in this project, the grid can be combined with a disinfection solution. This way, the dosage of peracetic acid (15 µg/L) after filtration has shown a sufficient reduction of *E.coli*, so that the bathing water quality can be maintained.

An important observation in the project has been that the Skanderborg lake is extraordinarily clean, when it comes to the number of coli bacteria, which even at overflow incidents could be found in very low concentrations in the lake.

4. Introduktion

God badevandskvalitet er højt prioriteret både politisk og i forhold til fastholdelse af turisme i Danmark. Idet klimaforandringer forventes at resultere i hyppigere og voldsommere nedbørshændelser i fremtiden, udgør udledning af ubehandlet, fortyndet spildevand i forbindelse med regnvandsbetingede overløb en stigende trussel mod badevandskvaliteten. Der er således behov for at imødegå de negative effekter, som sådanne overløb har på recipientkvaliteten.

Ved kraftige regnhændelser udledes regnvand og spildevand via overløb fra fælleskloakerede områder, hvilket påvirker vandmiljøet og badesikkerheden. Der er endnu ikke krav til rensning af de regnvandsbetingede overløb, men i et udkast til de nye vandplaner, er der udpeget 790 overløbsbygværker, på hvilke der skal sættes ind for at mindske belastningen af recipienterne (*punktkilder 2013, NST*). Den traditionelle løsning er at separatkloakere for at forhindre udløb eller at udbygge afløbssystemet med større rør eller sparrebassiner for at reducere udledningerne. Det kræver imidlertid store investeringer og 10-20 år at gennemføre disse tiltag.

Baseret på en miljømæssig prioritering af overløb var formålet med dette projekt at udvikle og etablere kosteffektive renseløsninger, som i samspil med udvikling og implementering af et varslingsystem ville kunne minimere miljøbelastningen og påvirkningen af badesikkerheden. Det integrerede system skulle således repræsentere en løsning, som er økonomisk fordelagtig for forsyningsselskaberne/kommunerne uden at gå på kompromis med miljø- og sundhedsaspekter.

Skanderborg har 18 officielle badestrande og fire strande har Blå Flag-status (foråret 2018). Badestrandene er fordelt ved seks søer, og 10 af badestrandene - herunder de fire strande med Blå Flag - er placeret ved de tre søer, der har udledning fra overløbsbygværker fra fælleskloakerede områder. Skanderborg Kommune ønsker i nærmeste fremtid at anlægge flere nye badesteder ved Skanderborg Sø for at øge udbuddet af rekreative områder til turister og lokale brugere. Dette medfører imidlertid nye udfordringer for Skanderborg Forsyning i forhold til at sikre vandkvaliteten i søerne. Skanderborg er derfor et oplagt sted til at udvikle og demonstrere nye løsninger til håndtering af overløbshændelser, og der er gennem kontakt til Det Nationale Vandtestcenter skabt et konsortium med de bedste kompetencer til at løse denne udviklingsopgave.

Udfordringerne med at sikre god badevandskvalitet og samtidig håndtere overløbsvand er aktuelle i Danmark såvel som i udlandet. Dette gælder ikke mindst landene i EU, som på dette område er reguleret efter samme lovgrundlag via vandplanerne. Der er således et stort økonomisk potentiale for at producere og afsætte fleksible løsninger inden for dette område.

Formålet med projektet var at udvikle et effektivt system til beskyttelse af badeområder og reducere den miljømæssige belastning af vandområder fra fælleskloakerede overløb. For at opnå dette har projektet fokuseret på udviklingen af et samlet koncept bestående af tre dele: a) En innovativ måde at gennemføre risikovurdering af individuelle overløb med særlig fokus på badevandskvalitet, b) Et nyt varslingsystem, som varsler på baggrund af moderne mikrobiologiske metoder og varslingsværktøjer, og c) To renseløsninger - en plantebaseret filterløsning velegnet til naturnære områder og en modulær fysisk/kemisk rensemetode tilpasset overløbsbygværker med meget lidt plads. I begge tilfælde vil renseløsningen kunne kobles til varslingsmodellen, således at der kun varsles om forringet badevandskvalitet i de tilfælde, hvor renseløsningerne ikke er i stand til at håndtere og rense overløbsvandet tilstrækkeligt inden udledning til søen.

I projektet var fokus på badevandskvaliteten i Skanderborg Sø, hvor der er registreret 13 regnvandsbetingede overløb samt 10 nødoverløb fra spildevandspumpesystemer med direkte eller indirekte udløb i Skanderborg Sø. FIGUR 1 er regnvandsbetingede overløbspunkter markeret med grøn pil og nødoverløb på spildevandspumpestationer er vist med rød pil. Badestrandenes placering er vist med blå streg.



FIGUR 1. Placering af badestrande og overløb i Skanderborg Sø.

Projektet har været opdelt i fire arbejdsopgaver, der omfattede kortlægning af de fækale bakterielle kilder i søen og disses udbredelse og betydning for badevandskvaliteten (AP1). Informationerne blev anvendt til udvikling af en bakteriel varslingsmodel, som fysisk resulterede i en interaktiv varslingsmodel til badegæster ved en udvalgt badestrand ved Skanderborg Sø (AP2). Med baggrund i kortlægningen udvalgte et relevant overløbsbygværk, på hvilket der blev udviklet og testet to miljø- og kosteffektive renseløsninger (AP3). Løsningernes effektivitet blev dokumenteret i en testperiode, og muligheden for en kobling mellem varslingsmodel og rensning blev belyst (AP4).

5. Kortlægning af bakterielle kilder og udbredelsen i Skanderborg Sø

Pålidelig varsling af badevandskvalitet kræver korrekte målinger. Derfor startede projektet med etablering af det empiriske grundlag for en avanceret varslingsmodel. Da der eksisterede meget få målinger af badevandskvalitet andre steder, end hvor der i forvejen er badeaktivitet, var det en forudsætning, at der etableredes en database med målinger af vandkvaliteten fra resten af søen. Hertil blev der i projektet udviklet to typer af prøvetagere, der med en forprogrammeret drone kunne flyve eller sejle ud på søen og tage vandprøver på forudbestemte koordinater.

En komplikation i forhold til at vurdere badevandskvaliteten var, at der foruden overløb fra kloaksystemet findes mange forskellige kilder til bakteriel forurening af vandet. Dette gælder specielt for ferskvandsområder, såsom søer, der ofte besøges af vandlevende fugle i selve søen og af får, køer eller heste i direkte eller indirekte (overfladeafstrømning) kontakt med vandet. Disse dyr kan via deres afføring tilføre søen betragtelige mængder af fækale bakterier, såsom *E.coli* og Enterokokker. For at en varslingsmodel kan optimeres i forhold til forurening fra spildevandssystemet er det vigtigt at kende omfanget af forureningen fra fugle, får, køer m.m. Med DNA-analyser af vandprøver er det muligt at identificere specifikke markørgener i de fundne bakterier og på den måde opnå viden om bakteriernes oprindelse. Dette var således også indtænkt som en vigtig del af projektet.

5.1 Logning af overløb

Forudsætningen for at kunne etablere et varslingsystem i forbindelse med overløb er, at der lyder en alarm fra overløbene, når de aktiveres. I første halvdel af projektet blev antallet af overløb til Skanderborg Sø kortlagt og registreret. På overløb i forbindelse med eller i nærheden af en pumpestation blev der monteret elektroder eller overløbsvippere, der giver en alarm via sms, når overløbet er aktivt. Data logges i forsyningens SRO, ligesom varigheden af det enkelte overløb registreres.

På overløb, hvor der ikke er adgang til strøm, blev der monteret batteridrevne loggere, som ved overløb sender en alarm via e-mail og sms, og som uploader de løbende målinger til en ftp-server. For at spare på batteriet er der endvidere monteret en switch, som registrerer, når vandstanden i overløbsbygværket er 10 cm under overløbskanten, og først der bliver loggerne aktive. Data fra SRO-baserede loggere og fra ftp-serveren uploades en gang i timen til en SQL-database, hvorfra data kan tilgås.

5.2 Udvikling af drone til prøvetagning

I forbindelse med udviklingen af en prøvetagningsdrone valgte Aalborg Universitet fortrinsvis at arbejde på udviklingen af en sejlede drone frem for en flyvende, idet en båddrone vurderedes at være langt mere driftssikker ift. at kunne udtage de nødvendige prøver.

Den udviklede båddrone kunne både udtage punktvis prøver og en "middelprøve" over en tilbagelagt strækning på søen. Båden kunne udtage 24 separate prøver, hvilket mere end opfyldte projektets krav om 10 vandprøver udtaget på individuelle prøvetagningspunkter i søen. Prøverne blev udtaget via en slange 30 cm under vandoverfladen, men dybden kunne

justeres efter behov, ligesom der også kunne foretages en profilering af koncentrationsvariationer i hele vandsøjlen. Prøvetagningspunkterne blev bestemt via indkodede koordinater, som båddronen navigerede efter. Fjernstyring var også en mulighed.

Dronen baserer sig i den nyeste version alene på GPS-data til navigation. Den tidligere version brugte digitalt kompas til orientering, hvilket viste sig at være for unøjagtigt. Det har krævet en omprogrammering af styringssoftwaren til PID-regulering på baggrund af GPS-data.

Båddronen er blevet testet i forhold til navigation og prøvetagning, og der blev opsamlet data fra den nordlige del af søen med henblik på evaluering af en regnhændelse. I forbindelse med test af båddronen er der etableret kontakt til Miljøstyrelsen omkring videre udvikling af konceptet til en avanceret båddrone, der kan opfylde Miljøstyrelsens ønsker om en mere effektiv og billigere prøvetagning i søer.

En flyvende drone blev ligeledes testet i projektet. Testen viste, at det var muligt at sende en drone langt ud over Skanderborg Sø, syd for Kalvø, og hente en vandprøve tilbage. Dronen var under fuld kontrol under hele testen. Testen viste ligeledes, at dronen var i stand til at bære op til 0,5 l vandprøve, hvilket ville være nok til ca. fem vandprøver fra søen. Dog kræves der en væsentlig større drone og dermed langt flere sikkerhedsforanstaltninger, hvis den flyvende drone skal kunne tage samme antal prøver som den sejlene drone. Dronen blev således udelukkende demonstreret i projektet.

På FIGUR 2 og FIGUR 3 ses hhv. den sejlene og flyvende drone under test på Skanderborg Sø.



FIGUR 2. Båddrone (grøn) efter test på Skanderborg Sø.



FIGUR 3. Quad-copter-drone henter vandprøve fra Skanderborg Sø.

5.3 Observerede bakteriekoncentrationer

I forhold til projektets aktiviteter, der vedrører kortlægning af bakteriekoncentrationer og kildesporing, blev der taget udgangspunkt i de historiske data, der foreligger fra Skanderborg Sø, suppleret med analysedata fra nye prøver udtaget under forskellige vejrforhold i og omkring søen.

Badevandskvaliteten i Skanderborg Sø karakteriseres historisk set og for nuværende som "udmærket", hvilket betyder, at badevandet overholder grænseværdierne bekendtgjort i BEK nr. 917 af 27/06/2016: Bekendtgørelsen om Badevand i Badeområder (< 500 *E.coli* cfu /100 ml og <200 Enterokokker cfu/100 ml). Ydermere har der heller ikke tidligere været anledning til bekymring ift. *E.coli* i kontrolprøver. Kvalitetskravene for ferskvand som angivet i Bekendtgørelsen om Badevand i Badeområder (BEK nr. 917 af 27/06/2016) fremgår af TABEL 1.

TABEL 1. Kvalitetskrav for ferskvand ifølge BEK nr. 917 af 27/06/2016: Bekendtgørelsen om Badevand i badeområder.

Parameter	Udmærket kvalitet	God kvalitet	Tilfredsstillende kvalitet
Intestinale Enterokokker (cfu/100 ml)	200 ¹⁾	400 ¹⁾	330 ²⁾
Escherichia coli (cfu/100 ml)	500 ¹⁾	1.000 ¹⁾	900 ²⁾

1) Ud fra en vurdering af 95-percentilen.

2) Ud fra en vurdering af 90-percentilen.

Badevandskvaliteten beregnes via en statistisk formel baseret på data over 4 år. Derfor er både antallet af prøver og koncentrationen i prøverne afgørende for, hvor høje niveauer der må findes i en enkelt prøve, for at badevandskvaliteten kan ændre klassifikation. Der er for nuværende ikke specifikke krav til varsling ift. badevandskvaliteten. Blå Flag-ordningen foreskriver dog, at man skal tage flaget ned ved fækale koncentrationer over 2.000/100 ml, mens Bekendtgørelsen om Badevand i badeområder lægger op til, at kommunen skal varsle ved risiko for kendt kortvarig forurening, men der foreligger ikke retningslinjer for, hvordan man skal varsle eller ved hvilke koncentrationer.

I bestræbelsen på at kortlægge forureningskilder og omfang ift. badevandskvaliteten i Skanderborg Sø har der i projektet indledningsvis været fokuseret på den øvre del af søen i området omkring Skanderborg Kulturhus, ved en eksisterende badebro, hvor det er planlagt at etablere "Søtorvet", er et større søbad og vandaktivitetscenter i løbet af 2018. For at undersøge den fækale påvirkning af Søtorvet blev seks vandløb udvalgt ud fra deres placering samt vandføring ift. påvirkning af denne badestrand. Koncentrationen af *E.coli* og Enterokokker blev efterfølgende bestemt i vandprøver udtaget i tørvejr og regnvejr i seks prøvetagningspunkter samt ved stranden, vist på FIGUR 4**Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**

Fund af høje bakteriekoncentrationer i prøver udtaget i tørvejr kan indikere fejlkoblinger fra kloaksystemet til regnvandssystemet, mens der under regnvejr kan forekomme afstrømning fra veje og tage via regnvandssystemet, som kan lede fækale bakterier ud i søen. Endvidere er der risiko for, at der, under regnvejr, ledes opspædet spildevand ud i søen via overløb, hvis kapaciteten i kloaksystemet overskrides.

I prøverne, udtaget af Amphi-Bac i tørvejr blev der ikke fundet høje koncentrationer af hverken *E.coli* eller Enterokokker. Dette tydede på, at badevandskvaliteten i Skanderborg Sø, i det undersøgte område, ikke blev påvirket negativt af det vand, der blev tilført via vandløb i tørvejr.

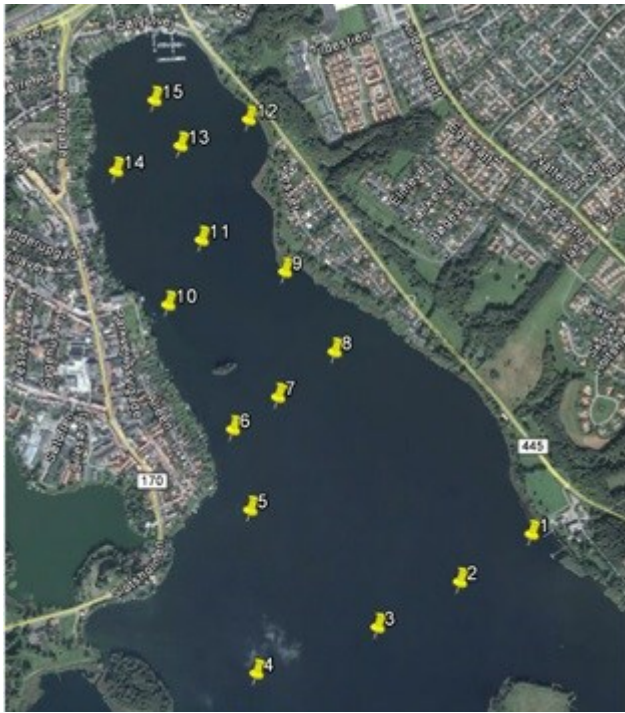
I februar 2017 gennemførte Amphi-Bac endnu en prøvetagningsrunde i de nærliggende vandløb samt ved badevandsstationen for at kunne beskrive en eventuel sæsonvariation i bakteriekoncentrationen. Prøvetagningen blev udført efter en periode med 5 mm nedbør og ingen registrerede overløb. Der blev ikke registreret høje koncentrationer af *E.coli* eller enterokokker i nogle af prøverne. Den højeste måling var på 331 *E.coli*/100 ml i det rørførte vandløb nord for badevandsstationen. Det vurderes derfor, at det ikke er til nytte for projektet at udtage flere vinterprøver, og at de resterende midler er bedre brugt på flere analyser i forbindelse med test af de to renseløsninger og prøvetagning med dronebåden.



FIGUR 4. Overblik over prøvetagningssteder i Skanderborg Sø.

På baggrund af overløbsalarmer fra Skanderborg Forsyning blev der medio juni 2016 udtaget prøver (30 timer efter overløbsalarmeren) fra flere steder i nærheden af eller direkte ved søbredden i området omkring Søtorvet. I punkterne 2 og 7 (FIGUR 4 **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**) blev der fundet høje koncentrationer af både *E.coli* og Enterokokker (> 2.420 cfu/100 ml), mens der ved Søtorvet kun blev fundet 30 *E.coli*/100 ml og 10 Enterokokker/100 ml. Både punkt 2 og punkt 7 er påvirket af overløb fra kloaksystemet, så en del af de fundne bakterier stammer sandsynligvis fra spildevand, men tilsvarende høje koncentrationer kunne ikke genfindes ved Søtorvet. Der var desuden ingen forskel i forekomsten af *E.coli* i prøver taget 30 cm og 300 cm under vandoverfladen ved Søtorvet. Variation i prøverne kan måske til dels forklares med den udviklede strømningsmodel (se kapitel 6).

Hen over sommeren 2017 har Amphi-Bac udført yderligere fire prøvetagningsrunder, hvor vandprøver er blevet udtaget under forskellige vejrforhold og i varierende omfang i og omkring søen. I alle tilfælde blev der udelukkende målt lave koncentrationer af *E.coli* eller Enterokokker ved Søtorvet. Det er således fortsat uklart, hvor de fækale bakterier bliver af. Som opfølgning herpå foretog Amphi-Bac i august 2017 en omfattende prøvetagningsrunde, hvor hele den øvre del af Skanderborg Sø blev undersøgt systematisk. Prøvetagningspunkterne fremgår af FIGUR 5.



FIGUR 5. Overblik over prøvetagningsstationer i den øvre del af Skanderborg Sø. Ved hver prøvetagningsstation er der udtaget en prøve til kvantitativ bestemmelse i overfladen samt en dybdeprøve.

Prøverne blev udtaget i båd i numerisk rækkefølge. Ved hvert prøvetagningspunkt blev der udtaget en prøve i søens overflade samt en dybdeprøve. Dybdeprøven blev udtaget ved, at 200 ml vand blev suget op 0,5 m over søbunden og derefter 200 ml for hver meter over bunden, indtil de sidste 200 ml blev udtaget 1 meter under vandoverfladen. Vanddybden afgjorde således, hvor mange delprøver der blev suget op. Alle delprøverne for hvert prøvetagningspunkt blev blandet, hvorefter 100 ml af den blandede dybdeprøve blev analyseret for *E.coli* med standardmetoder. Prøverne blev udtaget i let regn, efter at der var registreret overløb fra et overløbsbygværk i byen. Resultaterne af analyserne viste ingen høje bakteriekoncentrationer i prøverne.

I september 2017 førte flere store regnhændelser over Skanderborg og omegn til utallige overløb og massive aflastninger fra flere overløbsbygværker til Skanderborg Sø. Amphi-Bac har udtaget en prøve ved Sørtorvet en septembermorgen efter et skybrud, men heller ikke i dette tilfælde kunne der måles høje koncentrationer af *E.coli* eller Enterokokker ved Sørtorvet.

5.4 Bakteriel kildesporing

For at bestemme overløbsbygværkernes indflydelse på badevandskvaliteten ved Søtorvet, kan DNA-analyser anvendes til at bestemme oprindelsen af de bakterier, der findes ved badestranden (M1.2 "Kildesporing af bakteriernes oprindelse gennemført vha. DNA-analyser"). Herved kan det fastslås, om en fækal bakterie stammer fra et menneske (spildevand), fra kvæg, svin (landbrug) eller andre diffuse kilder. Dette giver mulighed for at vurdere, om udledning fra spildevandssystemet er den dominerende kilde til fækal forurening af badevandet, eller om andre kilder også har indflydelse.

Idet der ikke er målt høje koncentrationer af fækale bakterier ved Søtorvet eller i de vandløb, der ikke var påvirket af overløb fra spildevandssystemet ved prøvetagningen, har der ikke været baggrund for at udføre en DNA-analyse på prøverne.

Det var forventet, at der kunne findes prøver med højere koncentration af fækale bakterier via det udvidede prøvetagningsprogram med dronebåden, hvor også prøver i forskellige vanddybder blev udtaget. Dette viste sig ikke at være tilfældet.

Amphi-Bac opkoncentrerede bakterierne i de indsamlede prøver fra søen ved cross flow-filtrering og opnåede således en tilstrækkelig høj koncentration af bakterier til at lave DNA-analyser. I FIGUR 6 ses til venstre ubehandlet søvand fra Søtorvet, og til højre vises bakterier m.m. fra 10 liter søvand opkoncentreret til et slutvolumen på ca. 200 ml.



FIGUR 6. Til venstre ubehandlet søvand ved Søtorvet og til højre bakterier m.m. fra 10 liter søvand opkoncentreret til et slutvolumen på ca. 200 ml.

For at øge sandsynligheden for at der blev udtaget en prøve fra Søtorvet, mens bakteriekoncentrationen var tilstrækkelig høj, blev der fremstillet en automatisk prøvetager (**Fejl! Henvissningskilde ikke fundet.**), der kunne aktiveres med en SMS. Prøvetageren kan indstilles til at udtage otte vandprøver i forskellige dybder og på forskellige tidspunkter og kan aktiveres, så der udtages en række prøver, når der registreres overløb fra et eller flere overløbsbygværker i nærheden af Søtorvet. Prøvetageren blev anvendt til prøvetagning i løbet af badesæsonen.



FIGUR 7. Testopstilling af automatisk prøvetager til udtagning af prøver i forskellige dybder.

Idet det ikke har været muligt at påvise høje koncentrationer af fækale bakterier hverken i de nærliggende vandløb eller direkte ved Søtorvet, blev en del af fokus for prøvetagning flyttet mod at bestemme, om der var sket en temperaturbaseret lagdeling i søen, der kunne have betydning for bakteriernes fordeling i vandmasserne. En sådan lagdeling ville dermed også influere på varslingsmodellen.

Amphi-Bac udviklede derfor en temperaturmåler, der kontinuerligt kunne måle vandtemperaturen ned igennem søen. Temperaturmåleren blev fastgjort en flydende enhed, der indeholder computer, antenne og batteri. Computeren opsamlede signalet fra 11 temperaturmålere, der var fordelt på en 10 meter lang wire ned i søen. Temperaturdata blev uploadet til et webhotel, hvorfra data kunne trækkes til varslingsmodellen og bruges til at tilpasse prøvetagningen. Amphi-Bac har udviklet softwaren til temperaturmåleren og bygget temperaturmåleren.

Forud for badevandssæsonen 2017 blev temperaturmåleren søsat og har logget temperaturen ned gennem søen hele badevandssæsonen. Temperaturmåleren viste, at der først på sæsonen var en temperaturbaseret lagdeling i søen, men at denne blev udlignet hen over sæsonen.

6. Udvikling af varslingsmodellen

En væsentlig udfordring for vurdering af badevandskvaliteten er at koble udledningerne fra afløbssystemet med transport og spredning. En vigtig del af projektet var derfor at udvikle en metode, der kunne koble nedbøren sammen med, flowet i afløbssystemet, overløb til søen samt den videre transport/spredning af spildevandet i det ferske vandmiljø. For at kunne foretage denne kobling skulle der bruges en regnmåler til at måle nedbøren i Skanderborg. Regn målingerne kombineres med en afløbsmodel, der kan forudsige, om der bliver overløb fra afløbssystemet. Modellen skal hele tiden sammenligne sine resultater med onlinemålinger af overløbsaktiviteten.

Det er vigtigt, at metoden kan bruges til at give et varsel i forbindelse med en overløbshændelse, så det kan vurderes, om den bakterielle forurening betyder, at badevandet ikke kan overholde badevandskriteriet. Hvis der på sigt etableres renseløsninger i forbindelse med overløbsbygværkerne fra det fælleskloakerede afløbssystem til Skanderborg Sø, vil metoden også kunne anvendes til at beregne belastningen på disse og til styring og regulering af renseløsningerne. Herved kan udledningen af bakterielt forurenet vand potentielt minimeres til fordel for badevandskvaliteten og dermed for lukketiden for Søbadet.

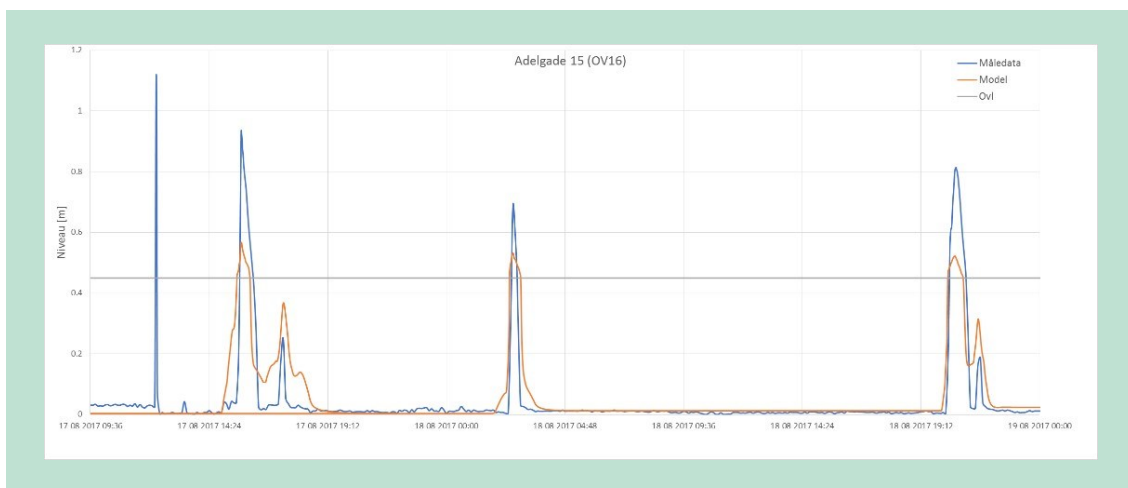
Varslingsystemet var baseret på en kombination af tre realtidsmodeller der alle er udviklet af Aalborg Universitet: 1) en hydraulisk belastningsmodel baseret på afløbssystemet, 2) en strømningsmodel for Skanderborg Sø og 3) en stofsprednings- og vandkvalitetsmodel for Skanderborg Sø. Disse modeller og deres opsætning og kalibrering beskrives i de følgende afsnit.

6.1 Hydraulisk belastningsmodel

I den første version af modellen var de præliminære resultater for den relative, hydrauliske belastning fra overløbsbygværker simuleret baseret på en 10-års periode. Der blev indledningsvis anvendt regndata fra spildevandskomiteens regnmåler i Horsens, da Skanderborg Forsynings egne regnmålinger i den for modellen nødvendige tidsopløsning, først blev etableret i forbindelse med nærværende projekt.

Denne første modelopsætning havde til formål at identificere og prioritere de overløbsbygværker, som påvirker Skanderborg Sø mest. Resultatet af denne prioritering kan ses af FIGUR 14, hvor det totale antal overløbsbygværker er samlet til ni primære udledningpunkter. Modelopsætningen blev baseret på en MIKE URBAN-model for afløbssystemet, som var stillet til rådighed for projektet af Skanderborg Forsyning. Denne model var fra projektstart ikke kalibreret og primært opsat for at kunne kortlægge oversvømmelsesrisici i Skanderborg. Modellen havde derfor ikke tidligere været anvendt til bestemmelse af aflastning fra fælleskloakerede oplande til Skanderborg Sø. Modellen blev i projektet simplificeret til i realtid at kunne simulere den hydrauliske belastning hurtigere end den oprindelige model og samtidig optimeret til at bestemme overløbsmængder.

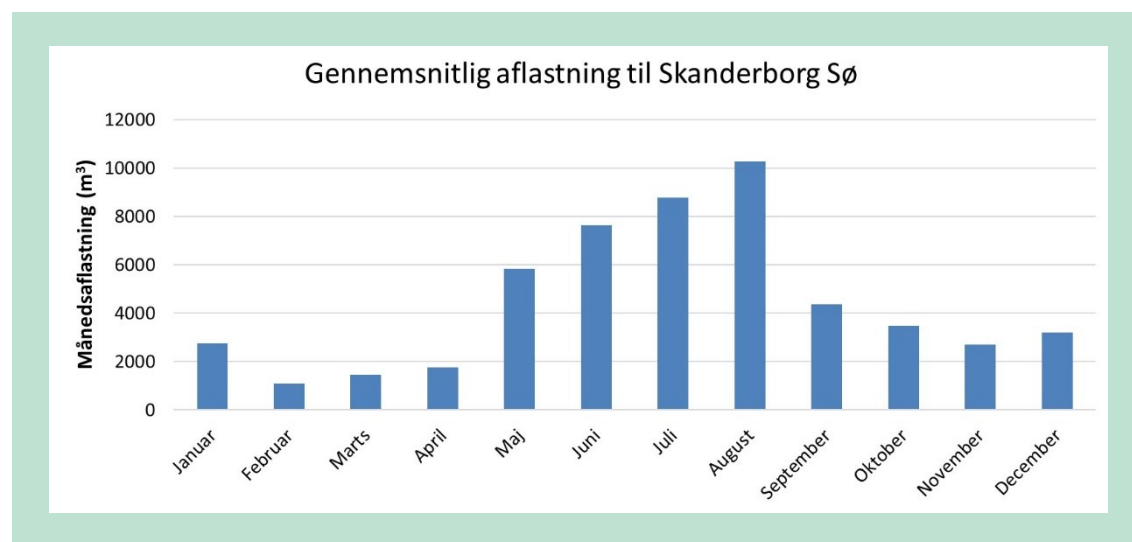
Kalibreringen af den udviklede hydrauliske belastningsmodel for Skanderborg Sø blev sidenhen fortaget vha. simuleringer med historisk regn for at bestemme den hydrauliske belastning fra de enkelte overløbsbygværker ved Skanderborg Sø. Opsætningen af lokale regnmålere i Skanderborg og etableringen af overløbsloggere på udvalgte overløbsbygværker har desuden dannet grundlag for yderligere kalibreringer af modellen.



FIGUR 7. Eksempel på kalibrering af model (rød kurve) mod måling af vandstand i overløbsbygværk (blå kurve).

FIGUR 7 viser et eksempel på, hvordan vandstanden i et enkelt overløbsbygværk er modelleret sammenlignet med vandstandsmålinger i samme bygværk. I dette tilfælde underestimerede modellen aflastningen en smule, mens den i andre bygværker overestimerede. Dette varierede fra hændelse til hændelse og mellem individuelle bygværker. Samlet var det dog ønsket, at modellen overestimerede aflastningerne for at være på den sikre side i forhold til varslingen af vandkvaliteten i søen.

I **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** ses de modelberegnedede årlige aflastninger beregnet over en 10 årig periode. Det ses at de største aflastningsmængder ligger i sommerperioderne – sammenfaldende med badesæsonen.

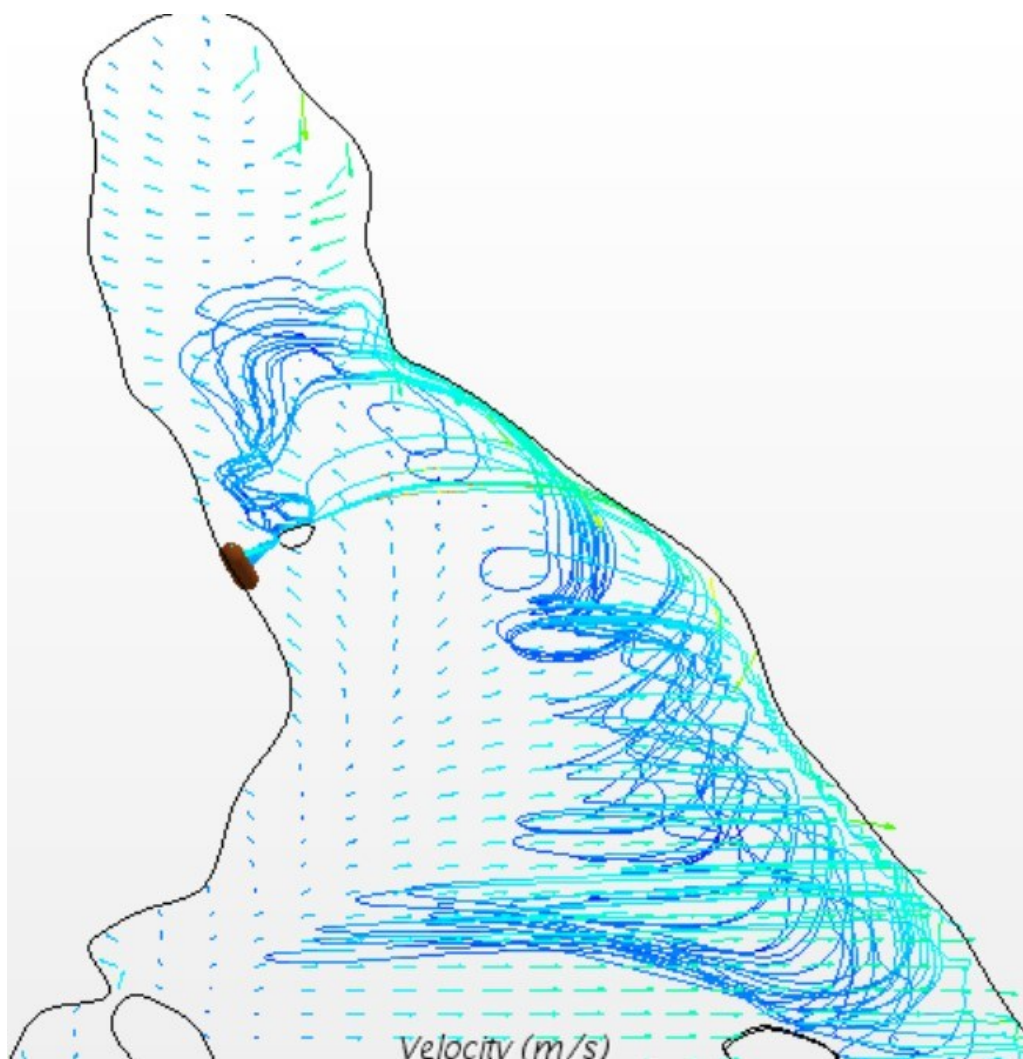


FIGUR 9. Gennemsnitlig simuleret årsvariation (2006-2016) i den regnbetingede aflastning fra fællessystemet til Skanderborg Sø opgjort pr. måned.

De enkelte overløbsbygværkerne der udleder til Skanderborg Sø aflaster imidlertid forskelligt i forhold til nedbørsmængden. Modelberegningerne viser eksempelvis, hvordan nogle af de mindre overløbsbygværker aflaster til søen allerede ved 2 mm regn, mens andre større overløbsbygværker først aflaster efter ca. 7-8 mm regn.

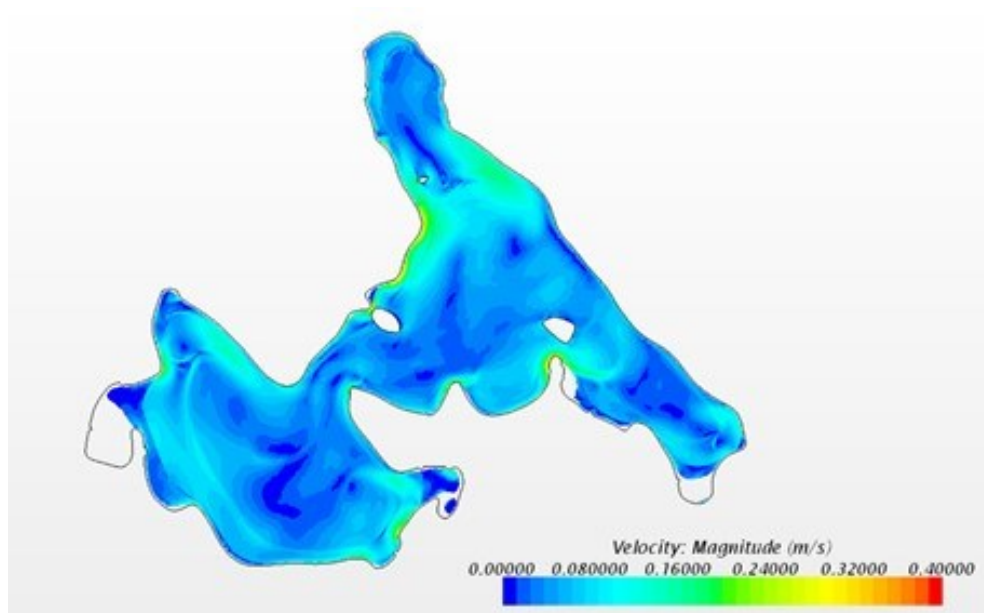
6.2 Strømningsmodel

Til anvendelse i stofsprednings- og vandkvalitetsmodellen for Skanderborg Sø blev søens strømningsmønstre kortlagt. Der blev opstillet en tredimensional strømningsmodel i Star-CCM+, der var det primære simuleringsværktøj. Scenariemodellerne kan håndtere 12 forskellige vindretninger, og den hydrodynamiske model blev optimeret med henblik på at simulere den horisontale del af spredningen bedst muligt. Søens geometri og dybdeforhold er digitaliseret på baggrund af dybdekort, og der er gennemført simuleringer under forskellige vindretninger og vindhastigheder for at kunne belyse strømningsmønstre i søen.



FIGUR 8. Eksempel på spredningsmønster for bakterier ved vestlig vind og udledning syd for Søtorvet.

Det ses af FIGUR 8, at strømningsmønsteret kan være ganske kompliceret i en enkelt vindretning. Selvom det intuitivt virker logisk, at bakterierne spredes mod øst i vestlig vind, kan det ses fra beregningerne, at de i dette tilfælde først vil bevæge sig mod nord, herefter mod øst for til sidst at bevæge sig mod syd. Det skyldes den komplekse interaktion mellem den vinddrivne cirkulation og søens udformning.



FIGUR 9. Eksempel på overfladestrømningshastigheden ved sydlig vind.

I FIGUR 9 ses et andet eksempel på, hvordan overfladehastigheden varierer ved en sydlig vind på 10 m/s. Det komplicerede 3-dimensionelle strømningsmønster, der opstår, er et resultat af forskellige vanddybder og af søens udformning.

Til projektet blev der endvidere udviklet flydere med GPS-trackere, som blev testet flere gange i projektet. Princippet bag GPS-trackere er, at de flyder i overfladen og primært følger vandets bevægelse. GPS-systemet lokaliserer trackeren inden for få meter, og positionen opdateres hvert minut. Systemet består ganske simpelt af en Androidmobiltelefon, hvorpå der er installeret et gratis software, der gemmer positionen og overføre den til Dropbox hvert minut. På den måde var det muligt løbende at følge trackeren rundt i søen og efterfølgende samle den op igen. Erfaringerne med systemet viser, at selvom telefonen ligger i vandoverfladen, er det muligt at overføre data via mobilnettet.

GPS-trackere blev udformet sådan, at en væsentlig del af trackeren lå under vandoverfladen og var forsynet med et drivanker, så trackeren førtes af sted af strømningerne i søen, og ikke af vinden. GPS-trackere blev placeret i søen nær et udløb og ville således følge strømningerne rundt i søen. Herved kunne strømningsforholdene i søen nærstudies, og observationerne blev anvendt til at kalibrere strømningsmodellen.



FIGUR 10. Til venstre en GPS-tracker, der flyder med strømmen i Skanderborg Sø. Til højre se for- og bagside af GPS-trackeren.

På den ene side af den vandtætte kasse blev der monteret et 3D-printet beslag, som havde monteret en vægt, der sørger for at hele kassen ligger i vandoverfladen og ikke flyder højt. Derudover var der små finner på boksen, der bremsede den i forhold til vandet, så kassen fulgte vandet som antaget. På FIGUR 11 er en af GPS-trackernes rute vist over en periode på otte timer i Skanderborg Sø.



FIGUR 11. Eksempel på en GPS-trackers rute i Skanderborg Sø. Eheden blev søsat fra badebroen ved Vestermølle og opsamlet ca. otte timer senere på den modsatte søbred.

6.3 Stofsprednings- og vandkvalitetsmodel for Skanderborg Sø

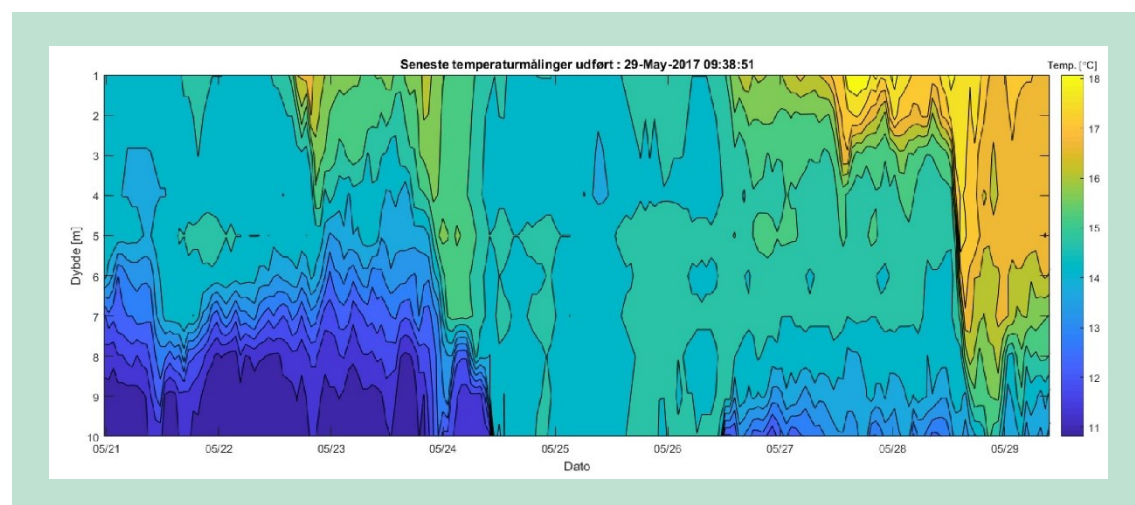
Den bakterielle badevandskvalitet er afhængig af en række forhold, bl.a. mængden af spildevand der aflastes fra afløbssystemet, strømningssforhold i søen, fortynding og henfald. Mængden af aflastet spildevand er primært styret af mængden og intensiteten af regnen. Da gennemstrømningen er meget lille for Skanderborg Sø, vil strømningssforholdene primært være styret af vinden. En aflastning fra et givet overløbsbygværk kan derfor give meget forskellig badevandskvalitet, afhængigt af vindretning og hastighed. Vandkvalitetsmodellen bruger derfor den ovenfor beskrevne strømningssmodel sammen med en spredningsmodel for at vurdere det aktuelle niveau for *E.coli*. Den primære begrundelse for at anvende en varslingsmodel frem for en direkte måling af vandkvaliteten er begrundet i, at det kan tage op til 24 timer at gennemføre en måling af bakterier. I den mellemliggende periode vil de badende ikke være forhindret i at bruge søen. Selvom modelberegningerne er forbundet med en vis usikkerhed, er dette at foretrække, da det muliggør en lukning af et badeområde, inden de badende kommer i kontakt med evt. forurenede vand. Det er i den anvendte varslingsmodel valgt at risikovurdere på den sikre side. Det betyder, at badning sandsynligvis frarådes oftere, end det efterfølgende kan begrundes med målinger. Dette valg er truffet af hensyn til de badendes sikkerhed.

Stofspredningsmodellen tager højde for fortyndingen af opblandet spildevand fra overløbsbygværkerne til søen. Det bakterielle niveau kalibreres på plads ud fra de målinger, der er foretaget i projektet.

Der er generelt blevet målt meget lave koncentrationer af *E.coli* i de gennemførte målekampanger; koncentrationer der var langt under de gældende grænseværdier for badevand. Da målingerne er essentielle for at kunne bruge de simulerede stofkoncentrationer i modellen, har de lave koncentrationer, der blev målt, medført, at modellen har været svær at kalibrere på plads. Der er derfor mulighed for, at yderligere målinger og efterfølgende modelkalibrering vil medføre en mere præcis model.

På FIGUR 12 ses en temperaturprofil skabt på baggrund af måling af temperaturen i Skanderborg Sø over nogle måneder i foråret i 2017. Formålet med temperaturprofilen var at undersøge, om der forekom lagdeling i søen.

FIGUR 12. Temperaturprofil i Skanderborg Sø fra 21/5 – 29/5 2017.



Det kan ses, at i slutningen af maj stiger overfladetemperaturen signifikant. Det kan have den effekt, at densiteten falder i overfladen. Fortyndet spildevand med en lavere temperatur vil have en større densitet og vil derfor søge mod bunden – væk fra overfladen og dermed fra de badende.

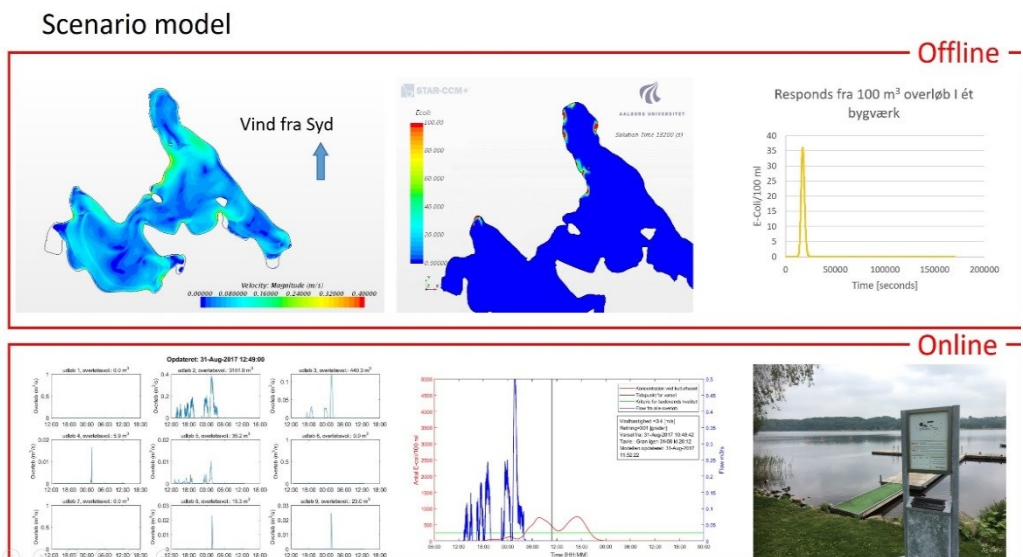
6.4 Online varslingsystem

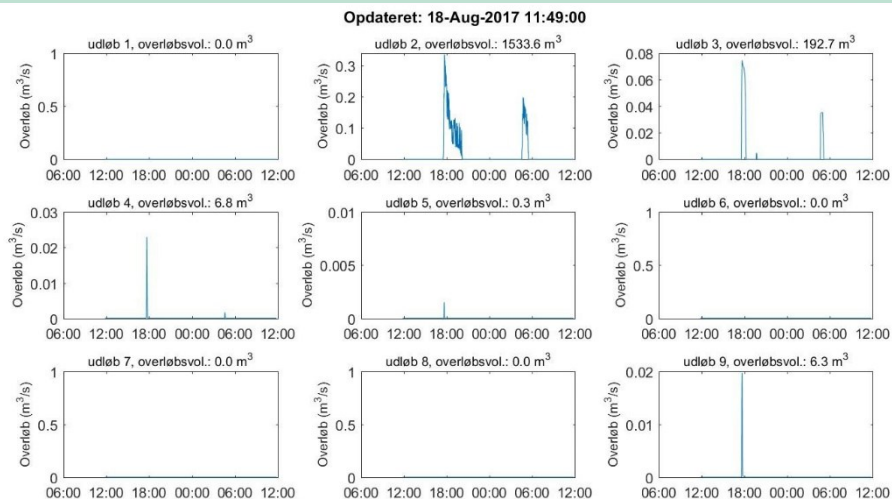
Skanderborg Forsyning har i projektet Sikkert Søbad etableret logning og registrering af alle overløb med udløb til Skanderborg Sø. Dette har blandt andet resulteret i, at der i forbindelse med overløbshændelser automatisk sendes en alarm via sms eller e-mail, hvis man er tilmeldt tjenesten. Der sendes info om tid og sted for overløbshændelserne, og informationen har Amphi-Bac kunnet benytte i forbindelse med planlægning af prøvetagninger (se kapitel 5), ligesom varslingsmodellen har været brugt til direkte input.

Konceptet for onlinevarslingsystemet er illustreret i **Fejl! Hensvingskilde ikke fundet..**

Varslingsmodellen er delt i to dele: En offline scenariomodel og en onlinevarslingsmodel. I offline delen beregnes der et strømningsmønster for hver vindretning og vindhastighed. Herefter kombineres disse resultater med en spredningsmodel, der beregner responsen fra hvert af de ni aggregerede overløbspunkter, FIGUR 13. Det er nu muligt at anvende superpositionsprincippet til at skalere og kombinere disse impulsrespons karakteristika fra hvert overløbspunkt med de beregnede aflastningshydrografer fra Mike Urban-modellen. Dette foregår i online-delen af modellen. Her opdeles aflastningshydrografen i en række ækvivalente impulsudledninger og kombineres til sidst til en kontinuert kurve for koncentrationen af *E.coli* nær Sørtorvet. Ved at kombinere de meget beregningstunge scenariosimuleringer med den meget beregningseffektive superpositions model er det muligt at afvikle varslingsmodellen i realtid.

Onlinevarslingsystemet har været i drift siden sensommeren 2017. Som beskrevet i det ovenstående er systemet blevet kalibreret efter registreringer af overløb og beregner således i realtid den hydrauliske belastning fra de fælleskloakerede overløbsbygværker til Skanderborg Sø. Det er valgt at aggregere udløbspunkterne til Skanderborg Sø i ni punkter (se FIGUR 13). Et eksempel på en belastningsberegning kan ses på FIGUR 13.



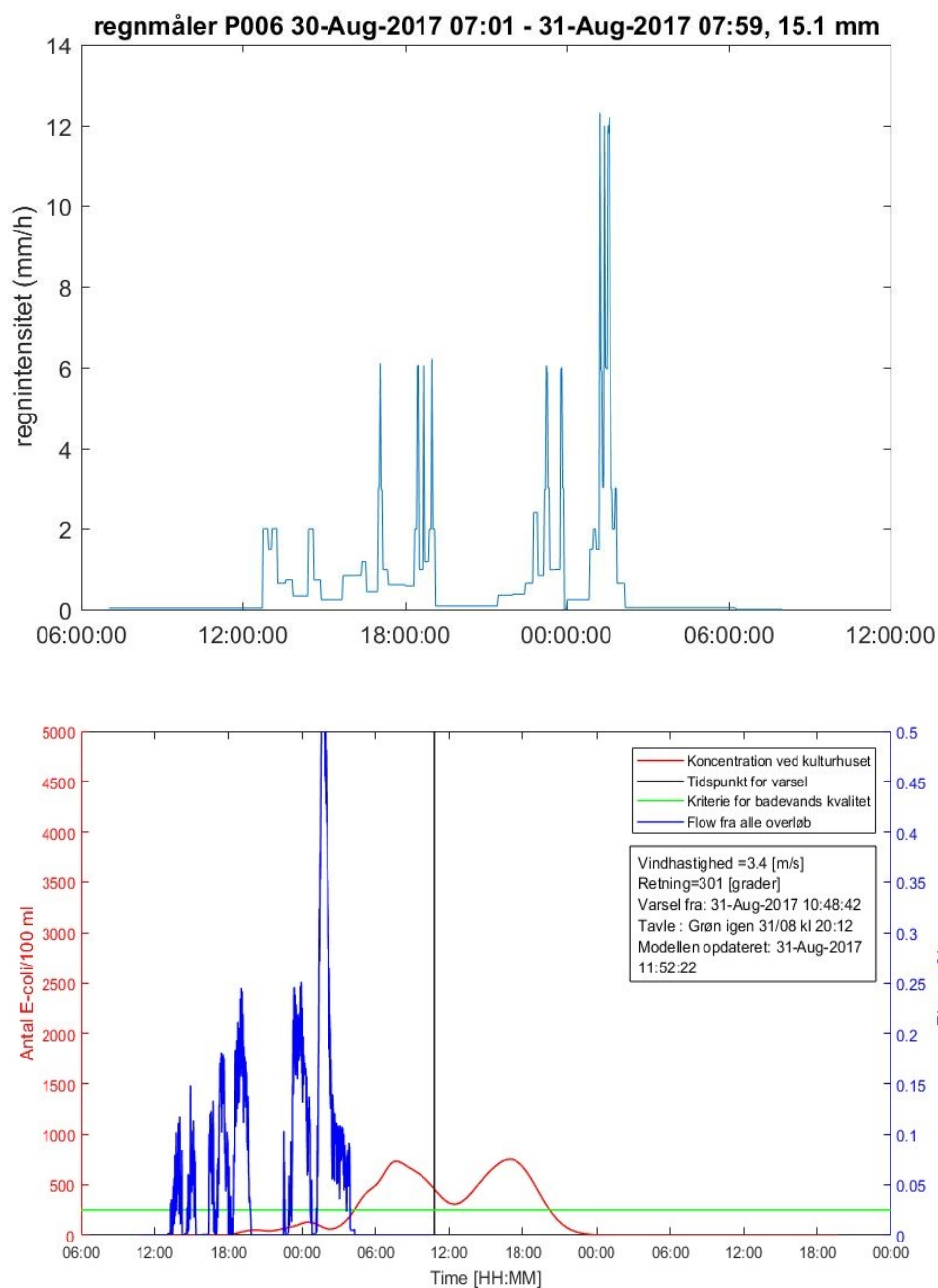


FIGUR 15. Koncept for onlinevarslingsystem.

FIGUR 13. Udløbspunkter til Skanderborg Sø. De røde markører angiver direkte udløb fra overløbsbygværker til søen og de gule markører er de udløb som løber via vandløb ud i søen.

FIGUR 14. Eksempel på hydraulisk belastningsberegning på Skanderborg Sø.

Modellen opdateres hvert 5. minut med ny prognose. I tilfælde af overskridelse ændres badeanbefalingen på varslingsstavlen ved Sørtorvet automatisk fra positiv (grøn signal) til negativ status (rødt signal), og der sendes en sms til kontaktpersoner i forsyningen og kommunen. De resulterende, beregnede koncentrationer er således afhængige af aflastet volumen, vindretning og vindstyrke. Vindhastigheden og vindretningen måles med lokale vindmålere, der løbende opdaterer data. Overskrides det fastsatte niveau for vandkvalitet, sendes der automatisk en alarm til det interaktive varslingsdisplay, som vil indikere dårlig badevandskvalitet, indtil koncentrationen er under det fastsatte niveau. I FIGUR 15 er vist et eksempel på en aflastningsberegning: Øverst i figuren ses regninputtet den 30.-31. august 2017, mens den beregnede koncentration af *E.coli* i samme tidsrum er vist nederst i figuren. I eksemplet er badevandskriteriet ift. *E.coli* sat til 250 *E.coli* /100 ml.



FIGUR 15. Eksempel på observeret nedbør og beregnet koncentration af *E. coli* baseret på modellen (rød kurve).

6.5 Interaktivt varslingsdisplay til badegæster

Udviklingen af et onlinevarslingsystem skal i projektet lede til opsætningen af et interaktivt varslingsdisplay til kommunikation med besøgende på udvalgte badestrande ved Skanderborg sø. Til dette formål benyttes et onlinedisplay, der kontinuerligt opdateres med relevant information og intuitivt kommunikerer badevandskvaliteten til badegæsterne.

Forud for badevandssæsonen 2017 blev det interaktive varslingskilt opsat ved badebroen ved Sørtorvet (se FIGUR 16). Varslingskiltet er onlineforbundet med varslingsmodellen og afspejler øjeblikkeligt de ændringer af badevandskvaliteten, som varslingsmodellen forudsiger.

Dermed får badegæster ved stranden straks besked, hvis der opstår forhold i søen, som af modellen vurderes at indebære en risiko for forringet badevandskvalitet ved badestedet.



FIGUR 16. Interaktivt varslingskilt opsat ved Søtorvet ved Skanderborg Sø. Varslingskiltet er onlineforbundet med varslingsmodellen for søen og advarer øjeblikkeligt badegæsterne, hvis der er risiko for forringet badevandskvalitet.

6.6 Sammenkobling mellem rensning og varsling

Idéen bag sammenkoblingen mellem rensning (se afsnit 7 og 8) og varsling er, at hvis den hydrauliske belastning af renseforanstaltningerne overskrider den tilgængelige kapacitet, vil den overskydende vandmængde blive aflastet ud i søen. Varslingsmodellen er således baseret på, at den kun regner på den aflastning, der er større end rensekapaaciteten på den tilkoblede renseløsning. Jo flere rensfaciliteter der installeres, og jo større de er – des mindre overløbsvand vil blive aflastet ubehandlet til søen. Den optimale balance mellem rensning og varsling afhænger af omkostninger på alternative løsninger – fx etablering af bassiner eller forøgelse af den hydrauliske kapacitet i afløbssystemet. Varslingssystemet kan til enhver tid tilpasses ændringer i denne strategi ved justering af afløbsmodellen.

7. Udvikling af renseløsninger koblet til overløb

Denne del af projektet fokuserede på at udvikle optimale løsninger til rensning af overløbsvand fra fælleskloakerede områder til recipienten - i dette tilfælde Skanderborg Sø. Som udgangspunkt var der i projektet lagt op til, at der skulle udvælges to relevante overløbsbygværker ved Skanderborg Sø: Det ene overløb skulle repræsentere et kritisk og bynært sted med meget lidt plads - men med ønske om udvidede bademuligheder, mens det andet overløb skulle være placeret, hvor der var mulighed for at etablere en naturnær og mere pladskrævende renseløsning, og hvor der ikke nødvendigvis var adgang til strøm. Ved at vælge to meget forskelligartede overløb, som stiller meget forskellige krav til en renseløsning, var det ønsket at præsentere Skanderborg Forsyning for løsninger til overvågning, varsling og rensning, der ift. overløbene placering kunne dække forsyningens varierende behov og samtidig være økonomisk rentable.

I forbindelse med valget af både testsite og relevante renseløsninger blev der imidlertid gjort en række overvejelser, som resulterede i løsninger, der afveg en smule fra ovenstående. Dette er nærmere beskrevet i nærværende kapitel.

7.1 Valg af testsite

På baggrund af en gennemgang af logningsdata og besigtigelse af de mest relevante testsites (overløb) blev det besluttet at opsætte begge renseløsninger på Sølystvej 14P (udløbsnr. U6.51/overløbsbygværk OV7 ifølge Skanderborg Forsynings egen oversigt), hvor Skanderborg Forsyning ejer den 530 m² store grund (se FIGUR 17). Etablering af begge løsninger på samme overløb muliggjorde tests på det samme overløbsvand, således at der var mulighed for sammenligning af rensegrader. Ligeledes blev løsningerne etableret, så der var mulighed for at justere flow og vandmængder og udføre forsøg med begge løsninger på samme forsøgsgdage.

Der var flere årsager til, at netop dette site blev udvalgt, herunder a) beliggenheden ud til Skanderborg Sø og formidlingsværdien i dette, b) at Skanderborg Forsyning ejer grunden, hvilket gjorde sagsbehandlingen lettere ift. at opnå tilladelse til at opstille renseløsningerne, c) at overløbsvandet kunne "fremstilles" og behandles løbende ved at blande spildevand med søvand og efterfølgende tilbageføres direkte til udligningsbassinet ved overløbsbygværket. På denne måde var det muligt at simulere et overløb uden at udlede spildevand direkte til Skanderborg Sø, og forsøgsopsætningerne var uafhængige af vejrforholdene, d) muligheden for at kontrollere den hydrauliske belastning af renseløsningerne (i stedet for at anlæggene skulle håndtere det totale overløb) gav teknologipartnerne i projektet bedre vilkår ift. dimensioneringen af anlæggene og muligheden for at teste renseteknologierne ved varierende hydraulisk belastning e) ved at opstille begge renseløsninger ved det samme overløb var der bedre mulighed for at sammenligne de to anlægstyper og ikke mindst optimere ressourceforbruget ifm. prøvetagning, tilsyn med anlæggene etc.

Med valget af test site blev der i projektet udelukkende fokuseret på Skanderborg Sø, mens Knudsø og Svane Sø ikke indgik som en del af projektet.



FIGUR 17. Testsite ved udløbsnr. U6.51/overløbsbygværk OV7 placeret ved Sølystvej 14P i Skanderborg.

7.2 Valg af renseløsninger

I forbindelse med valg af renseløsninger blev der i projektet lagt vægt på, at de anvendte teknologier var relativt simple og hurtige at etablere, rentable og effektive. Mange af de teknologier, som i dag benyttes til at håndtere og rense spildevand, er blevet bedømt i forhold til deres relevans og anvendelighed i dette projekt. Dette arbejde er samlet i en teknologioversigt og -evaluering i **Føjl! Henvisningskilde ikke fundet..**

I forhold til at skabe naturnære renseløsninger til håndtering af overløbsvand benyttes våde regnvandsbassiner og kunstige vådområder i stor udstrækning til håndtering af regnvandet. Et beplantet filter kombinerer mange af de gode egenskaber, som også kan opnås ved førnævnte løsninger; herunder sedimentation og adsorption af partikulære stoffer samt biologisk stofomsætning. Men et beplantet filter er langt mindre pladskrævende, mere velegnet til rensning af overløbsvand og renser ydermere mere effektivt sammenlignet med de traditionelle rekreative renseløsninger. Teknologien tillader desuden en meget fleksibel anlægskonfiguration, som kan tilpasses det konkrete behov både ift. kapacitet, ønsket rensegrad, plads til rådighed og mulighed for tilslutning af strøm. Ydermere, er de beplantede filtre relativt billige at anlægge og drifte,

kræver minimalt vedligehold, falder godt ind i landskabet, er uden lugtgener og er alt i alt et godt alternativ til andre rekreative renseløsninger.

Ved de overløb, der er lokaliseret i bynære områder med begrænset plads, stilles der selvsagt helt andre krav til de teknologier, der skal håndtere og rense overløbsvandet. Med henblik på at klarlægge, hvor lidt der skal til for at opnå en tilfredsstillende rensning ift. at opretholde god badevandskvalitet i Skanderborg Sø, blev der i projektet arbejdet med en relativt simpel løsning, som kombinerede mekanisk rensning og kemisk desinfektion. Den mekaniske rensning har til formål at opnå en fysisk tilbageholdelse af større partikler og andre urenheder, mens tilsætningen af et kemikalie med en stærk oxiderende virkning vil ødelægge komponenter i mikroorganismernes cellevæg og dermed inaktivere dem. Sammenlignet med brug af UV og ultrafiltrering er effekten og vedligeholdelsesgraden af en kemisk desinfektionsenhed langt mindre påvirket af vandets indhold af suspenderet stof. Omvendt kan doseringen af desinfektionskemikalier i nogle tilfælde føre til dannelsen af uønskede kemiske forbindelser, samtidig med at der ofte er skrappe krav til håndtering og udledning. Ud fra disse betragtninger og en række andre hensyn, blev det i projektet besluttet at benytte pereddikesyre til desinfektion af det mekanisk rensede overløbsvand.

De udvalgte renseteknologier, der indgik i projektet er nærmere beskrevet i de følgende afsnit.

7.2.1 Naturnær renseløsning

Med henblik på at demonstrere en naturnær renseløsning, der kan imødekomme en periodevis meget høj hydraulisk belastning, blev der ved overløbet på Sølystvej etableret et beplantet filteranlæg med aktiv beluftning.

Det beplantede filter blev dimensioneret til en rensekapacitet på op til 30 PE (baseret på O-krav), svarende til en hydraulisk belastning på 4,5 m³/dag. I det anlægget skulle rense overløbsvand, som forventes at være væsentligt fortyndet ift. spildevand, var det målet at den hydrauliske belastning som minimum kunne øges med en faktor 3, dvs. minimum 13,5 m³/dag, uden at det kompromitterede rensesgraden.

Overordnet set bestod det beplantede filter af følgende delelementer: Filtermateriale, planter, beluftningssystem, vandfordelingssystem og doseringssystem til kemisk fosforfjernelse. Skitsetegning over anlægget fremgår af FIGUR 18, mens det færdige anlæg er præsenteret i FIGUR 19. Generel info om denne type anlæg findes desuden i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..**



FIGUR 18. Skitsetegning over det beplantede filter på det udvalgte testsite. Kilian Water.

FIGUR 19. Det beplantede filter etableret ved Skanderborg Sø. Kilian Water.

Anlægget blev tilført overløbsvand via en pumpe placeret i overløbsbygværket. Herefter blev vandet fordelt via en manifold gennem fordelerrør placeret i filterets øverste del. I bunden af anlægget var anlagt en vandtæt membran, som sikrede, at anlægget var permanent vandfyldt. Selve filtermaterialet bestod af 15 m³ ærtesten.

Filteret blev på toppen beplantet med tre forskellige planter: gul iris til at optage næringsstoffer; sideskærm - også kendt som smalbladet mærke – til specifik optagelse af fosfor og tagrør, som har hule plantestængler, der hjælper med at tilføre ilt ned i anlægget.

Den mikrobiologiske omsætning i det beplantede filter blev varetaget af en lang række forskellige mikroorganismer, som vokser på både filtermaterialet og planternes rødder. Disse mikroorganismer sørgede sammen med planterne for at omsætte og optage en del af stofferne i overløbsvandet.

For at sikre bedst mulig ilttilførsel til planterødder og mikroorganismer, var der i bunden af anlægget monteret et system af beluftningsslanger, som blev tilsluttet en kompressor for regulering af ilttilførslen efter behov. Den nødvendige iltmængde skulle således reguleres på baggrund af den hydrauliske belastning og forureningsgraden af det tilførte overløbsvand. Ved at regulere ilttilførslen på denne måde var det muligt at opnå en lang højere kapacitet i forhold til et traditionelt beplantet filteranlæg.

For at opnå en tilfredsstillende fjernelse af fosfor og samtidig minimere doseringen af fældningsmiddel (PAX15 - aluminiumklorid), blev der i projektet afprøvet et nyt tiltag, hvor en fosforfældningsbrønd blev anvendt som poleringstrin. I de traditionelle filteranlæg tilsættes fældningskemikalierne i første rensningstrin - typisk i en bundfældningstank - hvorfor den nye anlægskonfiguration forventedes at reducere forbruget af fældningskemikalie væsentligt.

7.2.2 Kompakt renseløsning

Den kompakte løsning, som var tiltænkt en placering ved et overløbsbygværk, hvor der er begrænset plads til rådighed, bestod i projektet af en kombination af en Stjernholm RO rist (0,4-6,0 mm afprøvet), et båndfilter (40 µm filterdug) og et desinfektionstrin (dosering af pereddikesyre). Anlægget er yderligere beskrevet i FIGUR 20 og FIGUR 21.

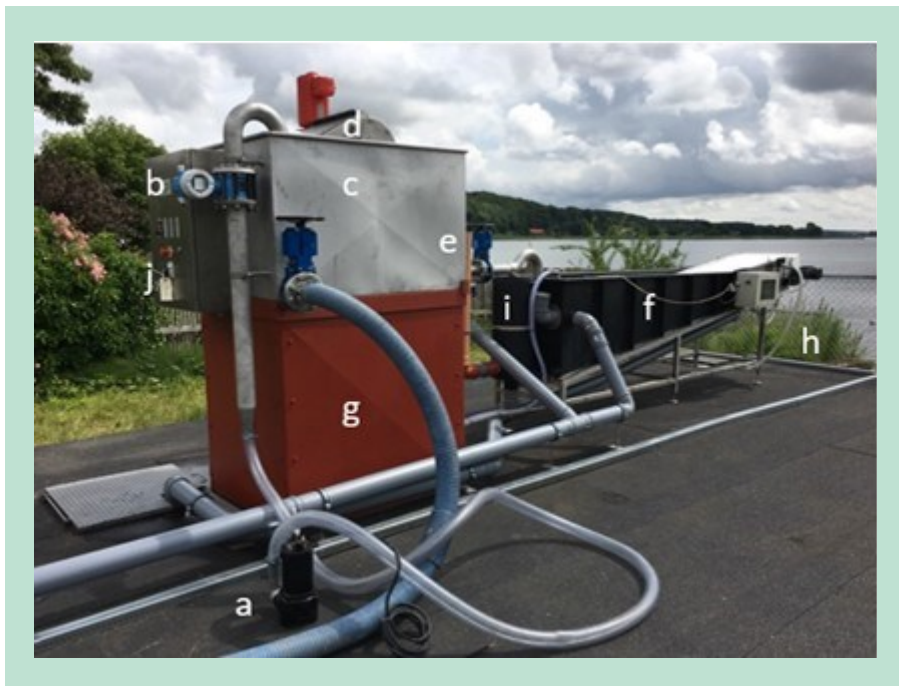
Overløbsvandet blev pumpet fra overløbsbygværket op til risten, hvor en perforeret plade tilbageholdt ristegodset. Efter risten blev vandet ledt videre til båndfilteret, hvor det gennemgik en finere filtrering og mere partikulært materiale blev tilbageholdt. Renholdelsen af de to mekaniske renses trin var niveaustyret, således at der blev opbygget et tyndt lag filtermateriale for at forbedre filtreringseffekten yderligere. Risten blev renses automatisk med en rensesnegl med børster, mens et kombineret skrabe- og spulesystem rengjorde filterdugen.

For at sikre at anlægget var gearet til at kunne håndtere en relativt høj hydraulisk belastning blev det indledningsvis undersøgt, hvilke rensesgrader der kunne opnås gennem risten alene og i kombination med båndfilteret.

Testen af de forskellige ristestørrelser (0,4-6,0 mm) blev således foretaget ved et flow på 12,5 m³/h, og anlægget blev vurderet baseret på stabil drift samt den bedste rensesgrad ift. suspenderet stof, (SS) organisk stof (COD) og bakterier (*E.coli* og Enterokokker). Testen viste, at det var muligt at opnå stabil drift samt den bedste tilbageholdelse ved den mindste ristestørrelse. Det blev derfor besluttet at arbejde videre med en 0,4 mm rist i det endelige test set-up.

Til sammenligning med de ristestørrelser der typisk anvendes i forbindelse med overløbsbygværker (4-15 mm) kan der med en 0,4 mm rist opnås en væsentlig bedre tilbageholdelse af ristegods og dermed mere effektiv rensning af overløbsvandet selv ved relative høje hydrauliske belastninger.

Testen viste desuden at båndfilteret med en 40µm filterdug kun havde en lille eller slet ingen yderligere renseseffekt, hvorfor det blev valgt at fjerne dette rensetrin og i stedet lede vandet direkte videre til desinfektionstanken.



FIGUR 20. Opbygning af kompakt renseløsning: a) Pumpe til indløbsvand, b) Flowmåler til registrering af flow, c) Stjernholm kar til Stjernholm RO rist, d) Stjernholm RO rist med perforeret plade, e) Flowmåler til registrering af flow, f) Båndfilter, g) Doseringssystem til desinfektionsmiddel (gemt væk inde i teknikskabet), h) Container for slam fra båndfilter, i) Spulesystem til renholdelse af filterdug, j) Styreskab.



FIGUR 21. Den endelige kompakte renseløsning, bestående af 0,4mm Stjernholm RO rist efterfulgt af PAA desinfektionstank.

8. Afprøvning og vurdering af renseløsningerne

8.1 Vurdering af renseløsningerne baseret på badevandskvalitetskrav

I forhold til at dokumenterer effekten af de to renseløsninger er der blevet gennemført en række målekampagner, hvor effekten af de to renseløsninger er blevet udfordret under forskellige driftsbetingelser. Der er i målekampagnerne udtaget prøver til både kemiske og mikrobiologiske analyser, som er analyseret hos hhv. Teknologisk Institut og Amphi-Bac.

De kemiske parametre, som der blev analyseret for var hhv. suspenderet stof (SS), organisk stof (COD), total fosfor (TP), total kvælstof (TN), ammonium (NH₄) og hvor relevant også nitrit (NO₂) og nitrat (NO₃). I selve vurderingen af renseløsningerne blev udvalgte nøgleparametre sammenholdt med udledningskrav gældende for traditionelle rensningsanlæg (jf. Spildevandsbekendtgørelsen BEK nr. 1469 af 12/12/2017): COD<75mg/L, NH₃+NH₄-N: <5 mg/l og TP<1,5mg/L (SOP-krav), TABEL 2.

TABEL 2. Rensekrav baseret på rensklasser beskrevet i Spildevandsbekendtgørelsen BEK nr. 1469 af 12/12/2017.

Renseklasse	COD (mg/l)	NH ₃ +NH ₄ -N (mg/l)	TP (mg/l)
SOP	75	5	1,5
SO	75	5	-
OP	125	-	1,5
O	125	-	-

O: Reduktion af organisk stof

SO: Skærpet krav til reduktion af organisk stof samt nitrifikation

P: Reduktion af fosfor

COD: Organisk stof (alternativ til B15)

I forhold til de mikrobiologiske parametre blev der i nærværende projekt sigtet efter at opnå en vandkvalitet for rensset overløbsvand udledt fra renseløsningerne på <10⁴ *E.coli*/100ml, hvilket svarer til en faktor 10 større end kravspecifikationen for "god kvalitet". Det vurderes, at dette udledningskrav i langt de fleste tilfælde vil være tilstrækkeligt, idet overløbsvandet i forbindelse med udledningen til søen fortyndes i en sådan grad, at udledningen samlet set ikke vil påvirke badevandskvaliteten.

E.coli og enterokokker blev kvantificeret af Amphi-Bac samme dag, som prøverne blev udtaget, mens delprøverne til de kemiske analyser blev sat på køl eller nedfrosset, afhængigt af hvornår analyserne kunne foretages på Teknologisk Institut. Enterokokker blev kun målt i enkelte udvalgte prøver, da resultaterne forventes at ligne reduceringsgradene for *E.coli*.

8.2 Det beplantede filter

Det beplantede filter er blevet testet løbende hen over badevandssæsonen 2017 ved varierende hydraulisk belastning. For at simulere overløbshændelser blev der mellem hver ny flowtest indlagt "hvileperioder" af op til flere ugers varighed, hvor der kun i meget begrænset omfang eller slet ikke er blevet tilført overløbsvand til anlægget. Dermed har tilførslen af nye næringsstoffer til planterødder og mikroorganismer også være meget begrænset i disse hvileperioder. Det beplantede filter var dog under hele testperioden inkl. hvileperioder vandfyldt og blev tilført ilt (seks timers beluftning efterfulgt af seks timer uden beluftning).

Generelt for de gennemførte målekampanjer gjaldt det, at ind- og udløbsprøver blev udtaget samme dag, og at der derfor ikke er taget højde for opholdstiden i anlægget. Ind- og udløbsprøverne var i flere tilfælde derfor ikke direkte sammenlignelige, men de gav alligevel en god indikation om vandkvaliteten af ind- og udløbsvand. Dog er der i flere af målekampanjerne udtaget prøver løbende henover flere timer, for netop at kunne følge vandets vej gennem det beplantede filter.

Indledningsvis blev anlægget testet ved lavt flow ($6 \text{ m}^3/\text{døgn}$), lang opholdstid (24 t) og kontinuerlig drift i flere uger for herved at sikre, at anlægget performede efter hensigten, herunder at den mikrobielle aktivitet i anlægget var tilstrækkelig og stabil. Ift. de mikrobielle parametre blev der under disse driftsbetingelser opnået reduktionsgrader for *E. coli* og Enterokokker på hhv. 99,99 % og 99,09 %. Ydermere blev der observeret en fuldstændig omsætning af ammonium, hvilket antydede en god mikrobiel aktivitet i rodzonen.

I de efterfølgende tests blev flowet sat op til hhv. 9 og $12 \text{ m}^3/\text{døgn}$. Ved både $9 \text{ m}^3/\text{døgn}$ og $12 \text{ m}^3/\text{døgn}$, hhv. 16 og 12 timers hydraulisk opholdstid, performede anlægget efter hensigten: COD blev reduceret med 69-90 %, mens >99 % af ammonium blev omsat og *E. coli* blev reduceret med >99 % til en udløbskvalitet på $1,2 \cdot 10^3$ - $1,0 \cdot 10^4$ *E. coli* /100 ml. Baseret på disse tre parametre blev udledningskravene således overholdt.

For at teste det beplantede filter ved et mere moderat flow ift. anlægskonfigurationen blev der gennemført en målekampagne ved $24 \text{ m}^3/\text{døgn}$, svarende til en hydraulisk opholdstid på ca. 6 timer. Ved testens start blev der udtaget en indløbsprøve, hvorefter der for hver time blev udtaget udløbsprøver over en periode på 3 timer (svarende til en halv hydraulisk opholdstid). Antallet af *E. coli* blev i den første time reduceret med 98,18 %, men rensegraden efterfølgende faldt til hhv. 96,72 % og 96,87 %. *E. coli* blev således reduceret til $3,0$ - $5,7 \cdot 10^4$ *E. coli* /100 ml, hvilket kun lige akkurat overstiger det opsatte krav på $1,0 \cdot 10^4$ *E. coli* /100 ml. COD blev reduceret med 92-93 %, mens 98 % af ammonium blev omsat. Baseret på disse resultater vurderes det, at et beplantet filter med den pågældende anlægskonfiguration ift. de opstillede rensekra- v besidder en maks. kapacitet, som tilsyneladende ligger et sted mellem 12 og $24 \text{ m}^3/\text{døgn}$.

Generelt blev der kun observeret relativt lave niveauer af total fosfor i indløbsvandet, og der forekom kun en lille reduktion igennem selve anlægget. Doseringen af PAX synes derfor kun at have haft en meget begrænset effekt, hvorfor det blev besluttet at undlade dosering af PAX ved de sidste to tests (flow på hhv. 24 og $240 \text{ m}^3/\text{døgn}$). I enkelte tilfælde blev der målt en højere koncentration af total fosfor i udløbsprøverne i forhold til indløb. Det formodes dog, at denne forskel dels kunne tilskrives usikkerhed på målingerne og dels fortynding af indløbsvandet op til prøvetagningen i forbindelse med en kraftig regnhændelse.

Med henblik på at simulere et meget kraftigt overløb og presse den pågældende anlægskonfiguration til det yderste, blev den hydrauliske belastning ved en enkelt test sat op til $240 \text{ m}^3/\text{døgn}$. Ud over at presse anlæggets fysiske rammer medførte den høje hydrauliske belastning at opholdstiden i anlægget (ca. 36 min) - og dermed også den mikrobiologiske omsætning - blev reduceret betragteligt. Ved testen blev der for hver time udtaget ind- og udløbsprø-

ver over en periode på 3 timer (svarende til fem gange den hydrauliske opholdstid). Ved sammenligning af COD-niveauerne i indløbsprøverne blev det vurderet, at variationen mellem prøverne var minimal, hvorfor der blev udtaget delprøver til en samlet blandingsprøve, som indløbsreference. Analyse af udløbsprøverne viste en tydelig og stabil reduktion af både COD (51-56 %) og total fosfor (28-39 %) henover måleperioden, hvilket indikererede, at partikulært organisk stof og bundet fosfor blev tilbageholdt af filtermaterialet. Samtidig sås der kun en reduktion af ammonium (47 %) i den første time af måleperioden, mens der i prøverne udtaget efter hhv. to og tre timer ikke sås nogen forskel fra indløbsprøven. Den store variation i ammoniumkoncentrationerne skyldes formentlig, at den første prøve, som blev udtaget efter bare en time med højt flow, for en stor del repræsenterede det "gamle" vand, som har stået i anlægget og dermed har haft en længere opholdstid. Desuden kan de uforandrede værdier for ammonium i de efterfølgende udløbsprøver nok tilskrives den korte hydrauliske opholdstid i anlægget, som vanskeliggør en mikrobiologisk omsætning. Der sås generelt ikke nogen reduktion af *E.coli* i denne målekampagne, hvorfor anlægget ved denne hydrauliske belastning ikke kunne opfylde kravene til badevandkvalitet. I

FIGUR 22 er udledningstværdier- og krav sammenlignet ved de forskellige flow. Det samlede overblik over analysedata findes i **Fejl! Henvissningskilde ikke fundet.**

Flow (m3/d)	Flow (l/s)	COD: <75 mg/l	TN (mg/L)	NO3-N (mg/L)	NH3+NH4-N: <5 mg/l	TP: <1,5 mg/l	E.coli: <10.000 cfu/100 ml)
9	0,1	11,4	6,94	7,08	BDL	1,36	4,4E+03
9	0,1	16,4	10,8	11,5	BDL	1,67	1,7E+03
9	0,1	16,8	12,6	12,3	0,018	2,19	1,0E+04
12	0,14	11,5	6,62	NA	0,472	1,38	1,2E+03
24	0,28	15,6	20	NA	0,455	2,44	3,0E+04
24	0,28	15	21,3	NA	0,345	2,43	5,5E+04
24	0,28	14,5	21,5	NA	0,265	2,38	5,7E+04
240	2,78	103	NA	NA	6,62	2,04	2,0E+06
240	2,78	108	NA	NA	11,4	2,2	>10000
240	2,78	96,8	NA	NA	12	2,4	>10000

Flow (m3/d)	Flow (l/s)	COD: <75 mg/l	TN (mg/L)	NO3-N (mg/L)	NH3+NH4-N: <5 mg/l	TP: <1,5 mg/l	E.coli: <10.000 cfu/100 ml)
9	0,1	11,4	6,94	7,08	BDL	1,36	4,4E+03
9	0,1	16,4	10,8	11,5	BDL	1,67	1,7E+03
9	0,1	16,8	12,6	12,3	0,018	2,19	1,0E+04
12	0,14	11,5	6,62	NA	0,472	1,38	1,2E+03
24	0,28	15,6	20	NA	0,455	2,44	3,0E+04
24	0,28	15	21,3	NA	0,345	2,43	5,5E+04
24	0,28	14,5	21,5	NA	0,265	2,38	5,7E+04
240	2,78	103	NA	NA	6,62	2,04	2,0E+06
240	2,78	108	NA	NA	11,4	2,2	>10000
240	2,78	96,8	NA	NA	12	2,4	>10000

FIGUR 22.

Sammenligning af udledningstværdier- og krav (SOP-krav samt krav til badevandskvalitet) ved de testede flow. Farvekoden grøn, gul og rød indikerer, at rensekravet er hhv. overholdt, tæt på kravværdien og overholder ikke rensekravet.

Som det fremgår af

FIGUR 22, kan et beplantet filter med den pågældende anlægskonfiguration udmærket håndtere og rense overløb på 0,1-0,28 l/s, svarende til 9-24 m³/d, mens ekstreme regnhændelser, som fører til langt højere flow (her testet ved 2,78 l/s) udfordrer anlægget. Dog ses der selv

Flow (m ³ /d)	Flow (l/s)	COD: <75 mg/l	TN (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₃ +NH ₄ -N: <5 mg/l	TP: <1,5 mg/l	E. coli: <10.000 cfu/100 ml)
9	0,1	11,4	6,94	7,08	BDL	1,36	4,4E+03
9	0,1	16,4	10,8	11,5	BDL	1,67	1,7E+03
9	0,1	16,8	12,6	12,3	0,018	2,19	1,0E+04
12	0,14	11,5	6,62	NA	0,472	1,38	1,2E+03
24	0,28	15,6	20	NA	0,455	2,44	3,0E+04
24	0,28	15	21,3	NA	0,345	2,43	5,5E+04
24	0,28	14,5	21,5	NA	0,265	2,38	5,7E+04
240	2,78	103	NA	NA	6,62	2,04	2,0E+06
240	2,78	108	NA	NA	11,4	2,2	>10000
240	2,78	96,8	NA	NA	12	2,4	>10000

ved 2,78 l/s en fin reduktion af COD, som kommer meget tæt på at kunne overholde det skærpede udledningskrav (SO-krav) på de 75 mg COD/l. Hvis effekten af anlægget i stedet holdes op i mod O-kravet på 125 mg COD/l, overholdes kravet om reduktion af organisk stof i samtlige tests. I Skanderborg Kommune gør OP-kravene sig gældende (se TABEL 2).

8.2.1 Anlægsomkostninger og dimensionering

Det beplantede filteranlæg, som blev anlagt og testet i projektet, kostede ca. 80.000 kr. at anlægge (beløbet dækker både materialer og løn, prisen er eksklusiv moms). Udgiften til selve driften af anlægget afhænger i overvejende grad af det nødvendige elforbrug til beluftningssystem samt pumper, og det vil således afhænge af, hvordan anlægget belastes.

For at kunne håndtere en højere hydraulisk belastning og samtidig opfylde de opstillede renskrav kan anlægget udvides til en 'skotsk' model. Det betyder, at anlægget vil blive i alt en halv meter dybere og højere, således at anlægget kan klare en meter vand over sig. Pumpen kan dermed pumpe den tredobbelte vandmængde ind i anlægget, samtidigt med at anlæggets afløb formindskes, så den hydrauliske opholdstid i anlægget er minimum et døgn. På den måde kan anlæggets kapacitet forøges med en faktor 3, mens renskravet stadig forventes at kunne opfyldes. Merudgifter vil være minimale (ca. DKK 10.000) i forhold til den øgede kapacitet. Etableringsudgifter og driftsomkostningerne for den samme størrelse anlæg på 15 m² med en ekstra meter bufferkapacitet i højden er ca. 1/3 mere end det oprindelige anlæg.

8.3 Den kompakte løsning

De gennemførte tests af den kompakte renseløsning har været intensiveret på udvalgte dage. Indledningsvis blev der som beskrevet tidligere i rapporten udført en række tests med henblik på at optimere den mekaniske renseseffekt og samtidig demonstrere, at anlægget kunne gøres mere kompakt.

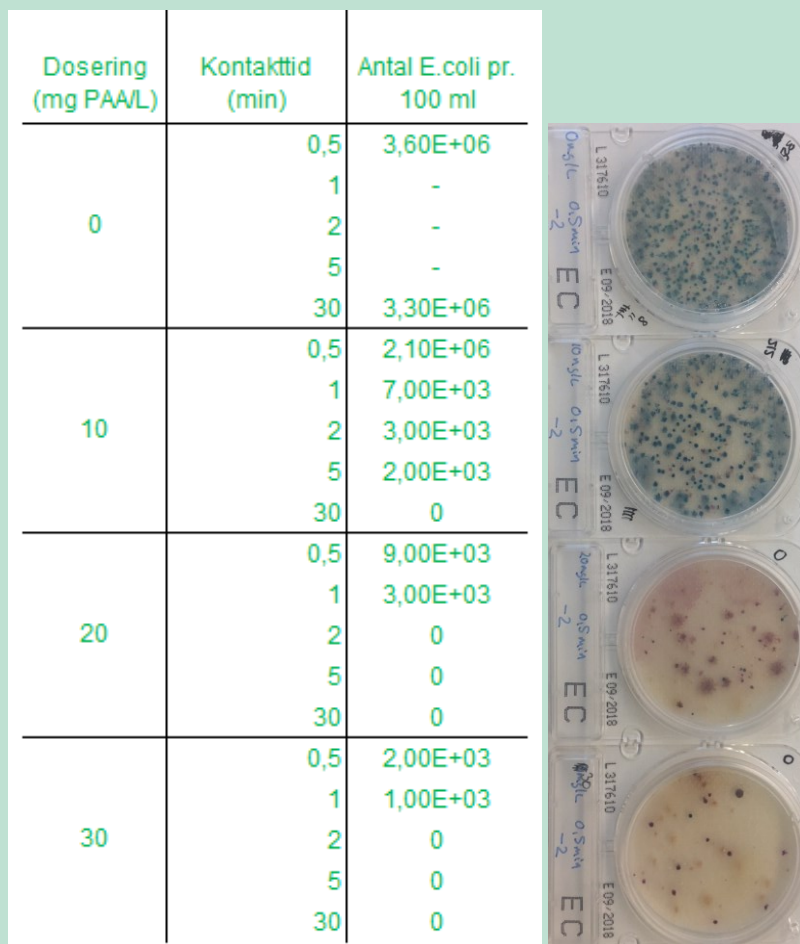
Der blev testet riste med perforeringshuller i diameter fra 6 til 0,4 mm, hvorved det kunne konkluderes, at der med denne konstruktion af Stjernholm overløbsrist type RO kan opnås stabil drift også med en 0,4 mm. Anlægget kan dermed dimensioneres efter ønske om renskrav og hydraulisk flow, i forhold til perforeringens størrelse.

I forhold til desinfektionstrinnet var det vigtigt, at der blev doseret så lidt som muligt uden at gå på kompromis med vandkvaliteten. Forud for pilottesten med dosering af pereddikesyre blev der således gennemført en række laboratorieforsøg med henblik på at finde frem til et passende doseringsområde og en tilstrækkelig kontakttid for at opnå den ønskede effekt. I forsøgene blev der anvendt filtreret overløbsvand fra selve pilotopstillingen og samme kemikalie, som senere blev anvendt ved test i pilotskala.

Resultaterne af forsøgene, som fremgår af FIGUR 26, viste, at en dosering på 10-20 mg/L og en kontakttid på 0,5-1 min var tilstrækkeligt til at opnå den ønskede vandkvalitet (<10.000 *E.coli* /100 ml ufortyndet rensede overløbsvand). Virkningen antages at være nogenlunde tilsvarende på Enterokokker.

For at kunne undersøge effekten af pereddikesyre ved forskellige kontakttider blev produktets desinficerende virkning stoppet ved tilsætning af en neutraliseringsvæske inden det testede overløbsvand blev overført til et vækstmedie. Det blev således også verificeret ved laboratorieforsøg, at den anvendte neutraliseringsvæske havde den ønskede effekt og samtidig ikke virkede hæmmende på væksten af *E.coli*.

Ved test af den samlede renseløsning i pilotskala blev der doseret pereddikesyre til overløbsvandet, efter at det havde passeret risten. Testene viste, at ved et flow på ca. 12,5 m³/t var en dosering på 14 mg PAA/l (svarende til en dosering på 1000 ml produkt/t) og en kontakttid på 2,5 min tilstrækkeligt til at opnå en næsten fuldstændig fjernelse af *E.coli* (>99,99 %-reduktion). Samtidig kunne der ikke påvises rester af pereddikesyre i udløbsvandet fra anlægget. I forbindelse med gennemførelsen af denne test opstod der imidlertid en række uforudsete udfordringer, som bevirkede, at mængden og spændet af data blev mindre end forventet. Blandt andet var det ikke muligt at undersøge, hvorvidt en kortere opholdstid ville have haft en tilsvarende effekt, hvilket ellers var at forvente.



FIGUR 26. Resultaterne for doseringsforsøg med pereddikesyre.

8.3.1 Anlægsomkostninger og dimensionering

Den kompakte renseløsning kan opstilles og placeres i eksisterende og nye overløbsbygværker, hvor filtreringen kan foretages i forhold til miljøkrav. Det er vigtigt, at dimensioneringen af renseløsningen styres og driftes korrekt i forhold til hydraulisk belastning og renskrav. Diameteren på RO-risten kan variere fra 300 til 750 mm og længden kan variere fra 300 til 4000 mm. Dette medfører, at flowet kan variere fra 10 til 400 l/s pr. m rist. **I Fejl! Henvissningskilde ikke fundet.** ses et eksempel på, hvordan Stjernholms RO-riste dimensioneres ift. den hydrauliske belastning, renskrav og overløbskantens bredde ved de forskellige ristestørrelser. Dimensioneringsprogrammet er udviklet af Stjernholm A/S.

Prisen på risten varierer fra ca. kr. 82.000 for en 1,0 m rist til ca. kr. 115.000 for en 4,0 m rist i ø 300, hvorimod den største rist i ø 750 varierer fra kr. 115.000 for en 1,0 m rist til ca. kr. 170.000 for en 4,0 m rist.

Hvis der, som i dette projekt, er krav til badevandskvalitet, kan risten kombineres med en desinfektionsløsning. Dosering af pereddikesyre (15 mg/l) efter filtreringen har således vist en tilstrækkelig reduktion af *E.coli* til, at badevandskvaliteten kan overholdes.

9. Perspektivering

I Skanderborg er der samlet set 85 overløb fra de fælleskloakerede områder, hvoraf en del har udløb til vandløb. Ved de enkelte overløb er der typisk installeret en rist med spalteåbninger på 1-4 cm, og det er oplagt, at et bedre filter som det kompakte mekaniske filter testet i projektet vil kunne forhindre større partikler i at ende i recipienten. For at reducere næringsalte kræver det en renseløsning som det beplantede filter. En kombination af begge løsninger kan muligvis give et godt bud på rensning af overløbsvand.

I projektet er der alene fokuseret på Skanderborg sø med hovedvægt på badestranden ved Skanderborg Kulturhus, hvor Skanderborg kommunes nye søbad og vandaktivitetscenter, Søtorvet, etableres. Modellen og varslingen er derfor justeret ind til at give alarmer ved risiko for dårlig badevandskvalitet ved denne strand, hvor også varslingstavlen er placeret. Der er imidlertid flere badestrande ved Skanderborg Sø, og modellen kunne med fordel udvides til også at give alarmer ved de øvrige badestrande ved Skanderborg Sø.

I Knud Sø ved Ry og Stilling-Solbjerg Sø ved Stilling er der fem officielle badestrande, og det er oplagt at indføre logning på overløbsbygværkerne og lave en strømningsmodel og eventuel varsling og rensning ved disse badestrande.

Ud over de officielle badestrande er der givetvis også diffus badning i søerne, og det vil være oplagt at markere de punkter/steder i søerne, hvor der er en udledning fra fælleskloakken og eventuelt indføre sikkerhedszoner, hvor badning frarådes.

Det er ikke nødvendigt at indføre det fulde system ved hver sø - enkelte steder vil det sandsynligvis være tilstrækkeligt at undersøge søen ved logning af overløb og modellering af strømningsvejene.

På landsplan er der ved seneste optælling registreret 4989 punktkilder ("Punktkilder 2015", Miljø og Fødevarerministeriet, Styrelsen for Vand-og Naturforvaltning, januar 2017) med udledning fra fælleskloakken. Med ca. 120.000 søer og vandhuller er det oplagt at undersøge, hvilke overløbsbygværker der har udledning til søer med badestrande. En overvågning af overløbene kan bruges til at vurdere, om det vil give værdi at lave en model for søen og indføre varsling og eventuel rensning. Det er ligeledes oplagt at se på overløbsbygværker, der leder til andre ferskvandsrecipienter – vandløb – hvor enten et simpelt filter eller en rensning, der fjerner næringsalte, vil være hensigtsmæssig.

Projektet har nydt stor interesse fra Skanderborg Kommune, der som en del af følgegruppen har fulgt projektet. Kommunen har særligt fokus på vandkvaliteten og på håndtering af borgerne i forbindelse med forringet badevandskvalitet og vil være aftager af varslingstavlen i fremtiden. Det er utrolig vigtigt for alle kommuner med badestrande at kunne sikre borgernes og turisternes sikkerhed og ligeledes signalere, at der gøres noget aktivt for at sikre badevandskvaliteten. En udfordring, der ikke har været omfattet af nærværende projekt, er opblomstringen af blågrønalg i søen, hvilket ville være meget interessant at undersøge nærmere. Hvis en varsling også kunne omfatte denne trussel, ville det være optimalt.

Bilag 1. Teknologioversigt – Rensning og desinfektion af overløbsvand

Tabel indeholdende beskrivelse og vurdering af:

- Primære renseteknologier – Naturnære løsninger
- Primære renseteknologier – Kompakte og delvis kemiske løsninger
- Desinfektionstrin – Ikke-kemiske og kemiske løsninger

Primær renseteknologi – Naturnære løsninger				
<i>Teknologi</i>	<i>Virkemåde</i>	<i>Fordele</i>	<i>Ulemper</i>	<i>Anvendelighed ift. projektet</i>
Våde regnvandsbassiner med eller uden beplantning	Sedimentation af partikulære stoffer, ved beplantning opnås tilmed adsorption og delvis stofomsætning	Nemme at etablere, minimalt vedligehold, rekreative	Lav rensegrad ift. andre løsninger	Ingen nyhedsværdi, begrænset effekt ift. projektformål
Kunstige vådområder	Sedimentation, adsorption og stofomsætning	Billige at anlægge, rekreative, ok rensegrad	Pladskrævende	Ingen nyhedsværdi, for pladskrævende
Beplantede filtre	Sandfilter/biologisk rensning	Billige at anlægge og drifte, minimalt vedligehold, rekreative og uden lugtgener, god rensegrad		Betydeligt potentiale
Sorption i kombination med våde regnvandsbassiner	Filtrering gennem fastmediefilter med sorptionsmateriale (aktivt kul, bark, spåner, tørv m.m.)	Binder fosfor, tungmetaller og org. mikroforureninger	Kræver reduceret SS-indhold, sårbar over for tilstopning, løbende vedligehold	Begrænset erfaring, men betydeligt potentiale, dog satses der i projektet ikke på magasinering

Primær renseteknologi – Kompakte og delvis kemiske løsninger				
<i>Teknologi</i>	<i>Virkemåde</i>	<i>Fordele</i>	<i>Ulemper</i>	<i>Anvendelighed ift. projektet</i>
Installering af udstyr til forfiltrering/ forbedret sedimentation	Forbedret bundfældning (SS-fjernelse) vha. lameller, hvirvelseparatorer, vandforleingsindsats, tromlerist	Minimalt vedligehold	Løbende slamhåndtering, kan give anledning til lugtgener, kræver de rette forhold for installering.	Installering af rist som forbehandling en mulighed

Primær renseteknologi – Kompakte og delvis kemiske løsninger				
<i>Teknologi</i>	<i>Virkemåde</i>	<i>Fordele</i>	<i>Ulemper</i>	<i>Anvendelighed ift. projektet</i>
Kemisk bundfældning	Tilsætning af fældningskemikalier (metalsalte, polymerer), forbedrer slamflokkenes egenskaber ift. sedimentation	Fjerner kolloid COD og P	Pladskrævende, løbende slamhåndtering, udstyrskrævende, risiko for utilsigtet udledning af kemikalier	Ikke en speciel grøn løsning, dårlig signalværdi ift. projektformålet.
Forceret sedimentation	Tilsætning af kemi og mikrosand forbedrer bundfældningsegenskaberne (SS-fjernelse)	Fjerner kolloid COD og P, antages at være mere effektiv over for tungmetaller og org. mikroforureninger ift. sand- og mikrofiltrering. Kan kombineres med aktivt kul for yderligere effekt	Løbende slamhåndtering, kan give anledning til lugtgener, kræver en del udstyr og procesforståelse, risiko for utilsigtet udledning af kemikalier	Betydeligt potentiale pga. høj rensegrad og relativt kompakt løsning. Dog tvivlsom signalværdi ift. projektformål.
Mikrofiltrering	Tilbageholder SS, forbedret effekt med kemisk fældning	Kompakt løsning, høj rensegrad, energieffektiv	Jo finere dug desto bedre udløbskvalitet og øget sårbarhed over for tilstopning	Betydeligt potentiale
Sandfiltrering	Filtrering gennem et eller flere lag sand, fjernelse af suspenderet stof	Kompakt og modulopbygget løsning, relativt energieffektiv		Betydeligt potentiale

Desinfektion – uden kemi				
<i>Teknologi</i>	<i>Virkemåde</i>	<i>Fordele</i>	<i>Ulemper</i>	<i>Anvendelighed ift. projektet</i>
UV	Bestråling med UV-lys via neddykkede lamper. Ødelægger DNA og RNA i cellekernen	Kompakt teknologi	Kræver reduceret SS-indhold, risiko for reaktivering/genvækst	Betydeligt potentiale
Ultrafiltrering	Fjerner bakterier ved filtrering over membran (0,1 µm porestørrelse)	Meget effektiv	Dyr i etablering og drift, sårbar ift. tilstopning, kræver forudgående effektiv SS-fjernelse (mikrofilter)	Ikke relevant ift. projektets økonomiske rammer og anvendelsesformål

Desinfektion – kemisk desinfektion				
<i>Teknologi</i>	<i>Virkemåde</i>	<i>Fordele</i>	<i>Ulemper</i>	<i>Anvendelighed ift. projektet</i>
Kemisk desinfektion generelt	Stærk oxiderende virkning, ødelægger komponenter i cellevæggen og inaktiverer derved	Billig etablering, ikke så følsom over for SS-indhold	Dannelse af uønskede kemiske forbindelser, risiko for	

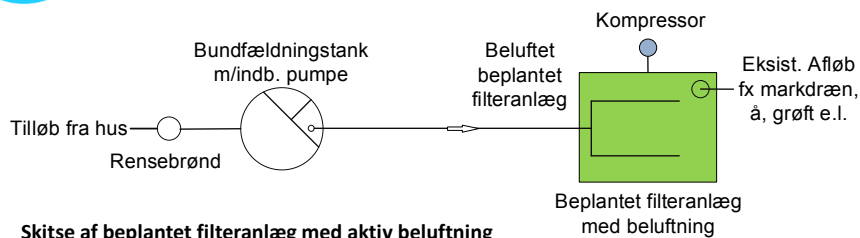
Desinfektion – kemisk desinfektion				
<i>Teknologi</i>	<i>Virkemåde</i>	<i>Fordele</i>	<i>Ulemper</i>	<i>Anvendelighed ift. projektet</i>
	bakterierne, delvis fjernelse af mikroforureninger		utilsigtet udledning af kemikalier til recipient	
Hypoklorit	Tilsætning af natriumhypoklorit, klor som virkemiddel		Risiko for dannelse af utilsigtede biprodukter, som kan være kræftfremkaldende	Umiddelbart ikke relevant
Klordioxid	Produceres ved blanding af klor og natriumklorit, klor som virkemiddel		Ustabilt molekyle som må produceres on-site, kræver særlige forhold ift. arbejdsmiljø	Umiddelbart ikke relevant
Ozon	Reaktion med O ₃ eller OH-radikaler	Meget effektiv ift. reduktion af vira	OH-radikalerne har en høj reaktivitet, som medfører kort levetid og mulighed for at reagerer med andre stoffer end bakterierne, optimal virkning ved lav pH, ozon er særdeles giftigt	Har potentiale, men kræver onlinemåling
Brintperoxid	Reaktion med OH-radikaler, kræver aktivering med UV-lys eller jern		Udledningskrav fra MST på 10 µg/l har tidligere været gældende, dyr etablering af egnet anlæg	Ikke relevant
Permyresyre	Reaktion med OH-radikaler	Virker og nedbrydes hurtigere end pereddikesyre	Ustabilt molekyle, som må produceres on-site, skrappe krav til udledning af restproduktet brintperoxid	Har potentiale
Pereddikesyre	Produceres ved blanding af brintperoxid og eddikesyre	Stabil opløsning, let at håndtere med normale værnemidler, ingen væsentlige biprodukter	Skrappe krav til udledning af restproduktet brintperoxid	Betydeligt potentiale

Referenceliste: 1) Renseteknik – oversigt over ny miljøteknologi inden for spildevandshåndtering, Gert Holm Kristensen, Per Elberg Jørgensen, DHI. Miljøministeriet 2008. 2) Forbedret rensning af spildevand og overløbsvand, Kim Sundmark, Krüger A/S Morten Boel Andersen, Krüger A/S Anden bidragyder Henrik R. Andersen, DTU. Miljøministerier 2012. ISBN net: 978-87-92903-17-4. Farvede rækker er dem der er vurderet potentielt interessante i forbindelse med overløb.

Bilag 2. Info-ark omkring beluftede, beplantede filteranlæg

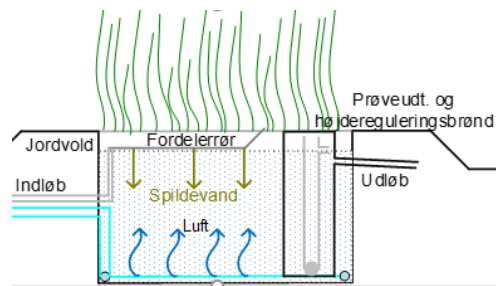


Det beplantede filter med aktiv beluftning



Særlige fordele ved aktiv beluftning:

- **Areal-effektivt:** kun 4 m²/ husstand (5 PE)
- kun 3 m² ved O-krav
- **Flexibelt design** som kan tilpasses både helt små og helt store anlæg (fra 5 – 5000 PE).
- **Energi-effektivt** med et strømforbrug på blot 225 kWh/år for et 5 PE anlæg.
- **Egnet til varierende tilførsel af spildevand i løbet af året;** fx campingpladser, kolonihaver, sommerhuse.
- **Egnet til fælles kloakvand.** Hermed spares kloakseparering, regnvandsbassin, pumpestation.
- **Egnet til industrielt spildevand:** Frisørsalon, levnedsmiddelindustri, frugt- og grøntavler.
- **Egnet hvor der er høj grundvandstand** eller risiko for opstuvning af drænvand
- **Renser standard spildevandet til (S)O krav.** Kan udvides til (S)OP- krav



Opbygning

Et beplantet filter med aktiv beluftning har en kraftig vandtæt membran i bunden.

Vandet pumpes stødvist ud i anlægget via fordelerrør som er placeret i den øverste del af anlægget. Ilt fordeles jævnt i filteret via beluftningsslanger i bunden af anlægget. Mikroorganismer får dermed optimaliseret deres livsbetingelserne, og rensningen bliver særdeles effektiv. Det vandfyldte filterelement består kun af ærtesten, og kan dermed behandle større vandmængder end det gængse beplantede filteranlæg med sand i. På afløbssiden er der installeret en prøvudtagnings-, samt højdereguleringsbrønd. Hvis udledning ikke er muligt, kan det rensede vand nedsives i en faskine.

Antal ejendomme	Antal PE	Anlægsstørrelse (m ²)	Filtermateriale ærtesten (m ³)	Filtermateriale, Vasket sand (m ³)	Strømforbrug, ca. (kWh / PE/år)	Total strømforbrug ca. (kWh / år)
1	5	4	6	0	45	225
2	10	8	10	0	40	400
3 - 4	15	12	15	0	40	600
5 - 6	20	16	20	0	35	700
7 - 8	25	20	25	0	35	875
9 - 10	30	24	30	0	30	900
>10	>30	Kontakt Kilian Water ApS for beregning af større anlæg				

Bilag 3. Analyseresultater for det beplantede filter ved varierende flow

Flow	E.coli (cfu/100ml)				COD (mg/l)				TP (mg/l)				TN (mg/l)				NH4-N (mg/l)				NO3-N (mg/l)		
	Ind	Ud	Reduktion	Reduktion i %	Ind	Ud	Reduktion	Reduktion i %	Ind	Ud	Reduktion	Reduktion i %	Ind	Ud	Reduktion	Reduktion i %	Ind	Ud	Reduktion	Reduktion i %	Ind	Ud	Omdannet fra NH4-N
9 m3/døgn*	5,56E+05	4,4E+03	5,52E+05	99,22	36,8	11,4	25,40	69,02	0,61	1,36	-0,75	-123	3,55	6,94	-3,39	-95,49	1,39	BDL	-	(100%)	0,601	7,08	6,48
	1,45E+06	1,7E+03	1,45E+06	99,88	73,8	16,4	57,40	77,78	1,34	1,67	-0,33	-25	9,61	10,8	-1,19	-12,38	5,97	BDL	-	(100%)	0,238	11,5	11,26
	5,37E+06	1,0E+04	5,36E+06	99,81	161	16,8	144,20	89,57	3,71	2,19	1,52	41	26,4	12,6	13,80	52	21,3	0,018	21,28	100	0,353	12,3	11,95
12 m3/døgn	8,05E+05	1,2E+03	8,04E+05	99,85	57,1	11,5	45,60	79,86	0,814	1,38	-0,57	-70	6,32	6,62	-0,30	-5	2,7	0,472	2,23	83	NA	NA	-
24m3/døgn**		5,5E+04	1,62E+06	96,72		15,6	186,40	92,28		2,44	0,73	23	24	20	4,00	17		0,455	21,85	98	NA	NA	-
	1,67E+06	5,7E+04	1,62E+06	96,57	202	15	187,00	92,57	3,17	2,43	0,74	23	24	21,3	2,70	11	22,3	0,345	21,96	98	NA	NA	-
		5,2E+04	1,62E+06	96,87		14,5	187,50	92,82		2,38	0,79	25	24	21,5	2,50	10		0,265	22,04	99	NA	NA	-
240m3/døgn	8,79E+05	2,0E+06	-1,14E+06	-129,39		103	119,00	53,60		2,04	1,31	39	NA	NA	-	-		6,62	5,78	47	NA	NA	-
					222	108	114,00	51,35	3,35	2,2	1,15	34	NA	NA	-	-	12,4	11,4	1,00	8	NA	NA	-
						96,8	125,20	56,40		2,4	0,95	28	NA	NA	-	-		12	0,40	3	NA	NA	-

*) Prøvekampagner udtaget på tre forskellige dage (hhv. d. 3/8, 9/8, 14/8 2017).

**) Prøvekampagner udtaget på en enkelt dag.

***) Prøvekampagne udtaget på en enkelt måledag. Indløbsprøven er en pooled prøve udtaget t=0/60/120 min, mens udløbsprøverne er enkeltprøver udtaget hhv. t=60/120/180 min

****) Prøvekampagne udtaget på en enkelt måledag. Indløbsprøven er udtaget t=0 min, mens udløbsprøverne er udtaget hhv. t=60/120/180 min

Bilag 4. Dimensioneringsark til Stjernholm RO-rist

Beregnings skema for RO-rist						
Sagsnr.					Dato	6.04.18
Indtast overløbskant længde i meter				1,5		
ø300						
mm peri.	Længde	25% tilst	Ren rist			
0,4	1,5	22,0	29,3	33,0	44,0	Vandmængde l/s
1	1,5	26,6	35,5	39,9	53,2	Vandmængde l/s
2	1,5	36,5	48,7	54,8	73,0	Vandmængde l/s
4	1,5	68,8	91,8	103,2	137,6	Vandmængde l/s
5	1,5	94,5	126,0	141,7	189,0	Vandmængde l/s
6	1,5	129,7	173,0	194,6	259,5	Vandmængde l/s
ø400						
mm peri.	Længde	25% tilst	Ren rist			
0,4	1,5	28,5	38,1	42,8	57,1	Vandmængde l/s
1	1,5	34,6	46,2	52,0	69,3	Vandmængde l/s
2	1,5	47,8	63,8	71,8	95,7	Vandmængde l/s
4	1,5	91,2	121,7	136,9	182,5	Vandmængde l/s
5	1,5	126,0	168,0	189,0	252,0	Vandmængde l/s
6	1,5	174,0	232,0	261,0	348,0	Vandmængde l/s
ø550						
mm peri.	Længde	25% tilst	Ren rist			
0,4	1,5	40,8	54,4	61,2	81,6	Vandmængde l/s
1	1,5	49,3	65,7	73,9	98,6	Vandmængde l/s
2	1,5	67,6	90,1	101,3	135,1	Vandmængde l/s
4	1,5	126,9	169,3	190,4	253,9	Vandmængde l/s
5	1,5	174,0	232,0	261,0	348,0	Vandmængde l/s
6	1,5	238,5	318,0	357,7	477,0	Vandmængde l/s
ø700						
mm peri.	Længde	25% tilst	Ren rist			
0,4	1,5	51,5	68,7	77,2	103,0	Vandmængde l/s
1	1,5	62,3	83,0	93,4	124,6	Vandmængde l/s
2	1,5	85,5	114,0	128,3	171,0	Vandmængde l/s
4	1,5	161,1	214,9	241,7	322,3	Vandmængde l/s
5	1,5	221,2	295,0	331,9	442,5	Vandmængde l/s
6	1,5	303,7	405,0	455,6	607,5	Vandmængde l/s
					Sign.	

Sikkert søbad

Dette er slutrapporten for projektet "Sikkert Søbad - Overvågning, rensning og varsling af regnvandsbetingede overløb" under Miljøstyrelsens tilskudsordning "MUDP 2015". Projektet havde til formål at udvikle et samlet koncept til overvågning, varsling og rensning af overløbsvand til sikring af badevands-sikkerheden og forbedring af vandkvaliteten i recipienter.

Kombinationen af de rette tekniske løsninger og intelligent varsling er en ny måde at se helhedsorienteret på de regnvandsbetingede udledninger fra fælleskloak.

Med udgangspunkt i Skanderborg Sø og med fokus på badevandskvalitet har projektet haft til formål at udvikle en helhedsløsning. Den udviklede løsning kombinerer risikovurdering af individuelle overløb med et avanceret varslingssystem, som kobler mikrobiologiske data, vejr- og vinddata samt de hydrauliske forhold i opland og sø. Derudover er der udviklet og testet to prototyper af renseløsninger til behandling af overløbsvand; en naturnær plante-baseret filterløsning og en kompakt modulær mekanisk/kemisk rensemetode.

Resultaterne af projektet er en varslingsmodel, der ud fra reelle data i Skanderborg og en kompliceret modellering nu varsler badegæsterne ved søbadet via en automatisk varslingstavle, hvis der er risiko for, at bakterier fra overløb nedsætter badesikkerheden.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk