Analyse og forbedring af badevandskvalitet ved Tangkrogen på baggrund af strømningsforhold

Karen Thienly Truong & Mette Kirstine Nielsen
Aalborg Universitet
Kandidatspeciale
MSc Water and Environmental Engineering
9. juni 2022

AALBORG UNIVERSITET

Kandidatpeciale v/ det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet
MSc Water and Environmental
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Ø
www.civil.aau.dk

Titel:

Analyse og forbedring af badevandskvalitet ved Tangkrogen på baggrund af strømningsforhold

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

2. september 2021 - 9. juni 2022

Forfattere:

Karen Thienly Truong
Mette Kirstine Nielsen

Vejledere:

Jesper Ellerbæk Nielsen
Michael Robdrup Rasmussen

Sidetal: 127
Bilagsantal: 6
Afsluttet: 9. juni 2022

Synopsis:

Tangkrogen er et bynært, rekreativt område med badestrand i Aarhus tæt på Marselisborg Lystbådehavn og Aarhus Bugt. Stranden er velbesøgt på solskinsdage, men Aarhus Kommune er bekymret for badevandskvaliteten grundet overløbsbygværker i nærområdet. Kommunens nuværende badevandsmodel varsler 25-30 lukkedage i badesæsonen. Formålet med projektet er at analysere og forbedre badevandskvaliteten ved Tangkrogen på baggrund af systemets strømningsforhold. Der opstilles en model i MIKE 3, der bruges til at udarbejde en risikoprofil, og vurdere hvilke af nærområdets overløbsbygværker samt meteorologiske forhold, der har betydning for badevandskvaliteten. Derudover er der udarbejdet et løsningsforslag, hvor udløbene til de to udløb, der bidrager med den største *E. coli*-belastning til Tangkrogen, føres længere ud i Aarhus Bugt. På baggrund af risikoprofilen er det fundet, at der er 60 % sandsynlighed for, at badevandskravet overskrides, når der aflastes med spildevand til området, uafhængig af vindens retning, og den højeste belastning opnås, når det blæser fra øst og sydøst. Ved at implementere løsningsforslaget, reduceres bakteriekoncentrationen ved Tangkrogen kraftigt, omend det er en kortsigtet løsning. På sigt vil området omkring Tangkrogen blive udvidet, hvilket modellen ikke tager højde for. Dog diskuteres områdets fremtidsperspektiver i forhold til badevandskvaliteten.

Forord

Dette afgangsspeciale er udarbejdet af Karen Thienly Truong og Mette Kirstine Nielsen på institutet for Byggeri, By og Miljø med speciale i Vand og Miljø. Projektet er udarbejdet i perioden september 2021 til juni 2022.

Der skal rettes stor tak til lektor Jesper Ellerbæk Nielsen og professer Michael Robdrup Rasmussen for vejledning og godt samarbejde samt Nikolaj Kruse Christensen fra Aarhus Vand A/S for data- og vidensdeling.

Læsevejledning

I rapporten refereres til figurer, formler og tabeller ved kapitelnummer eller bilagsbogstav samt herefter fortløbende numre.

Ved præsentation af formler angives eksempler på enheder. Hvis det, for et korrekt resultat, kræves af formlen, at der benyttes bestemte enheder, præciseres dette ved præsentationen.

Det anvendte referencesystem er Harvard-systemet, som i teksten fremgår (Efternavn, år). Er der for årstallet angivet "u.å."indikerer det, at året ikke har fremgået af referencen. Referencen er placeret i slutningen af en sætning og henfører til pågældende sætning, eller placeret efter et punktum og henfører til pågældende tekststykke. Bagerst i projektrapporten er referencerne samlet i litteraturlisten i alfabetisk orden efter forfatterens efternavn.

Mellemregninger er foretaget med alle betydende cifre, men for overskuelighedens skyld er de afrundet i rapporten. Antal benyttede cifre afhænger af det konkrete tilfælde, for at afrundingerne er meningsfulde.

Figurer er udarbejdet i Excel og QGIS. Baggrundskort er fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering (2022).

Karen Thienly Truong
ktruon17@student.aau.dk

Mette Kirstine Nielsen
meniel16@student.aau.dk

Abstract

This thesis aims to analyze and improve the bathing water quality at Tangkrogen in Aarhus, Denmark, based on marine flow conditions. The municipality of Aarhus is obligated to measure the concentration of fecal indicator bacteria (FIB) in the water, and even though the bathing water quality meets the requirements most of the time, the municipality of Aarhus is still worried about the bathing water quality due to combined sewer overflows (CSOs). Based on predictions from a model used by the municipality of Aarhus, the bathing water quality at Tangkrogen exceeds bathing water requirements 25-30 times per bathing season.

During this project, a 3-dimensional flow model is set up, and the obtained results are used to identify the CSOs with the most significant load of FIB to Tangkrogen and how big of an impact the wind direction, speed, and tidal conditions have. Furthermore, the model is used to create a risk profile with the purpose of identifying the risk of contamination in the whole area around Tangkrogen. It was found that there is a 60 % risk of contamination at the part of Tangkrogen where most people are bathing, not depending on wind direction, and two CSOs were identified as the most critical sources for bad bathing water quality. The rest of the CSOs in the area were also ranked regarding to their load of FIB. In order to accommodate the problem, a short-term solution is provided and modeled.

In the solution, drains from the two most critical CSOs are relocated further into the ocean, meaning the contamination is moved away from Tangkrogen. This solution is effective, though short-term, and the concentration of FIB is reduced significantly. However, the problem should also be solved long term with the establishment of a separate sewer system and a new wastewater treatment plant that the municipality is planning on building. This new treatment plant will have increased capacity, meaning the number of CSOs will most likely be reduced.

Indholdsfortegnelse

I Indledning 1

Kapitel 1 Problematikker omhandlende badevandskvalitet i Aarhus 2

Kapitel 2 Områdebeskrivelse af Tangkrogen 10

2.1 Badevandskvalitet 10

2.2 Kilder til ferskvand og forurening 12

2.3 Fysiske forhold 17

Kapitel 3 Problemformulering 23

II Modellering af strømningsforhold ved Tangkrogen 25

Kapitel 4 Opsætning af strømningsmodel 26

4.1 Modelstruktur og -geometri 26

4.2 Implementering af vandstands- og vinddata 28

4.3 Hydrodynamiske parametre 29

4.4 Sammenligning af model og observationer 30

4.5 Gridafhængighed 31

4.6 Overløbsbygværker og modellering af aflastning 32

4.7 Salinitet i modelleringsområdet 34

4.8 Modellering af transport og henfald af bakterier 35

Kapitel 5 Scenariemodellering 37

5.1 Tidevandsforhold og tidspunkt for aflastning 38

5.2 Analyse af vindhastighedens effekt på udbredelse 38

III Belastning af *E. coli* og påvirkning fra vind og tidevand 41

Kapitel 6 Belastning af *E. coli* ved Tangkrogen 42

6.1 Risikokort - Udledning fra syv overløbsbygværker 42

6.2 Koncentrationsprofiler ved Tangkrogen 45

6.3 Udpegning af overløbsbygværker med største *E. coli*-belastning 47

6.4 Udpegning af vindretninger resulterende i største *E. coli*-belastning . . . 48

IV Løsningsforslag - Nedlægning af kritiske overløb og fremtidsperspektiver 53

Kapitel 7 Belastning efter nedlægning af OU02S og OU04S 54

7.1 Risikokort - Udledning fra fem overløbsbygværker 54

7.2 Udpegning af overløbsbygværker med største *E. coli*-belastning 60

Kapitel 8 Fremtidsperspektiver for Tangkrogen og badestedets vandkvalitet . . 66

V Afrunding 71

Kapitel 9 Konklusion 72

Litteraturliste 74

VI Bilag 79

Bilag A Salinitet 80

Bilag B Viby Regnserien og overløbsvolumener 83

Bilag C Vejrdata for badesæsonerne 2018-2020 86

Bilag D Beregning af henfaldskonstant 90

Bilag E Forureningsprofiler 93

E.1 Forureningsprofiler for overløbsbygværker: Ved badestranden, stengærdet og væk fra badestranden 93

E.1.1 Nordenvind 94

E.1.2 Nordøstenvind 96

E.1.3 Østenvind 98

E.1.4 Sydøstenvind 100

E.1.5 Søndenvind 102

E.1.6 Sydvestenvind 104

E.1.7 Vestenvind 106

E.1.8 Nordvestenvind 108

Bilag F Profiler efter nedlægning af OU02S og OU04S 111

F.1 Forureningsprofiler for overløbsbygværker efter nedlæggelse: Ved badestranden, stengærdet og væk fra badestranden 111

F.1.1 Nordenvind 112

F.1.2 Nordøstenvind 114

F.1.3 Østenvind 116

F.1.4 Sydøstenvind 118

F.1.5 Søndenvind 120

F.1.6 Sydvestenvind 122

F.1.7 Vestenvind 124

F.1.8 Nordvestenvind 126

I Indledning

Del I præsenterer en indledning og områdebeskrivelse, der belyser de vigtigste problemer ved Tangkrogen i henhold til badevandskvalitet. Dette leder til en problemformulering.

Kapitel 1 Problematikker omhandlende badevandskvalitet i Aarhus 2

Kapitel 2 Områdebeskrivelse af Tangkrogen 10

2.1 Badevandskvalitet
2.2 Kilder til ferskvand og forurening
2.3 Fysiske forhold

Kapitel 3 Problemformulering 23

1 Problematikker omhandlende badevandskvalitet i Aarhus

Badende kan blive eksponeret for urenset spildevand fra overløb forbundet til fælleskloak og renseanlæg udledt til badeområder (Mølgaard et al., 2002). Ophold i badevand forurenet med spildevand kan udgøre en sundhedsmæssig risiko, da mikroorganismer i spildevand kan medføre sygdom. Nogle af de mest traditionelle mikroorganismer i spildevand er bakterierne Campylobacter, Salmonella, Enterokokker, coliforme bakterier, herunder *E. coli*, samt protozoerne *Cryptosporidium parvum* og *Giardia intestinalis*, og flere typer af enterovirus. De nævnte mikroorganismer har typisk en lav infektionsdosis, kan smitte gennem vand og udskilles ofte i store mængder fra mennesker og dyr (Mølgaard et al., 2002).

Danmark er omringet af vand, og badegæster besøger flittigt de 1026 registrerede badevande i Danmark, hvor 906 af dem er kystvande (European Environment Agency, 2020). Kommuner i Danmark fører tilsyn med vandkvaliteten i danske badevande, både kyst og indlands, for at sikre, at vandet ikke er forurenet og dermed overholder badevandskravet anført i Badevandsdirektivet (Europa-Parlamentet og Rådets Direktiv, 2006). I år 2020 blev badevandskvaliteten klassificeret som tilfredsstillende eller bedre for 98,3% af badevandene (European Environment Agency, 2020).

Figur 1.1: Badesteder i Aarhus by og nærområde. Modificeret fra Aarhus Kommune (2021a).

En af de byer i Danmark, hvor der er god adgang til badevand er Aarhus, der er den næststørste by i Danmark beliggende i Østjylland ved Aarhus Bugt (Aarhus Kommune, 2021a). Figur 1.1 viser badesteder i Aarhus by og nærområde. En del af kyststrækningen i Aarhus Bugt omkring og nær Aarhus by er klassificeret som badestrand, samt er der i byen anlagt både havnebad og friluftsbad. Derudover råder Aarhus over Tangkrogen, der ikke officielt er klassificeret som badestrand, men benyttes som badested af byens badegæster.

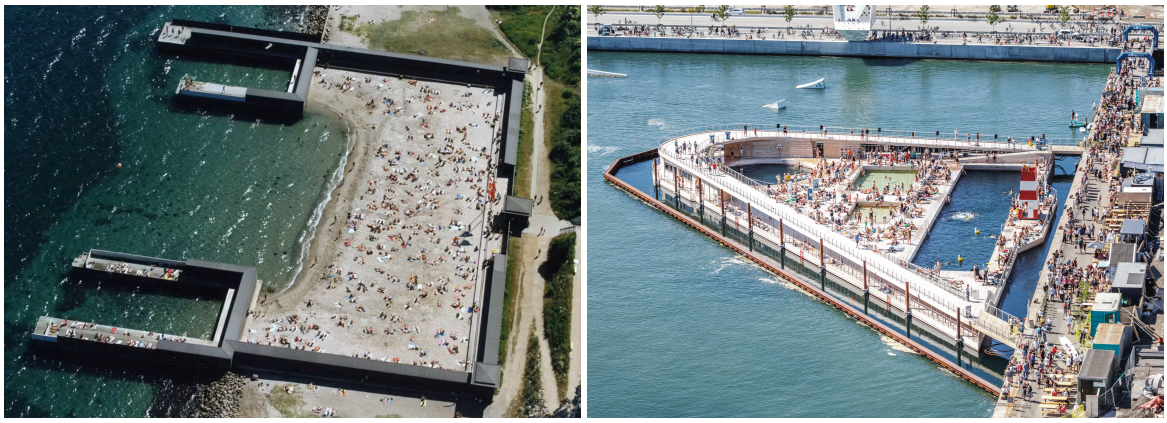
Aarhus Kommune prioriterer gode badesteder højt med det formål at sikre turisme og fastholde byens tilflyttere (VisitAarhus, 2022). Friluftsbadet Den Permanente er en af byens mest populære og bedste badestrande, og den benyttes flittigt af badegæster, når der er godt vejr og sommer i Aarhus. Stranden er tildelt Det Blå Flag, hvilket er en international miljømærkningsordning, der gives til badesteder, hvor der stilles bestemte krav til antal af badevandsprøver, informationstavler og faciliteter. Det Blå Flag tages ned, hvis badevandskravet ikke er overholdt (Friluftsrådet, 2022).

Badevandsdirektivet, udstukket af EU, har til formål at sikre folkesundheden ved at klassificere og overvåge europæiske badevande samt at sikre, at information om badevandenes tilstand udbredes til landenes borgere (Europa-Parlamentet og Rådets Direktiv, 2006). Badevand klassificeres som ringe, tilfredsstillende, godt eller udmærket, jf. tabel 1.1, og kriteriet for de forskellige klassifikationer er bestemt ud fra koncentrationen af intestinale enterokokker og *Escherichia coli* (*E. coli*), der er indikatororganismer for spildevandsforurening. Der er tale om forurening, når badevandet er mikrobiologisk kontamineret til en sådan grad, at kriteriet for tilfredsstillende badevandskvalitet ikke kan mødes, og badevandet klassificeres derfor som ringe (Miljø- og Fødevareministeriet, 2016).

Tabel 1.1: Kvalitetskrav til badevand for kyst- og overgangsvande (Miljø- og Fødevareministeriet, 2016). * Ud fra en vurdering af 95-percentilen. ** Ud fra en vurdering af 90-percentilen.

	Udmærket kvalitet	**God kvalitet**	**Tilfredsstillende kvalitet**
Intestinale enterokokker (cfu/100 mL)	100*	200*	185**
Escherichia coli (cfu/100 mL)	250*	500*	500**

Ligesom Den Permanente, besøges havnebadet i Aarhus Havn af byens badegæster, men her måles ofte en bakteriekoncentration, der er over badevandskravet for tilfredsstillende badevandskvalitet, og derfor har Aarhus Kommune igangsat en række tiltag med det formål at forbedre vandkvaliteten i Aarhus Havn, men også Braband Sø og Aarhus Å. Disse tiltag omfatter bl.a. bedre rensning af spildevand på Viby og Åby Renseanlæg samt nedlægning af overløb (Aarhus Vand, 2022). Et tiltag har også været at etablere en spunsvæg omkring havnebadet med et vandudskiftningssystem mhp. at forbedre badevandskvaliteten. Derudover er der også tale om bedre varsling af badevandskvaliteten i havnen (Aarhus Vand, 2022). Kristensen og Heggdal (2019) har lavet et sådan sensorbaseret varslingssystem, der kan varsle bakteriekoncentrationen i realtid på baggrund af ledningsevnen i badevandet i Aarhus Havn.



(a) Den Permanente (Petersen, 2017) (b) Havnebadet (OrganoWood, 2018)

Figur 1.2: Velbesøgte og stemningsfyldte badeanlæg ved Den Permanente og Havnebadet i Aarhus.

Figur 1.2 viser, hvor benyttede Den Permanente og Aarhus Havnebad er på sommerdage i Aarhus. Foruden de to badeanlæg er Tangkrogen også et attraktivt sted at opholde sig, når vejret er godt, og stranden er velbesøgt på solskinsdage, jf. figur 1.3 (Starcke et al., 2021).

Figur 1.3: Glade badegæster hygger sig ved Tangkrogen på en sommerdag (Starcke et al., 2021).

Tangkrogen er både et grønt og åbent område med plads til adskillige arrangementer og besøgende samt en vig med plads til bådelaug for fritidsfiskere og badegæster sydøst for Aarhus midtby. Områdets placering ligger i vinkel med Strandvejen og Marselisborg Lystbådehavn, jf. figur 1.4 og 1.5, samtidig er det knap 2,5 kilometer i gå-afstand fra midtbyen og den halve afstand fra forlystelsesparken Tivoli Friheden, der giver god anledning til at besøge området. Tangkrogen har gennem tiden været plaget af dreven tang pga. pålandsvind, idet det er en vig, hvilket områdets navn bærer præg af. Trods tang samt den af og til medførte duft af rådden tang og saltvand har pladsen været foretrukken til badning grundet den bynære distance samt de rekreative pladser, der er blevet etableret med tiden. (Aarhus Stadsarkiv, 2021)

Figur 1.4: Villaer beliggende på Strandvejen med udsigt over Tangkrogen. Billedet er taget af forfatterne maj 2022.

Figur 1.5: Marselisborg Lystbådehavn tæt på Tangkrogen, der er hjemsted for både ejet af fritidsfiskere og bådentusiaster. Billedet er taget af forfatterne maj 2022.

Tangkrogen er ikke klassificeret som en officiel badestrand, og Aarhus Kommune er derfor ikke forpligtiget til at varetage driften af området, men eftersom stranden benyttes til badning, har kommunen pligt til at føre tilsyn med badevandskvaliteten (Starcke et al., 2021). Badevandet ved Tangkrogen bliver kontrolleret hele badesæsonen, der strækker sig over perioden 1. juni til 1. september, og DHI har udviklet en badevandsmodel, der varsler 25-30 lukkedage ved badeområdet i badesæsonen (Aarhus Kommune, 2021b).
Badestedets gæster kan tjekke badevandskvaliteten på Badevand.dk, udviklet af DHI, der giver et overblik over badevandsprognosen (DHI, 2021). Dertil har Aarhus Kommune opsat elektroniske tavler, der viser en forudsigelse af den aktuelle vandkvalitet på baggrund af prognoser bygget på overvågning af kloak- og renseanlæg, meteorologiske data samt strømretninger og strømhastighed. (Aarhus Kommune, 2021c)

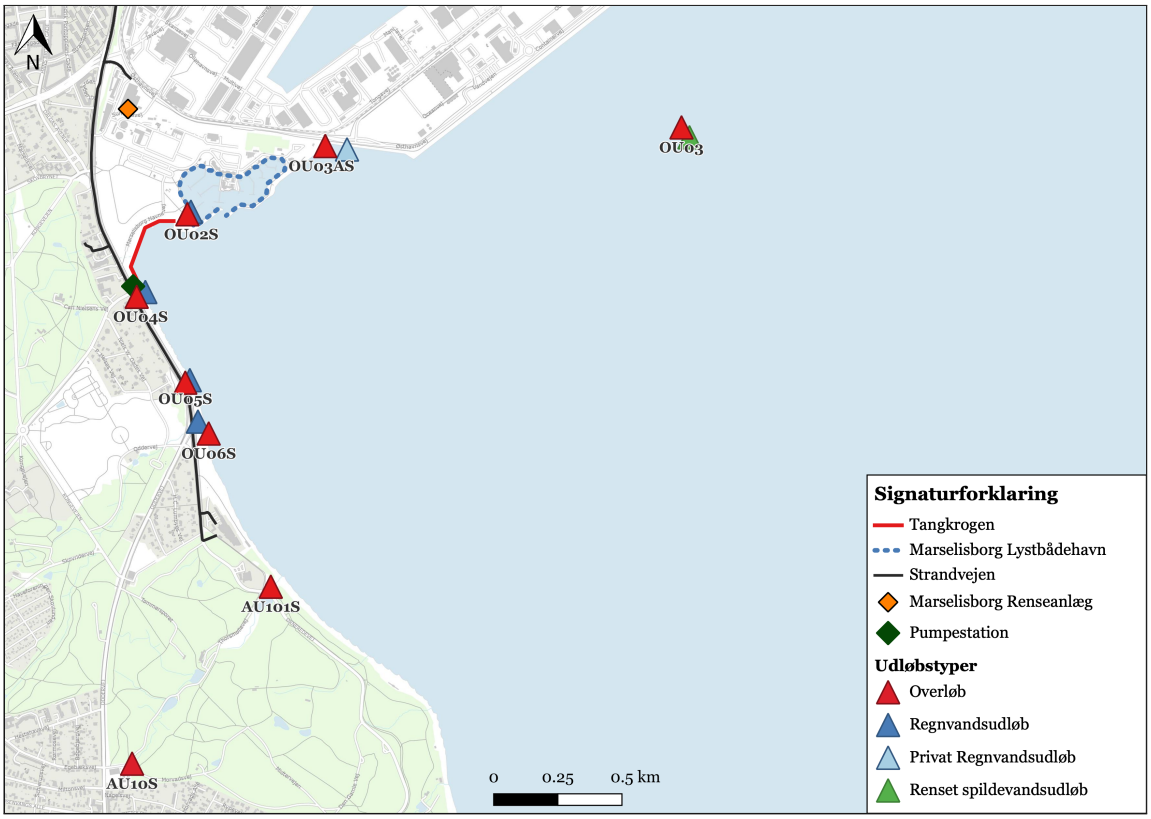
(a) (b)

Figur 1.6: Stemningsbilleder fra Tangkrogen, der viser badestranden, hvor badende går i vandet (a) samt den sydøstlige kyst, hvor der er stengærde og pumpehus (b). Billederne er taget af forfatterne maj 2022.

Kommunen er bekendt med flere regnbetingede overløb og udløb i området, der giver anledning til forurenet badevand og dermed er skyld i de mange varslede lukkedage i badesæsonen. Et af disse overløb er forbundet til en pumpestation, som kan ses på figur 1.6b. Der er tale om bygningsværket til venstre med brune mursten. Dette bygningsværk er et pumpehus, der har udløb ud til det nærliggende vand. Besøger man området, er det muligt at se overløbsledningen, og denne er vist på figur 1.7. Overløbet har navnet OU04S.

Figur 1.7: Udløbet OU04S, der er et overløb forbundet til en pumpestation og det fælleskloakerede afløbssystem i Aarhus. Tangkrogen er recipient for det tilførte spildevand fra dette overløb. Den røde linje viser placeringen af Tangkrogen ift. overløbet. Billedet er taget af forfatterne maj 2022.

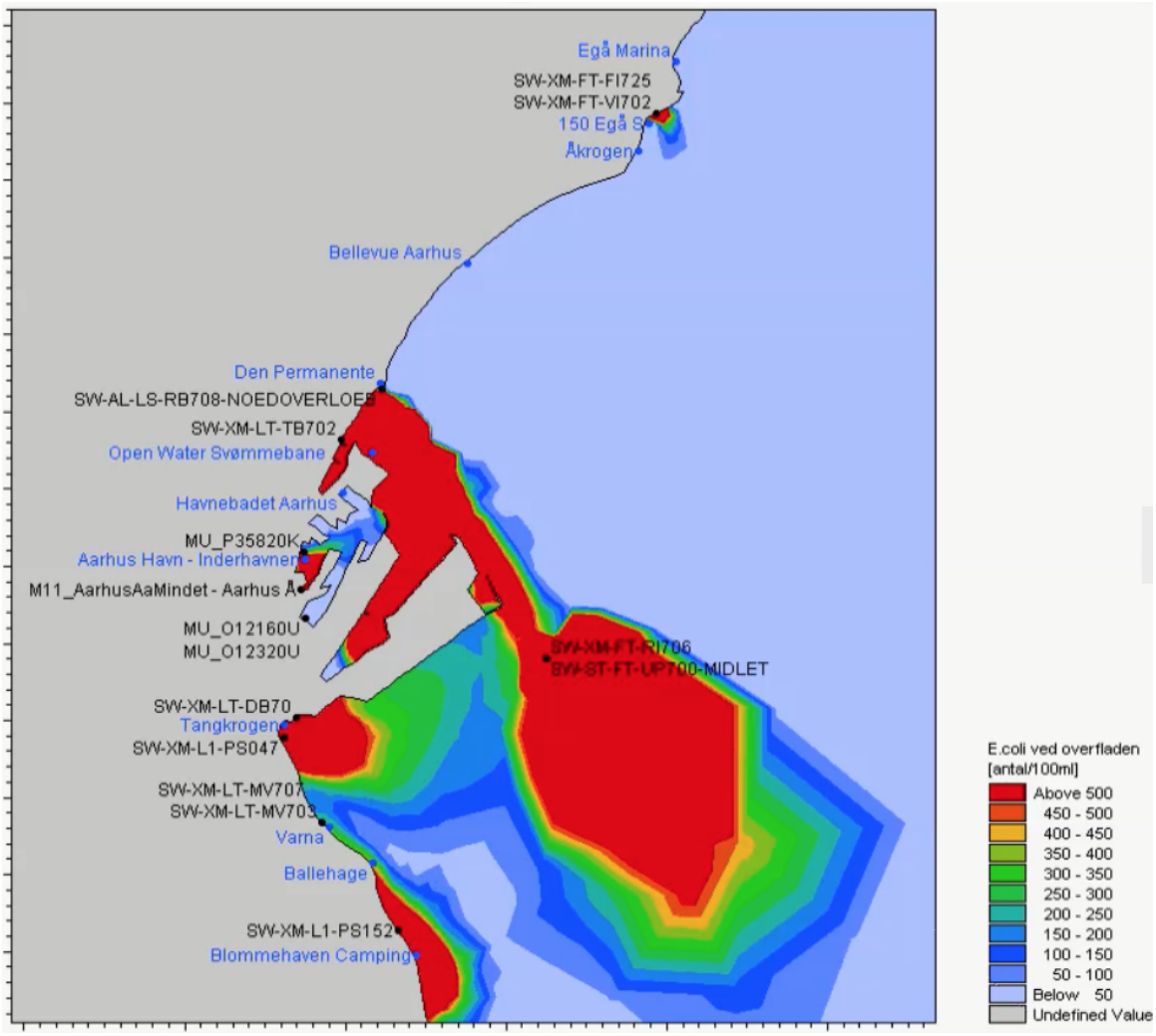
Et overblik over nærområdets udløb og overløb fra fælleskloak samt renseanlæg er vist på figur 1.8.



Figur 1.8: Udløb og overløb ved Tangkrogen og i strandens nærområde (SEGES, 2020).

Marselisborg Renseanlæg har sin nuværende placering tæt på Tangkrogen, jf. figur 1.8, og renseanlægget har et udløb med renset spildevand og et overløb med urenset spildevand i Aarhus Bugt ca. to kilometer fra Tangkrogen. Aarhus Kommune har planer om, at renseanlægget skal nedlægges og omplaceres, således kapaciteten øges ved et nyt renseanlæg, og afløbssystemet skal udbygges i området, men der vil stadig være mulighed for overløb af spildevand ved større regnhændelser (Starcke et al., 2021).

Kommunens nuværende badevandsmodel, udviklet af DHI, medtager det, der er vurderet af kommunen, til at være de mest kritiske overløbsbygværker. Her er der tale om renseanlæggets overløb OU03, overløbet ved Marselisborg Lystbådehavn OU02S og overløb AU101S, der er placeret ved et vandløb kaldet Varna Bæk. Figur 1.9 viser et udklip fra den nuværende badevandsmodel, hvor badevandsudsigten fra den 24. juli 2015 er vist. Det er tydeligt, at store dele af Tangkrogen og strandens nærområde vil opnå en ringe badevandskvalitet, da bakteriekoncentrationen overskrider badevandskravet på 500 $E.coli$/100mL.



Figur 1.9: Udklip fra en simulering af badevandskvaliteten ved Tangkrogen fra kommunens nuværende badevandsmodel den 24. juli 2015. Modificeret fra Aarhus Kommune (2021b).

Som følge af den dårlige badevandskvalitet har Aarhus Kommune udarbejdet en række mulige fremtidsperspektiver med det formål at sikre rent badevand ved Tangkrogen (Aarhus Kommune, 2021b). Nogle af disse mulige tiltag er bl.a. nedlæggelse af overløbsbygværkerne OU02S, OU04S og OU03AS, eller en mulig forlængelse af overløbenes udløb ud i butgen ud i bugten, grundet deres tætte placering til badeområdet. Derudover er et sparrebassin i forbindelse med det nye renseanlæg også under overvejelse, således spildevand kan opmagasineres og udledning til Tangkrogen kan undgås (Aarhus Kommune, 2021b).

Yderligere er Aarhus Kommune opmærksomme på muligheden for at varsle badevandskvaliteten på andre måder end vha. badevand.dk (Starcke et al., 2021). I stedet for at overvåge afløbssystemet, bruge vejrdata samt strømretning og -hastighed, spekuleres det, om det er muligt at varsle badevandskvaliteten ved Tangkrogen vha. indirekte parametre, som Kristensen og Heggdal (2019) har gjort i Aarhus Havn. Varslingen foregår således, at der findes en sammenhæng mellem en eller flere indirekte parametre som f.eks. ledningsevne eller ammonium, der forekommer i spildevand (Jansen et al., 2019), og bakteriekoncentrationen. På denne måde vil man kunne varsle badevandskvaliteten i realtid og dermed kunne lukke badestranden med det samme, når modellen viser, at badevandskvaliteten er forringet.

Dette eliminerer problemstillingen omkring svartid på vandprøver af bakteriekoncentrationen, hvor det først vides flere timer efter udtagning, om der er dårlig badevandskvalitet.

Selvom Tangkrogen ikke er en officiel badestrand, er den velbesøgt om sommeren på samme måde som Den Permanente og Aarhus Havnebad, og det gør den varslede ringe badevandskvalitet ved Tangkrogen til et problem for Aarhus Kommune. Den Permanente er en strand med generel god badevandskvalitet, og Kristensen og Heggdal (2019) har lavet et varslingssystem, der beskytter badegæster mod dårligt badevand i Havnebadet. Det er derfor relevant at undersøge forholdene omkring Tangkrogen nærmere og dermed komme tættere på en løsning, der kan sikre god badevandskvalitet her.

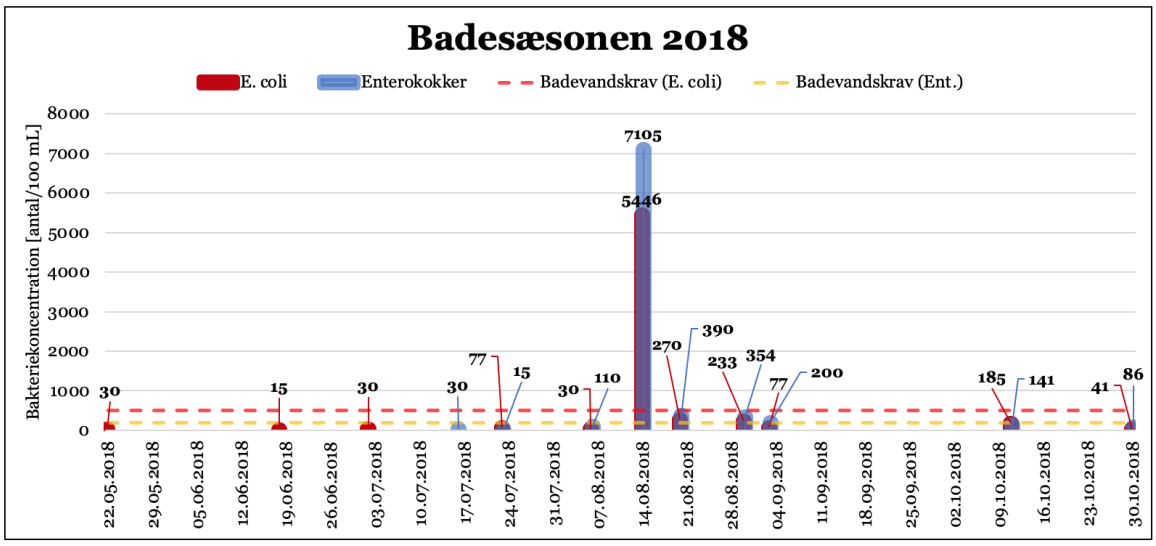
2 Områdebeskrivelse af Tangkrogen

Dette afsnit indeholder en områdebskrivelse af Tangkrogen. Afsnittet berører de generelle forhold omkring vandkvalitet, kilder til ferskvand og forurening samt systemets fysiske forhold i form af vandets saltholdighed og vind- og tidevandsforhold.

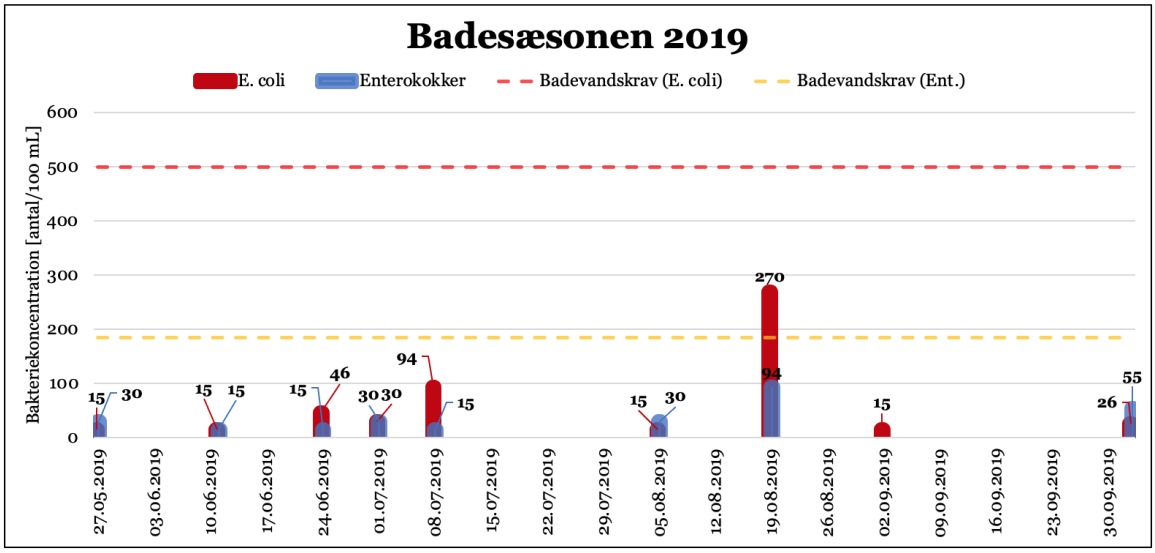
2.1 Badevandskvalitet

Aarhus Kommune udtager løbende vandprøver i badesæsonen for at vurdere badevandskvaliteten ved Tangkrogen. På baggrund af de opsamlede vandprøver er badevandskvaliteten ved Tangkrogen klassificeret som tilfredsstillende, men alligevel varsles der 25-30 lukkedage ved stranden i løbet af badesæsonen (Starcke et al., 2021). Kommuner er forpligtiget til at udtage og analysere mindst fire vandprøver i badesæsonen (Miljø- og Fødevareministeriet, 2016). Aarhus Kommune har taget vandprøver 11 gange i badesæsonen 2018, otte gange i badesæsonen 2019 og ni gange i badesæsonen 2020. Derudover har der været taget vandprøver sidst i maj for alle tre badesæsoner og starten af oktober for badesæsonerne i 2018 og 2019.

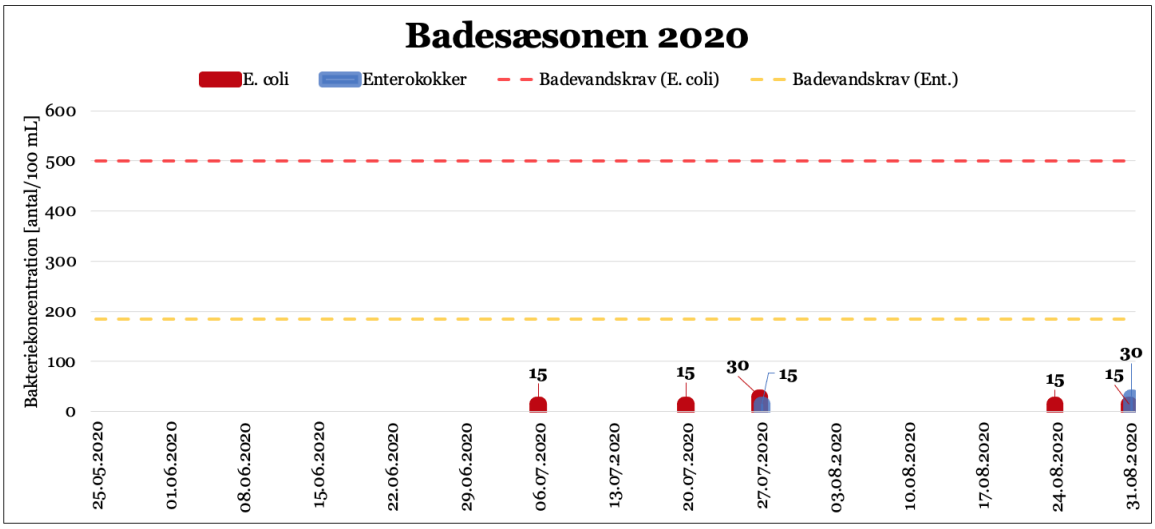
Figur 2.1 viser resultaterne fra målinger foretaget i badesæsonerne 2018-2020.



(a)



(b)



(c)

Figur 2.1: Bakteriekoncentrationen for *E. coli* og enterokokker målt i badesæsonen 2018 (a), 2019 (b) og 2020 (c) samt få målepunkter uden for badesæsonen (Aarhus Kommune, 2021b).

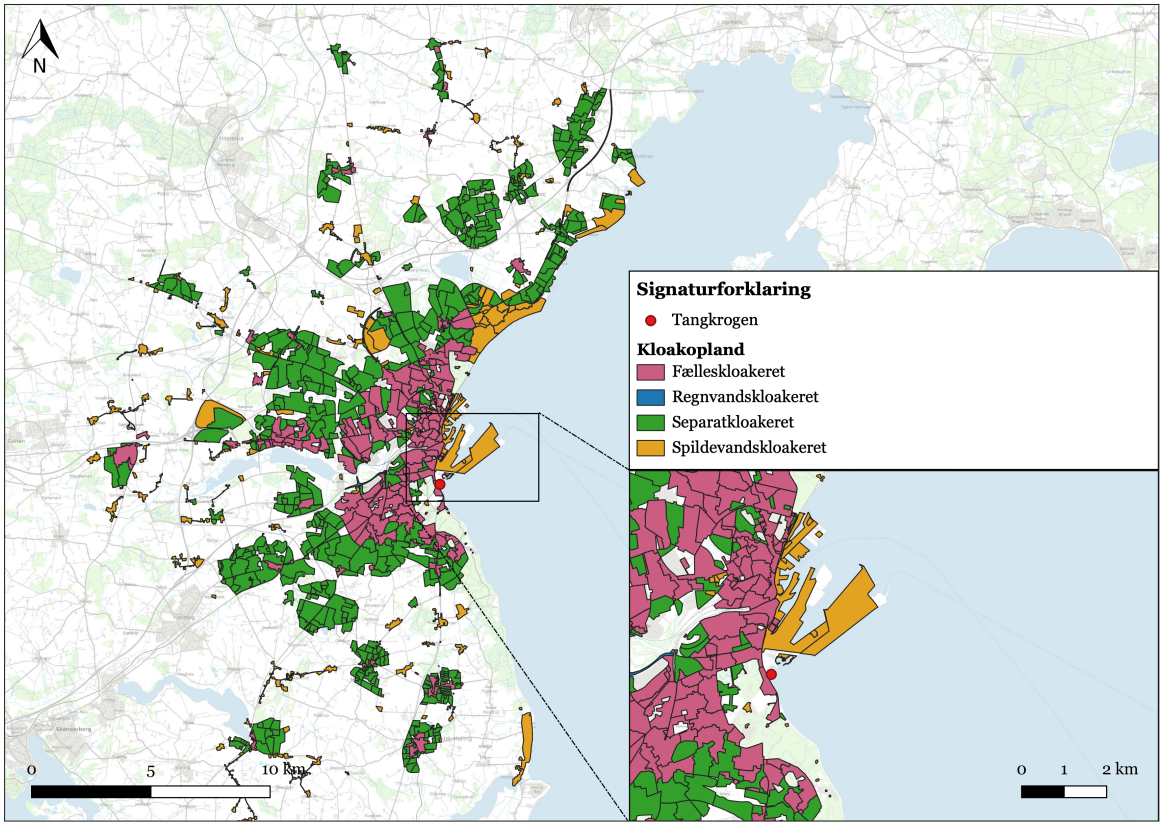
Resultatet af vandprøverne i de tre præsenterede badesæsoner viser, at bakteriekoncentrationen jævnligt peaker, og specielt i år 2018 er koncentrationen af *E. coli* og enterokokker høj i en måling fra den 14. august. Her er der for *E. coli* målt 5.446 bakterier/100mL, mens der for enterokokker er målt 7.105 bakterier/100mL. De målte bakteriekoncentrationer overskrider badevandskravet for *E. coli* på 500 bakterier/100mL og enterokokker på 185 bakterier/100mL marginalt. Høje koncentrationer af *E. coli* og enterokokker i vandmiljøer kan måles som følge af udledning af urenset spildevand fra regnbetingede overløb i nærområdet. I følge en regnmåler placeret i Viby, jf. appendiks B, er der den 12. august 2018 registreret en regnhændelse på mere end 20 timer resulterende i en regndybde på 22,8 cm, mens der den 13. august 2018 er registreret en hændelse på 13 timer resulterende i en regndybde på 50,4 cm. Så kraftige regnhændelser formodes at være skyld i overløbshændelser, der er årsagen til de høje bakteriekoncentrationer målt den 14. august.

De højest målte bakteriekoncentrationer i badesæsonen år 2019 er på 270 bakterier/100mL for *E. coli* og på 94 bakterier/100mL for enterokokker. Badevandskravet er dermed overskredet for *E. coli*, men ikke for enterokokker. Målinger fra badesæsonen 2019 overskrider ellers ikke badevandskravet, jf. figur 2.1 (b), og det samme gør sig gældende for badesæsonen 2020, hvor bakteriekoncentrationen fra vandprøverne aldrig kommer over 30 bakterier/100mL for hverken *E. coli* eller enterokokker. I følge målinger fra år 2018, ser det ud til, at det typisk er enterokokker, der resulterer i en overskridelse af badevandskravet, jf. figur 2.1, hvilket også er konklusionen fra Aarhus Kommune, der vurderer, at klassifikationen ofte er tæt på ringe, men ellers er badevandskvaliteten statistisk set tilfredsstillende i år 2019 og 2020 (Aarhus Kommune, 2021b).

Aarhus Kommune har vha. vandprøver kunne påvise, at badevandskvaliteten ved Tangkrogen er påvirket af udledningen af urenset spildevand. Det er derfor essentielt at kortlægge kilderne til denne forurening ved at se på overløb forbundet til afløbsnettet og områdets renseanlæg.

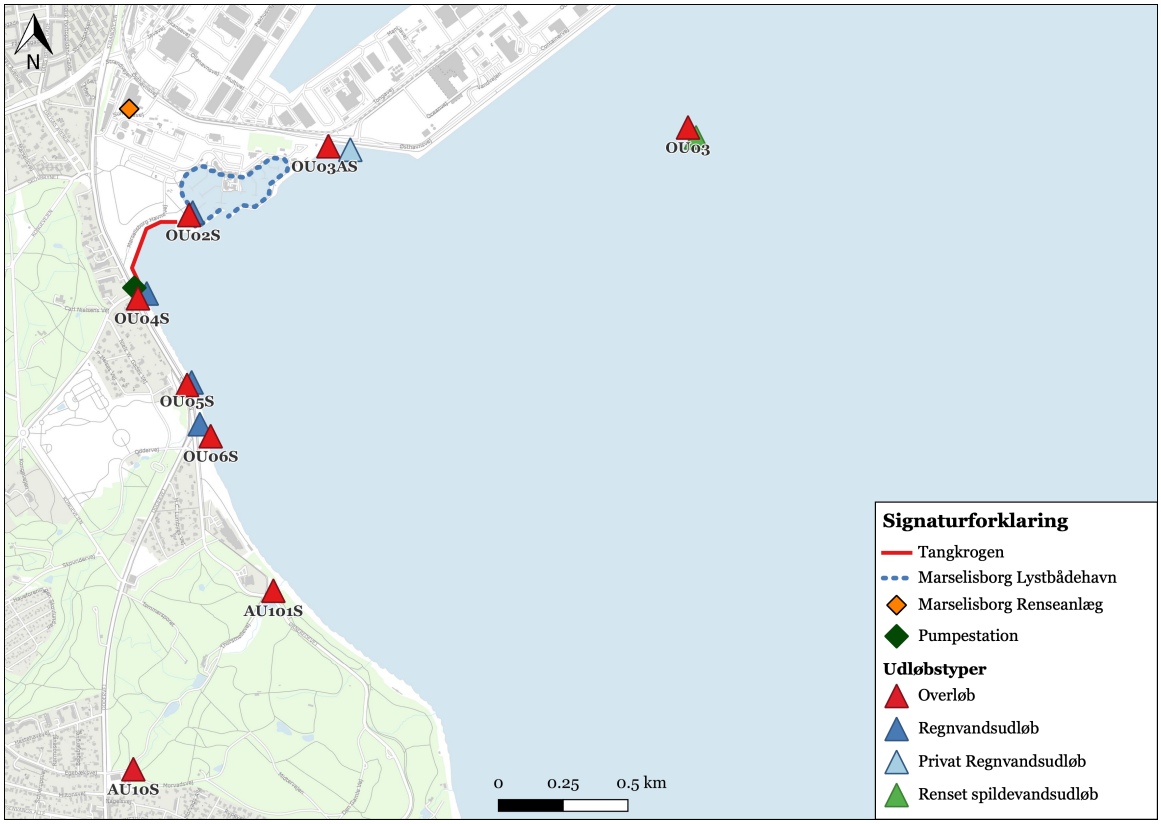
2.2 Kilder til ferskvand og forurening

Fersk spildevand indeholdende coliforme bakterier og streptokokker tilledes Tangkrogen via overløb fra det fælleskloakerede afløbsnet i området og Marselisborg Renseanlæg. Figur 2.2 viser kloakoplandet omkring Tangkrogen og i Aarhus by. Det fremgår af figuren, at en stor del af området omkring Tangkrogen og Aarhus Havn er fælleskloakeret.



Figur 2.2: Kloakoplandet omkring Tangkrogen og i Aarhus by (Aarhus Kommune, 2021a).

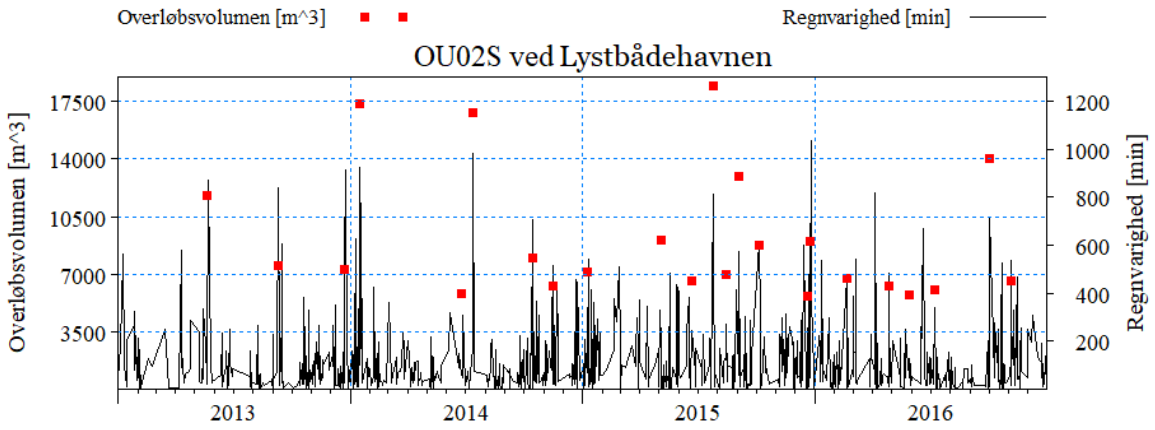
Ved kraftige regnhændelser aflastes systemet vha. overløb til bl.a. Tangkrogen, jf. figur 2.3. Udover overløb fra afløbssystemet, forekommer der også overløb lidt nordøst for Tangkrogen, hvor Marselisborg Renseanlæg, der er markeret med orange på figur 2.3, har to udløb. Det ene er et udløb, der udleder renset spildevand til Aarhus Bugt, mens det andet er et overløb, der udleder urenset spildevand i de tilfælde kapaciteten er opbrugt på renseanlægget.



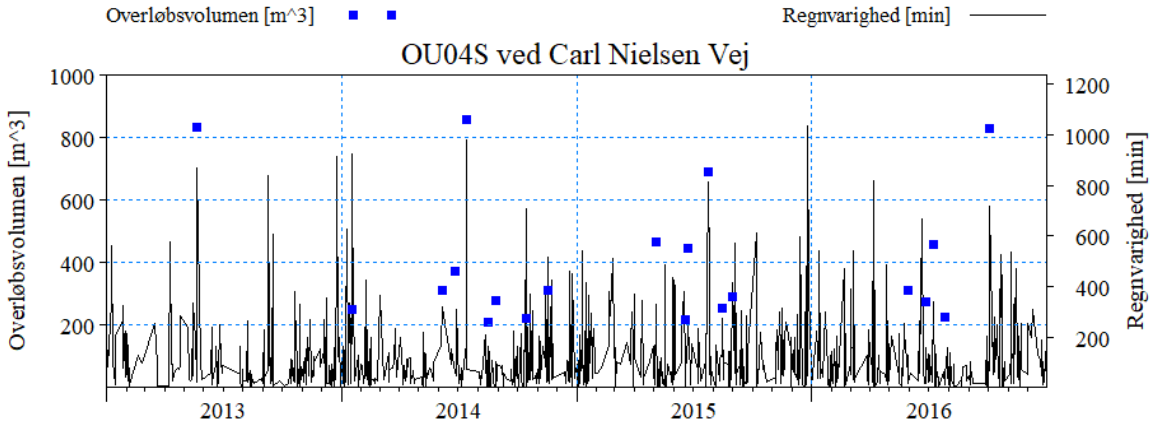
Figur 2.3: Potentielle kilder til forurening af badevandskvaliteten ved Tangkrogen (SEGES, 2020).

Aarhus Kommune anslår, at renseanlægget har 77 overløb om året med urenset spildevand, hvilket i år 2020 svarede til en samlet årlig udledningsmængde på 139.497 m^3, mens bygværket OU02S ved Marselisborg Lystbådehavn i år 2020 havde seks overløb svarende til en årlig udledningsmængde på 1.783 m^3 (Aarhus Kommune, 2021b; SEGES, 2020). Det nøjagtige antal overløb og udledningsmængde vides ikke for de resterende overløb på figur 2.3. Kommunen har lavet en række beregninger på den udledte overløbsmængde i årene 2013-2016 for renseanlæggets overløb OU03 samt overløbene OU02S og OU04S, jf. appendiks B (Aarhus Kommune, 2021b). Dette er gjort på baggrund af en række hændelser i en regnserie fra en målestation i Viby, jf. appendiks B.

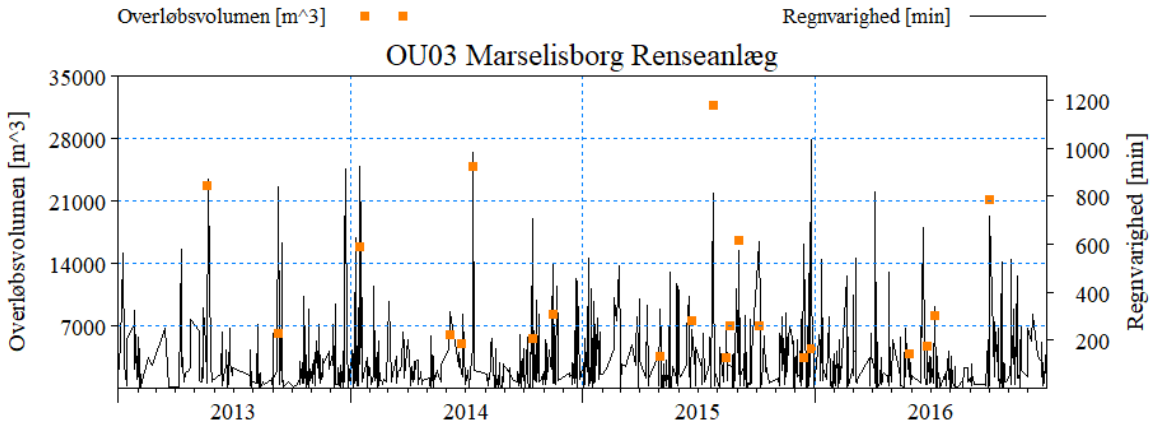
Figur 2.4 viser overløbsvolumenerne for OU02S placeret ved Lystbådehavnen, OU04S placeret ved Carl Nielsens Vej og renseanlæggets overløb OU03 placeret i Aarhus Bugt, jf. figur 2.3, og regnvarigheder i samme periode.



(a)



(b)

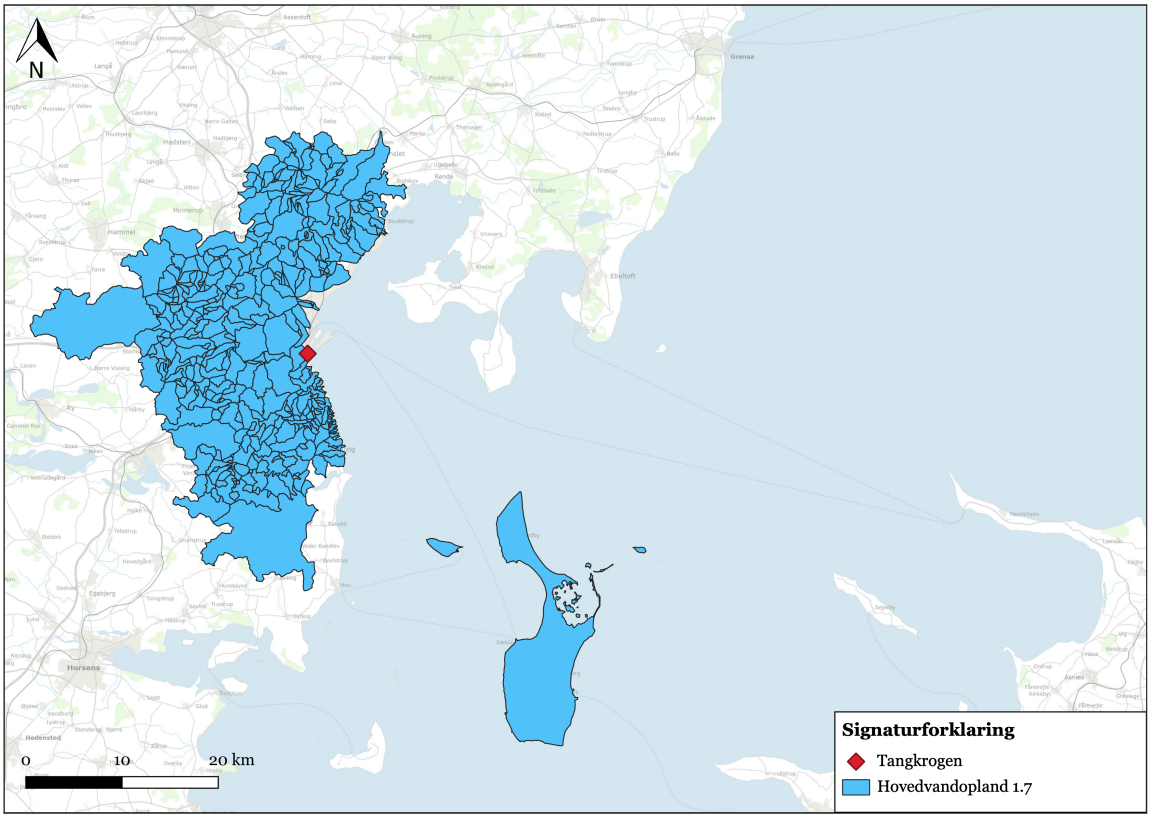


(c)

Figur 2.4: Beregnet overløbsvolumener for overløb fra fælleskloak placeret ved Lystbådehavnen (a) og Carl Nielsens Vej (b) samt overløbet i Aarhus Bugt tilhørende Marselisborg Renseanlæg (c), jf. figur 2.3, samt regnvarigheder fra Viby Regnserien.

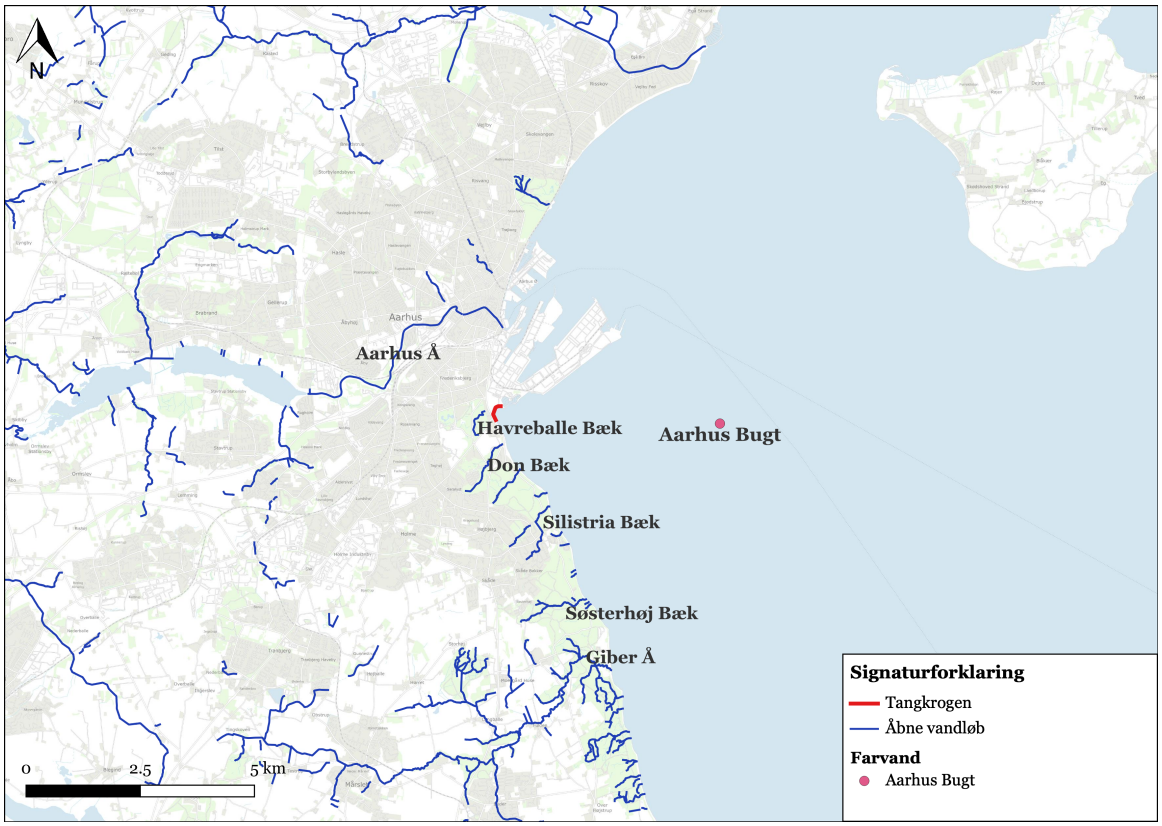
En høj regnvarighed resulterer ikke nødvendigvis i høje overløbsvolumener, jf. figur 2.4, men de dage, hvor der forekommer store overløbshændelser, er der typisk også en høj regnvarighed den samme dag. Dog er der også enkelte undtagelser som f.eks. den 21. maj 2013, hvor der udledes 11.767 m^3 fra OU02S og 22.652 m^3 fra OU03, hvilket svarer til overløbshændelser med gentagelsesperioder på hhv. 0,67 år og 1,33 år, jf. appendiks B. På denne dag er der registreret tre hændelser med varighederne 32, 20 og 82 min, og regndybden er for alle hændelser under 3 mm. Først dagen efter den 22. maj 2013 kommer der en kraftigere regnhændelse med en varighed på 869 min og en regndybde på 46,6 mm. Det tyder derfor på, at der forekommer fejl i dato og klokkeslæt for de beregnede overløbshændelser.

Udover overløb fra afløbsnettet og renseanlægget er der lokaliseret en række regnvandsudløb med udløb til Tangkrogen, jf. figur 2.3, der også bidrager med ferskvand til systemet. Regnvandsudløb udgør i sig selv en kilde til forurening af vandmiljøer i form af tungmetaller og miljøfremmede stoffer, men betragtes i dette projekt ikke som en ferskvandskilde, der kan påvirke badevandskvaliteten med sundhedsskadelige bakterier. På samme måde er nærområdets vandløb også en ferskvandskilde til Tangkrogen, og det er derfor også relevant at tage et kig på områdets vandopland.



Figur 2.5: Hovedvandopland 1.7 Aarhus Bugt (Aarhus Kommune, 2021a).

Tangkrogen er beliggende i hovedvandopland 1.7, kaldet Aarhus Bugt, der inkluderer området mellem Solbjerg og Norsminde i syd til Rønde i nord, og fra Helgenæs i øst til Lading i vest. Yderligere er Samsø og Tunø en del af vandoplandet. Vandoplandet har et samlet areal på ca. 772 km^2, og det største vandløb i oplandet er Aarhus Å, der er næsten 27 km langt, med udløb til Aarhus Havn og Aarhus Bugt, der er et dansk farevand beliggende ud for Aarhus by (Miljøministeriet, By- og Landskabsstyrelsen, 2010). Figur 2.5 viser Hovedvandopland 1.7.



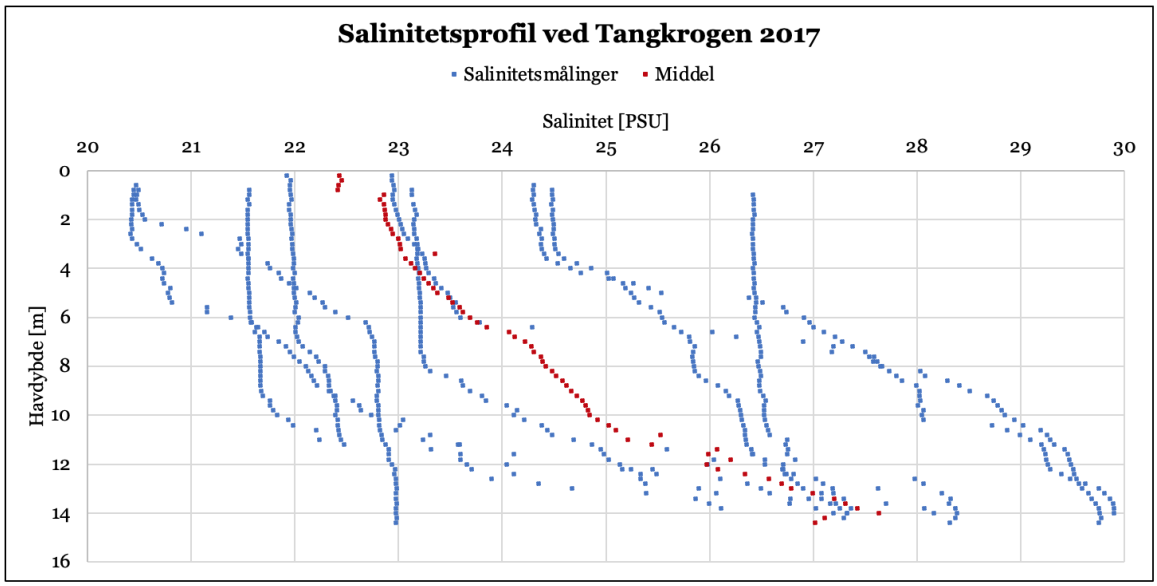
Figur 2.6: Vandløb i området omkring Tangkrogen og Aarhus Havn, heraf også Aarhus Å (Aarhus Kommune, 2021a).

Havreballe Bæk er et åbent vandløb, der på den sidste del af strækningen er rørlagt og har udløb til Tangkrogen. Vandløbet har en meget lille vandføring og udtørrer om sommeren (Skanderborg Kommune, 2017). Havreballe Bæk er det eneste vandløb med udløb til Tangkrogen, men en række små vandløb, karakteriseret som type 1 vandløb, har udløb til Aarhus Bugt i nærheden af Tangkrogen (Miljøministeriet, 2011; Aarhus Kommune, 2021a). De to nærmeste vandløb er beliggende omkring 700 m og 1,3 km fra Tangkrogen og er, hhv., Don Bæk og Varna Bæk, jf. figur 2.6. Derudover er der også tale om Silistria Bæk og Søsterhøj Bæk, der er placeret mellem Varna Bæk og Giber Å, der er et type 2 vandløb placeret ca. 5,5 km fra Tangkrogen (Miljøministeriet, 2011).

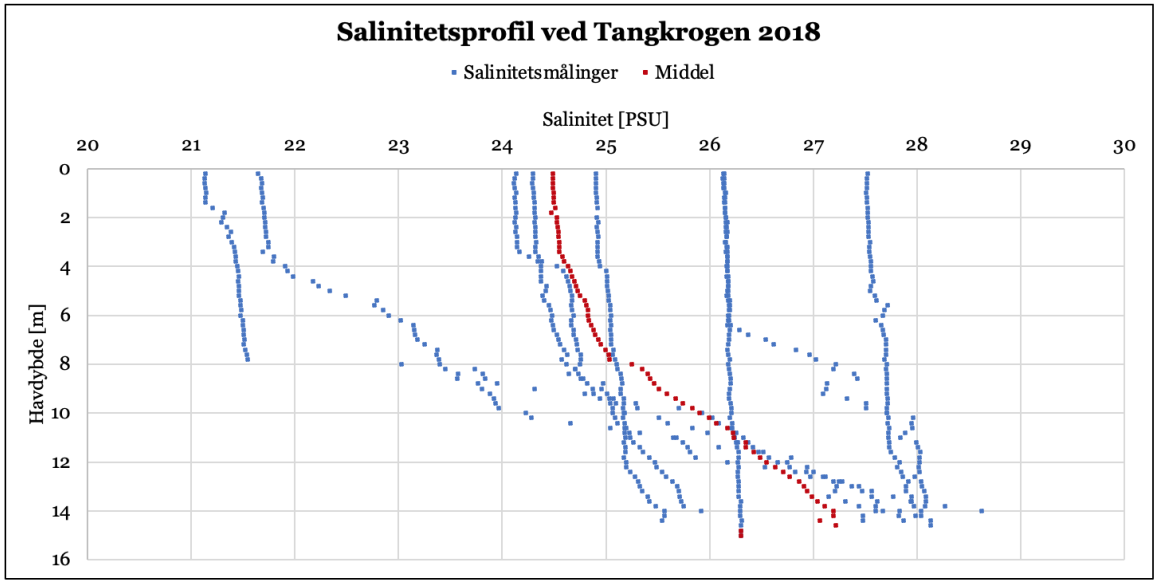
Ferskvandskilder som overløb, regnvandsudløb og vandløb påvirker systemets saltholdighed i vandsøjlen, og derudover er udbredelsen af det tilførte ferskvand styret af bugtens strømningsforhold, der påvirkes af vind og tidevand. Det er derfor relevant at undersøge systemets fysiske forhold.

2.3 Fysiske forhold

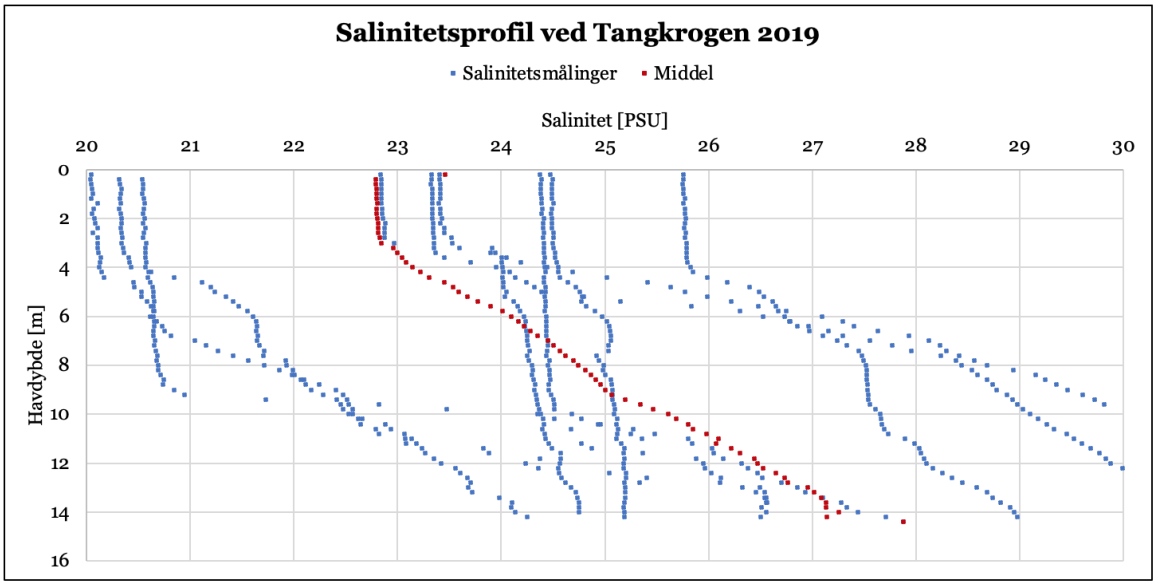
Udover bakteriekoncentrationen, måler kommunen også på vandets ledningsevne, der er et mål for den totale ionstyrke i havvandet (Miljøstyrelsen, 2006). Ledningsevnen indikerer derfor noget om vandets saltholdighed, der vil falde, når ferskvand, for eksempel i form af spildevand, tilføres det salte havvand. Figur 2.7 viser dybdevariationen i salinitet for årene 2017, 2018 og 2019, der er de tre seneste år med måledata, ved målestationen ARH170084 beliggende tæt ved Tangkrogen. Lokationen for den pågældende målestation er vist på figur A.1 i appendiks A.



(a)



(b)



(c)

Figur 2.7: Salinitetsmålinger fra målestationen ARH170084 samt middelværdier til hver dybde. Data er hentet fra Danmarks Miljøportal (2021).

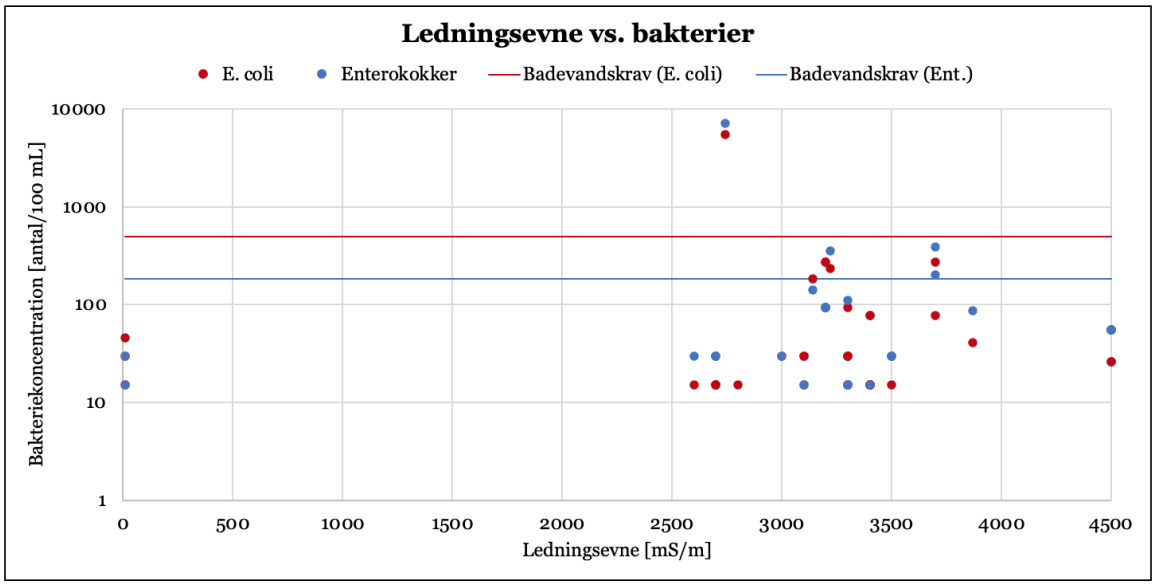
Der er foretaget salinitetsmålinger i dybden 0,2-14,4 m med et interval på 0,2 m i årene 2017 og 2019, mens der i år 2018 er foretaget målinger i dybden 0,2-15 m med samme interval på 0,2 m. Generelt, set over hele vandsøjlen, ligger saliniteten i et område på 20-30 PSU i årene 2017 og 2019, mens intervallet er mindre i år 2018, hvor saliniteten ligger mellem 21-29 PSU.

Tendensen i år 2018 er generelt anderledes sammenlignet med de to andre år, og dette ses ved, at der ved nogle prøvetagninger måles en højere salinitet i overfladen i dette år end i 2017 og 2019. Der er for eksempel målt en salinitet på over 27 PSU i de første 4 m af vandsøjlen, hvilket ikke gør sig gældende for de andre år. Derudover observeres der også, at den beregnede middel, som er vist med rød på figur 2.7, ikke varierer ligeså meget i dybden i de første 8 m i år 2018 som den gør i år 2017 og 2019. Den anderledes tendens for år 2018 forklares med, at året var tørt og vindstille (Cappelen, 2019), jf. appendiks C. Den manglende regn vil have haft indflydelse på frekvensen af tilførslen af ferskvand fra overløb, regnvandsudløb og vandløb, og det er derfor muligt, at saliniteten ikke er blevet sænket så meget som ellers i overfladen. Derudover vil de vindstille forhold have indflydelse på vindomrøringen i overfladen, hvilket også vil påvirke saliniteten i havvandet.

Udover den observerede effekt fra vejret, observeres det også af målingerne, at saliniteten øges med dybden. Det tyder derfor på, at der kan forekomme lagdeling, omend den ikke er udpræget ved en bestemt dybde. Figur A.2 viser salinitetsmålingerne på figur 2.7 opdelt i målinger foretaget om sommeren og målinger foretaget i efteråret. For alle tre år gælder der, at der i efteråret er taget målinger, hvor saliniteten ikke varierer særlig meget i dybden, og lagdelingen eksisterer nærmest ikke. Der er dog også dage i efteråret, hvor saliniteten varierer meget i dybden. Om sommeren er der altid en væsentlig variation i dybden, undtagen for nogle få dage, hvor der mangler målinger fra 8 m og ned. Det er muligt at kraftigere vind i efteråret resulterer i en større opblanding, hvorfor saliniteten ikke udviser en stor variation, mens der om sommeren er mere vindstille, hvilket er ensbetydende med, at opblandingen af ferskvand i vandsøjlen er langsommere.

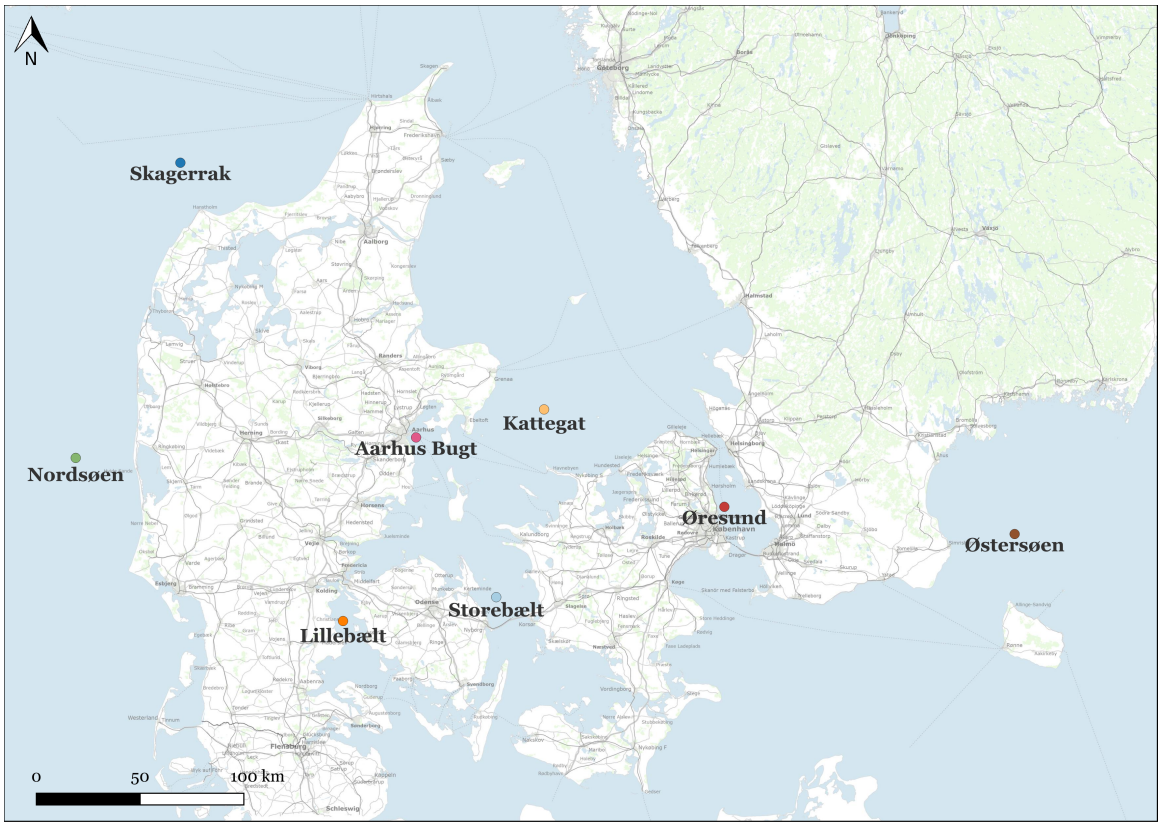
I år 2017 og 2019 forekommer de helt høje salinitetsmålinger på 29 og 30 PSU først efter 8 m. Det fremgår også af figur 2.7, at der er målt vidt forskellige saliniteter til en given dybde i løbet af året. Eftersom lagdelingen kan påvirkes af vejret ift. regnhændelser, der resulterer i ferskvandstilførsel, og vindenergi, der opblander vandet, er det muligt, at en eventuel lagdeling kan variere afhængig af årstiden.

Tilstedeværelsen af ferskvand i det marine miljø, vil i princippet kunne afspejles i vandets ledningsevne. Figur 2.8 viser den målte ledningsevne samt bakteriekoncentrationen målt i samme omgang ved Tangkrogen i årene 2018-2020. I princippet vil en lav ledningsevne tyde på en høj bakteriekoncentration og omvendt (Kristensen og Heggdal, 2019).



Figur 2.8: Sammenhæng mellem ledningsevne og bakteriekoncentration for badesæsonerne 2018-2020. Badevandskravet på figuren er for tilfredsstillende kvalitet ud fra en vurdering af 90-percentilen for både *E. coli* og enterokokker, jf. tabel 1.1.

Tangkrogen er beliggende ud til Aarhus Bugt og ligger placeret midt i mellem det salte Nordsøvand og det brakke Østersøvand tæt på Kattegat, hvor saliniteten påvirkes af tilstrømning fra Østersøen og Nordsøen (Miljøministeriet, By- og Landskabsstyrelsen, 2010), jf. figur 2.9. Vind og tidevand påvirker havets overfladestrømning, mens dybere strømning er påvirket af temperatur- og salinitetsforskelle.

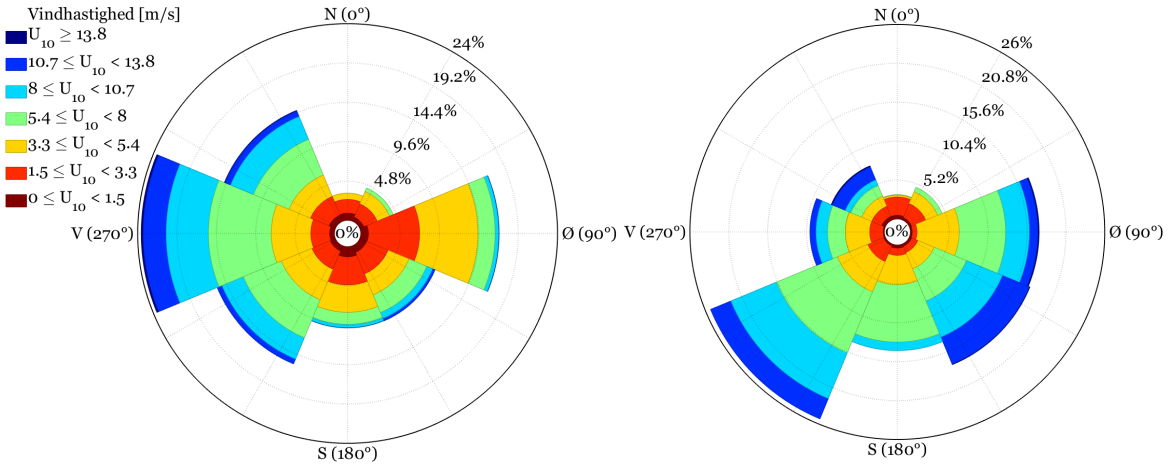


Figur 2.9: Placering af danske farvande, der alle er forbundet, og dermed er med til at styre de fysiske forhold, der forekommer i Aarhus Bugt, hvis placering også er vist.

Vind og tidevand har indflydelse på strømningsforholdene og dermed på udbredelsen af ferskvand. Særligt er det relevant, hvordan disse forhold påvirker cirkulationen af tilført spildevand, der kan forringe badevandskvaliteten ved Tangkrogen. Generelt gælder der for danske farvande, at strømretningen er mere sydgående end nordgående, omend gælder der for Nordsøen, at strømretningen er overvejende i sydøstlig retning, da Nordsøen er meget påvirket af vestenvind (Hansen et al., 2012). Nordsøen og området omkring Skagerrak er generelt meget eksponeret for vind, og der er stor dynamik i vandmasserne, hvorfor der ikke findes nogen udpræget lagdeling i Nordsøen.
Kattegat modtager store mængder saltholdigt havvand fra Nordsøen gennem Skagerrak, hvor det tilføres som bundvand pga. dets tyngde. Kattegat modtager også havvand fra Østersøen, som transporteres nordgående i overfladen, da havvandet fra Østersøen er mindre saltholdigt end havvandet fra Nordsøen. Dette skyldes, at der til Østersøen er en stor ferskvandstilførsel (Hansen et al., 2012). Da Nordsøvandet er placeret under Østersøvandet i Kattegat, og densitetsforskellen er stor, skabes der lagdeling, hvilket ofte ses i danske farvande, da vandene er forholdsvis beskyttede. Denne lagdeling kan brydes vha. opblanding fra vinden, men dette kræver meget energi (Hansen et al., 2012). Det salte bundvand fra Nordsøen transporteres gennem Kattegat, bælterne og Øresund mod Østersøen, men opblandingen mellem det saltholdige Nordsøvand i bunden og det brakke Østersøvand i overfladen er en langsom proces, og der er derfor, modsat Nordsøen, tendens til lagdeling i Østersøen (Hansen et al., 2012).

Aarhus Bugt ligger officielt i Bæltehavet, der er en del af Østersøen. Den gennemsnitlige opholdstid af vand i bugten er ca. 12-19 dage i efteråret og vinterhalvåret (Hansen et al., 2012). I lukkede kystnære områder som Aarhus Bugt, er opholdstiden typisk styret af ferskvandstilførslen, mens den i større farvande typisk er styret af vind- og strømningsforhold (Hansen et al., 2012). Vandudskiftningen i bugten er primært barotrop, resulterende i, at tidevandet er med til at omflytte vandmasserne i Aarhus Bugt fremfor temperatur- og salinitetsforskelle. Dog er tidevandsamplituden kun ca. 20 cm, hvilket er ensbetydende med, at omflytningen af vand mest er intern i bugten. Størstedelen af vandudskiftningen mellem bugten og det omkringliggende vand sker ved Sletterhage (Christiansen et al., 1994). Udover tidevand kan vind også have indflydelse på strømmen, og der er ved Sletterhage opsat en vindmåler, hvis placering er vist på figur 4.3.

Af figur 2.10a fremgår en fordeling af vindforhold og -retning fra målestationen ved Sletterhage Fyr for alle dage i badesæsonerne 2018-2020, jf. figur 2.1, mens fordelingen af vindforhold og -retning på regnvejrsdage i de nævnte badesæsoner fremgår af figur 2.10b. Målestationen er placeret ud til Aarhus Bugt og vurderes derfor repræsentativ for vindforholdene ved Tangkrogen.



(a) For alle dage

(b) Regnvejrsdage

Figur 2.10: Fordeling af vindretning og -hastigheder i badesæsonerne 2018-2020 i Aarhus. Data er hentet fra en målestation ved Sletterhage Fyr, og målestationens placering fremgår af figur 4.3. Hyppighed af vindhastighed og -retning fremgår i appendiks C.

Det fremgår af figur 2.10a, at det oftest blæser fra vest og øst på en vilkårlig dag ved Tangkrogen, samt at kraftige vindhastigheder over 10,7 m/s hovedsageligt opstår ved vestenvind. Sandsynligheden for, at der blæser fra vest på en vilkårlig dag ved Tangkrogen, er næsten 24 %. Den næsthyppigste forekommende vindretning er østenvind, der opstår 17 % af tiden, mens den mindst forekommende vindretning er nordenvind, der kun opstår ca. 3,5 % af tiden. Det observeres også af figuren, at vindhastigheder resulterende i frisk vind ($8 \leq U_{10} \leq 10{,}7$) og hård vind ($10{,}7 \leq U_{10} \leq 13{,}8$) typisk forekommer, når det blæser fra sydvest, vest og nordvest. På vand defineres frisk vind i følge (DMI, 2022b) som middelstore, langagtige bølger med mange skumtoppe, mens hård vind på vand defineres som store bølger og hvide skumtoppe overalt. Disse forhold indbyder ikke til badning, og det antages derfor, at stranden ikke er velbesøgt på dage med frisk og hård vind.

Det er relevant at kigge nærmere på vindens retning på dage med regn, da tilførsel af urenset spildevand fra overløb vil ske som følge af regnhændelser. Det formodes, at stranden ikke er benyttet i samme omfang, når det regner, som den er, når der er højt solskin. Dog kan stranden sagtens benyttes efter en regnhændelse, når vejret er klaret op, hvilket kan resultere i, at badende udsættes for sundhedsskadelige bakterier fra spildevand. Det fremgår af figur 2.10b, at der oftest blæser fra sydvest på regnvejrsdage ved Tangkrogen, dog opstår der i flere tilfælde kraftige vindhastigheder fra sydøst og øst. Sandsynligheden for, at der blæser fra sydvest på en regnvejrsdag er mere end 25 %, mens vind fra sydøst og øst på en regnvejrsdag opstår ca. 17 % af tiden. Det er også fra sydøst, at kraftige vindhastigheder over 10,7 m/s typisk opstår. Sandsynligheden for, at det blæser fra nord eller nordøst på en regnvejrsdag er lille og er kun på hhv. ca. 3 % og næsten 5 %, og når det blæser fra nord eller nordøst er vindhastigheden altid mindre end 8 m/s. Det vil sige, at disse vindretninger højest skaber en jævn vind ($5{,}4 \leq U_{10} \leq 8$), der på vand defineres som mindre bølger med hyppige skumtoppe (DMI, 2022b).

De fysiske forhold og nærområdets overløb ved Tangkrogen danner baggrund for de problematikker Aarhus Kommune har med badevandskvaliteten ved Tangkrogen. Derfor opstilles der i dette speciale en problemformulering, der tager udgangspunkt i en række spørgsmål omhandlende de dårlige badevandsprognoser ved Tangkrogen.

3 | Problemformulering

Tangkrogen er et velbesøgt badested i Aarhus by, men på grund af overløb med spildevand i Tangkrogens nærområde er badevandsprognoserne ofte dårlige i badevandssæsonen, og der varsles 25-30 lukkedage i løbet af en sæson (Starcke et al., 2021). Det skaber en del problemer for Aarhus Kommune, der har pligt til at føre tilsyn med badevandskvaliteten mhp. at sikre badenes sundhed. Der er placeret syv overløbsbygværker i Tangkrogens nærområde, præsenteret i afsnit 2.2 på figur 2.3, og det er disse overløbsbygværker, der udgør den umiddelbare risiko for den varslede ringe badevandskvalitet ved Tangkrogen.

Dette speciale har til formål at undersøge problematikken omkring de dårlige badevandsprognoser ved Tangkrogen bl.a. ved at undersøge, hvilke overløbsbygværker og meteorologiske forhold, der udgør en risiko for dårlig badevandskvalitet. Derudover har specialet også til formål at undersøge fremtidsperspektiver for Tangkrogen mhp. at opnå en bedre badevandskvalitet. Dette gøres på baggrund af en 3D strømningsmodel, der opstilles i MIKE 3. Strømningsmodellen medtager, modsat kommunens nuværende badevandsudsigt, overløbene OU04S, OU05S, OU06S og OU03AS samt de allerede medtagne overløb i kommunens model: OU02S, OU03 og AU101S. Det er valgt at medtage alle nærområdets overløb med det formål at få det fulde overblik over forureningssituationen ved Tangkrogen.

Der tages udgangspunkt i følgende spørgsmål:

Spørgsmål №1:

Hvor omfattende er problemet med dårlig badevandskvalitet ved Tangkrogen?

Spørgsmål №2:

Hvilke overløbsbygværker ved Tangkrogen og i nærområdet giver anledning til dårlig badevandskvalitet?

Spørgsmål №3:

Hvilken betydning har meteorologiske forhold for spredning af E. coli?

Spørgsmål №4:

Hvad bør der gøres for at sikre godt badevand ved Tangkrogen i fremtiden?

II

Modellering af strømningsforhold ved Tangkrogen

Del II præsenterer en strømningsmodel over Tangkrogen, der inddrager systemets fysiske forhold med henblik på at modellere belastningen af *E. coli* ved badestedet.

Kapitel 4 Opsætning af strømningsmodel 26

4.1 Modelstruktur og -geometri
4.2 Implementering af vandstands- og vinddata
4.3 Hydrodynamiske parametre
4.4 Sammenligning af model og observationer
4.5 Gridafhængighed
4.6 Overløbsbygværker og modellering af aflastning
4.7 Salinitet i modelleringsområdet
4.8 Modellering af transport og henfald af bakterier

Kapitel 5 Scenariemodellering 37

5.1 Tidevandsforhold og tidspunkt for aflastning
5.2 Analyse af vindhastighedens effekt på udbredelse

4 | Opsætning af strømningsmodel

For at få indsigt i strømningsforholdene omkring Tangkrogen, som er med til at styre udbredelsen af spildevand, opstilles en strømningsmodel af området omkring Tangkrogen i Aarhus Bugt. Strømningsmodellen er en numerisk 3D model og anvendes i modelleringsprogrammet MIKE 3 Flow Model FM (DHI, 2017b). Det vælges at opbygge en model i tre dimensioner, da det ferske spildevand vil have effekt på den naturlige dybdevariation i salinitet. Modeller i to dimensioner anvender en gennemsnitsværdi for salinitet i dybden, og dette er ikke tilstrækkeligt til at modellere udbredelsen af spildevand, da modellen skal kunne adskille det ferske spildevand med en lav salinitet fra det tunge saltvand med en høj salinitet.

For at kunne afspejle virkeligheden bedst muligt med modellen kræves relevante data, heraf batymetri, vandstands- og vinddata, vandtilførsel fra forureningskilder, salinitet samt hydrodynamiske koefficienter. Implementering af data og opsætning af strømningsmodellen præsenteres i dette afsnit.

4.1 Modelstruktur og -geometri

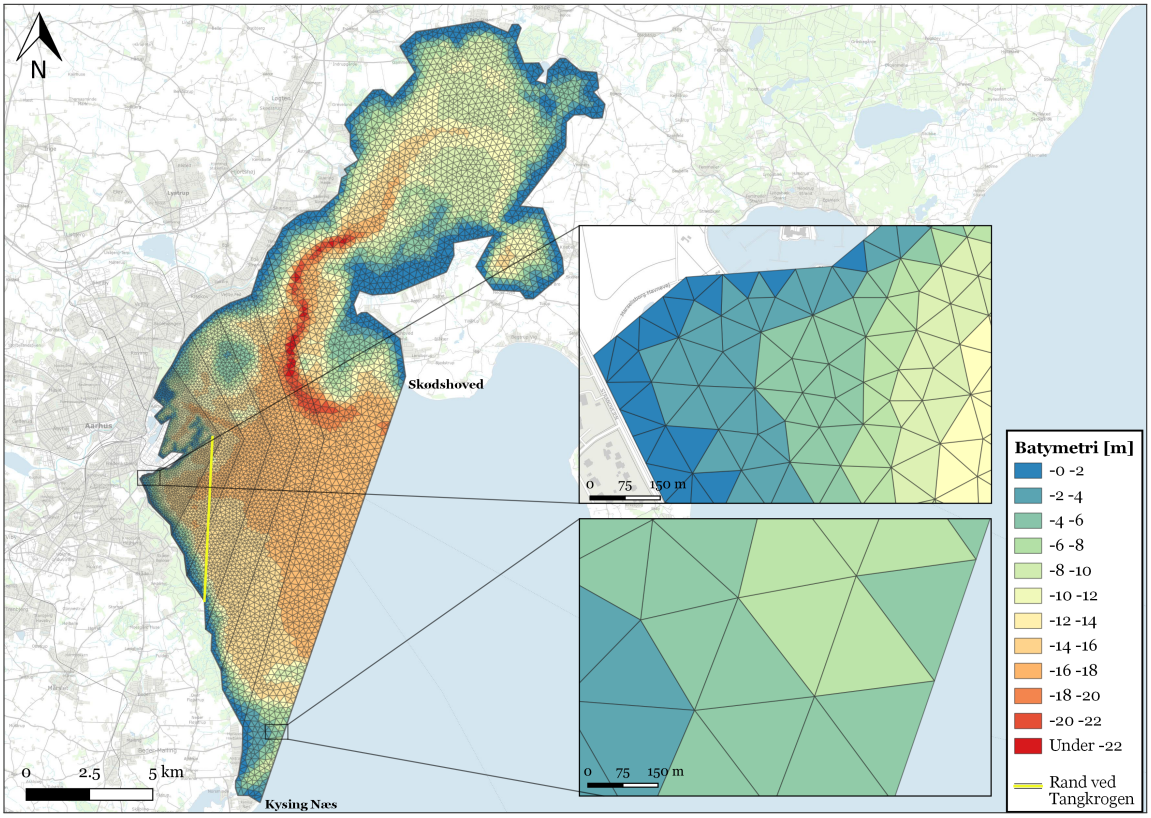
Strømningsmodellen er opbygget således, at der arbejdes med to forskellige beregningsnet. Begge er opsat som et ustruktureret beregningsnet med knudepunkter, der beskriver batymetrien på baggrund af interpolering af batymetridata udleveret af Farvandsvæsenet (u.å.). Beregningsnettene er opbygget af trekantede elementer og er dermed fleksible net i forbindelse med beregninger, hvor løsningsmetoden cellecentreret finit volumen bliver anvendt (DHI, 2017b). Cellestørrelse og -vinkler i det enkelte net har stor indvirkning på beregningshastigheden. Vandstrømningen vil blive beskrevet mere detaljeret med et finere net med flere beregningselementer sammenlignet med et grovere net, dog på bekostning af beregningstiden.

Modellens tidslige opløsning er styret af Courant-Friedrich-Lévy-tallet (CFL), der sikrer, at vandet ikke kan strømme længere end én cellelængde per tidsskridt. CFL-tallet bør være mindre end 1 for stabile numeriske beregninger, hvorfor kriteriet sættes til 0,9 i denne strømningsmodel. Jo mindre elementerne er, desto mindre tidsskridt anvendes under celleberegning for at opretteholde CFL. (DHI, 2017b)

For at beskrive strømningsforholdene omkring Tangkrogen, er det nødvendigt med et meget fint beregningsnet inde ved Tangkrogen, hvor overløbene er placeret. Strømningerne i nærområdet til Tangkrogen er styret af strømningerne i Aarhus bugt, hvorfor der i bugten arbejdes med et stort og groft inddelt modelleringsområde, hvis formål er at simulere en randbetingelse til et mindre og finere inddelt modelleringsområde omkring Tangkrogen.

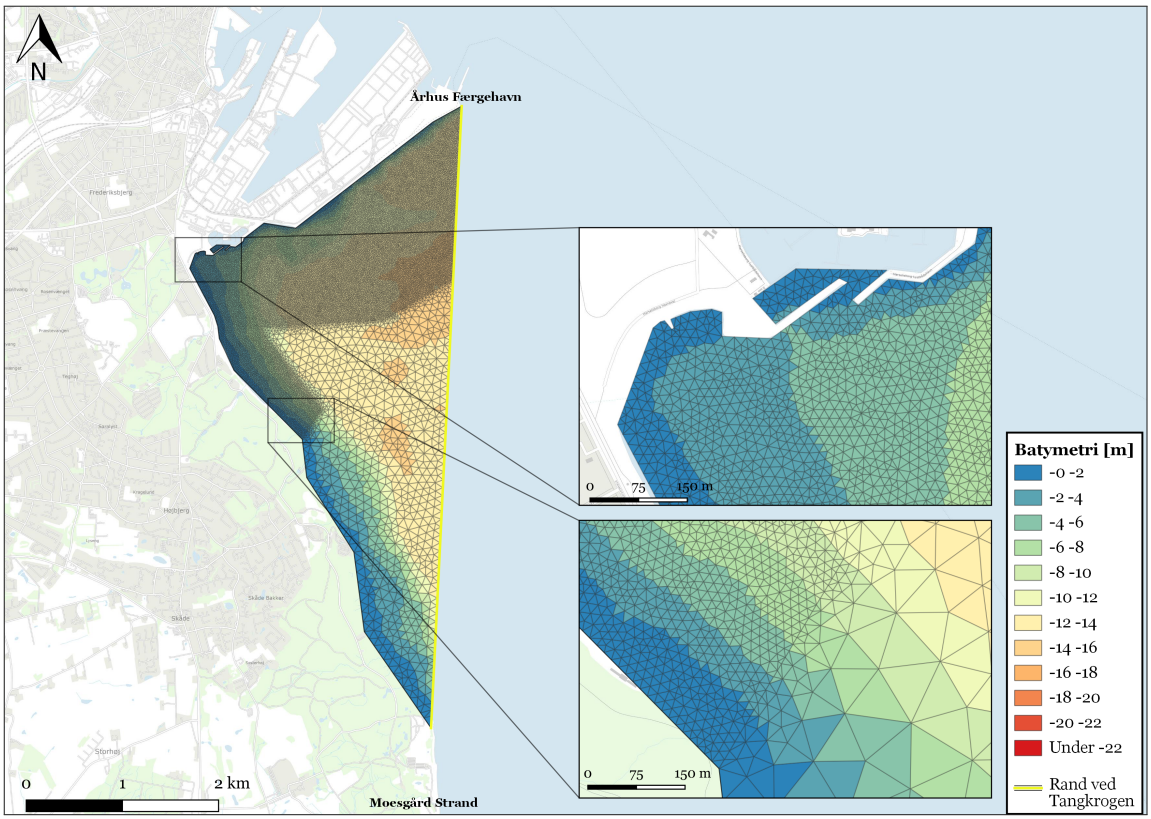
Det større modelleringsområde er afgrænset fra Kysing Næs til Skødshoved, jf. figur 4.1. Beregningsnettet er lavet således, at trekanternes mindst mulige vinkel er 26°, og nettet er inddelt i seks zoner, som er genereret således, at zonen nær Tangkrogen har en maksimal cellestørrelse på 5.000 m^2, og zonerne herefter har maksimale cellestørrelser på hhv. 10.000 m^2, 15.000 m^2, 20.000 m^2, 30.000 m^2 og 40.000 m^2, hvilket fremgår på figur 4.1. Ved udjævning optimeres elementstørrelser- og vinkler, således de er gjort så store som muligt for at optimere beregningstiden (DHI, 2017b).

I nærheden af Kysing Næs på det store beregningsnet, jf. figur 4.1, er der placeret en vandstandsmåler, hvor data herfra benyttes på randen mellem Kysing Næs og Skødshoved samt til de hydrodynamiske beregninger. Anvendelse og implementering af vandstandsdata beskrives i afsnit 4.2.



Figur 4.1: Det ene ud af to beregningsnet samt interpoleret batymetri af modelleringsområdet anvendt til strømningsmodellen i MIKE 3. Den simulerede randbetingelse for den finere model er markeret med gul.

Det mindre og finere modelleringsområde, jf. figur 4.2, er defineret af landegrænser og havnelinjer, men også af den simulerede rand i Aarhus Bugt fra Aarhus Færgehavn i nord til Moesgård Strand i syd, der er vist med gul på figur 4.1. Det er valgt at simulere vandstanden på randen, da der ikke er placeret en vandstandsmåler i den umiddelbare nærhed. Beregningsnettet i denne model er inddelt i to zoner med hver sin maksimalt mulige cellestørrelse, hvor trekanternes mindst mulige vinkel også er på 26°. De maksimalt mulige cellestørrelser i de to zoner er på hhv. 150 m^2 og 5.000 m^2, svarende til at siderne af de trekantede celler er hhv. knap 20 m og 110 m, hvilket betyder, at udbredelsen af bakteriekoncentrationer kan beskrives respektivt 20 m og 110 m ad gangen.



Figur 4.2: Det andet ud af to beregningsnet samt interpoleret batymetri af modelleringsområdet anvendt til strømningsmodellen i MIKE 3.

De meget fine celler er oprettet omkring overløbene ved at lave en bred zone af fine celler omkring renseanlæggets overløb og en smallere zone af fine celler omkring de overløb, der er placeret langs kysten syd for Tangkrogen. Yderligere er nærområdet helt inde ved Tangkrogen, hvor der også er placeret adskillige overløb, også omfattet af de meget fine celler. I den anden zone indenfor modelleringsområdet inden Moesgård Strand er cellerne lavet en del større for at mindske beregningstiden. Det vurderes, at eventuelt spildevand, der udbredes til dette område, er så langt væk fra badestranden ved Tangkrogen, at der her ikke er behov for en finere inddeling.

For både det fine og grove beregningsnet er dybden inddelt som et sigmadomæne med 10 lag, hvor tykkelsen af disse lag varierer med 1/10 af dybden af området i alle punkter.

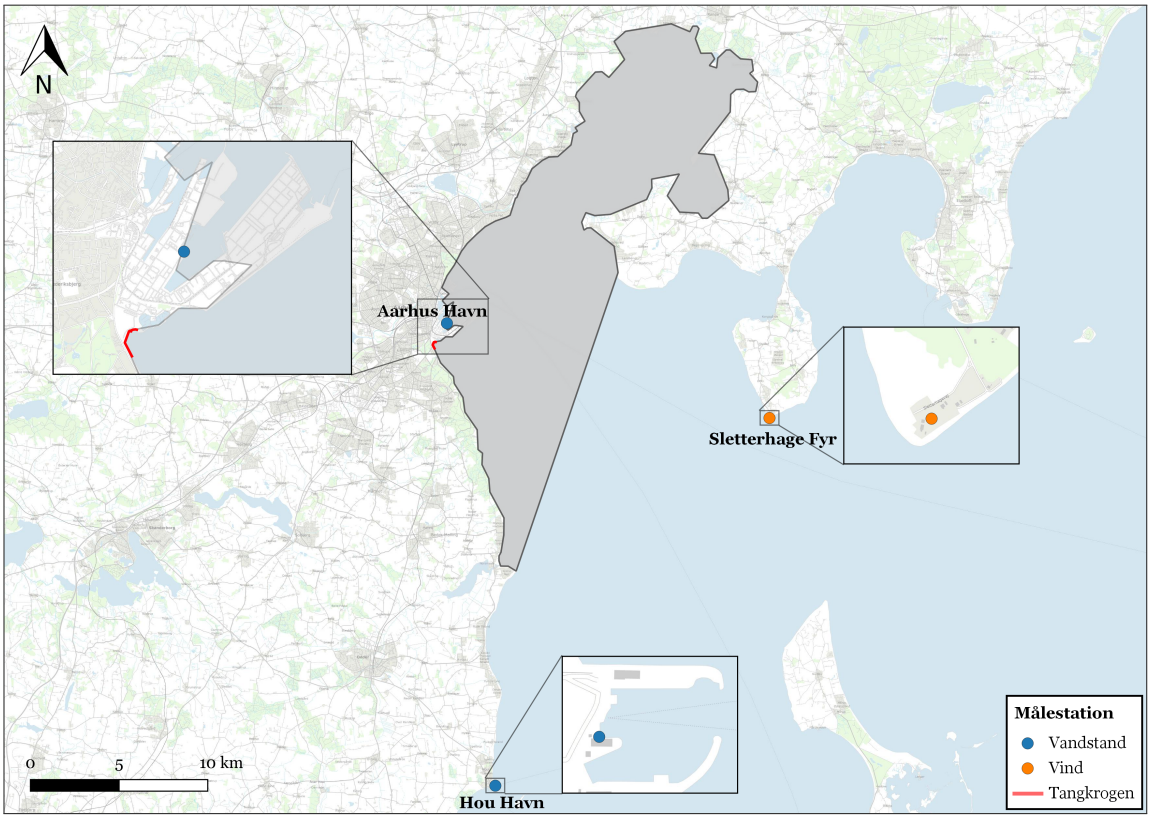
4.2 Implementering af vandstands- og vinddata

Data i form af vandstand og vind er hentet fra DMI's frie oceanografiske og meteorologiske observationsdata for år 2021 (DMI, 2022a), da der simuleres for vilkårlige dage i året. Observationsdata er rå-data og er derfor ikke kvalitetskontrolleret eller på anden vis behandlet af DMI, hvorfor fejlbehæftede målinger kan forekomme. Der er foretaget en lineær interpolering mellem data for at opnå et fuldendt datasæt for hele år 2021.

Afgrænsningen mellem Kysing Næs og Skødshoved er defineret som modellens randbetingelse, når der gøres brug af beregningsnettet vist på figur 4.1, hvor vandstandsdata fra Hou Havn er anvendt som konstant langs randen, men varierende i tid.

Målestationen i Hou Havn er vist på figur 4.3 og har målt vandstanden hvert 10. minut.

For at validere modellen til yderligere anvendelse er der anvendt vinddata fra Sletterhage Fyr samt vandstandsdata inde ved Aarhus Havn, som bliver sammenlignet med den modellerede vandstand ved samme punkt som målerens placering, jf. afsnit 4.4, når der anvendes et beregningsnet som vist på figur 4.1. Data er ligeledes målt på 10 minutters basis, og placering af målerne fremgår på figur 4.3.



Figur 4.3: Placering af vandstands- og vindmålere.

Det forventes, at placeringen af målestationerne ved Hou og Sletterhage Fyr kan introducere usikkerhed i modellen, da stationerne er placeret længere væk fra selve modelleringsområdet.

4.3 Hydrodynamiske parametre

Strømninger i modellen er styret af 3D *shallow-water*-ligninger, som tager udgangspunkt i en antagelse om hydrostatisk tryk. Derudover er strømninger i modelleringsområdet påvirket af en luft/vand-friktionskoefficient, hvirvelviskositet og bundruhed. Disse parametre er i virkeligheden afhængige af adskillige forhold og kan dermed variere fra område til område.

Påvirkningen fra vind på overfladestrømningen er betinget af en luft/vand-friktionskoefficient, som yderligere er betinget af vindens hastighed samt vandets temperatur. Ved vindhastigheder under 5 m/s er koefficienten især temperaturafhængig. Ved tilfælde af køligere vandtemperatur end lufttemperatur reduceres koefficienten, hvorimod varmere vandtemperaturer bevirker en større friktionskoefficient.

Koefficientens sammenhæng med vindhastighed kan beregnes ved en empirisk formel, som fremgår af ligning (4.1). (Larsen, 2021)

$$c_D = (0{,}63 + 0{,}066 \cdot U_{10}) \cdot 10^{-3} \tag{4.1}$$

c_D	Luft/vand-friktionskoefficient [-]
U_{10}	Vindhastighed 10 m over vandoverfladen [m/s]

I modellen angives vindfriktionen som linært varierende mellem to værdier, udregnet ved ligning (4.1), der er baseret på laveste og højeste vindhastighed i det implementerede vinddata. Variationen af vindfriktionen fremgår i tabel 4.1.

Bundruheden angives i meter og har oftest en værdi mellem 0,01 - 0,3 m. En høj værdi angiver en høj friktion ved havbunden. Standardværdien i programmet er 0,05, hvilket DHI (2017b) beskriver som en forholdsvis glat havbund. Havbunden i modelleringsområdet består hovedsageligt af dynd, som antages at være en glat bund (GEUS, 2022). Oplysninger om havbunden og bundruheden i modelleringsområdet er ikke tilstrækkelig detaljeret, hvorfor der anvendes en konstant værdi for hele domænet, heraf standardværdien.

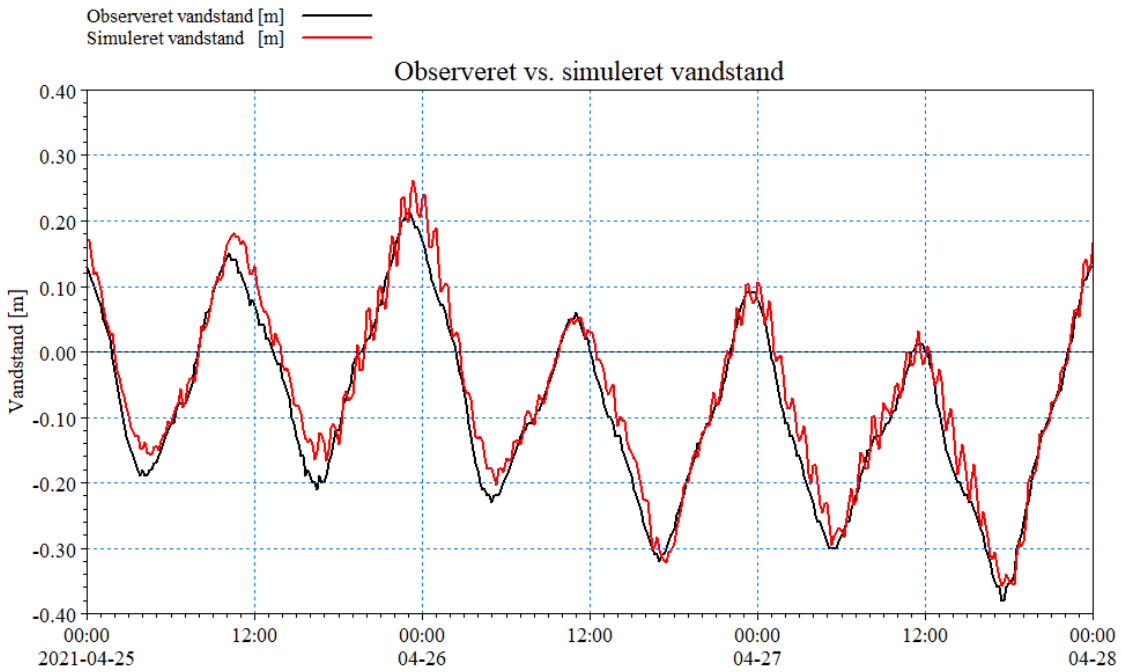
Turbulente strømninger og hvirvler i alle størrelser vil forekomme i modelområdet. De turbulente overførsler af momentum fra hvirvlerne medfører en forøgelse af intern væskefriktion. Sammenhængen mellem den interne væskefriktion og middelstrømningen kan beskrives ved indførelse af en hvirvelviskositet. I strømningsmodellen er der anvendt Smagorinskys formulering til at beskrive tidsvarierende horisontale hvirvelviskositeter i enkelte cellestørrelser. Til formuleringen indgår Smagorinskys koefficient, der typisk varierer mellem 0,02 og 0,5, hvor standardværdien i programmet er 0,28. Idet koefficienten er en kalibreringsparameter, er standardværdien anvendt som udgangspunkt.

Tabel 4.1: Hydrodynamiske koefficienter og parametre i strømningsmodellen.

	Format	**Værdi**	**Enhed**
Styrende ligninger	Konstant	*shallow-water*	-
Luft/vandfriktionskoefficient	Lineær variation	0,00065 og 0,002729	-
Hvirvelviskositet	Konstant	0,28	1/s
Bundruhed	Konstant	0,05	m

4.4 Sammenligning af model og observationer

Ved hjælp af et grovere, større beregningsnet er der simuleret en vandstand til randen af et finere, mindre beregningsnet som beskrevet i afsnit 4.1. For at validere strømningsmodellen, når der er implementeret et groft beregningsnet, jf. figur 4.1, sammenlignes den observerede vandstand fra en måler i Aarhus Havn med den simulerede vandstand i samme punkt, hvor måleren er lokaliseret i modellen, jf. figur 4.3.

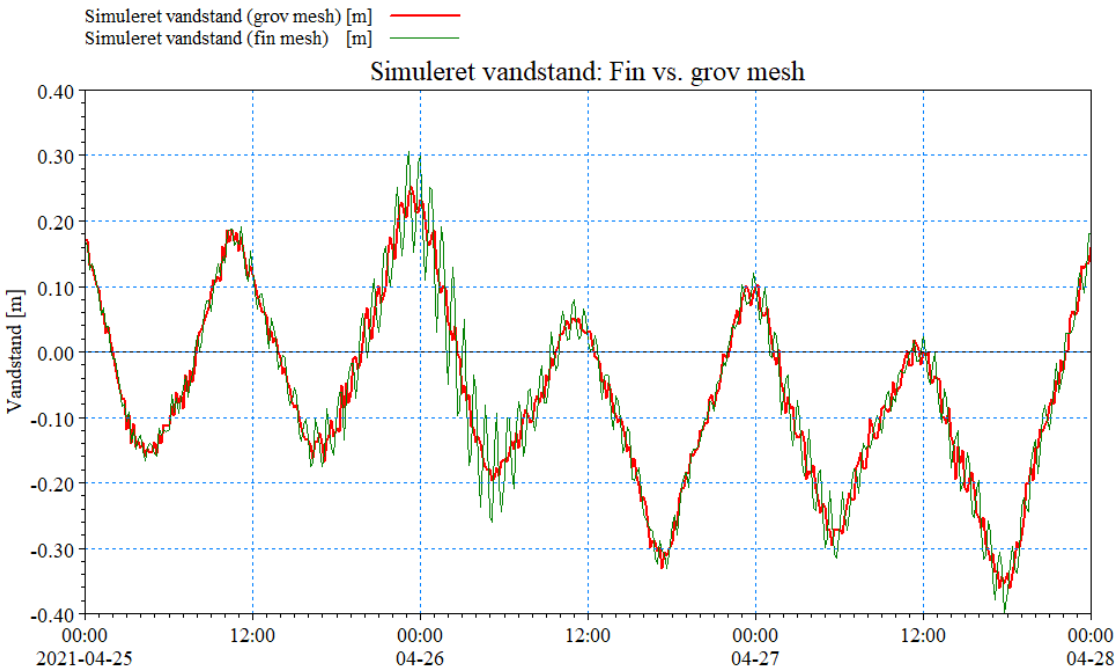


Figur 4.4: Graf over observeret og simuleret vandstand ved Aarhus Havn.

Af figur 4.4 fremgår observeret og simuleret vandstand ved Aarhus Havn, når der køres en simulering med et groft beregningsnet. Der er valgt en simuleringsperiode på tre dage, fra den 25. april 2021 til den 28. april 2021. Dato for simuleringsperioden er tilfældigt udvalgt. Sammenligningen af observeret og simuleret vandstand giver en RMSE (Root Mean Square Error) på 0,0323 m, mens det giver en MAE (Mean Absolute Error) på 0,0260 m. Det er at se, at den simulerede vandstand følger samme tendens samt maksimum- og minimumsværdier som den observerede vandstand i Aarhus Havn, hvorfor det vurderes på baggrund af dette samt de lave RMSE- og MAE-værdier, at den opsatte strømningsmodel med et groft beregningsnet er valid til yderligere anvendelse.

4.5 Gridafhængighed

Med henblik på at vurdere strømningsmodellen, hvori det fine, mindre beregningsnet er implementeret, jf. figur 4.2, udtrækkes vandstandsdata fra et punkt ved Tangkrogen fra en simulering med det grove beregningsnet. Disse vandstandsberegninger sammenlignes med vandstandsdata i selv samme punkt ved Tangkrogen fra en simulering med det fine beregninsnet, jf. figur 4.5.



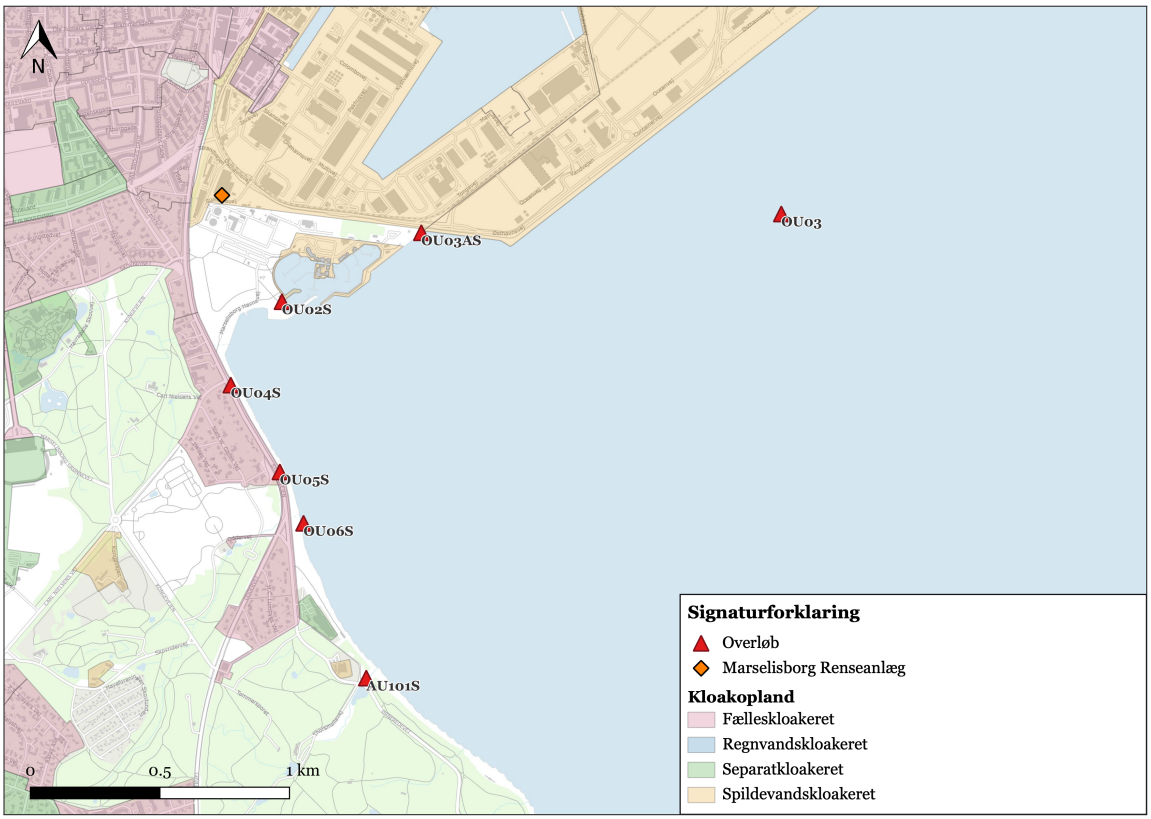
Figur 4.5: Graf over simuleret vandstand i et punkt ved Tangkrogen for hhv. fint og groft beregningsnet.

Figur 4.5 viser vandstanden i et punkt ved Tangkrogen, når der simuleres med hhv. et groft og fint beregningsnet mhp. at se om vandstanden er korrekt ved Tangkrogen, når der simuleres med et fint beregningsnet med en randbetingelse, der er udtrukket fra en model med et groft beregningsnet. Vandstandsdataene følger samme tendens, jf. figur 4.5, og RMSE beregnes til 0,0358 m, mens MAE beregnes til 0,0278 m. Den nye vandstand på randen fra simuleringen med et groft beregningsnet resulterer ikke i en markant ændret vandstand eller høje værdier for RMSE og MAE. Det vurderes derfor, at den opsatte strømningsmodel med et fint beregningsnet og en simuleret rand er valid til at modellere strømningsforhold omkring Tangkrogen.

Figur 4.4 har små udsving på den simulerede vandstand, som ikke observeres i den målte vandstand. På samme måde har den simulerede vandstand på figur 4.5 fra det fine beregningsnet også små udsving. Disse udsving kommer fra modellen og tilskrives en form for numerisk fejl og antages at være uden betydning.

4.6 Overløbsbygværker og modellering af aflastning

Der er i strømningsmodellen implementeret syv overløb, der først blev præsenteret på figur 1.8, med udløb i det dybeste lag i modellen. De specifikt udvalgte overløb implementeret i strømningsmodellen kan ses på figur 4.6.



Figur 4.6: Udvalgte overløb ved Tangkrogen og i nærområdet, der indgår i strømningsmodellen.

Hvert overløb er tilkoblet en vandføringsfil, der angiver tidspunkt og mængde af spildevand, der udledes. Der forefindes ikke tilgængeligt data for overløbenes vandføring, hvorfor der er valgt nogle værdier, der svarer til overløbshændelser, der forekommer relativt hyppigt. Der er på baggrund af beregnede overløbsvolumener fra Aarhus Kommune (Aarhus Kommune, 2021b), jf. figur 2.4, beregnet overløbsvandføringer, således forholdet mellem hver overløbsvandføring stemmer overens med de forhold, der formodes udledt i virkeligheden mellem hvert overløb, jf. tabel 4.2.

På baggrund af beregnede overløbsmængder fra Aarhus Kommune (2021b) er det beregnet, at renseanlæggets overløb OU03 i gennemsnit udleder 20,74 gange så meget vand som OU04S placeret ved Carl Nielsens Vej. På samme måde udleder renseanlægget i gennemsnit 1,16 gange så meget overløbsvand som OU02S placeret ved Lystbådehavnen, og OU02S udleder i gennemsnit 18,06 gange så meget vand som OU04S. Udregningen af disse forhold er beskrevet i appendiks B.

Tabel 4.2: Vandføringer for hvert overløb i strømningsmodellen. Der forefindes ikke beregnede overløbsvolumener for OU03AS, OU05S, OU06S og AU101S, og der er derfor valgt at bruge den mindste vandføring for disse overløb, svarende til vandføringen fra OU04S.

	OU02S	OU04S	OU03	OU03AS	OU05S	OU06S	AU101S
Vandføring [m^3/s]	1,1	0,0615	1,276	0,0615	0,0615	0,0615	0,0615

Udledningen fra hvert overløb har en varighed på 2 timer og 10 minutter. Ved at krydsreferere med de beregnede overløbsvolumener i appendiks B, ses der, at en overløbsvandføring på $1{,}276\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ fra renseanlæggets overløb OU03 svarer til en overløbshændelse med en gentagelsesperiode på omtrent 0,58 år. Tilsvarende svarer en vandføring på $1{,}1\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ fra OU02S ved Lystbådehavnen til en hændelse med en gentagelsesperiode på ca. 0,43 år, og en vandføring på $0{,}0615\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ fra OU04S ved Carl Nielsens Vej svarer til en hændelse med en gentagelsesperiode på ca. 0,60 år.

Det er valgt at bruge de listede vandføringer i tabel 4.2 og en varighed på 2 timer og 10 minutter, da dette svarer til hændelser, der forekommer ca. hver 5. til 7. måned. Det er derfor overløbshændelser, der forekommer relativt hyppigt, og det vurderes derfor realistisk, at en sådan hændelse sagtens kan forekomme i badevandssæsonen. Overløbsvarigheden er, udover at være valgt på baggrund af gentagelsesperioder, også valgt til at være 2 timer og 10 minutter, således at udledningen dækker en periode, hvori den maksimale og minimale vandstand forekommer i sammenhæng med højvande og lavvande.

Det er valgt ikke at implementere regnvandsudløb og vandløb som ferskvandskilder i strømningsmodellen pga. manglende data, og fordi Tangkrogens nærmeste vandløb Havreballe Bæk udtørrer om sommeren (Skanderborg Kommune, 2017).

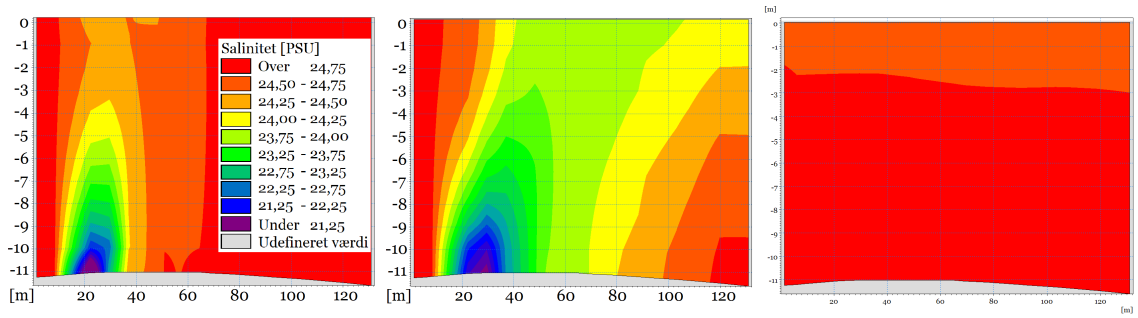
4.7 Salinitet i modelleringsområdet

Indenfor modelleringsområdet er salinititen blevet målt i ét punkt hvert 20. cm fra dybden 0,2 m til 15 m. Data strækker sig fra 2017-2019 og er målt omtrent hvert 14. dag i månederne juli, august, september, oktober og november. Salinitetsmålingerne er beskrevet i afsnit 2.3 og fremgår på figur 2.7. Der forefindes ikke data for årene efter år 2019.

I strømningsmodellen kan saliniteten angives som konstant eller varierende i domænet og dybden. Idet den gennemsnitlige salinitet i punktet varierer fra år til år samt i dybden, er det valgt at anvende en konservativ konstant i modellen, heraf et gennemsnit for alle tre år. Denne værdi resulterer i, at randbetingelsen samt initialtilstanden af salinitet i strømningsmodellen bliver 24,8 PSU. Spildevand udledes i modellen med en salinitet på 0 PSU. Ferskvand har en meget lav salinitet, der generelt er mindre end $3.000\,\mathrm{mg\,L^{-1}}$ svarende til ca. 3 PSU (Nielsen et al., 2003). Den valgte salinitet på 0 PSU formodes derfor at være en rimelig antagelse.

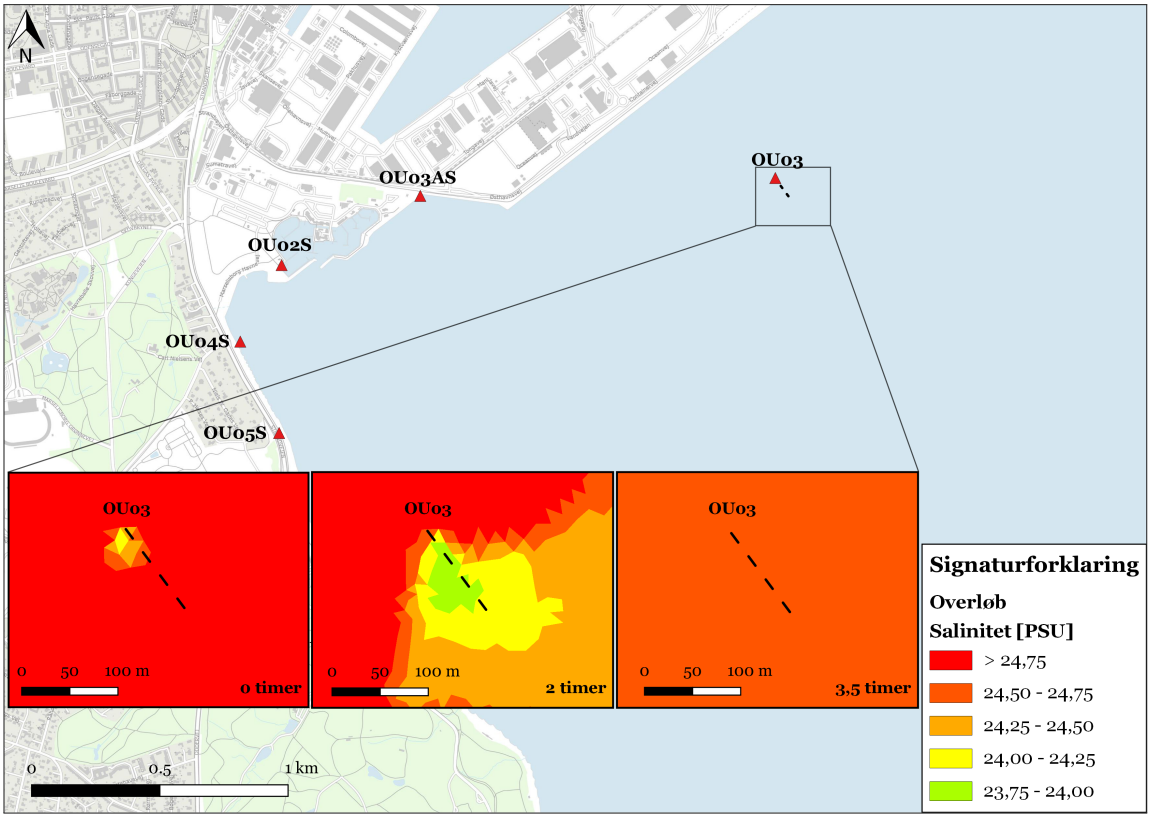
Det er valgt at forenkle modelleringen af saliniteten i modellen, trods det også vil være påvirket af nedbør i virkeligheden, da det væsentlige er at kunne modellere og visualisere denisitetsforskellen mellem havvand og spildevand, der udledes i det dybeste lag.

Med den opsatte model, jf. figur 4.2, implementerede overløb og vind fra Sletterhage Fyr køres en simulering. Et tværsnitsprofil ved udløbet OU03 fra renseanlægget til tiden 0, 2 og 3,5 time efter start af udledning fremgår af figur 4.7. Det ferske spildevand bevæger sig til overfladen, da det har en lavere densitet end havvandet, hvilket betyder, at saliniteten modelleres korrekt i modellen. Tværsnitsprofilet og udbredelsen af profilet set ovenfra fremgår af figur 4.8. Det bemærkes, at saliniteten ikke varierer meget, og dette skyldes den øjeblikkelige fortynding af spildevandet.



(a) 0 timer (b) 2 timer (c) 3,5 timer

Figur 4.7: Tværsnitsprofil af udbredelse af spildevand fra OU03 til tiden 0, 2 og 3,5 timer efter overløbets start.



Figur 4.8: Tværsnitsprofil og udbredelse af spildevand set ovenfra ved overløbet OU03 fra Marselisborg Renseanlæg til tiden 0, 2 og 3,5 time efter overløbets start.

4.8 Modellering af transport og henfald af bakterier

Udbredelsen af bakterierne fra spildevand er simuleret vha. et transportmodul (DHI, 2017a), der indsættes i strømningsmodellen. Modulet tager udgangspunkt i de hydrodynamiske beregninger præsenteret i dette kapitel og kan simulere spredning af partikulære og opløste stoffer i vandmiljøer. Transportmodulet tager højde for, at stoffernes transport er påvirket af konvektiv flow, men også dispersion (DHI, u.å.).

Transportmodulet har mange forskellige anvendelser, men modulet er bl.a. egnet til at beskrive transport af coliforme bakterier i havmiljøer (DHI, u.å.). Det er derfor ideelt at benytte modulet til at beskrive bakteriekoncentrationen i det udledte spildevand fra overløbene, der har udløb til Tangkrogen. For at simulere udbredelsen af spildevand, er hvert overløb tilknyttet sin egen stofkomponent i transportmodulet. På denne måde er det muligt at se, hvilken bakteriekoncentration hvert overløb bidrager med til et given punkt i modelleringsområdet. De individuelle komponenter udgør hver især en konstant koncentration af coliforme bakterier på $9 \cdot 10^6$ bakterier/100mL. Dette er i overensstemmelse med koncentrationen af *E. coli* i spildevand fra overløb (Erichsen et al., 2006). I modellen oprettes koncentrationen af bakterier som en specificeret koncentration med en værdi på 100 bakterier/100mL. I de endelige resultatfiler svarer en værdi på 100 bakterier/100mL til $9 \cdot 10^6$ bakterier/100mL, og bakteriekoncentrationen til hvert tidsskridt omregnes, således det stemmer overens med virkelige værdier.

Størrelsen og formen på udbredelsen af bakterieforureningen er påvirket af faktorer som overløbsvandføring, tidevand, vind, konvektion og dispersion. Dispersionskoefficienter angives i transportmodulet vertikalt og horisontalt som en skalar. Dispersionkoefficienterne beregnes som hvirvelviskositeten i de hydrodynamiske beregninger, jf. afsnit 4.3, men ganges med en skalar, som i dette projekt er 1, der er standardværdien.

Udbredelsen er også påvirket af, hvor hurtigt bakterierne henfalder. Henfaldskonstanten beskriver, hvor hurtigt bakterierne dør. De vigtigste faktorer, der har indflydelse på henfald, er sollys, temperatur, salinitet og prædation (Erichsen et al., 2006). I transportmodulet beskrives henfald af coliforme bakterier som et første ordens henfald, og henfaldskonstanten skal derfor beregnes og indskrives i modellen. Henfaldskonstanten er i dette projektet delt op i en mørkedel og en lysdel, og den er beregnet som vist i appendiks D. Det er valgt at benytte en henfaldsmodel for coliforme bakterier, hermed gældende for *E. coli*, da henfald af enterokokker ikke er ligeså velbeskrevet i litteraturen som henfald af coliforme bakterier (Erichsen et al., 2006). Generelt tyder det på, at enterokokker har en lavere henfaldsrate sammenlignet med *E. coli*, og de modellerede resultater er derfor ikke et billede af bakteriekoncentrationen for enterokokker.

Tabel 4.3 viser den specificerede koncentration, henfaldskonstanten og dispersionskoefficienterne benyttet i transportmodulet.

Tabel 4.3: Koefficienter og parametre i transportmodulet.

	Format	**Værdi**	**Enhed**
Horisontal dispersion	Konstant	1	-
Vertikal dispersion	Konstant	1	-
Henfaldskonstant	Konstant	0,000187	1/s
Specificeret koncentration	Konstant	100	bakterier/100mL

De modellerede bakteriekoncentrationer vil blive brugt til at analysere på risikopåvirkning, hvilke vindretninger, der giver ringe badevandskvalitet og hvilke overløbsbygværker, der er de mest kritiske for badestranden. Det følgende kapitel præsenterer, hvordan vind- og tidevandsforhold er indkorporeret i modellen.

5 | Scenariemodellering

Med strømningsmodellen vælges det at undersøge strømningsforholdende omkring Tangkrogen ved otte forskellige vindretninger med en konstant vindhastighed ved to forskellige tidevandsforhold. Dette resulterer i 16 simuleringer, alle med den samme vindhastighed, da hver af de otte vindretninger simuleres to gange - først med det første tidevandsforhold, hvor der sker en aflastning ved højvande, og efterfølgende med det andet tidevandsforhold, hvor der sker en aflastning ved lavvande.

Yderligere laves der to simuleringer med en anderledes vindhastighed for en enkelt vindretning for at undersøge hastighedens effekt på udbredelsen. Dette vil sige, at der i alt er lavet 18 simuleringer, hvori alle de implementerede overløb indgår. Tabel 5.1 viser en oversigt over disse scenarier. Resultaterne fra disse simuleringer præsenteres i kapitel 6, mens der i kapitel 7 præsenteres resultater fra yderligere 16 simuleringer, hvori de to overløb OU02S og OU04S har udløb i samme punkt som renseanlæggets udløb mhp. at fjerne belastningen tæt på Tangkrogen. Tabel 5.2 viser en oversigt over scenarierne, hvori belastning fra OU02S og OU04S føres ud til renseanlæggets overløb. Hvorfor det er valgt at føre udløbene fra netop disse overløb væk, specificeres i kapitel 6.

Tabel 5.1: De forskellige scenarier strømningsmodellen anvendes til, når alle overløb aflaster i modellen fra deres nuværende udløb.

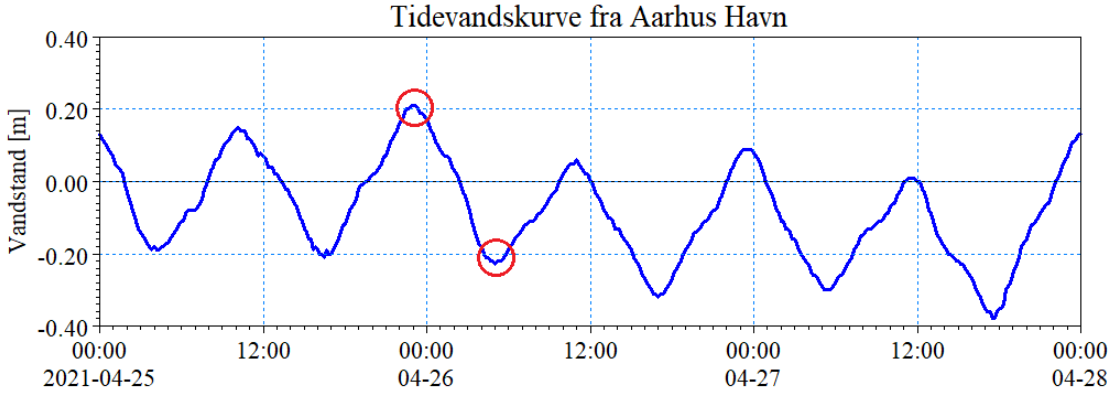
Vindretning		Vindhastighed	Tidevand	
Vindretning	Grader [°]	[m/s]	Aflastning ved højvande	Aflastning ved lavvande
Nordenvind	0	5	×	×
Nordøstenvind	45	5	×	×
Østenvind	90	5	×	×
Sydøstenvind	135	0	×	×
Sydøstenvind	135	5	×	×
Sydøstenvind	135	10	×	×
Søndenvind	180	5	×	×
Sydvestenvind	225	5	×	×
Vestenvind	270	5	×	×
Nordvestenvind	315	5	×	×

Tabel 5.2: De forskellige scenarier strømningsmodellen anvendes til, når udløb fra OU02S og OU04S føres ud til renseanlæggets overløb.

Vindretning		Vindhastighed	Tidevand	
Vindretning	Grader [°]	[m/s]	Aflastning ved højvande	Aflastning ved lavvande
Nordenvind	0	5	×	×
Nordøstenvind	45	5	×	×
Østenvind	90	5	×	×
Sydøstenvind	135	5	×	×
Søndenvind	180	5	×	×
Sydvestenvind	225	5	×	×
Vestenvind	270	5	×	×
Nordvestenvind	315	5	×	×

5.1 Tidevandsforhold og tidspunkt for aflastning

Det er valgt at starte aflastning fra overløbene ved hhv. høj- og lavvande og derefter modellere 12 timer frem, svarende til én tidevandscyklus, i alle de modellerede scenarier. Det er valgt at starte aflastningen, når der er høj- eller lavvande, da det er her strømningshastigheden er mindst. Resultaterne vil derfor afspejle effekten af den stigende og efterfølgende faldende strømningshastighed, som der simuleres gennem tidevandscyklussen. Figur 5.1 viser en tidevandskurve for dagene 25. april - 28. april 2021, som er de vilkårligt valgte dage for simuleringsperioden, jf. kapitel 4. Det er specificeret på kurven, hvornår aflastningen går i gang i strømningsmodellen med røde cirkler.



Figur 5.1: Tidevandskurve fra Aarhus Havn, der er den nærmeste vandstandsmåler til Tangkrogen. Der aflastes på to forskellige tidspunkter i to forskellige simuleringer. For højvande aflastes der i tidsrummet 22.30-00.40 den 25. april 2021, mens det for lavvande er i tidsrummet 04.00-06.10 den 26. april 2021.

5.2 Analyse af vindhastighedens effekt på udbredelse

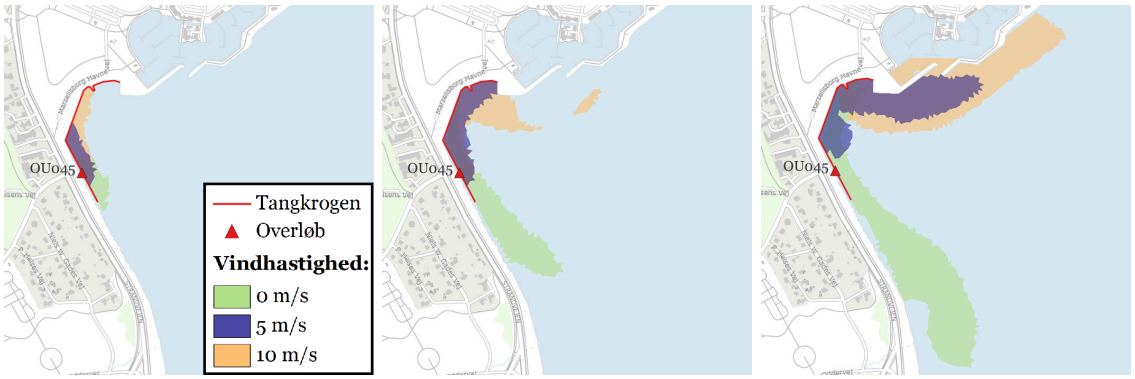
Vindretningerne er i modellen angivet som konstante over hele simuleringsperioden og fremgår i tabel 5.1 sammen med anvendt vindhastighed. Trods vindretninger og -hastigheder ikke er konstante i virkeligheden og forekommer i vilkårlige kombinationer, er det valgt at undersøge enkelte kombinationer med formålet at undersøge, hvilke vindretninger og -hastigheder har størst indvirkning på forureningen og udbredelsen i området.

Betydningen af vindhastighed ved modellering vil blive undersøgt ved 0 m/s, 5 m/s og 10 m/s til én vindretning, hvoraf resultaterne sammenholdes. Det fremgår i fordelingen af vindretning- og hastigheder for regnvejrsdage i badesæsonerne for år 2018, 2019 og 2020, præsenteret i afsnit 2.3 på figur 2.10b, at der oftest blæser fra østlig, sydøstlig og sydvestlig retning. Det formodes, at sydøstenvind vil drive strømningsretningen imod Tangkrogen, hvorfor denne vindretning vælges til vurdering af vindhastighedernes betydning.

Scenariet med ingen vind, 0 m/s, er valgt for at undersøge tidevandets indvirkning på strømningsforholdende. En vindhastighed på 5 m/s svarer til let vind ($3{,}3 \leq U_{10} \leq 5{,}4$), der på vand defineres som småbølger, hvor toppene brydes og der kan være glasagtigt skum. Ved denne hastighed antages det at være realistisk, at der vil være badegæster ved Tangkrogen.

Vindhastigheden på 10 m/s resulterer i frisk vind ($8 \leq U_{10} \leq 10{,}7$) samt middelstore langagtige bølger med mange skumtoppe. Det formodes, at badegæster er mindre tilbøjelige til at besøge badestedet ved frisk vind, da bølgerne kan være voldsomme og kuldeindeksen vil føles større.

Af figur 5.2 og figur 5.3 fremgår udbredelse af spildevand fra OU04S ved Carl Nielsens Vej til tre tidspunkter efter aflastning ved høj- og lavvande. Det vurderes, at tidevandet indvirker på strømningsforholdende og udbredelsen af spildevandet i sydlig retning. Valget af vindhastighed resulterer ikke i en stor ændring af udbredelse og dets bevægelse, dog bevæger det sig hurtigere ved en højere vindhastighed. På baggrund af dette anvendes vindhastigheden på 5 m/s til yderligere scenariemodellering, da der anses en større sandsynlighed for tilstedeværelsen af badegæster ved Tangkrogen ved let vind.



(a) 30 minutter (b) 1,5 time (c) 3,5 time

Figur 5.2: Udbredelse af spildevand ved Tangkrogen 30 minutter, 2 og 3,5 timer efter overløbets start ved 0 m/s, 5 m/s og 10 m/s ved sydøstenvind ved højvande.

(a) 30 minutter (b) 1,5 time (c) 3,5 time

Figur 5.3: Udbredelse af spildevand ved Tangkrogen 30 minutter, 2 og 3,5 timer efter overløbets start ved 0 m/s, 5 m/s og 10 m/s ved sydøstenvind ved lavvande.

III Belastning af *E. coli* og påvirkning fra vind og tidevand

Del III præsenterer strømningsmodellens resultater og analysen heraf. Resultaterne bruges til at danne en risikoprofil for overskridelse af badevandskravet samt at udpege, hvilke overløbsbygværker, der giver den største belastning af *E. coli* ved Tangkrogen. Derudover berøres påvirkningen fra vind og tidevand.

Kapitel 6 Belastning af *E. coli* ved Tangkrogen . . . 42

6.1 Risikokort - Udledning fra syv overløbsbygværker
6.2 Koncentrationsprofiler ved Tangkrogen
6.3 Udpegning af overløbsbygværker med største *E. coli*-belastning
6.4 Udpegning af vindretninger resulterende i største *E. coli*-belastning

6 | Belastning af *E. coli* ved Tangkrogen

Dette kapitel har til formål at beskrive belastningen af *E. coli* ved Tangkrogen vha. resultater opnået med strømningsmodellen, jf. kapitel 4. Borgere i Aarhus har en forventning om, at badevandskvaliteten opfylder badevandskravet, men som udgangspunkt er det ikke nærområdets regnbetingede udløb, der danner baggrund for badevandskravet. Det er derimod den generelle baggrundskoncentration af *E. coli* ved Tangkrogen. Der er i dette kapitel udarbejdet risikokort mhp. at se, hvilke overløb, der skal fjernes, således Aarhus Kommune kan bekymre sig mindre om den generelle baggrundskoncentration. Derudover bruges resultaterne til at undersøge, hvordan koncentrationen ændrer sig afhængig af vindretning og tidevand. Det er valgt at undersøge påvirkningen fra otte forskellige retninger, jf. tabel 5.1.

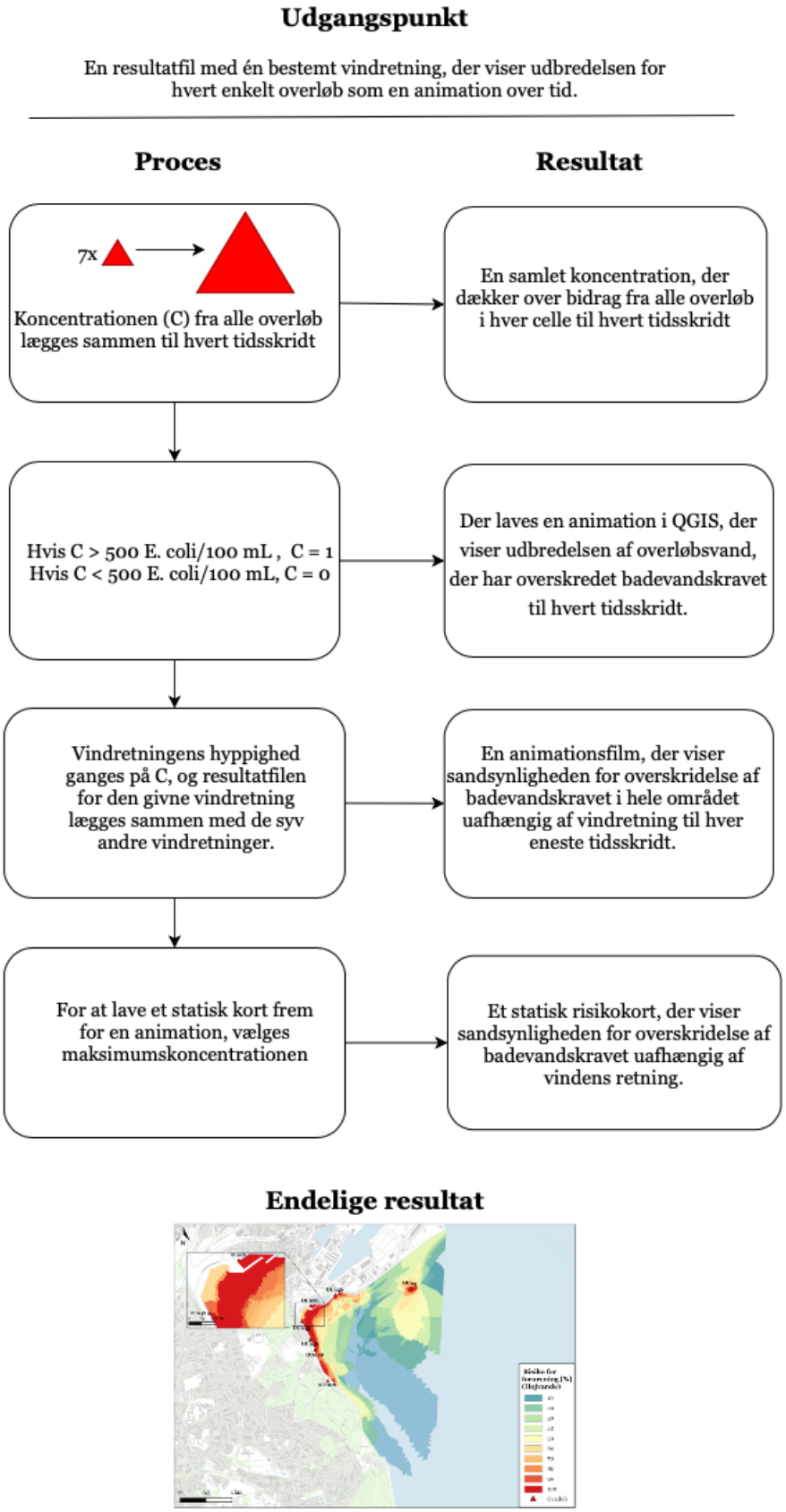
6.1 Risikokort - Udledning fra syv overløbsbygværker

Figur 6.2 viser risikokort, der illustrerer sandsynligheden for en overskridelse af badevandskravet ved Tangkrogen og i nærområdet ved hhv. høj- og lavvande. Risikokortene er udarbejdet mhp. at udarbejde en risikoprofil, der kan vurdere en samlet akkumuleret risiko for overskridelse af badevandskravet hele året efter regnvejr. Det er valgt ikke at tage udgangspunkt i enkelte hændelser, da disse kan være atypiske og samtidig kræver mange observationsdata for mange år. Derudover giver risikokortene et indblik i, hvor udsat området omkring hvert enkelt overløb er for dårlig badevandskvalitet, når det vurderes ift. vindens retning og tidevand fra Aarhus Bugt.

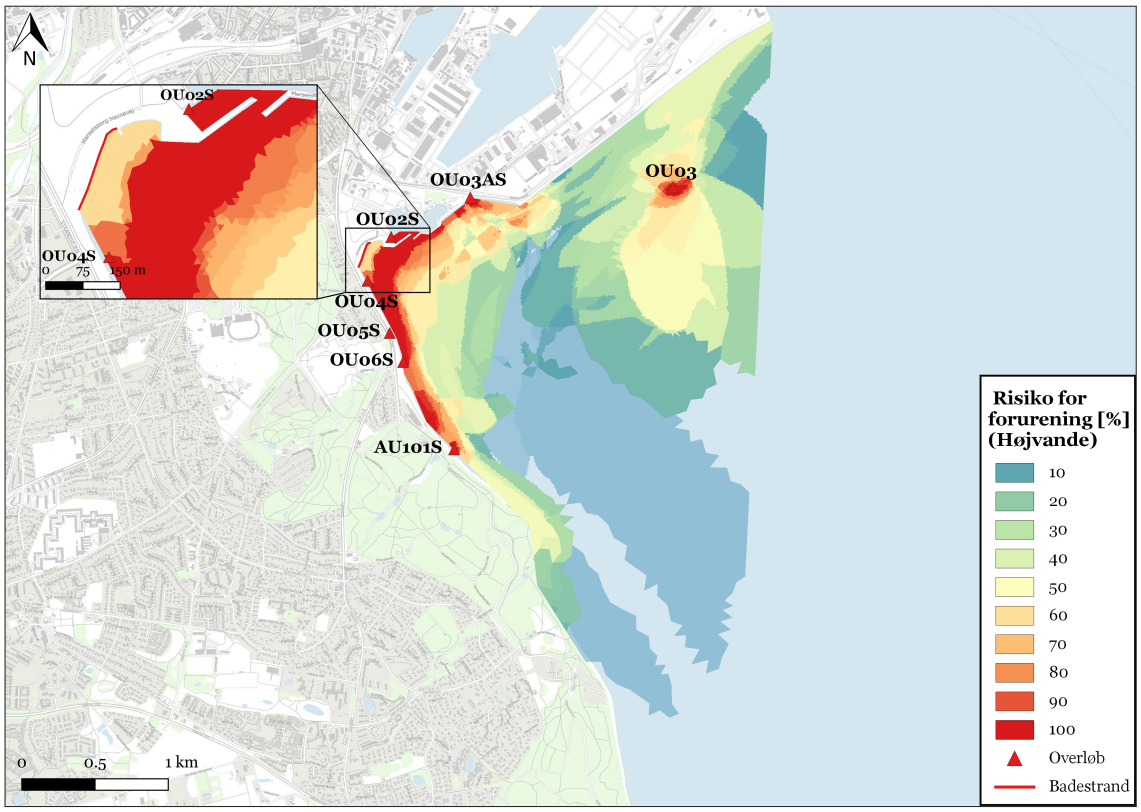
Kortene er lavet på baggrund af strømningmodellens resultatfiler, og figur 6.1 skildrer udarbejdelsen af kortene. For hver simulering af scenarierne, beskrevet i kapitel 5, vælges resultatfilerne til at være 3D volumener, hvor udbredelsen og bakteriekoncentrationen fra hvert overløb fremgår til hvert tidskridt. Filerne bearbejdes i QGIS. Med resultatfiler for de otte vindretninger er det muligt at udarbejde et statisk risikokort, der illustrerer sandsynligheden for overskridelse af badevandskravet for *E. Coli* på 500 bakterier/100mL, jf. tabel 1.1, uanset vindretning til et vilkårligt tidspunkt ved en overløbshændelse med en varighed på 2 timer og 10 minutter og en gentagelsesperiode på ca. 6 måneder. Dette er gjort ved at lægge vindretningerne sammen, hvor det er relevant at tage højde for og vægte sandsynligheden af vindretningernes hyppighed, præsenteret i afsnit 2.3 og jf. appendiks C, hvorefter en samlet sandsynlighed for overskridelse af badevandskravet beregnes. For de statiske kort anvendes maksimale celleværdier fra dynamiske kort, der viser udbredelsen og bakteriekoncentrationen til hvert eneste tidsskridt.

Det er vigtigt at have i mente, at risikokortene har samme opløsning som det anvendte beregningsnet beskrevet i afsnit 4.1, hvor udbredelsen af bakteriekoncentrationer beskrives omtrent 20 m og 110 m ad gangen hhv. i en zone omkring Tangkrogens nærliggende overløb inklusiv Tangkrogen og det resterende modelleringsområde, jf. figur 4.2, trods kortene

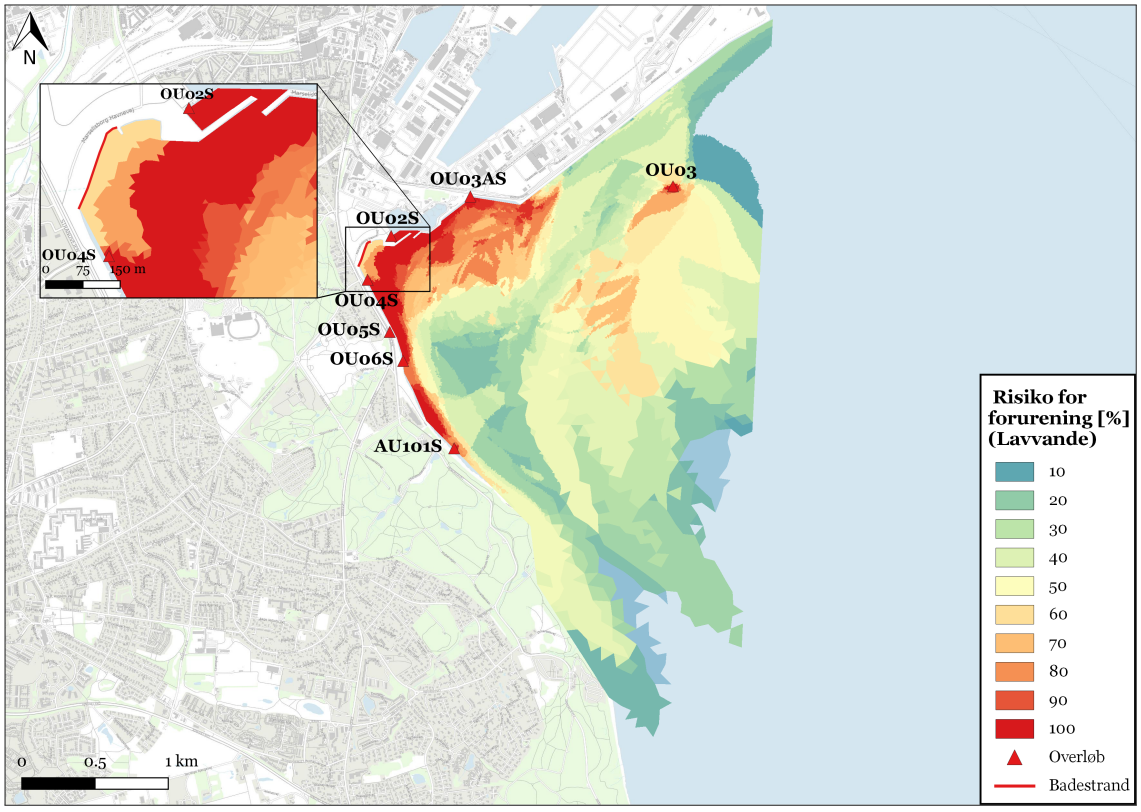
udtrykker en højere opløsning. Dette skyldes sammenlægning af resultatfilerne for de enkelte vindretninger.



Figur 6.1: Flowdiagram, der viser, hvordan risikokortene er udarbejdet.



(a) Højvande



(b) Lavvande

Figur 6.2: Risikokort over Tangkrogen og nærområdet. Kortet illustrerer sandsynligheden for overskridelse af badevandskravet ved aflastning ved høj- og lavvande uanset vindretning til et vilkårligt tidspunkt gennem en overløbshændelse med en varighed på 2 timer og 10 minutter, jf. afsnit 4.6.

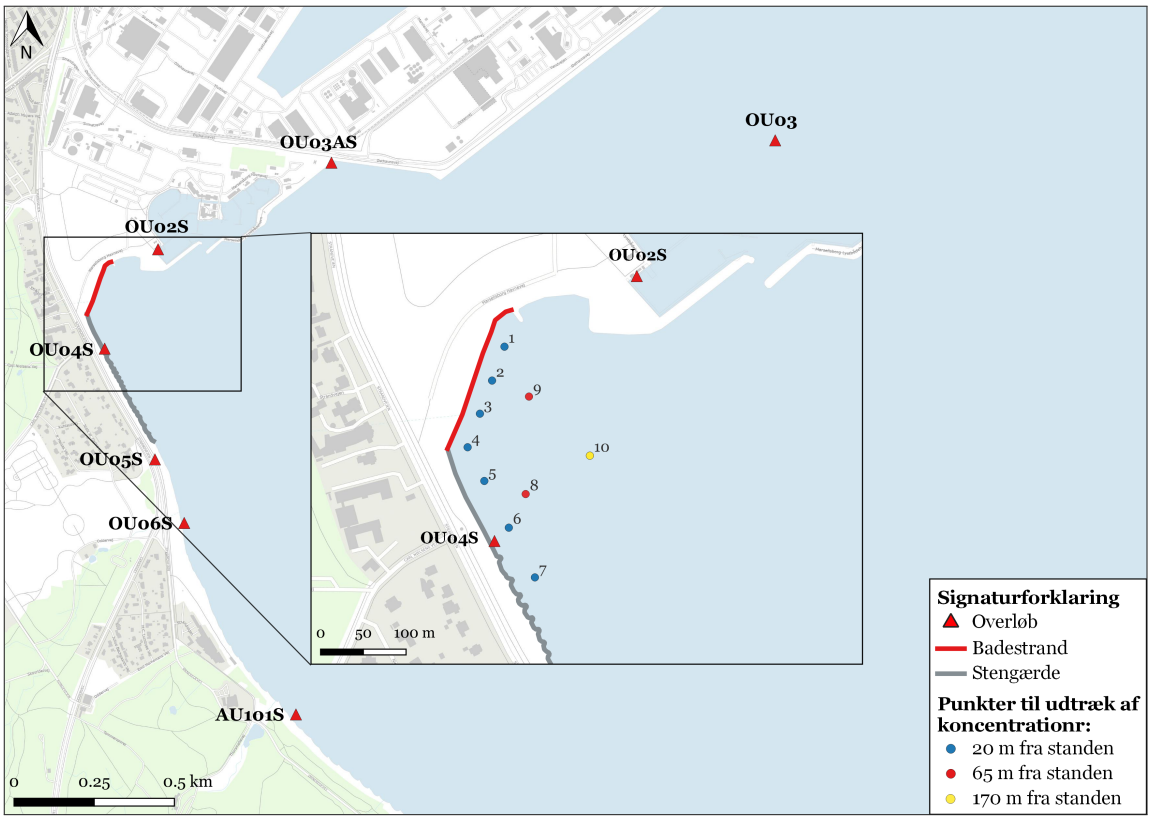
Det fremgår af figur 6.2, at det for aflastning ved både høj- og lavvande er ca. 60 % sandsynligt, at der helt inde ved Tangkrogen vil være en overskridelse af badevandskravet på et vilkårligt tidspunkt efter overløbshændelser i nærområdet. Ved at kigge på de bidragende fraktioner i området inde ved Tangkrogen, hvor sandsynligheden er ca. 60 %, ses der, at det er vindretningerne nord, nordøst, øst, sydøst, syd og sydvest, der forurener ved badestranden. Grunden til at seks ud af otte vindretninger kun skaber en sandsynlighed for forurening på 60 % skyldes, at de to vindretninger, der ikke forurener, forekommer med en høj hyppighed. Vesten- og nordvestenvind forekommer med hyppigheder på hhv. næsten 24 og 15 %.

Der dannes et større rødt bælte >100 m fra Tangkrogen både ved aflastning ved høj- og lavvande, hvor der med 100 % sandsynlighed vil være en overskridelse af badevandskravet uanset vindretning. I dette bælte vil det være oplagt at placere en måler, der kan måle bakteriekoncentrationen, og blive anvendt til kalibrering og validering af strømningsmodellen. Derudover vil det også være oplagt at benytte dette område til at måle på ledningsevne og indirekte parametre, da der altid er risiko for forurening, når der aflastes til Tangkrogen med de foreskrevne overløbshændelser. Måling af ledningsevne og indirekte parametre vil endeligt kunne indgå i en varslingsmodel. Yderligere er det at se, at der er en højere risiko samt udbredelse for forurening ved aflastning ved lavvande i modsætning til højvande, hvilket formodes at skyldes strømningsforholdene.

På baggrund af de udarbejdede risikokort vurderes det, at der er en lavere risiko for dårlig badevandskvalitet helt inde ved Tangkrogen sammenlignet med 100 m ude, hvis badende besøger badestedet lige efter en regnhændelse. Derudover bør badende ikke benytte badestranden i op til 12 timer efter udledning fra nærområdets overløb, forudsat der er udledning fra alle overløb. For at vurdere hvilke overløb, der bidrager mest til den samlede belastning af *E. coli*, udtrækkes bakteriekoncentrationen i en række punkter ved Tangkrogen.

6.2 Koncentrationsprofiler ved Tangkrogen

Figur 6.3 viser nærområdets overløb samt en række udvalgte punkter, hvori resultaterne fra strømningsmodellen er udtrukket. Resultaterne bliver udtrukket som en bakteriekoncentration med enheden $E.coli/100\text{mL}$. Resultaterne vil blive brugt til at vurdere, hvilke overløbsbygværker og vindretninger, der resulterer i ringe badevandskvalitet ved Tangkrogen.



Figur 6.3: Punkter, hvorfra der udtrækkes koncentrationer til analyse af badevandskvaliteten ved Tangkrogen. Data er hentet fra SEGES (2020).

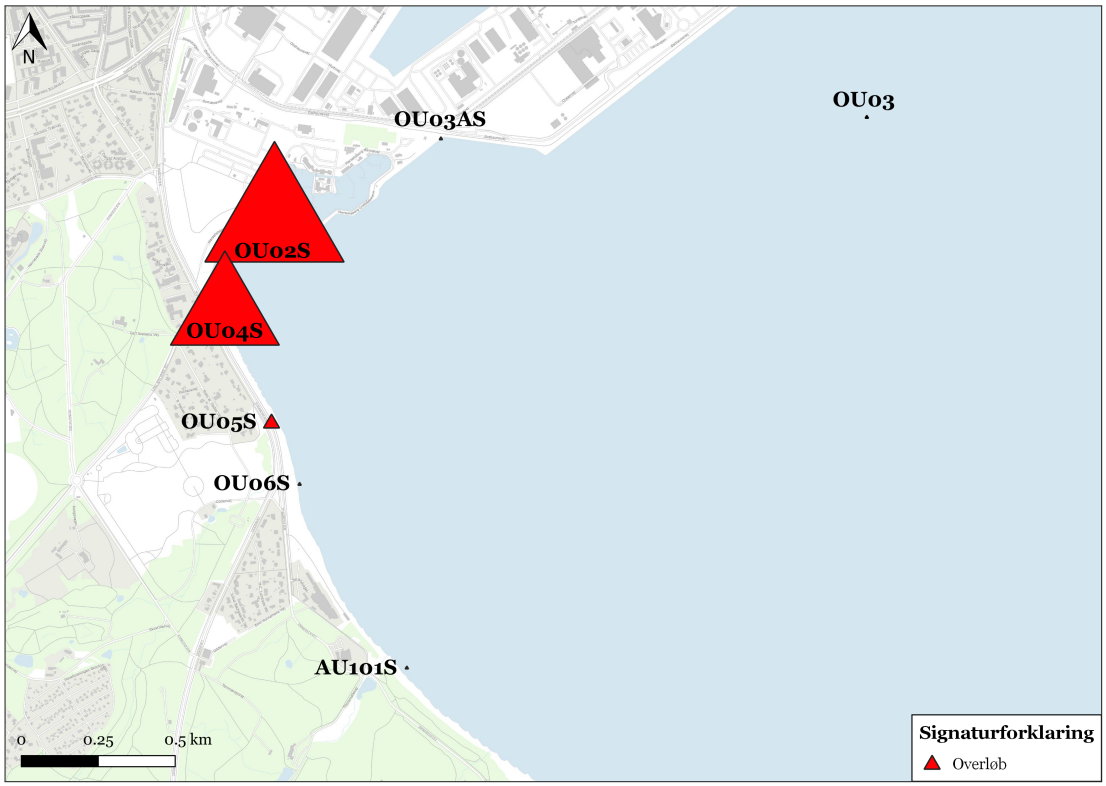
Der er i området omkring Tangkrogen masser af adgang til vand, men det antages, at det er mest oplagt at gå i vandet og bade ved den linje, der er markeret som badestrand på figur 6.3. Denne antagelse er baseret på sattelitkort og on-site observationer. Det er valgt at udtrække koncentrationer i punkterne 1-4, således der bliver dannet en forureningsprofil langs stranden. Langs den sydlige kyst, hvor overløbene OU04S, OU05S og OU06S er lokaliseret, er der et stengærde, og det er valgt at udtrække koncentrationer i punkterne 5-7 for at danne en forureningsprofil langs det første stykke af stengærdet, hvor badende også har mulighed for at bevæge sig ud. Disse punkter er alle placeret 20 m fra stranden, og denne afstand er valgt pga. tidevandet. Udtrækkes der koncentrationer helt inde ved strandkanten, er der i modellen tidspunkter, hvor vanddybden bliver meget lavt. Dette problem opstår ikke i de punkter, der er valgt og illustreret på figur 6.3, og koncentrationerne udtrækkes i dybden 35 cm.

Der er desuden valgt at udtrække koncentrationer 65 m fra badestranden i en dybde på 1 m mhp. at få et billede af forureningen længere væk fra stranden (punkt 8 og 9), hvor badende også kan bevæge sig ud, men det antages, at det primært vil være gode svømmere, der bevæger sig derud. Det er også valgt at udtrække koncentrationer 170 m fra stranden (punkt 10), også i en dybde på 1 m, da der her forekommer en risiko for overskridelse af badevandskravet på 100 % uanset vindretning og tidevandsperiode. Punkt 10 er placeret i det røde bælte vist på figur 6.2a og 6.2b, som er det område, der har størst risiko for at blive forurenet. I tilfælde af, at der placeres en måler i dette område, kan strømningsmodellen give et indblik i, hvad der kan forventes af bakteriekoncentrationer, og det er derfor relevant også at kigge på koncentrationer i punkt 10.

Der gøres opmærksom på, at strømningsmodellen simulerer overløbshændelser med en varighed af 2 timer og 10 minutter og med vandføringer som beskrevet i afsnit 4.6, svarende til hændelser med en gentagelsesperiode på 0,43, 0,58 og 0,60 år afhængig af, hvilket overløb, der er tale om. De næste afsnit præsenterer derfor data, der er en afspejling af en situation ved Tangkrogen, der statistisk set forekommer ca. to gange om året. Der er udarbejdet forureningsprofiler i alle ti punkter til hver vindretning præsenteret i appendiks E.1. Forureningsprofilerne viser forløbet af bakteriekoncentrationen samt den maksimale koncentration i ti punkter til de otte vindretninger: Nord, nordøst, øst, sydøst, syd, sydvest, vest og nordvest.

6.3 Udpegning af overløbsbygværker med største *E. coli*-belastning

Figur 6.4 illustrerer, hvor kritiske de enkelte overløb er inde ved Tangkrogen i forhold til hinanden. Dette er gjort på baggrund af tabel 6.1, der viser, hvilket overløb, der er mest ansvarlig for den ringe badevandskvalitet afhængig af vindretning og hvor badende befinder sig ved stranden. Figur 6.4 tager derfor udgangspunkt i det bygværk, der til hver vindretning bidrager mest til den samlede belastning i et givet punkt og ikke, hvor ofte bygværkerne resulterer i en overskridelse af badevandskravet.



Figur 6.4: Udpegning af overløb i Tangkrogens nærområde. Størrelsen på de enkelte overløb indikerer, hvor kritiske de er inde ved Tangkrogen ift. hinanden. Data er hentet fra SEGES (2020).

Tabel 6.1: Oversigt over, hvilket overløbsbygværk, der belaster mest i hvert punkt til en given vindretning. Punkter markeret med to overløb betyder, at begge overløb bidrager næsten ens til belastningen. Det førstskrevne overløb er bygværket med den største belastning.

Oversigt over værste bygværker

Højvande

Vindretning \ Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nord	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S
Nordøst	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S
Øst	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S
Sydøst	OU04S/ OU02S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU05S	OU05S/ OU02S	OU02S	OU02S
Syd	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU05S	OU05S	OU02S	OU05S
Sydvest	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU02S/ OU04S	OU02S	OU02S/ OU04S
Vest	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S
Nordvest	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S

Lavvande

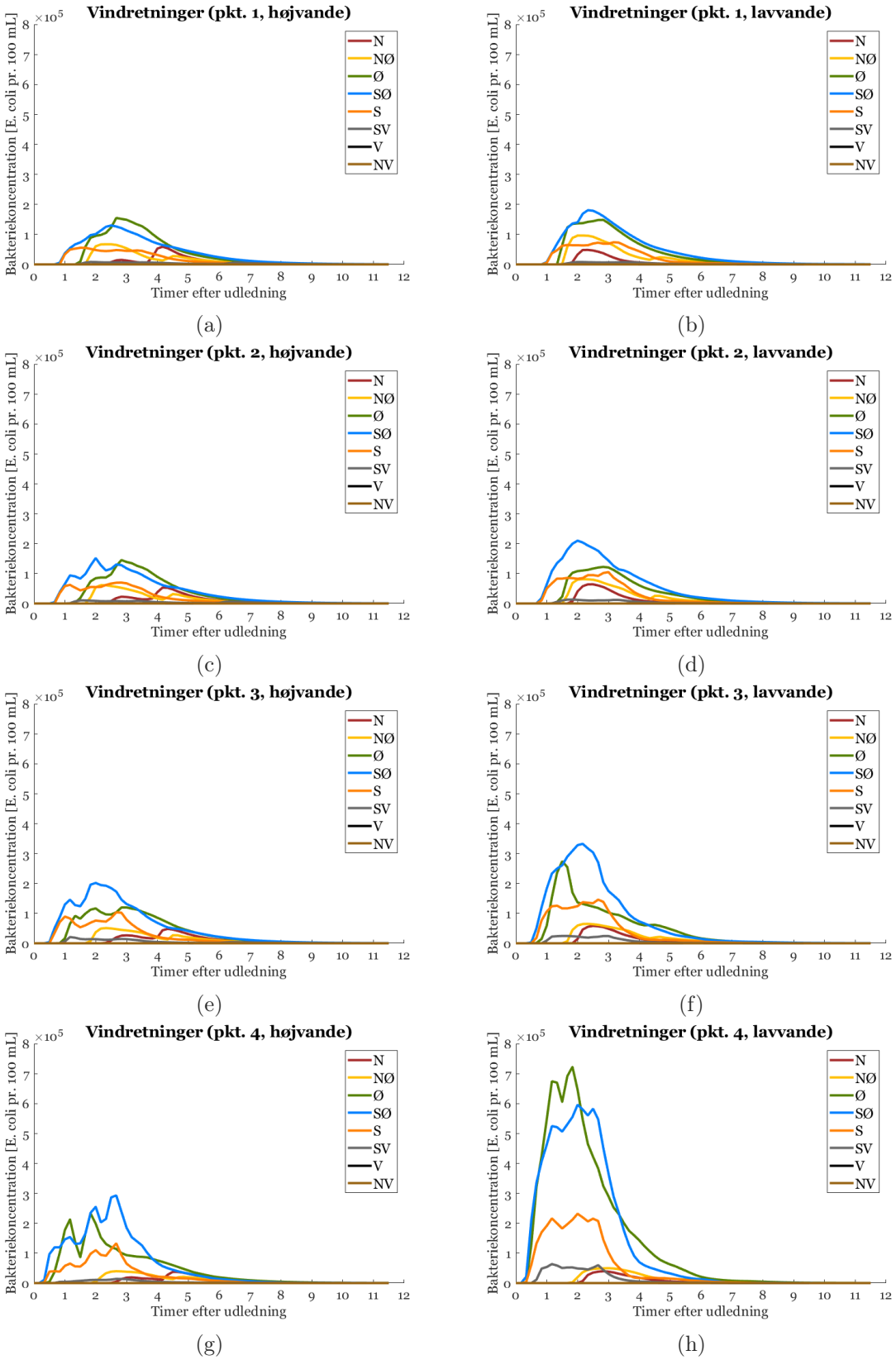
Vindretning \ Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nord	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S
Nordøst	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S
Øst	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S
Sydøst	OU02S/ OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU05S	OU05S	OU02S	OU02S
Syd	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU05S	OU05S	OU02S	OU05S
Sydvest	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S	OU04S
Vest	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S
Nordvest	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU02S	OU04S	OU04S	OU02S	OU02S	OU02S

Overløbet OU04S ved Carl Nielsens Vej og overløbet OU02S ved Lystbådehavnen er de primære ferskvandskilder til forringelse af badevandskvaliteten ved Tangkrogen ud af alle nærområdets overløb. Overløbet OU05S resulterer også i overskridelse af badevandskravet ved sydøsten- og søndenvind, men belastningen er ofte mindre sammenlignet med belastningen fra OU04S og OU02S, hvorfor overløbets symbol også er mindre på figur 6.4. OU05S belaster typisk mere end OU02S og OU04S i området omkring stengærdet og længere ude, hvor densiteten af badegæster er lav sammenlignet med inden ved badestranden.

Overløbene OU04S og OU05S er lige så kritiske ved højvande som ved lavvande, hvorimod overløbet OU02S er kritisk ved tre tilfælde mere, når der aflastes ved højvande end ved lavvande. Forskellen af forholdet for OU02S kan ikke ses, hvis figurer for høj- og lavvande sammenlignes, hvorfor der er valgt at anvende en middelværdi til figur 6.4.

6.4 Udpegning af vindretninger resulterende i største *E. coli*-belastning

Figur 6.5 viser koncentrationen af *E. coli* (bakterier pr. 100 mL) helt inde ved stranden til en given vindretning, når der aflastes ved hhv. høj- og lavvande. Der er tale om udtræk af bakteriekoncentrationen i punkterne 1-4 illustreret på figur 6.3, som er der, hvor badende går i vandet, og det er den samlede bakteriekoncentration, der forekommer i punktet, fra alle overløbsbygværker. Figurerne er baseret på forureningsprofilerne i appendiks E.1, hvor den samlede bakteriekoncentration også kan ses for punkterne 5-7 ved stengærdet og punkterne 8-10 længere væk fra stranden for alle de individuelle vindretninger.



Figur 6.5: Bakteriekoncentrationen i punkterne 1-4 ved hver vindretning.

Vindretningerne er rangeret fra 1-8 i tabel 6.2, hvor 1 er den vindretning, der resulterer i den største belastning af *E. coli*, og 8 er den vindretning, der resulterer i den laveste belastning af *E. coli*. Rangeringen er lavet på baggrund af de maksimale koncentrationer og er en samlet vurdering ud fra alle fire punkter ved badestranden og tidevandscyklus.

Tabel 6.2: Oversigt over, hvilke vindretninger, der resulterer i den største belastning. Vindretningernes hyppighed på en vilkårlig dag ved Tangkrogen og andelen af vindhastigheder, der er over 5 m/s for den pågældende retning, er også vist.

Vindretninger med største *E. coli*-belastning

	Nord	Nordøst	Øst	Sydøst	Syd	Sydvest	Vest	Nordvest
Rang [-]	5	4	2	1	3	6	8	7
Hyppighed [%]	≈ 4	≈ 5	17	10	10	16	24	15
U >5 m/s [%]	0,01	0,5	≈ 3	≈ 3	2	≈ 8	16	≈ 9

De tre mest kritiske vindretninger er øst, sydøst og syd, der alle forekommer relativt hyppigt sammenlignet med de resterende vindretninger, og der er lave vindhastigheder en god del af tiden, når vinden blæser fra disse retninger, hvilket giver anledning til godt badevejr ved Tangkrogen. På samme måde er vindhastigheden også oftest lav ved nord- og nordøstenvind, men disse to retninger er de retninger, der forekommer mindst af alle vindretningerne. Når det blæser fra sydvest, vest og nordvest forekommer der oftere vindhastigheder over 5 m/s sammenlignet med de andre vindretninger, hvilket betyder, at der en større andel af tiden, hvor det blæser fra disse retninger, ikke nødvendigvis er gode badeforhold. Samtidig er det de tre vindretninger, der forringer badevandskvaliteten mindst. Vind fra vest og nordvest vil ikke resultere i en overskridelse af badevandskravet i de fire punkter ved badestranden, og det er derfor ikke nødvendigt at lukke badestranden. Dog overskrides kravet i nærheden af stengærdet, hvorfor badende ikke bør benytte denne del af Tangkrogen, når det blæser fra vest og nordvest, jf. appendiks E.1.

Bakteriekoncentrationen, når der aflastes ved lavvande, og der blæser fra seks ud af otte vindretninger (N, NØ, Ø, SØ, S, SV), er langt højere end de maksimalt forekommende koncentrationer ved aflastning ved højvande. Den forhøjede koncentration ved aflastning ved lavvande sammenlignet med aflastning ved højvande skyldes, at modellen simulerer den naturlige tidevandscyklus, hvor der vil være en lavere dybde ved lavvande i de udvalgte punkter og derfor mindre marint vand at opblande det tilførte spildevand i. Den samme mængde spildevand opblandes i mindre vand, og dette resulterer i en højere koncentration af *E. coli*. Maksimale koncentrationer kan aflæses i appendiks E.1. Derudover bør det bemærkes, at enterokkokker ikke nødvendigvis følger den samme henfaldsmodel, hvorfor det er muligt, at bakteriekoncentrationen kan blive højere for denne bakterietype.

Strømningsmodellen simulerer en meget høj maksimal bakteriekoncentration ved Tangkrogen, der er langt over de målte koncentrationer i badesæsonen, jf. figur 2.1. Denne forskel kan skyldes, at der ikke er blevet taget prøver lige efter en overløbshændelse, hvor bakteriekoncentrationen er højest, og de målte koncentrationer kan derfor være et udtryk for baggrundskoncentrationen. Den store belastning af *E. coli* stammer primært fra OU02S og OU04S, og der vil derfor i det følgende afsnit blive undersøgt, hvor meget belastningen mindskes, når de to overløb nedlægges.

Sammenfatning af resultater

- Sandsynligheden for, at badevandskravet overskrides ved badestranden ved Tangkrogen er 60 % uafhængig af, hvilken vej vinden er.
- De mest kritiske overløb er OU04S ved Carl Nielsens Vej og OU02S ved Lystbådehavnen uanset tidevandscyklus. Overløbet OU05S vil ved nogle vindretninger være kilde til den største del af belastningen, når alle syv overløb aflaster, men det er typisk omkring stengærdet eller længere ude, hvor densiteten af badegæster er lav.
- Bakteriekoncentrationen ved Tangkrogen bliver højest, når det blæser fra øst og sydøst, men vind fra syd, nord, nordøst og sydvest vil også resultere i overskridelser af badevandskravet.

IV Løsningsforslag - Nedlægning af kritiske overløb og fremtidsperspektiver

Del IV præsenterer et løsningsforslag, hvori de to overløb med den største *E. coli*-belastning nedlægges. Nedlægningen af overløbene sker ved at føre deres udløb længere ud i Aarhus Bugt. Derudover berøres Tangkrogens fremtidsperspektiver og mulighed for varsling af badevandskvaliteten.

Kapitel 7 Belastning efter nedlægning af OU02S og OU04S 54

7.1 Risikokort - Udledning fra fem overløbsbygværker

7.2 Udpegning af overløbsbygværker med største *E. coli*-belastning

Kapitel 8 Fremtidsperspektiver for Tangkrogen og badestedets vandkvalitet 66

7 | Belastning efter nedlægning af OU02S og OU04S

De primære ferskvandskilder til forringelse af badevandskvaliteten ved Tangkrogen er overløbet OU04S ved Carl Nielsens Vej og overløbet OU02S ved Lystbådehavnen, som er beliggende nærmest til Tangkrogen ud af alle nærområdets overløb. En mulig løsning til problemstillingen er at nedlægge de to overløbsbygværker og lede den regnbetingede overløbsmængde fra OU04S og OU02S længere væk fra Tangkrogen og ud til overløbet OU03 tilhørende Marselisborg Renseanlæg.

I dette afsnit undersøges den mulige løsning med strømningsmodellen for at se, hvordan udbredelsen fra de resterende forureningskilder hænder. Der er ligeledes valgt at undersøge udbredelsen af spildevand, når vinden kommer fra de otte vindretninger ved aflastning ved både høj- og lavvande, jf. tabel 5.2. Tabel 7.1 viser udledte vandføringer fra de øvrige overløbsbygværker ved en overløbshændelse på 2 timer og 10 minutter, når OU02S og OU04S har udløb længere ude i bugten.

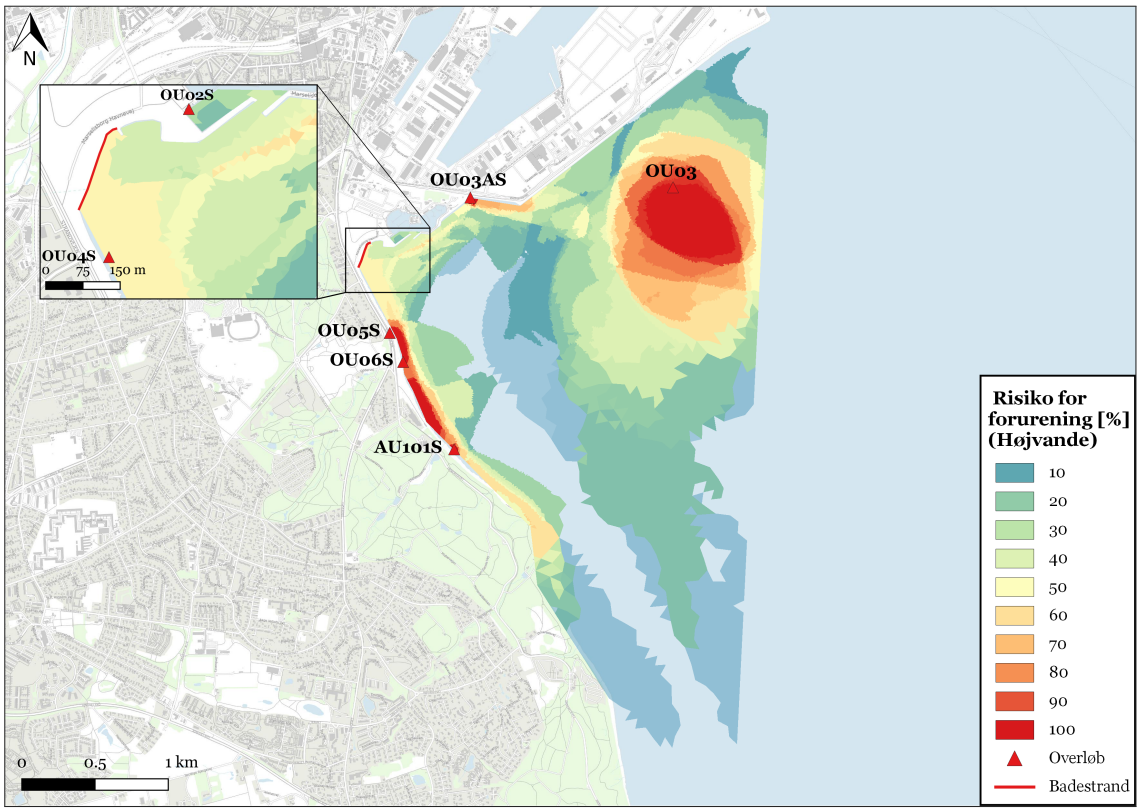
Tabel 7.1: Vandføringer for hvert overløb i strømningsmodellen. Udløbet OU03 omfatter nu udledning fra OU03, OU02S og OU04S.

	OU03	OU03AS	OU05S	OU06S	AU101S
Vandføring [m^3/s]	2,438	0,0615	0,0615	0,0615	0,0615

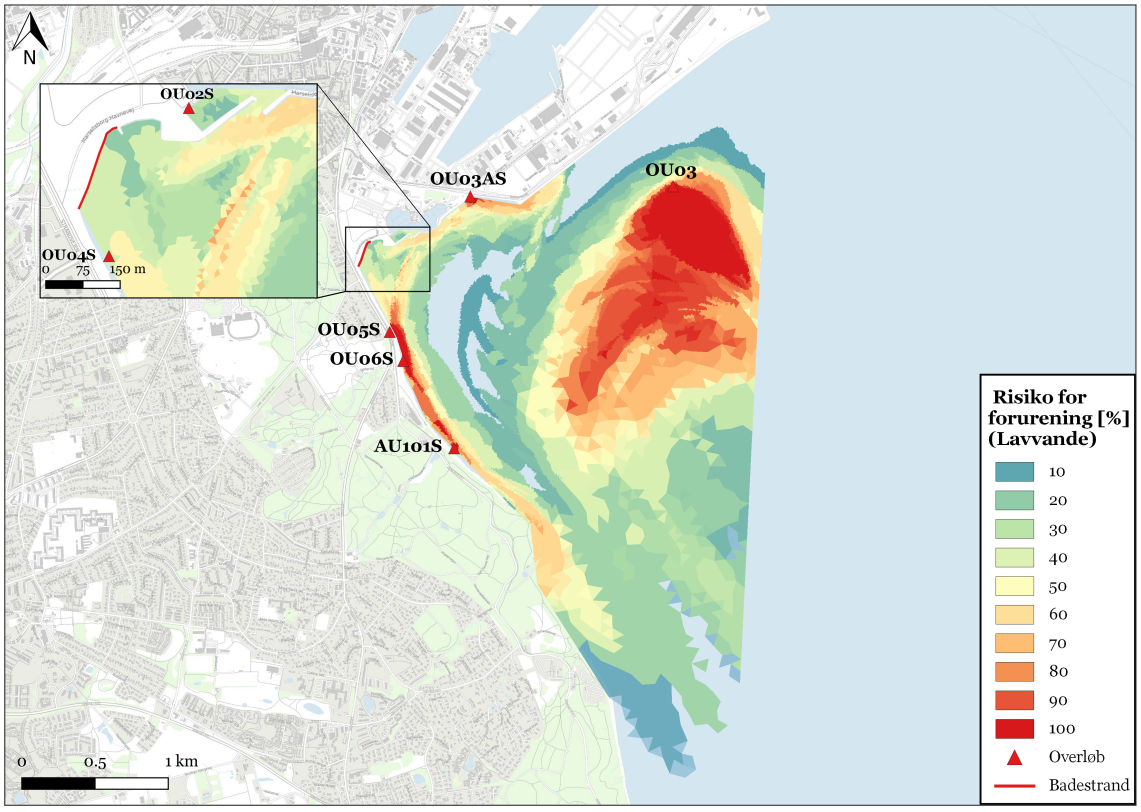
7.1 Risikokort - Udledning fra fem overløbsbygværker

Figur 7.1 illustrerer sandsynligheden for en overskridelse af badevandskravet for *E. coli* på 500 bakterier/100mL i nærområdet til Tangkrogen for hhv. aflastning ved høj- og lavvande, uanset vindretning til et vilkårligt tidspunkt ved den valgte overløbshændelse, efter nedlæggelse af overløbet OU04S ved Carl Nielsens Vej og overløbet OU02S ved Lystbådehavnen. Kortene er ligedan udarbejdet som beskrevet i afsnit 6.1. Der ses en mere jævn sandsynlighed for forurening ved aflastning ved højvande, som indikerer, at den stedslige risiko for overskridelse af badevandskravet er større, hvorimod sandsynligheden er mere ujævn ved aflastning ved lavvande og danner flere hotspots.

Badevandskvaliteten inde ved Tangkrogen regenereres efter 10 timer, således badevandskravet for *E. coli* overholdes, hvilket er 2 timer tidligere end før nedlæggelsen af de to overløb. Det anbefales, at badende gæster bør som minimum vente 10 timer med at bade ved Tangkrogen efter udledning fra regnbetingede overløb i området, hvis udløbene fra OU02S og OU04S føres længere ud i bugten.



(a) Højvande



(b) Lavvande

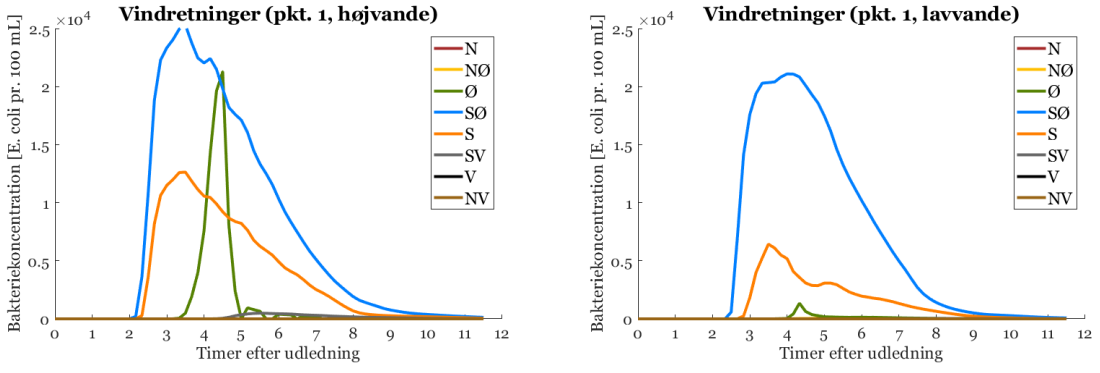
Figur 7.1: Risikokort over Tangkrogen efter nedlæggelse af overløbene OU04S og OU02S. Kortet illustrerer sandsynligheden for forurening ved aflastning ved høj- og lavvande uanset vindretning til et vilkårligt tidspunkt gennem en overløbshændelse med en varighed på 2 timer og 10 minutter.

Ved aflastning ved højvande er det omtrent 55 % sandsynligt, at badestedet vil blive forurenet på et vilkårlig tidspunkt efter overløbshændelser i nærområdet, hvorimod det ved aflastning ved lavvande er knap 40 %. Sandsynligheden for forurening ved badestedet før nedlæggelsen var omtrent 60 % for både aflastning ved høj- og lavvande. Tabel 7.2 viser de vindretninger, der bidrager til forurening inde ved badestranden ved Tangkrogen før og efter nedlæggelse af overløbene OU04S og OU02S. Efter nedlæggelsen af de to overløb er det vindretningerne øst, sydøst, syd og sydvest, der resulterer i forurening ved badestranden ved aflastning ved højvande, og østen-, sydøsten- og søndenvind, der resulterer i forurening ved aflastning ved lavvande. Førhen havde norden- og nordøstenvind en indvirkning på forureningen. Disse to vindretninger forekommer med en lav hyppighed, hvorfor sandsynligheden for overskridelse af badevandskravet efter nedlæggelsen ikke betydeligt reduceres.

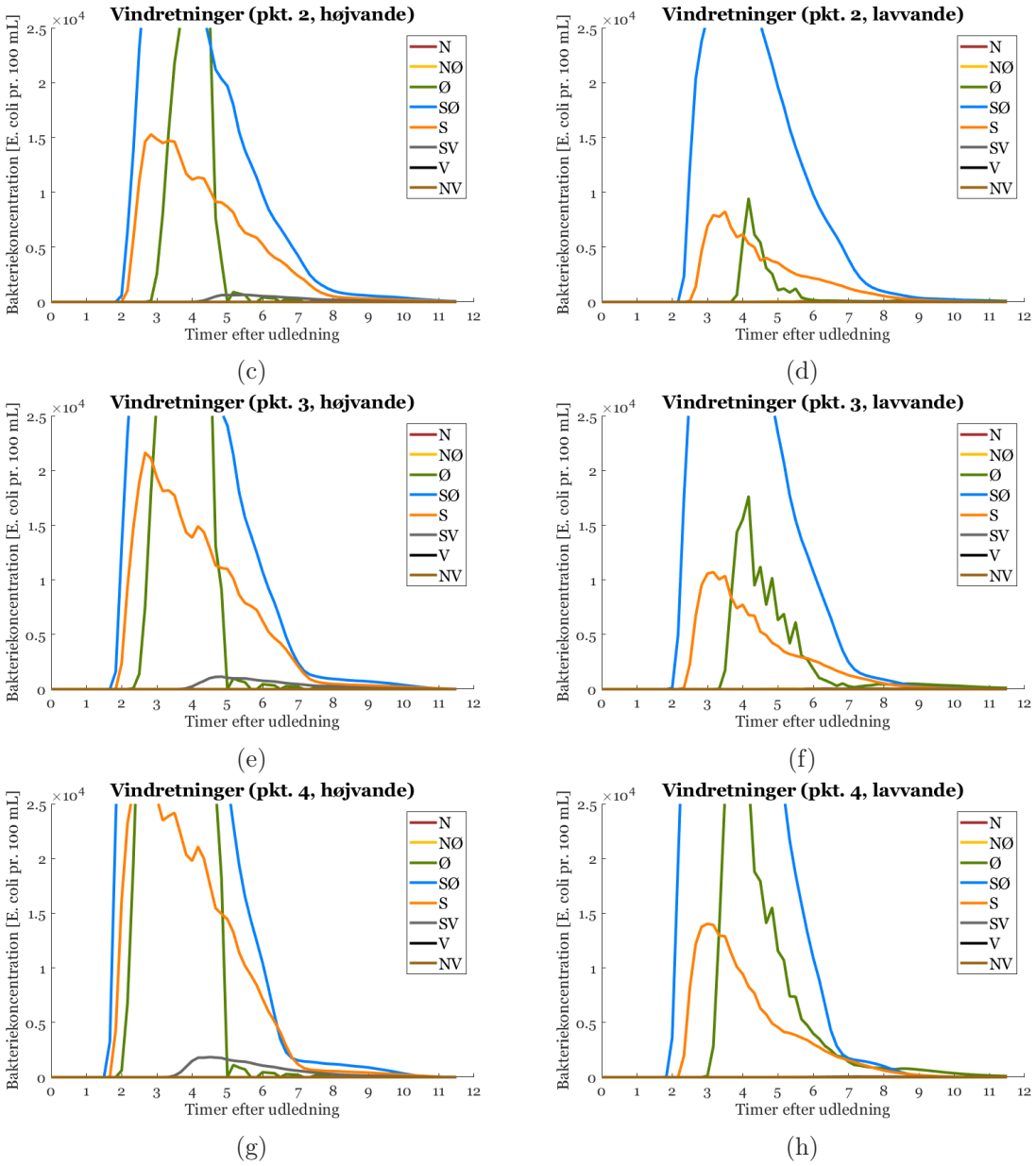
Tabel 7.2: Vindretninger, der resulterer i forurening inde ved badestranden ved Tangkrogen før og efter nedlæggelsen af overløbene OU04S ved Carl Nielsens Vej og OU02S inde ved Lystbådehavnen.

Vindretning	Bidragende fraktion [%]	Aflastning før nedlæggelse		Aflastning efter nedlæggelse	
		Højvande	Lavvande	Højvande	Lavvande
Nordenvind	3,5	×	×		
Nordøstenvind	4,6	×	×		
Østenvind	17,1	×	×	×	×
Sydøstenvind	10,2	×	×	×	×
Søndenvind	10,1	×	×	×	×
Sydvestenvind	15,8	×	×	×	
Vestenvind	23,8				
Nordvestenvind	14,9				

Figur 7.2 viser koncentrationen af *E. coli* (bakterier pr. 100 mL) helt inde ved badestranden til en given vindretning, når der aflastes ved hhv. høj- og lavvande. Der er tale om udtræk af bakteriekoncentrationen i punkterne 1-4 illustreret på figur 6.3, som er der, hvor badegæster går i vandet, og det er den samlede bakteriekoncentration, der forekommer i punktet fra alle overløbsbygværker. Figurene bekræfter desuden, at der er tale om de vindretninger, som er listet i tabel 7.2, og som er aflæst i QGIS fra risikokortene. Sydøstenvind giver generelt anledning til de højeste koncentrationer inde ved badestranden. Det er værd at bemærke, at koncentrationerne er omtrent en størrelsesorden 5-8 gange mindre end udtrukket koncentrationer før nedlæggelsen, jf. figur 6.5.



(a) (b)



Figur 7.2: Bakteriekoncentrationer ved badestranden som følge af vindens retning, når overløbene OU02S og OU04S er nedlagte.

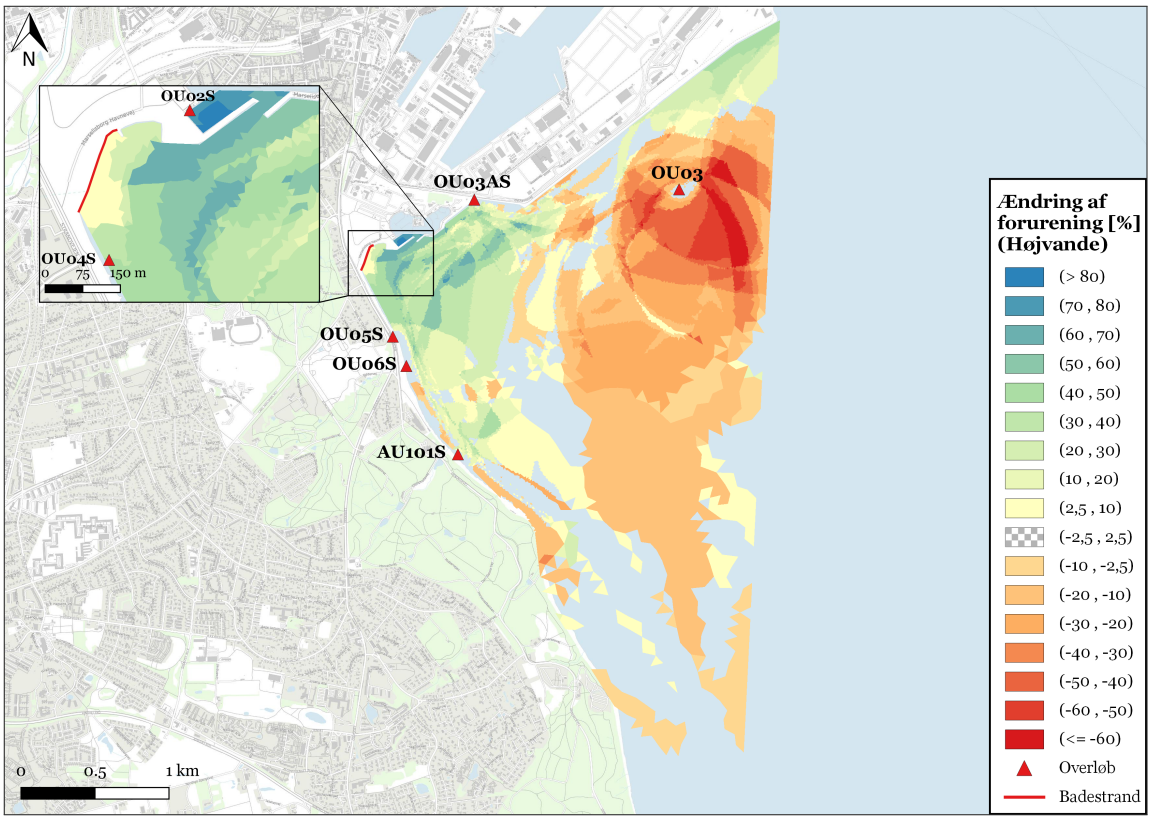
Ved sammenligning af risikokort før og efter nedlæggelsen af de to overløb er det at se, at der ikke længere er et rødt bælte >100 m fra Tangkrogen, der viser 100 % sandsynlighed for overskridelse af badevandskravet til et tilfældigt tidspunkt uanset vindretning, jf. figur 6.2a, 6.2b, 7.1a og 7.1b. Det vurderes, at udledning fra overløbene OU04S og OU02S er af stor betydning for forurening i bæltet.

Den yderligere vandføring fra renseanlæggets overløb OU03 resulterer i et betydeligt større areal, hvor der med 100 % sandsynlighed vil være forurening til et vilkårligt tidspunkt uanset vindretning, jf. tabel 7.3. Det vurderes dog, at der ikke er risiko for forurening inde ved badestranden fra renseanlæggets overløb i tilfælde af, at der udledes en større vandføring fra overløbet på 2,438 m^3/s end udgangspunktet på 1,276 m^3/s, da distancen er stor.

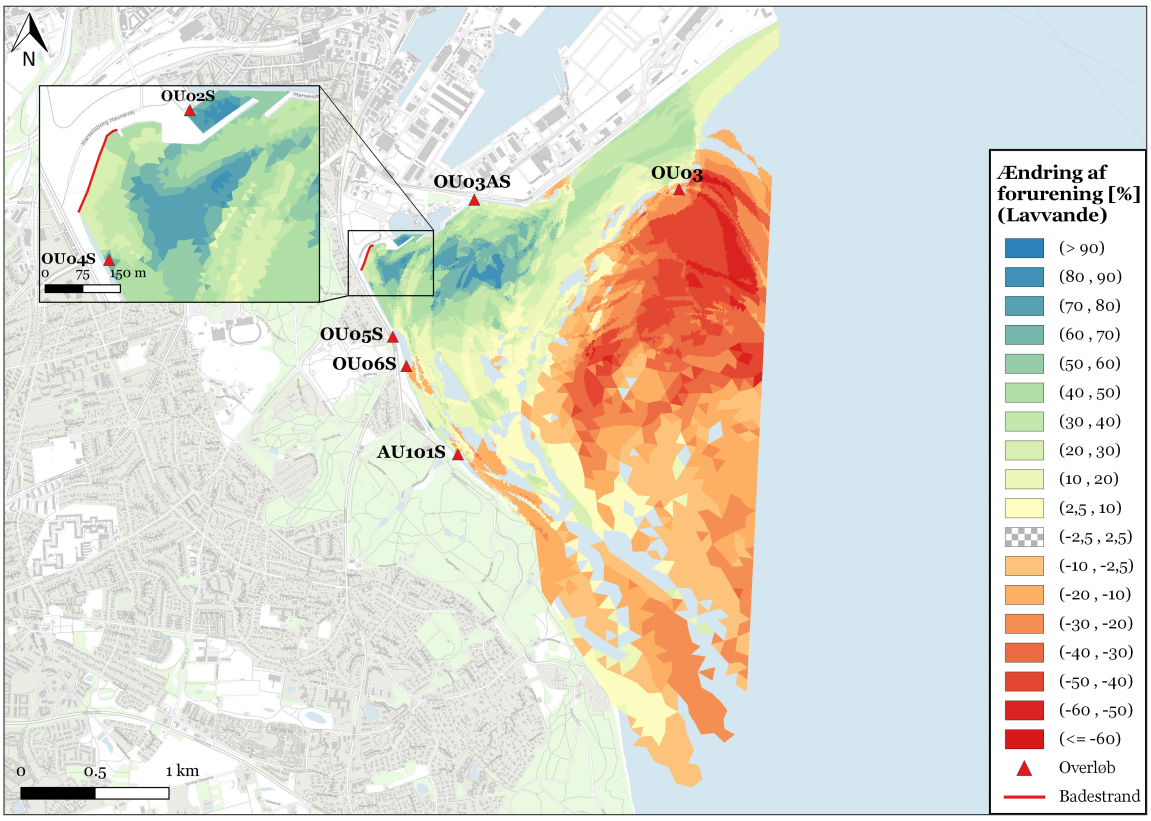
Tabel 7.3: Arealmæssig udbredelse af spildevand fra overløbet OU03 før og efter OU02S og OU04S blev koblet på.

Vindretning	Forurening før nedlæggelse		Forurening efter nedlæggelse	
	Højvande	Lavvande	Højvande	Lavvande
Areal [m^2]	9522	3575	240073	270473

Figur 7.3 illustrerer, hhv. for aflastning ved højvande og lavvande, den reelle ændring af sandsynlighed for overskridelse af badevandskravet for *E. coli* på 500 bakterier/100mL i modelleringsområdet. Dette er udarbejdet på baggrund af risikokort over området før og efter nedlæggelse af overløbet OU04S ved Carl Nielsens Vej og overløbet OU02S ved Lystbådehavnen. Dette er gjort ved at trække sandsynligheden fra hinanden for de to scenarier. Nedlægningen af de to overløb giver anledning til en betydelig reduktion af sandsynligheden for overskridelse af badevandskravet i nærområdet til Tangkrogen og langs havnen nord for renseanlæggets overløb OU03, hvor den store reduktion inde ved Lystbådehavnen er forventelig. Det vurderes, at nedlægningen ikke har stor betydning langs kysten ved overløbene OU05S og OU06S, idét kortene ikke viser en ændring af risikoen for forurening. Risikoen bliver derimod marginalt større i den sydøstlige og sydlige del af modelområdet grundet den yderligere udledning fra renseanlægget. Dette vil sammen med overløbet AU101S og lokale overløb langs kysten have en indvirkning på og belaste andre badestrande, jf. figur 1.1.



(a) Højvande



(b) Lavvande

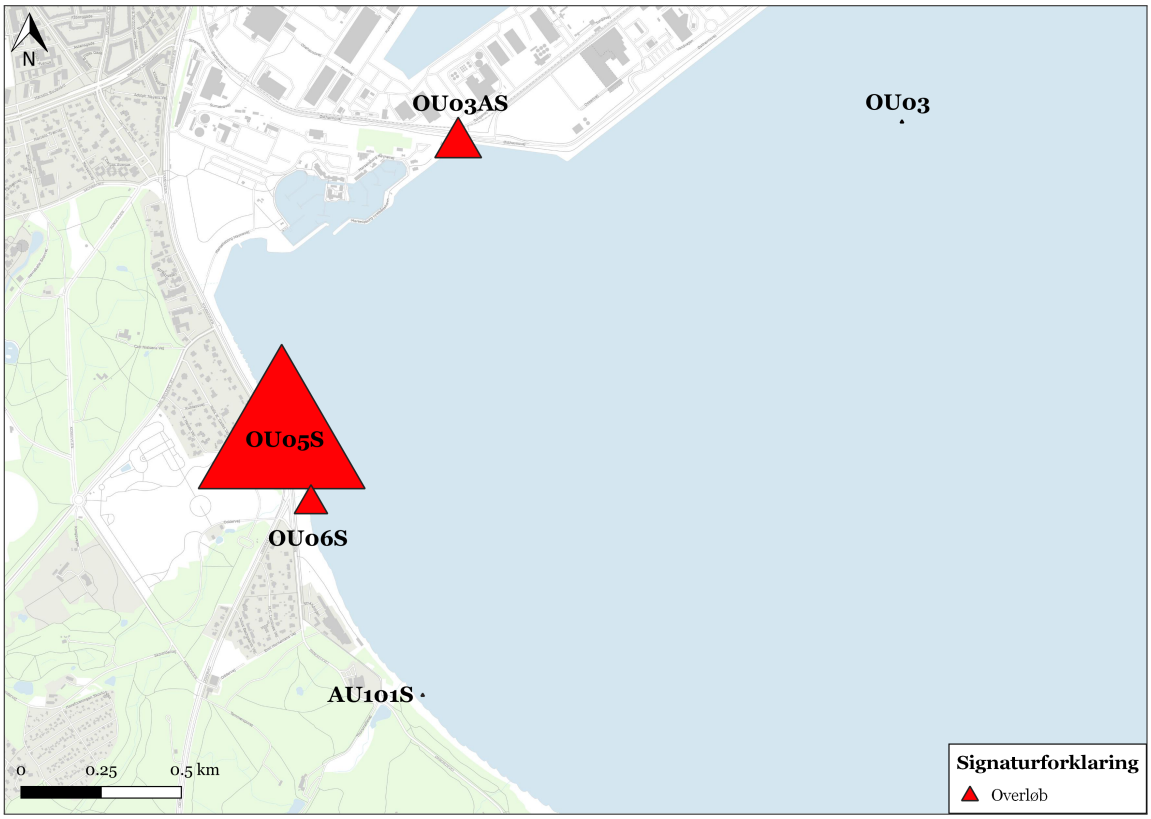
Figur 7.3: Kortene illustrerer ændringen af sandsynligheden for overskridelse af badevandskravet i modelleringsområdet efter nedlæggelse af overløbene OU04S og OU02S i forhold til før nedlæggelsen ved aflastning ved høj- og lavvande. Den positive skala informerer om reel reduktion af sandsynligheden, hvorimod den negative informerer om forøgelse af sandsynligheden.

Opløsningen af risikokortene, beskrevet i afsnit 6.1 og afsnit 7.1, opfattes at være høj og detaljeret, men er dog begrænset af det valgte beregningsnet til modellering, jf. afsnit 4.1 og figur 4.2, hvor udbredelsen af bakteriekoncentrationer beskrives omtrent 20 m og 100 m ad gangen, svarende til arealer mellem 150 m^2 og 5.000 m^2, hhv. i en zone omkring Tangkrogens nærliggende overløb inklusiv Tangkrogen og det resterende modelområde. Størrelsen af beregningsnettets celler er af stor betydning for troværdigheden af kortene. Det er især inde ved badeområdet, hvor et meget fint beregningsnet resulterer i et risikokort af meget høj opløsning, der er pålidelig at basere varsling ved Tangkrogen på. I strømningsmodellen beskrives bakteriekoncentrationen ca. 20 m ad gangen, og badestranden strækker sig ca. 200 m. For at øge opløsningen og dermed gøre risikoprofilen bedre, bør cellestørrelsen ved Tangkrogen gøres mindre. Dette vil dog resultere i en meget høj beregningstid, og det er derfor valgt at arbejde med cellestørrelser på 150 m^2. Trods dette indikerer de udarbejdet risikokort fortsat en sandsynlighed for forurening inde ved badeområdet, som antages at være plausibel.

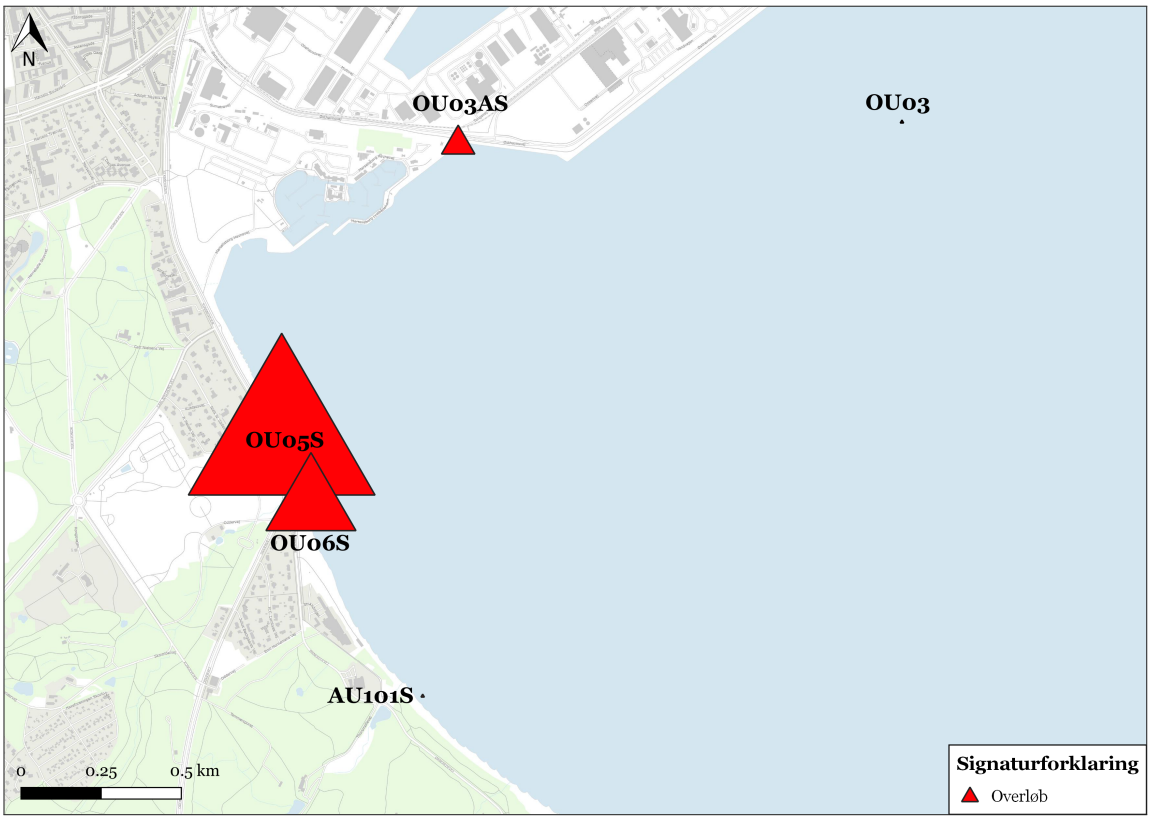
7.2 Udpegning af overløbsbygværker med største *E. coli*-belastning

Hvis risikoprofilen skal påvirkes, er det bygværkerne OU02S og OU04S, der er mest oplagte at nedlægge. Efter nedlæggelsen af OU02S og OU04S kan der dog i flere tilfælde forekomme en overskridelse af badevandskravet ved Tangkrogen, da overløbene, der ikke er nedlagte, stadig har udløb til Tangkrogen og nærområdet. Det er derfor relevant at lave en ny udpegning af overløbsbygværker med den største belastning af *E. coli*.

Figur 7.4 viser, hvor kritiske de fem resterende overløb er i forhold til hinanden ved aflastning ved høj- og lavvande efter nedlæggelsen af de to værste forureningskilder, mens tabel 7.4 viser en oversigt over, hvilket overløb, der bidrager mest til forringelse af badevandskvaliteten, når det ikke er OU02S og OU04S, der belaster mest, afhængig af vindens retning og hvor badende befinder sig ved stranden. Figur 7.4 er lavet på baggrund af tabel 7.4 og tager derfor udgangspunkt i det bygværk, der til hver vindretning bidrager mest til den samlede belastning i et givet punkt.



(a) Højvande



(b) Lavvande

Figur 7.4: Udpegning af overløbsbygværker i Tangkrogens nærområde ved aflastning ved høj- og lavvande. Størrelsen på de enkelte overløb indikerer, hvor kritiske de er inde ved Tangkrogen. Data er hentet fra SEGES (2020).

Tabel 7.4: Oversigt over, hvilket overløbsbygværk, der belaster mest i hvert punkt til en given vindretning, når OU02S og OU04S bliver udledt ved renseanlæggets udløb. Punkter markeret med - er punkter, hvori belastningen er 0 eller $<1\,E.coli/100mL$, hvilket anses for at være det samme som ingen belastning.

Oversigt over værste bygværker
Højvande

Vindretning \ Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nord	OU03AS	OU03AS	OU03AS	-	-	-	-	OU03AS	OU03AS	OU03AS
Nordøst	OU03AS/ OU05S	OU03AS/ OU05S	OU03AS/ OU05S	OU03AS/ OU05S	OU03AS/ OU05S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU03AS	OU05S	OU03AS/ OU06S	OU05S
Øst	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU03AS/ OU05S
Sydøst	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU06S
Syd	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S/ OU06S
Sydvest	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S
Vest	-	-	-	-	-	-	-	-	-	OU05S
Nordvest	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Lavvande

Vindretning \ Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nord	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S
Nordøst	OU03AS	OU03AS	OU03AS	OU03AS	OU03AS	OU03AS	OU03AS/ OU06S	OU06S/ OU03AS	OU03AS	OU06S
Øst	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU03AS
Sydøst	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU06S
Syd	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S/ OU06S
Sydvest	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S	OU05S/ OU06S	OU05S
Vest	-	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU05S/ OU06S	OU06S
Nordvest	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Flytningen af overløbenes udløb længere ud i bugten er en kortsigtet, men effektiv løsning, for det viser sig, at spildevand fra det fælles udløb nu tilhørende OU02S, OU04S og OU03 to kilometer længere ude i bugten ikke når ind til badestranden. På længere sigt vil det være nødvendigt at separatkloakere området omkring Marselisborg helt, således der ikke udledes spildevand til vandmiljøet overhovedet. Efter nedlæggelsen er risikoprofilen forandret meget til det bedre, men badevandskvaliteten kan stadig blive ringe. Dette skyldes primært overløbet OU05S, der på figur 7.4 derfor er meget større end de andre overløb ved både aflastning ved høj- og lavvande.

Specielt ved østen-, sydøsten-, sønden- og sydvestenvind er det bygværket OU05S, der giver problemer, men også overløbene OU06S, OU03AS og AU101S bidrager til belastningen. Specielt ved aflastning ved lavvande belaster OU06S ved flere vindretninger sammenlignet med aflastning ved højvande. Ved nord- og nordøstenvind er det primært bygværket OU03AS, der spiller en rolle for belastningen. Dog overskrides badevandskravet aldrig for disse to vindretninger undtagelsesvis i punkt 10, når det blæser fra nord, og aflastningen er startet ved lavvande. Her resulterer OU05S og OU06S i en overskridelse af badevandskravet, og de bidrager ca. lige meget til belastningen. Vind fra vest og nordvest resulterer aldrig i en overskridelse af badevandskravet for *E. coli*, men den minimale belastning, der er ved disse vindretninger, kommer fra OU05S og OU06S.

Figur 7.4 tager udgangspunkt i det bygværk, der belaster mest i et givent punkt til hver vindretning, men det er også relevant at se på, hvilke bygværker, der ellers belaster i hvert punkt. Tabel 7.5 viser en ranking af overløbene for de vindretninger, der resulterer i de største problemer ved badestranden: Øst, sydøst, syd og sydvest. Der tages udgangspunkt i de overløb, der bidrager mest til belastningen. I de tilfælde, hvor der kun er listet to overløb, er det kun de to bygværker, der belaster ved den givne vindretning. Hvis et bygværk er markeret med *, er badevandskravet overskredet. I appendiks F er de maksimale koncentrationer vist for hver vindretning i hvert punkt, og det er derfor muligt at se her, hvornår badevandskravet overskrides.

Tabel 7.5: Ranking af bygværker fra værst til tredje værst for vindretningerne øst, sydøst, syd og sydvest, der alle oplever en overskridelse af badevandskravet, hvis begge tidevandsscenarier betragtes.

Højvande

Punkt \ Vindretning	Øst	Sydøst	Syd	Sydvest
1	1. OU05S* 2. OU06S* 3. OU03AS*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S	1. OU05S 2. OU06S
2	1. OU05S* 2. OU06S* 3. OU03AS*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S	1. OU05S* 2. OU06S
3	1. OU05S* 2. OU06S* 3. OU03AS*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S	1. OU05S* 2. OU06S
4	1. OU05S* 2. OU06S* 3. OU03AS*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S*	1. OU05S* 2. OU06S

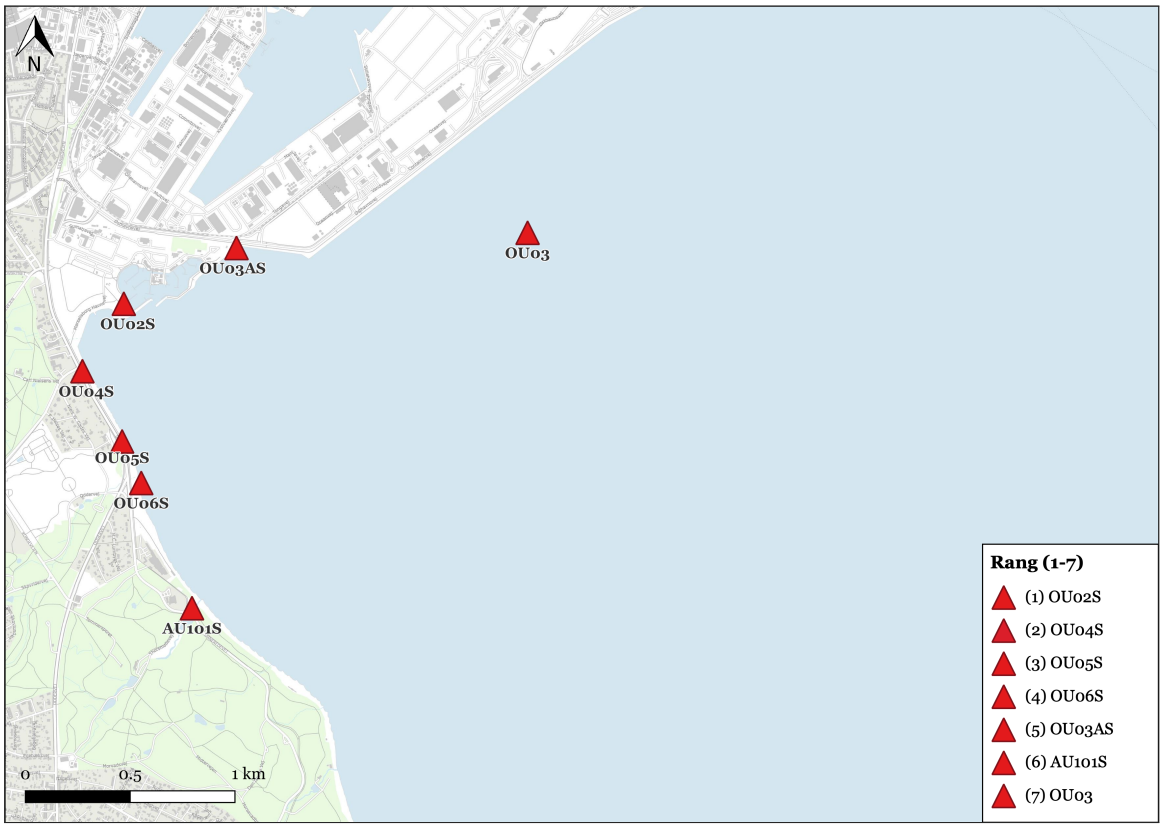
Lavvande

Punkt \ Vindretning	Øst	Sydøst	Syd	Sydvest
1	1. OU05S* 2. OU03AS 3. OU06S	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S	1. OU05S* 2. OU06S*	1. OU05S 2. OU06S
2	1. OU05S* 2. OU03AS 3. OU06S	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S*	1. OU05S* 2. OU06S*	1. OU05S 2. OU06S
3	1. OU05S* 2. OU06S*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S*	1. OU06S* 2. OU05S*	1. OU05S 2. OU06S
4	1. OU05S* 2. OU06S*	1. OU05S* 2. OU06S* 3. AU101S*	1. OU05S* 2. OU06S*	1. OU05S 2. OU06S

Strømningsmodellen tager udgangspunkt i det værst tænkelige scenarie, hvor alle nærområdets syv overløb aflaster på samme tid med overløbshændelser med gentagelsesperioder i området 5-7 måneder. De præsenterede resultater afspejler en risikoprofil efter en regnhændelse og repræsenterer ikke baggrundskoncentrationen. Dette er ensbetydende med, at en dag med høj solskin ved Tangkrogen, der kendetegnes som godt badevejr, ikke afspejler den præsenterede risikoprofil. Dog kan godt badevejr fremkomme efter en regnhændelse, og eftersom badende kan møde spildevand i op til 12 timer efter aflastningstidspunktet med de valgte gentagelsesperioder, er det absolut muligt, at Tangkrogens badegæster kan møde badevand med fortyndet spildevand.

Figur 7.5 viser en endelig rangering af alle områdets overløb baseret på resultaterne præsenteret i kapitel 6 og 7. Rangeringen er baseret på, hvor ofte et specifikt overløb bidrager med den største belastning i et punkt til en vindretning ligesom på figur 7.4.

Bygværk OU03AS forekommer oftere ved aflastning ved højvande sammenlignet med OU06S, mens det er omvendt ved aflastning ved lavvande. Det er valgt at rangere OU06S som et værre bygværk end OU03AS, da OU06S oftere rangeres som andet værste bygværk efter OU05S ved de fire kritiske vindretninger, jf. tabel 7.5.



Figur 7.5: Endelig rangering af alle overløbsbygværker, hvor 1 er det værste bygværk, og 7 er det mindst værste bygværk.

De værste overløbsbygværker i Tangkrogens nærområde er bygværkerne OU02S og OU04S, hvorfor det er valgt at præsentere et løsningsforslag, hvori udløbet til disse overløb føres længere ud i Aarhus Bugt. Der bør også være fokus på de to overløb, der er placeret efter OU04S langs den sydlige kyst: OU05S og OU06S. Aflastning fra disse overløb vil resultere i en overskridelse af badevandskravet ved flere kombinationer af vind og tidevandsforhold. Bygværk OU03AS er specielt en kilde til forurening, når der aflastes ved højvande, og det blæser fra nord, nordøst og øst. På samme måde er der bestemte vind og tidevandsforhold, der vil resultere i en overskridelse af kravet pga. belastning fra AU101S, jf. tabel 7.5. Spildevand fra renseanlæggets overløb OU03 når ikke ind til Tangkrogen, heller ikke når belastningen på overløbet øges, hvorfor bygværket modtager den laveste rang i rangeringen. Selvom der på nuværende tidspunkt er 77 overløb på dette udløb om året, anses det ikke som en væsentlig kilde til dårlig badevandskvalitet ved Tangkrogen.

Sammenfatning af resultater

- Nedlægningen af OU02S og OU04S har hjulpet meget ift. risikoprofilen ved Tangkrogen. Der vil stadig ske en overskridelse af badevandskravet, når det blæser fra øst, sydøst, syd og sydvest ved de valgte overløbshændelser, men retningerne nord, nordøst, vest og nordvest er ikke problematiske for badevandskvaliteten inde ved stranden.
- Efter nedlægningen af bygværkerne OU02S og OU04S er det blevet tydeligt, at bygværket OU05S også belaster meget ved Tangkrogen, og at overløbet i en del tilfælde kan resultere i en overskridelse af badevandskravet. Det gør sig også gældende for overløbene OU06S, AU101S og OU03AS, dog i mindre grad. OU03AS resulterer kun i en belastning, der overskrider badevandskravet, når det blæser fra øst, og aflastningen er startet ved højvande, mens AU101S er et problem, når det blæser fra syd og sydøst. OU06S resulterer i en overskridelse, når det blæser fra øst, sydøst og syd.
- Udløbet tilhørende Marselisborg Renseanlæg er ikke en kilde til ringe badevandskvalitet ved Tangkrogen ved en overløbshændelse svarende til ca. seks måneder. Når belastningen øges, er udløbet stadig ikke problematisk.

8 Fremtidsperspektiver for Tangkrogen og badestedets vandkvalitet

Der er store planer for Tangkrogen og Marselisborgområdet i fremtiden. Byggeplanerne involverer en udvidelse af den sydøstlige del af Aarhus Havn og en helhedsplan for Tangkrogen, der omfatter en større lystbådehavn og etableringen af et nyt renseanlæg. Helhedsplanen for Tangkrogens eventområde samt indpasning af et nyt Marselisborg Renseanlæg og udvidelsen af Marselisborg Lystbådehavn blev igangsat i 2014 (Aarhus Kommune, 2017).

Forslaget til udvidelsen af Aarhus Havn kaldes for Yderhavnen, og bliver udvidelsen en realitet, vil en del af søterritoriet i Aarhus Bugt blive inddraget. Udvidelsen af havnen skal ske som følge af pladsmangel og et ønske om at styrke byens forbindelse til resten af verden. Udvidelsen vil være tydelig fra Tangkrogen, og villaer på strandvejen vil potentielt kunne miste en del af deres havudsigt. Figur 8.1 viser Aarhus Havn på nuværende tidspunkt og hvordan havnen vil se ud, hvis udvidelsen bliver udført. (TV2 Østjylland, 2022)

(a)

(b)

Figur 8.1: Aarhus Havn før (a) og efter (b) foreslået havneudvidelse (TV2 Østjylland, 2022).

En udvidelse af havnen vil kunne påvirke strømningsforholdene og vandmiljøet i nærområdet. I dette speciale er der i strømningsmodellen ikke taget højde for en potentiel udvidelse af havnen, hvorfor de præsenterede resultater ikke afspejler indpasningen af udvidelsen, men i stedet den nuværende situation på figur 8.1 (a). Med den nye udvidelse af havnen, er det muligt, at resultaterne kan være anderledes.

Dette gør sig også gældende i det tilfælde, at det nye Marselisborg Renseanlæg også optager noget af søterritoriet. I fremtiden ønskes der at flytte renseanlægget længere væk fra byen og samtidig øge kapaciteten til mere end det dobbelte, således renseanlæggene i Åbyhøj og Viby kan nedlægges (Aarhus Kommune, 2017). Aarhus er en by i vækst, og det er derfor vigtigt for Aarhus Kommune, at der er nok kapacitet på byens renseanlæg. En større kapacitet vil formentlig være med til at mindske antallet af overløb på OU03. Selvom aflastning på bygværket ikke har den store indflydelse på badevandskvaliteten lige efter aflastning, er det muligt, at overløb fra renseanlægget er med til at påvirke baggrundskoncentrationen for badevandskvaliteten. På sigt ønsker kommunen, at byens spildevand kun håndteres og renses på Egå og Marselisborg Renseanlæg (Aarhus Kommune, 2017). På nuværende tidspunkt udarbejdes der miljvurderinger på to forslag til placeringen af det nye renseanlæg, og disse forslag kan ses på figur 8.2.

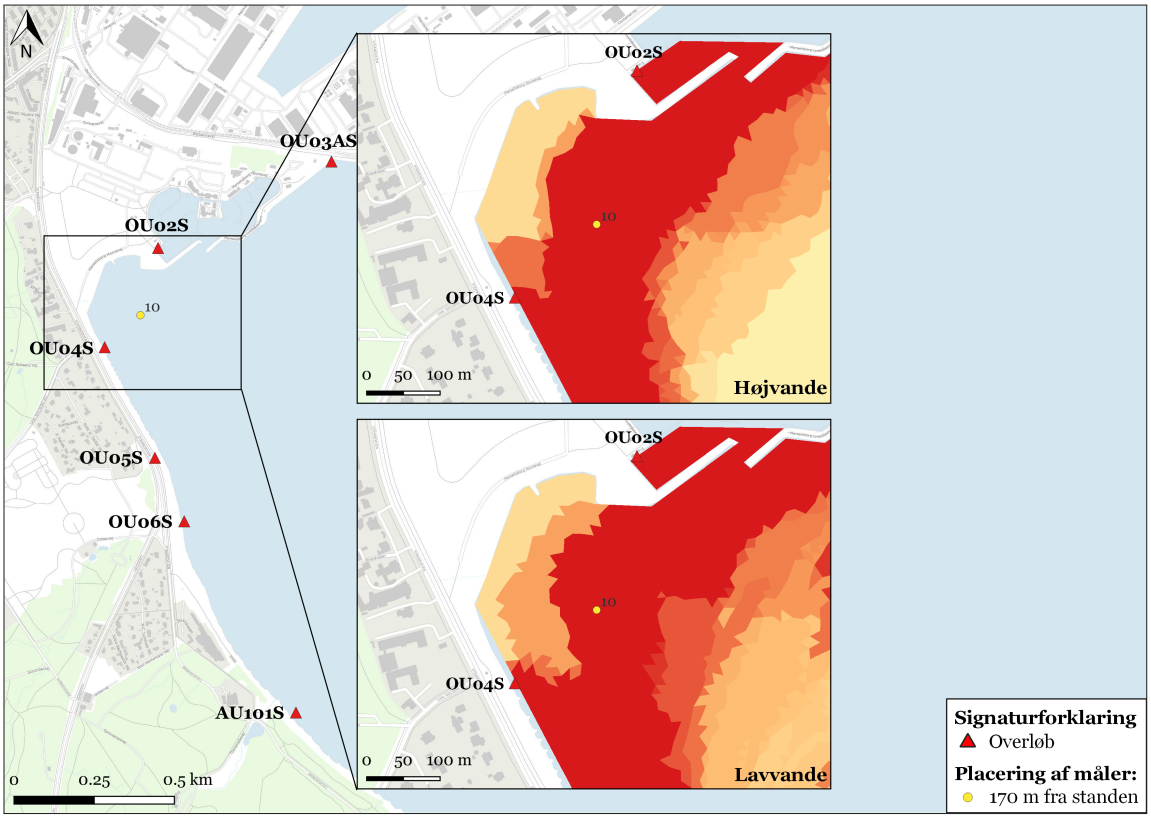
(a)

(b)

Figur 8.2: Forslag til fremtidig placering af det nye Marselisborg Renseanlæg samt forslag til udvidelse af Marselisborg Lystbådehavn og Tangkrogens eventområde. Forslagene er kendt som Hovedforslag (a) og Alternativ 2 (b) (Aarhus Kommune, 2019).

Af figur 8.2 fremgår også planen for udvidelsen af Marselisborg Lystbådehav. I det første forslag, kendt som Hovedforslaget, ligger det nye Marselisborg Renseanlæg placeret ved siden af Marselisborg Lystbådehavn. I det andet forslag, kendt som Alternativ 2, placeres det nye renseanlæg i den nye havneudvidelse og dermed væk fra lystbådehavnen. Planen for Marselisborg Lystbådehavn er, at den skal udvides, så der bliver op til 500 flere bådpladser (Aarhus Kommune, 2017). Det er kommunens ønske, at byen råder over flere bådpladser, og det er mest oplagt at finde pladserne i Marselisborg Lystbådehavn. Derudover er planen også at gøre hele Tangkrogsområdet mere attraktivt ved fortsat at bevare eventområdet og lave flere parkeringspladser der, hvor Marselisborg Renseanlæg er placeret nu (Aarhus Kommune, 2017, 2019).

Så længe der er overløbsbygværker i Tangkrogens nærområde, der aflaster med spildevand, vil der være risiko for forringet badevandskvalitet. Det er derfor fortsat vigtigt, at badevandskvaliteten varsles. Den opsatte strømningsmodel har været i stand til at vurdere, hvilke overløb i nærområdet, der har størst betydning for badevandskvaliteten, og hvilke der har mindst betydning. Den kan derfor sige noget om, hvilke overløbsudløb, der er en fordel at føre længere ud i bugten, og den kan varsle bakteriekoncentrationen 12 timer efter en overløbshændelse med en gentagelsesperiode på ca. 6 måneder. Derudover har strømningsmodellen også været i stand til at udpege, hvilke vindretninger, der styrer udbredelsen af spildevand, således badevandskravet bliver overskredet.



Figur 8.3: Forslag til placering af måler ved Tangkrogen, således måleren placeres hensigtsmæssigt et sted, hvor der er stor sandsynlighed for at møde spildevand.

Strømningsmodellen er ikke i stand til at varsle i realtid, men der er på baggrund af de udarbejdede risikokort lavet en vurdering på, hvor der kan opsættes en måler, jf. figur 8.3. Måleren bør opsættes i det røde bælte, hvor der er 100 % sandsynlighed for, at der forekommer forurening ved den foreskrevne overløbshændelse uafhængig af vindens retning. Der er i kapitel 6 præsenteret, hvordan der også er udtrukket koncentrationer fra punkt 10, der er placeret i det røde bælte. Placeres måleren i dette punkt, vil modellens resultater kunne bruges til sammenligning med de målte koncentrationer efter en overløbshændelse med en gentagelsesperiode på ca. 6 måneder. Kristensen og Heggdal (2019) har lavet en varslingsmodel i Aarhus Havn, der kan beregne bakteriekoncentrationen i realtid på baggrund af den målte ledningsevne i vandet. I princippet kunne samme set-up laves ved Tangkrogen, og der kunne placeres en måler i punkt 10, der måler på vandets ledningsevne. Det spekuleres også, om det er muligt at varsle ved at måle på andre indirekte parametre, f.eks. koncentrationen af ammonium. Uanset vil opsætning af en måler være et godt tillæg til strømningsmodellen og analysen af badevandskvaliteten ved Tangkrogen.

V

Afrunding

Del V indeholder afslutning af projektet i form af en konklusion og litteraturliste.

Kapitel 9 Konklusion **72**

Litteraturliste **74**

9 Konklusion

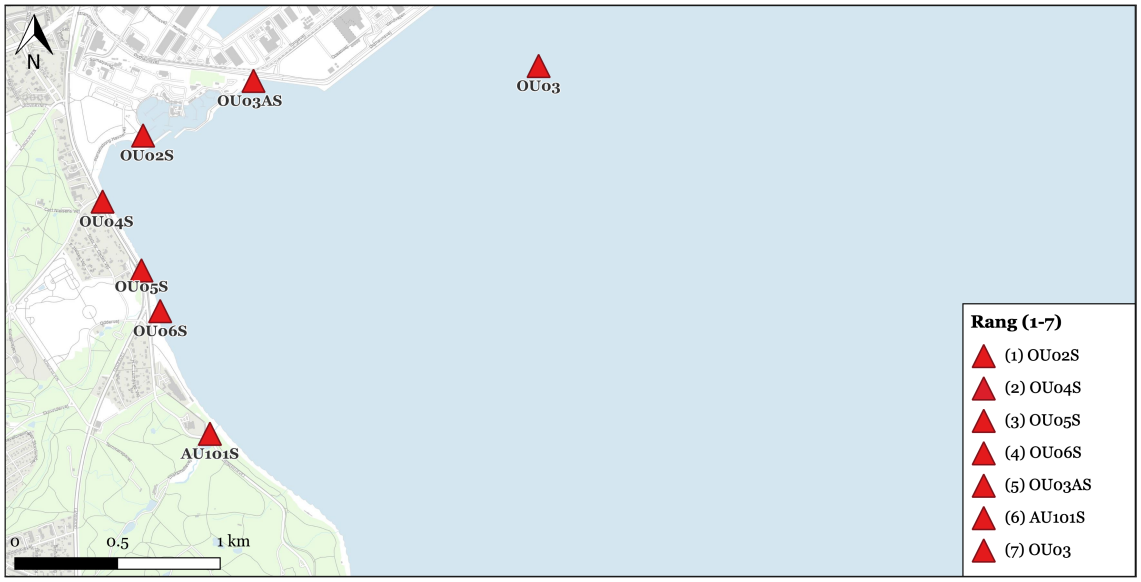
Der er i dette speciale udarbejdet en strømningsmodel mhp. at analysere og forbedre badevandskvaliteten ved Tangkrogen i Aarhus. Der tages udgangspunkt i en worst-case analyse, hvor syv overløbsbygværker aflaster til nærområdet samtidig efter en regnhændelse.

Hvor omfattende er problemet med dårlig badevandskvalitet ved Tangkrogen?

Regnbetingede udløb belaster området og forårsager ringe badevandskvalitet. Dette kan ses på målte koncentrationer fra Tangkrogen i form af peaks, men som udgangspunkt opfylder baggrundskoncentrationen badevandskravet. Ved at opsætte en strømningsmodel over Tangkrogen er det påvist, at der er 60 % sandsynlighed for forurening inde ved badeområdet ved aflastning af spildevand ved høj- og lavvande uanset vindretning til et vilkårligt tidspunkt gennem en overløbshændelse på 2 timer og 10 minutter, svarende til en gentagelsesperiode på ca. 6 måneder. Bevæger badende sig længere ud fra badestranden (ca. 100 m), vil risikoen for at møde spildevand være 100%, hvis den beskrevne overløbshændelse har fundet sted, og badevandskravet vil her være overskredet.

Hvilke overløbsbygværker ved Tangkrogen og i nærområdet giver anledning til dårlig badevandskvalitet?

På baggrund af modellerede koncentrationer udtrukket fra strømningsmodellen er der lavet en rangering af overløbsbygværkernes indflydelse på badevandskvaliteten ved Tangkrogen fra værst til bedst, hvor 1 er det værste, og 7 er det bedste. Figur 9.1 viser rangeringen og lokationen af overløbsbygværkerne i nærheden af Tangkrogen. Rangeringen er baseret på, hvor ofte et specifikt overløb bidrager med den største belastning i et punkt til en vindretning og ikke på, hvor ofte et specifikt overløb resulterer i en overskridelse af badevandskravet.



Figur 9.1: Endelig rangering af alle overløbsbygværker, hvor 1 er det bygværk, der samlet belaster mest, mens 7 er det bygværk, der samlet belaster mindst.

Det kan konkluderes, at de to værste bygværker er OU02S og OU04S, som er de overløb, der er nærmest beliggende til Tangkrogen. Det bygværk, der betyder mindst for badevandskvaliteten inde ved badeområdet, når der aflastes med spildevand til området, er overløbet OU03 tilhørende Marselisborg Renseanlæg. Det vides dog ikke, om overløbet har indflydelse på den generelle baggrundskoncentration af *E. coli* i området. Overløbsbygværkerne langs den sydlige kyst (OU05S, OU06S og AU101S) resultere i en overskridelse af badevandskravet ved Tangkrogen afhængig af vindens retning, men i flere tilfælde driver aflastningen fra disse overløb også længere syd på, hvor der også er badestrande. OU03AS i sig selv skaber kun i få tilfælde en overskridelse af badevandskravet, men overløbet bidrager ved flere vindretninger til en del af den samlede belastning.

Hvilken betydning har meteorologiske forhold for spredning af E. coli?

Der er vha. strømningsmodellen undersøgt, hvilken effekt vindens retning og hastighed har på badevandskvaliteten inde ved Tangkrogen. Det kan konkluderes, at en højere vindhastighed vil sprede *E. coli* hurtigere, men det vil ikke ændre på selve udbredelsen. Når der ikke blæser, vil tidevandsforholdene resultere i, at udbredelsen bevæger sig syd på. Spredningen af *E. coli* inde ved Tangkrogen er styret af vindretningerne nord, nordøst, øst, sydøst, syd og sydvest, som er de vindretninger, der resulterer i en sandsynlighed for forurening på 60 %. I vurderingen er der taget højde for vindretningers hyppighed, hvorfor seks ud af otte vindretninger kun resulterer i en sandsynlighed på 60 %. Når det blæser fra øst og sydøst, opnås de højeste koncentrationer ved badestranden.

Hvad bør der gøres for at sikre godt badevand ved Tangkrogen i fremtiden?

Der er i dette speciale præsenteret et løsningsforslag, hvor udløbene til OU02S og OU04S føres længere ud i Aarhus Bugt, hvor overløbet tilhørende Marselisborg Renseanlæg er lokaliseret. Løsningsforslaget er kortsigtet, men effektivt, da bakteriekoncentrationen reduceres betydeligt, men badevandskravet overskrides fortsat ved regnbetingede overløb. Det er ikke de regnbetingede overløb, der danner baggrund for badevandskravet, men derimod baggrundskoncentrationen af *E. coli*. Der er på baggrund af modellerede bakteriekoncentrationer og risikokort konkluderet, at OU02S og OU04S er de bygværker, der giver størst grund til bekymring, og løsningsforslaget, hvor udløbene føres længere ud i bugten, vil derfor være med til at mindske problematikken med badevandskvaliteten ved Tangkrogen. En ideel løsning vil være at mindske udledningsmængden af spildevand, der udledes til nærområdet. Dette kan ske i forbindelse med en separatakloakering af Marselisborgområdet samt en omplacering og udbyggelse af Marselisborg Renseanlæg i fremtiden.

Litteraturliste

Aarhus Kommune, 2017. Aarhus Kommune. *Indkaldelse af: Idéer og forslag til helhedsplanlægning for Tangkrogområdet og VVM, 2017.*

Aarhus Kommune, 2019. Aarhus Kommune. *Nye mulighed for planlægning på: Marselisborg Lystbådehavn, Marselisborg renseanlæg og søterritoriet ved Østhavnen i forbindelse med Helhedsplan Tangkrogen, 2019. Afdeling for Teknik og Miljø.*

Aarhus Kommune, 2021a. Aarhus Kommune. *BorgerGIS, 2021a. URL* `https://webkort.aarhuskommune.dk/spatialmap`. *Sidst besøgt: 03.12.2021.*

Aarhus Kommune, 2021b. Aarhus Kommune. *Data udleveret af Aarhus Kommune, 2021b. Samarbejde mellem Aarhus Vand A/S, Amphi-Bac Aps, Aalborg Universitet og Aarhus Kommune.*

Aarhus Kommune, 2021c. Aarhus Kommune. *Vil du på stranden?, 2021c. URL* `https://www.aarhus.dk/borger/kultur-natur-og-idraet/ud-i-naturen/vil-du-paa-stranden/`. *Sidst besøgt d: 15.12.2021.*

Aarhus Stadsarkiv, 2021. Aarhus Stadsarkiv. *Tangkrogen, 2021. URL* `https://aarhuswiki.dk/wiki/Tangkrogen`. *Sidst besøgt: 03.12.2021.*

Aarhus Vand, 2022. Aarhus Vand. *Aarhus har fået renere vand i havn, å og søer, 2022. URL* `https://www.aarhusvand.dk/projekter/vores-projekter/soerne-aen-og-havnen/`. *Sidst besøgt: 02.04.2022.*

Cappelen, 2019. J. Cappelen. *Tilbageblik: Vejret og klimaet i 2018, DMI,* `https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Bruger_upload/PopArt/Vejret159_vejr_klima_2018.pdf`, *2019.*

Christiansen et al., 1994. C. Christiansen, L. C. Lund-Hansen og P. Skyum. *Havforskning fra Miljøstyrelsen - Hydrografi og stoftransport i Aarhus Bugt, Miljøstyrelsen, 1994. Geologisk Institut, Aarhus Universitet.*

Danmarks Miljøportal, 2021. Danmarks Miljøportal. *Miljødata, 2021. URL* `https://miljoedata.miljoeportal.dk`. *Sidst besøgt: 09.06.2022.*

DHI, 2017a. DHI. *MIKE 3 Flow Model FM: Transport Module, User Guide, 2017a.*

DHI, 2017b. DHI. *Mike 3 Flow Model: Hydrodynamic Module User Guide, 2017b.*

DHI, 2021. DHI. *Badevandsudsigten, 2021. URL* `https://badevand.dk`. *Sidst besøgt d: 15.12.2021.*

DHI, u.å. DHI. *Mike 21 & MIKE 3 Flow Model FM: Transport Module, Short Description, u.å.*

DMI, 2022a. DMI. *DMI's Frie Data, 2022a. URL www.dmi.dk/friedata/. Sidst besøgt: 14.12.2021.*

DMI, 2022b. DMI. *Middelvind, vindstød, kuling og storm - hvad mener meteorologen egentlig?, 2022b. URL https://www.dmi.dk/nyheder/2017/middelvind-vindstod-kuling-og-storm-hvad-mener-meteorologen-egentlig/. Sidst besøgt: 11.04.2022.*

Erichsen et al., 2006. A. C. Erichsen, H. Kaas, J. Dannisøe, O. Mark og C. Jørgensen. *Etablering af badevandsprofiler og varslingssystemer i henhold til EU's nye badevandsdirektiv, 2006. DHI - Institut for Vand og Miljø: Miljøprojekt Nr. 1101.*

Europa-Parlamentet og Rådets Direktiv, 2006. Europa-Parlamentet og Rådets Direktiv. *Direktiv om forvaltning af badevandskvalitet og om ophævelse af direktiv, 2006.*

European Environment Agency, 2020. European Environment Agency. *Danish bathing water quality in 2020, 2020. Country report.*

Farvandsvæsenet, u.å. Farvandsvæsenet. *Batymetridata over Kattegat, u.å. Data tilhørende det tidligere farvandsvæsen. Udleveret af Thomas Ruby Bentzen.*

Friluftsrådet, 2022. Friluftsrådet. *Blå Flag-strande, 2022. URL https://friluftsraadet.dk/oplev-blaa-flag/blaa-flag-strande. Sidst besøgt: 02.04.2022.*

GEUS, 2021. GEUS. *Jupiter. https://www.geus.dk/produkter-ydelser-og-faciliteter/data-og-kort/national-boringsdatabase-jupiter/, 2021. Sidst besøgt: 09.06.2022.*

GEUS, 2022. GEUS. *MARTA - Marine raw material, 2022. URL https://data.geus.dk/geusmap/?mapname=marta#baslay=baseMapDa&optlay=&extent=538214.1050152781,6205611.578756383,607212.5769787009,6241081.10575008&layers=havbundssediment. Sidst besøgt: 14.12.2021.*

Hansen et al., 2012. J. W. Hansen, A. Windelin, C. Göke, E. T. Jørgensen, F. T. Hansen og T. Uhrenholdt. *Fysiske og kemiske forhold, Aarhus Universitet, 2012. Notat 1.1.*

Jansen et al., 2019. J. L. C. Jansen, E. Arvin, M. Henze og P. Harremoës. *Wastewater Treatment - Biological and Chemical processes. Polyteknisk Forlag, 2019. ISBN 978-87-502-1150-1.*

Kjellerup et al., 2016. S. Kjellerup, M. Macnaughton og D. J. Jensen. *Kortlægning af blødbundsområder i Kattegat, Naturstyrelsen, 2016. ISBN: 978-87-7175-571-8.*

Krause-Jensen et al., 2007. D. Krause-Jensen, P. B. Christensen, S. L. Nielsen, J. Carstensen og M. B. Rasmussen. *Havbunden påvirker ålegræssets dybdegrænse, 2007. Tidsskrift: Vand og Jord, 3, s. 113-116.*

Kristensen og Heggdal, 2019. M. S. Kristensen og Ø. Heggdal. *Sensorbaseret varsling af badevandskvalitet i Aarhus Havn, Aalborg Universitet, 2019. Afgangsspeciale.*

Larsen, 2021. Torben Larsen. *Note on wind effects in estuaries and lakes, Aalborg Universitet, 2021. Undervisningsnotat.*

Miljø- og Fødevareministeriet, 2016. Miljø- og Fødevareministeriet. *Bekendtgørelse om badevand og badeområder, 2016. Journalnummer: Miljø- og Fødevarmin., Naturstyrelsen, j.nr. 010-00222.*

Miljøministeriet, 2011. Miljøministeriet. *Miljøgis, 2011. URL* `http://miljoegis.mim.dk/`. *GIS for idefasen for vand- og naturplaner.*

Miljøministeriet, By- og Landskabsstyrelsen, 2010. Miljøministeriet, By- og Landskabsstyrelsen. *Forslag til vandplan: Hovedvandopland 1.7 Århus Bugt, 2010. ISBN: 978-87-92668-48-6.*

Miljøstyrelsen, 2006. Miljøstyrelsen. *Undersøgelse af piletræers evne til at vokse i saltholdigt havneslam, samt optagelse og nedsivning af udvalgte stoffer, 2006. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, 28/2005.*

Miljøstyrelsen, 2021. Miljøstyrelsen. *Miljøgis.* `http://miljoegis.mim.dk/`, *2021. Sidst besøgt: 09.06.2022.*

Mølgaard et al., 2002. K. Mølgaard, C. Nickelsen og J. la Cour Jansen. *Miljøprojekt Nr. 684: Hygiejnisk kvalitet af spildevand fra offentlige renseanlæg, Miljøstyrelsen, 2002. s. 21-32.*

Nielsen et al., 2003. D. L. Nielsen, M.A. Brock, G.N. Rees og D. S. Baldwin. *Effects of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia. 2003. Australian Journal of Botany, 51, s. 655-665.*

OrganoWood, 2018. OrganoWood. *Aarhus Havnebad, 2018. URL* `https://organowood.com/da/inspiration/aarhus-havnebad/`. *Sidst besøgt: 02.04.2022.*

Petersen, 2017. Claus Petersen. *Den Permanente Badeanstalt skal genskabes som i storhedstiden fra 1950'erne, 2017. URL* `https://jyllands-posten.dk/jpaarhus/ECE9528674/den-permanente-badeanstalt-skal-genskabes-som-i-storhedstiden-fra-1950erne/`. *Sidst besøgt: 02.04.2022.*

SEGES, 2020. SEGES. *PULS-data fra alle renseanlæg og punktudledninger i Danmark for året 2020, 2020. URL* `http://spildevandsdata.dk`. *Sidst besøgt d: 20.12.2021.*

Skanderborg Kommune, 2017. Skanderborg Kommune. *Vandområder til analyse for kunstig/stærk modificeret,* `https://www.skanderborg.dk/document/6684fa8f-b6ef-45e0-9c7e-31ee685d85ed`, *2017.*

Starcke et al., 2021. S. Starcke, S. Bastholm, M. R. Rasmussen, A. Sørensen, N. K. Christensen og A. K. Jensen. *Rekreationel anvendelse af Tangkrogen - Monitering af badevandskvaliteten og vurdering af forureningskilder, 2021. Udleveret af Aarhus Kommune.*

Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering, 2022. Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering. *Dataforsyningen. https://maps.kortforsyningen.dk/, 2022.*

TV2 Østjylland, 2022. TV2 Østjylland. *Aarhus vil udvide med en million kvadratmeter, 2022. URL https://www.tv2ostjylland.dk/aarhus/se-billederne-aarhus-vil-udvide-med-en-million-kvadratmeter. Sidst besøgt d: 05.06.2022.*

VisitAarhus, 2022. VisitAarhus. *Den Permanente, 2022. URL https://www.visitaarhus.dk/aarhus/planlaeg/den-permanente-gdk603420. Sidst besøgt: 02.04.2022.*

Weather Underground, 2022. Weather Underground. *WunderMap - Station IAARHU21, 2022. URL https://www.wunderground.com/wundermap. Sidst besøgt d: 18.01.2022.*

VI

Bilag

Del VI uddyber og supplerer rapporten med dokumentation i form af figurer, data og udregninger, der er relevante for resultater og antagelser anvendt i rapporten. Dokumentationen giver et nærmere indblik i projektets anvendte teori og antagelser.

Bilag A **Salinitet** 80

Bilag B **Viby Regnserien og overløbsvolumener** 83

Bilag C **Vejrdata for badesæsonerne 2018-2020** . . 86

Bilag D **Beregning af henfaldskonstant** 90

Bilag E **Forureningsprofiler** 93

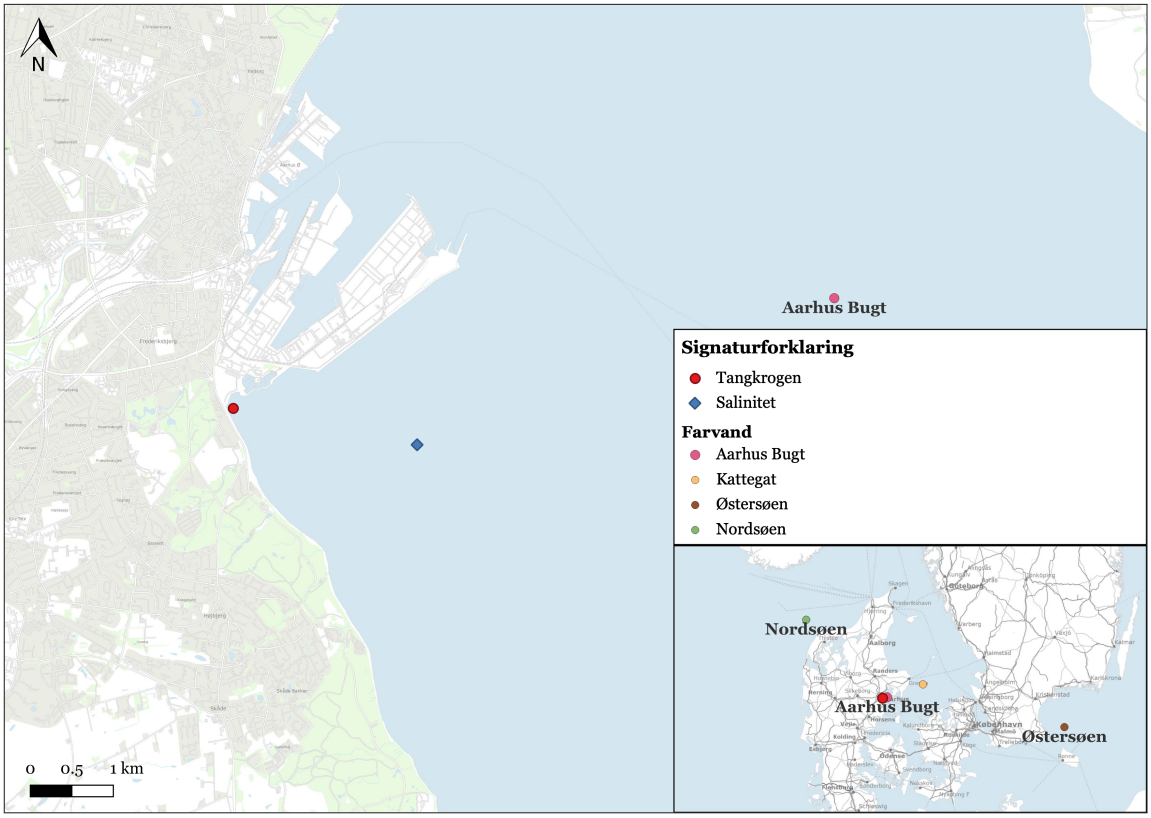
E.1 Forureningsprofiler for overløbsbygværker: Ved badestranden, stengærdet og væk fra badestranden

Bilag F **Profiler efter nedlægning af OU02S og OU04S** 111

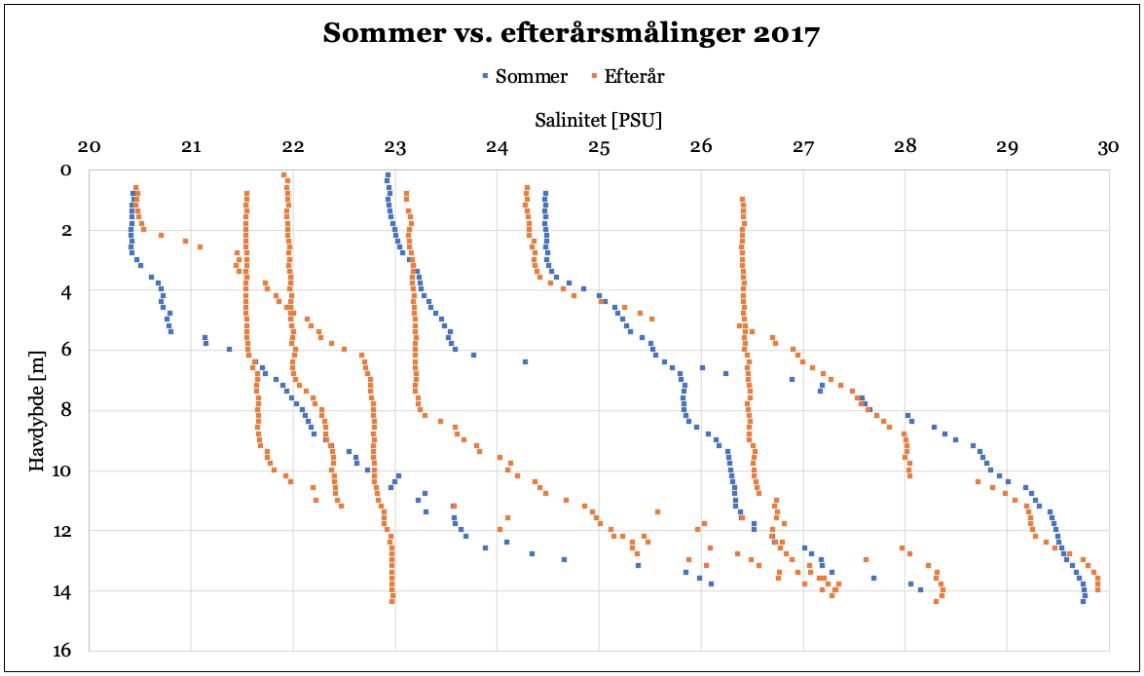
F.1 Forureningsprofiler for overløbsbygværker efter nedlæggelse: Ved badestranden, stengærdet og væk fra badestranden

Bilag A | Salinitet

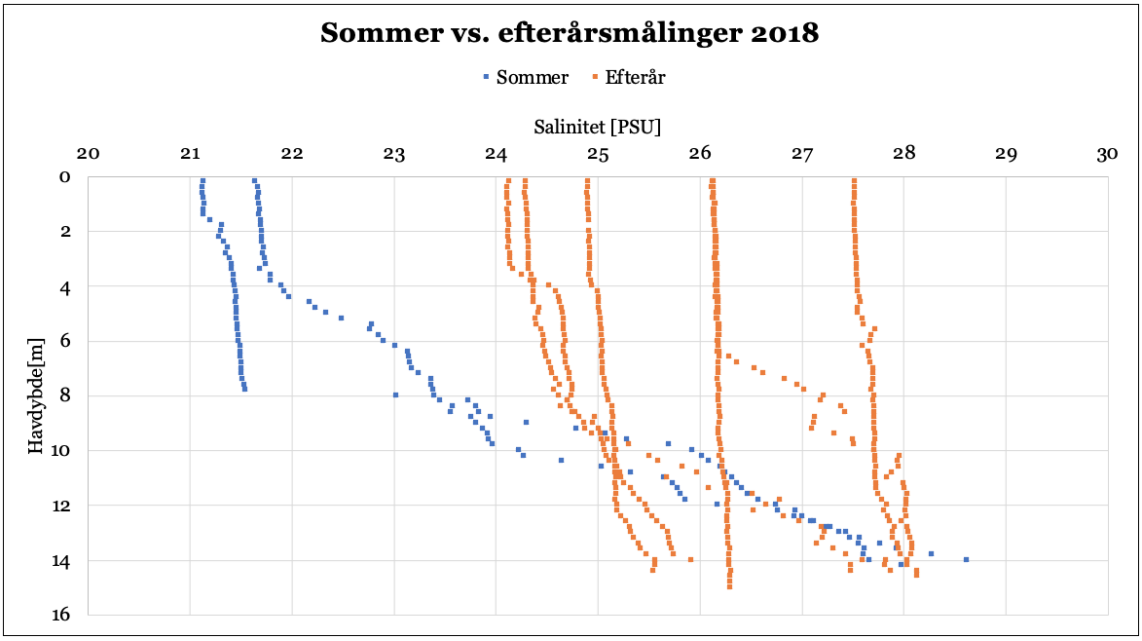
Dette bilag indeholder kortlægning over målestationen i Aarhus Bugt, hvorfra der er hentet salinitetsdata samt årstidsvariationen i salinitetsmålinger mhp. at identificere mulig lagdeling. Bilaget er relevant for kapitel 2. Målestationen kan ses på figur A.1, mens årstidsvariationen kan se på figur A.2.



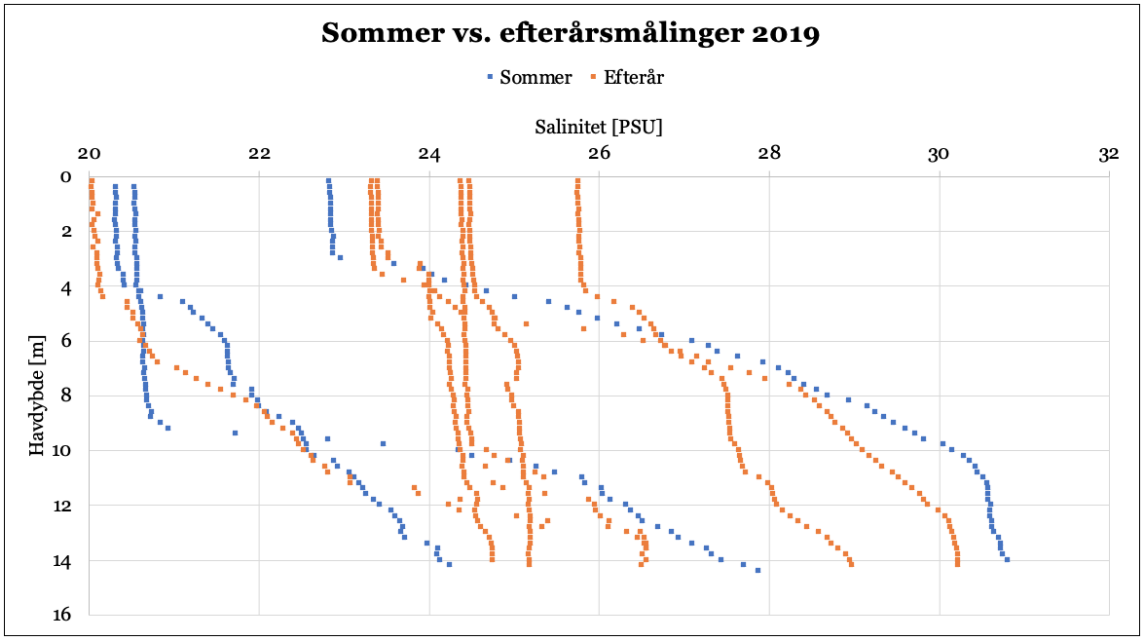
Figur A.1: Målestationen ARH170084 i Aarhus Bugt, hvorfra der er hentet salinitetsdata.


Sommer vs. efterårsmålinger 2017
Sommer
Efterår
Salinitet [PSU]
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
Havdybde [m]
0
2
4
6
8
10
12
14
16

(a)


Sommer vs. efterårsmålinger 2018
Sommer
Efterår
Salinitet [PSU]
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
Havdybde[m]
0
2
4
6
8
10
12
14
16

(b)



(c)

Figur A.2: Sommer og efterårsmålinger i salinitet for årene 2017 (a), 2018 (b) og 2019 (c) mhp. at analysere en eventuel forskel i lagdeling afhængig af årstiden. Data er hentet fra Danmarks Miljøportal (2021).

Bilag B | Viby Regnserien og overløbsvolumener

Dette bilag indeholder en præsentation af en regnserie fra en målestation i Viby, jf. figur B.1, samt overløbsvolumener beregnet af Aarhus Kommune for årene 2013-2016. Aarhus Kommune har beregnet overløbsvolumener for tre overløb med udløb tæt på Tangkrogen på baggrund af Viby Regnserien. Der er tale om overløb OU02S ved Lystbådehavnen, OU04S ved Carl Nielsens Vej og renseanlæggets overløb OU03, jf. figur 2.3. Dette bilag er relevant for kapitel 2 og kapitel 4.

Figur B.1: Placering af regnmåler i Viby, hvorfra Aarhus Kommune har brugt regndata til at beregne overløbsvolumener.

De følgende tabeller viser de beregnede overløbsvolumener og gentagelsesperioder beregnet af Aarhus Kommune (Aarhus Kommune, 2021b), samt akkumuleret regndybde og regnvarighed fra Viby Regnserien på de pågældende dage, der er beregnet overløbshændelser for. Bemærk, at der for nogle dage ikke er registreret en regnhændelse på det pågældende tidspunkt, der er lavet overløbsberegninger for som beskrevet i afsnit 2.2.

Tabel B.1: Beregnet overløbsvolumener for OU02S ved Lystbådehavnen.

OU02S ved Lystbådehavnen

Dato	Regnvarighed [min]	Akkumuleret regn [mm]	Volumen [m3]	Gentagelsesperiode [år]
21-05-2013 21:36	82	2	11767	0,67
09-09-2013 06:22	838	24,6	7512	0,36
23-12-2013 04:32	110	1,2	7271	0,33
16-01-2014 03:40	193	2,4	17391	2
25-06-2014 09:50	63	21	5835	0,19
13-07-2014 03:39	176	3	16848	1,33
14-10-2014 14:39	706	14,4	8025	0,4
16-11-2014 10:47	20	0,4	6245	0,21
09-01-2015 05:21	174	10,2	7114	0,31
05-05-2015 07:01	192	10,6	9097	0,57
21-06-2015 23:29	196	6,8	6580	0,24
25-07-2015 02:06	814	38,8	18465	4
14-08-2015 15:37	131	11,6	6949	0,29
04-09-2015 13:14	571	41,6	12953	0,8
06-10-2015 20:09	610	15,4	8794	0,44
21-12-2015 18:40	258	6,4	5640	0,1
25-12-2015 22:45	346	7,4	8981	0,5
20-02-2016 22:29	-	-	6728	0,27
26-04-2016 03:50	61	0,6	6301	0,22
29-05-2016 18:54	50	0,6	5738	0,18
08-07-2016 13:27	338	24,6	6049	0,2
01-10-2016 18:41	14	0,4	14001	1
04-11-2016 22:29	130	1,2	6586	0,25

Tabel B.2: Beregnet overløbsvolumener for OU04S ved Carl Nielsens Vej.

OU04S ved Carl Nielsens Vej

Dato	Regnvarighed [min]	Akkumuleret regn [mm]	Volumen [m3]	Gentagelsesperiode [år]
22-05-2013 02:36	-	-	834	2
16-01-2014 18:40	-	-	249	0,21
06-06-2014 05:13	320	18,8	309	0,31
25-06-2014 09:50	63	21	374	0,4
27-06-2014 17:38	47	4	284	0,27
13-07-2014 13:39	-	-	857	4
17-08-2014 10:08	-	-	210	0,1
29-08-2014 08:44	104	13,8	279	0,25
15-10-2014 00:39	-	-	220	0,19
16-11-2014 15:47	-	-	309	0,33
05-05-2015 07:01	192	10,6	465	0,57
19-06-2015 11:27	58	0,6	217	0,18
21-06-2015 23:29	196	6,8	447	0,44
25-07-2015 02:06	814	38,8	692	0,8
25-07-2015 16:57	-	-	522	0,67
15-08-2015 03:27	-	-	255	0,22
31-08-2015 15:47	417	20,8	292	0,29
04-09-2015 13:14	571	41,6	699	1
29-05-2016 23:54	-	-	312	0,36
25-06-2016 16:22	-	-	276	0,24
08-07-2016 13:27	338	24,6	457	0,5
25-07-2016 12:44	-	-	224	0,2
02-10-2016 12:10	-	-	828	1,33

Tabel B.3: Beregnet overløbsvolumener for overløbet OU03 tilhørende Marselisborg Renseanlæg.

OU03 Marselisborg Renseanlæg				
Dato	Regnvarighed [min]	Akkumuleret regn [mm]	Volumen [m3]	Gentagelsesperiode [år]
21-05-2013 21:36	82	2	22652	1,33
09-09-2013 06:22	838	24,6	6150	0,31
16-01-2014 19:37	-	-	15899	0,67
06-06-2014 05:13	320	18,8	6008	0,29
25-06-2014 09:50	63	21	4939	0,25
27-06-2014 17:38	47	4	4259	0,21
13-07-2014 08:39	-	-	24870	2
14-10-2014 14:39	706	14,4	5507	0,27
16-11-2014 15:47	-	-	8334	0,5
03-05-2015 19:55	329	13,6	3576	0,19
05-05-2015 07:01	192	10,6	8966	0,57
21-06-2015 23:29	196	6,8	7614	0,4
25-07-2015 02:06	814	38,8	31715	4
15-08-2015 05:29	-	-	3470	0,18
21-08-2015 15:47	-	-	7050	0,36
04-09-2015 13:14	571	41,6	16518	0,8
06-10-2015 20:09	610	15,4	7002	0,33
14-12-2015 14:18	598	16	3415	0,1
26-12-2015 10:03	-	-	4377	0,22
29-05-2016 23:54	-	-	3900	0,2
25-06-2016 16:22	-	-	4781	0,24
08-07-2016 13:27	338	24,6	8184	0,44
02-10-2016 13:08	-	-	21182	1

Forhold mellem overløb

Forholdet mellem overløbsvolumenerne fra de tre overløb er beregnet ved at sammenholde overløbsvolumenerne for de tre overløb til samme dato og tidspunkt. Overløbsvolumener fra OU03 ved Marselisborg Renseanlæg er divideret med overløbsvolumener fra OU02S ved Lystbådehavnen, ligeledes er gjort med overløbsvolumener fra OU03 ved Marselisborg Renseanlæg med OU04S ved Carl Nielsens Vej samt overløbsvolumener fra OU02S ved Lystbådehavnen med OU04S ved Carl Nielsens Vej. Heraf er der taget et gennemsnit af forholdende mellem de enkelte overløb, hvilket er at se i tabel B.4.

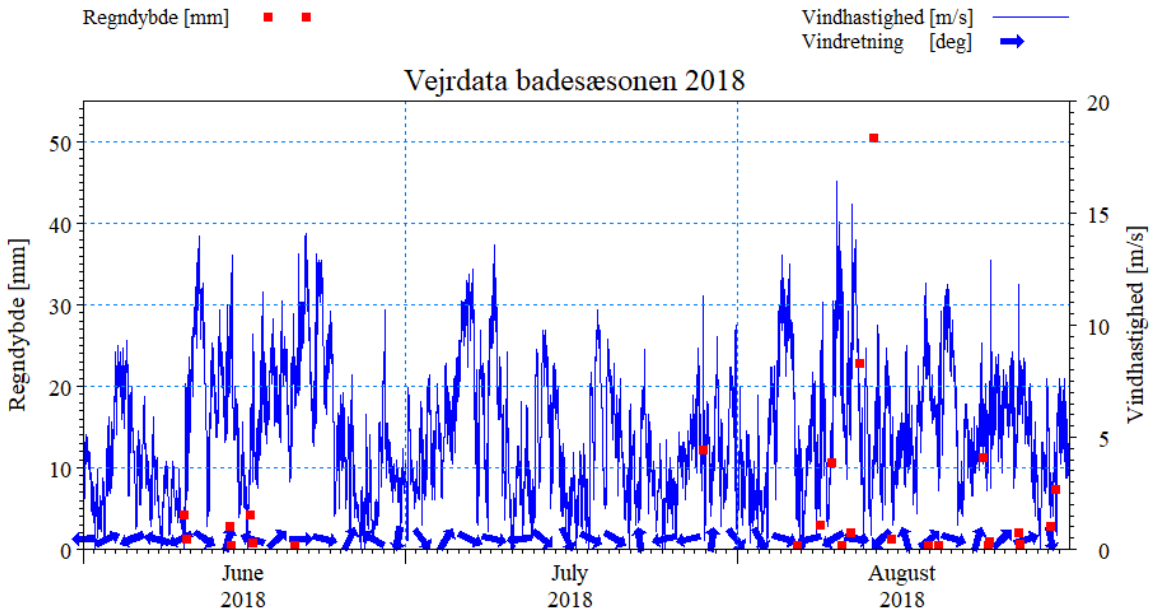
Tabel B.4: Beregnet forhold af overløbsvolumener i mellem de tre overløb.

OU03/OU02S	OU03/OU04S	OU02S/OU04S
1,16	20,74	18,06

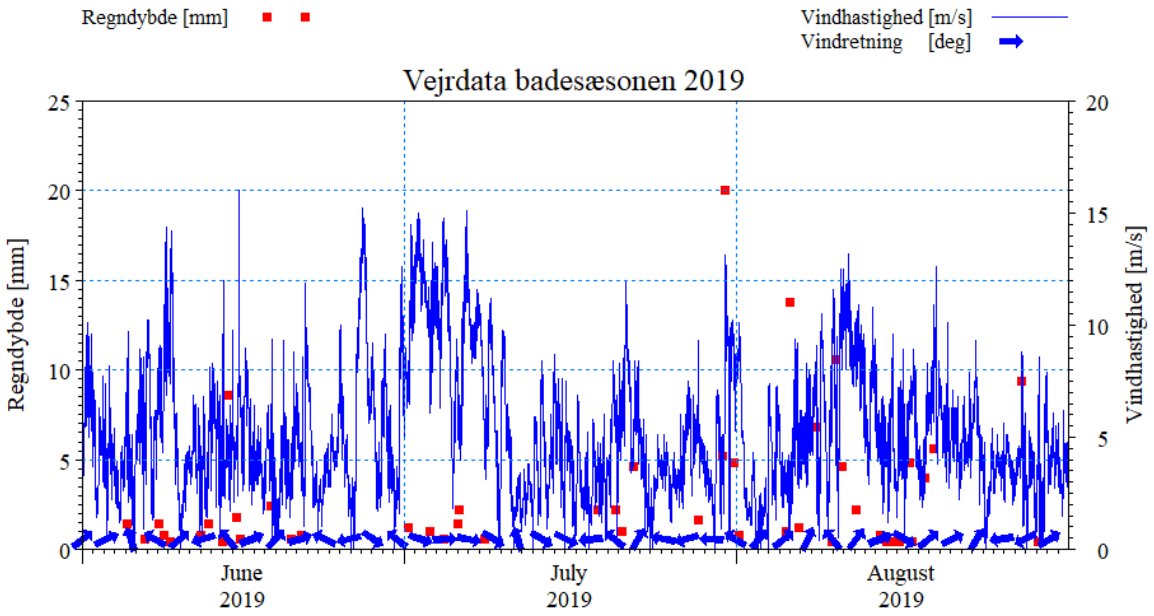
Bilag C | Vejrdata for badesæsonerne 2018-2020

Dette bilag indeholder en sammenligning af vejrdata fra de tre badevandssæsoner 2018, 2019 og 2020. Figurerne viser målinger for regndybde, vindhastighed og -retning. Vinddata er indhentet fra en måler ved Slettehage Fyr, hvis placering er vist på figur 4.3, mens regndata er fra Viby Regnserien, der præsenteres i appendiks B. Yderligere indeholder bilaget fordeling af vindretninger og -hastigheder i de tre badesæsoner. Bilaget er relevant for kapitel 2.

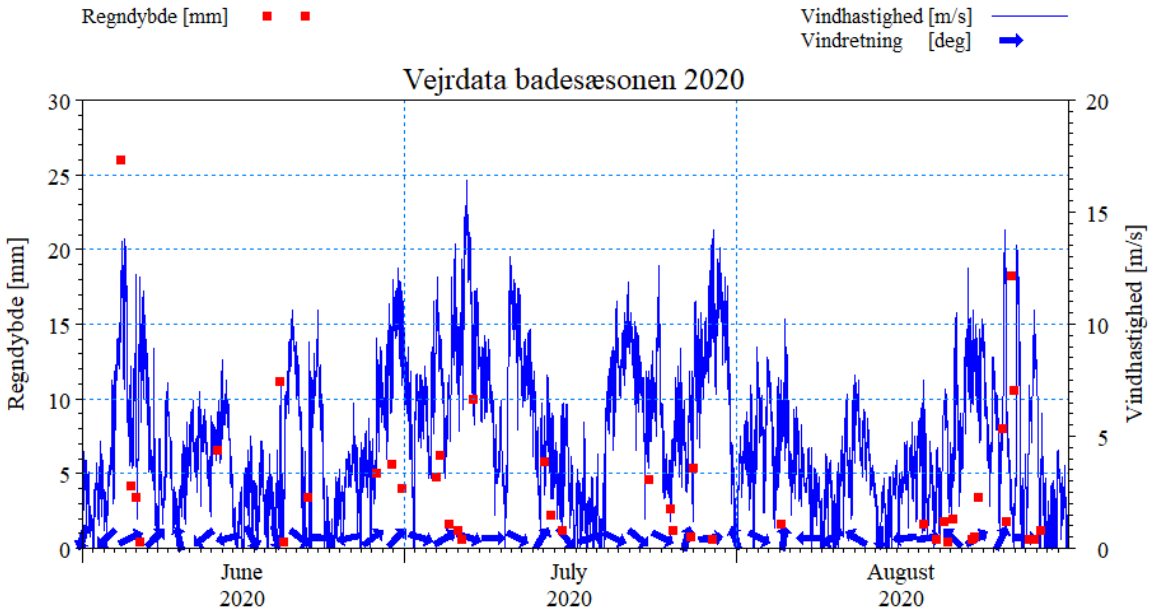
I badesæsonen 2018 regner det 29 gange, jf. figur C.1, hvilket er en del mindre end antallet af observerede regnhændelser i badesæsonerne 2019 og 2020, hvor der regner hhv. 61 og 55 gange i løbet af badesæsonen, jf. figur C.2 og C.3. Selvom år 2018 er et tørt år i forhold til antal regnhændelser, er den maksimale regndybde registreret i badesæsonen høj i forhold til de maksimale regndybder i de andre badesæsoner. En regnhændelse fra den 13. august 2018 tidlig aften med en varighed på mere end 13 timer resulterer i den maksimale regndybde på 50,4 mm. Til sammenligning er den maksimale regndybde i 2019 20 mm, mens den i 2020 er 26 mm. Den mindste regndybde, der er registreret, er for alle badesæsonerne 0,4 mm.



Figur C.1: Vind- og regndata for år 2018, hvor den maksimale regndybde registreret var 50,4 mm, og den gennemsnitlige vindhastighed var 5,19 m s^{-1}.



Figur C.2: Vind- og regndata for år 2019, hvor den maksimale regndybde registreret var 20 mm, og den gennemsnitlige vindhastighed var 6,30 m s^{-1}.



Figur C.3: Vind- og regndata for år 2020, hvor den maksimale regndybde registreret var 26 mm, og den gennemsnitlige vindhastighed var 4,90 m s^{-1}.

År 2018 er kendt som et tørt og vindstille år (Cappelen, 2019), hvilket stemmer overens med antallet af registrerede regnhændelser i badevandssæsonen 2018 sammenlignet med badesæsonerne 2019 og 2020. Sammenlignes de gennemsnitlige vindhastigheder for de tre badesæsoner, er vindhastigheden i år 2018 ikke mistænkelig lav, men 29.5 % af de målte vindretninger er under 1,5 m s^{-1} i badesæsonen 2018, svarende til *næsten stille* og *stille* vind. For badesæsonen 2019 og 2020 er hhv. 5,2 % og 12,9 % under 1,5 m s^{-1}.

Fordelingen af vindforhold og -retning fra målestationen ved Sletterhage Fyr for alle dage samt regnvejrsdage i de tre præsenterede badesæsoner er henholdsvis indskrevet i tabel C.1 og tabel C.2.

Vindretning		Interval af vindhastigheder							
Interval	Gennemsnit	[0 , 1,5]	[1,5 , 3,3]	[3,3 , 5,4]	[5,4 , 8]	[8 , 10,7]	[10,7 , 13,8]	[13,8 , Inf]	TOTAL
[337,5 , 22,5]	0	1,09	1,67	0,76	0,01	0,00	0,00	0,00	3,53
[22,5 , 67,5]	45	0,74	1,77	1,62	0,50	0,00	0,00	0,00	4,62
[67,5 , 112,5]	90	1,14	6,25	7,11	2,09	0,45	0,05	0,01	17,09
[112,5 , 157,5]	135	1,10	2,84	2,78	2,33	0,80	0,30	0,01	10,15
[157,5 , 202,5]	180	1,44	3,44	3,34	1,46	0,40	0,04	0,01	10,13
[202,5 , 247,5]	225	0,88	2,43	4,05	5,01	2,83	0,62	0,01	15,83
[247,5 , 292,5]	270	0,79	2,31	4,82	7,66	5,16	2,81	0,23	23,78
[292,5 , 337,5]	315	1,03	2,46	2,84	4,71	3,02	0,74	0,07	14,87
[0 , 360]	TOTAL	8,20	23,16	27,32	23,76	12,65	4,55	0,35	100,00

Tabel C.1: Fordeling af vindretninger og -hastigheder i [%] for alle dage i badesæsonerne 2018, 2019 og 2020.

Vindretning		Interval af vindhastigheder							
Interval	Gennemsnit	[0 , 1,5]	[1,5 , 3,3]	[3,3 , 5,4]	[5,4 , 8]	[8 , 10,7]	[10,7 , 13,8]	[13,8 , <13,8]	TOTAL
[337,5 , 22,5]	0	0,50	2,45	0,24	0,08	0,00	0,00	0,00	3,28
[22,5 , 67,5]	45	0,34	2,04	1,71	0,65	0,00	0,00	0,00	4,74
[67,5 , 112,5]	90	0,26	0,65	5,63	6,20	3,18	1,14	0,16	17,23
[112,5 , 157,5]	135	0,34	0,90	2,37	4,65	5,22	3,92	0,08	17,48
[157,5 , 202,5]	180	0,42	0,98	3,92	7,67	1,14	0,00	0,00	14,13
[202,5 , 247,5]	225	0,26	2,29	4,41	8,82	6,61	2,94	0,00	25,32
[247,5 , 292,5]	270	0,17	1,80	3,27	2,37	1,55	0,82	0,00	9,97
[292,5 , 337,5]	315	0,50	1,47	1,47	1,55	0,82	1,88	0,16	7,85
[0 , 360]	TOTAL	2,78	12,57	23,02	32,00	18,53	10,69	0,41	100,00

Tabel C.2: Fordeling af vindretninger og -hastigheder i [%] for regnvejrs dage i badesæsonerne 2018, 2019 og 2020.

Bilag D | Beregning af henfaldskonstant

Henfald af coliforme bakterier følger ofte et første ordens henfald, jf. ligning (D.1) (Erichsen et al., 2006).

$$C = C_0 \cdot e^{-k \cdot t} \tag{D.1}$$

C	Bakteriekoncentration $[antal/100mL]$
C_0	Startkoncentration af bakterier $[antal/100mL]$
k	Henfaldskonstant $[t^{-1}]$
t	Tid [t]

Henfaldskonstanten deles op i en lysdel og en mørkedel, jf. ligning (D.2), hvoraf mørkehenfaldet oftest er således, at 90 % af bakterierne er henfaldet efter 55-75 timer i et marint miljø, mens det for lyshenfaldet gør sig gældende, at 90 % af bakterierne er henfaldet efter 1,5 timer. I søvand og vandløb er henfaldet oftest lavere (Erichsen et al., 2006).

$$k = k_\mathrm{m} + k_\mathrm{l} \cdot I_\mathrm{l} \tag{D.2}$$

k	Samlet henfaldskonstant $[t^{-1}]$
k_m	Henfaldskonstant for mørke $[t^{-1}]$
k_l	Henfaldskonstant for lys $[t^{-1}]$
I_l	Aktuel lysindstråling i vandet $[W \cdot m^{-2}]$

Lyshenfaldet er afhængig af lysindstrålingen, der beregnes som vist i ligning (D.3).

$$I_\mathrm{l} = I_0 \cdot e^{-\frac{-ln(0,15)}{SD} \cdot z} \tag{D.3}$$

I_l	Aktuel lysindstråling i vandet $[W \cdot m^{-2}]$
I_0	Lysindstråling ved overfladen $[W \cdot m^{-2}]$
SD	Sigtdybden $[m^{-1}]$
z	Dybden til forurening $[m]$

Lysindstrålingen varierer afhængig af årstiden, og til disse beregninger er der brugt en lysindstråling ved overfladen på 210 W · m svarende til en lysindstråling ved overfladen i juli måned (Erichsen et al., 2006). Sigtdybden er fundet i litteraturen til 8 m i Aarhus Bugt (Krause-Jensen et al., 2007), mens dybden til forurening er et gennemsnit af den dybde, Aarhus Kommune har taget vandprøver i for badesæsonerne 2018-2021. Dette svarer til en dybde på 0,93 m (Aarhus Kommune, 2021b).

Lyshenfaldet beregnes som vist i ligning (D.4).

$$k_{\mathrm{l}} = \frac{S_{\mathrm{m}} \cdot (b_{\mathrm{T}} \cdot T + k_{\mathrm{l0}})}{a \cdot S_{\mathrm{m}} - (a-1) \cdot S} \tag{D.4}$$

k_l	Henfaldskonstant for lys $[t^{-1}]$
S_m	Ukendt [PSU]
b_T	Temperaturkonstant $[m^2W^{-1}t^{-1}C^{-1}]$
T	Aktuel vandtemperatur $[C]$
k_{l0}	Ukendt $[m^2W^{-1}t^{-1}]$
a	Konstant [-]
S	Aktuel salinitet

Mørkehenfaldet beregnes som vist i ligning (D.5).

$$k_{\mathrm{m}} = a_{\mathrm{T}} T - k_{\mathrm{m0}} \tag{D.5}$$

k_m	Henfaldskonstant for mørke $[t^{-1}]$
a_T	Temperaturkonstant $[t^{-1}C^{-1}]$
T	Aktuel vandtemperatur $[C]$
k_{m0}	Konstant $[m]$

Den aktuelle vandtemperatur er bestemt ud fra en række prøver udført af Aarhus Kommune (Aarhus Kommune, 2021b). Et gennemsnit af de målte temperaturer i badesæsonerne 2018-2021 giver en gennemsnitlig vandtemperatur på 17,33 C. Den aktuelle salinitet er fundet som beskrevet i afsnit 4.3 og er 24,8 PSU. Derudover indgår der en række faste konstanter, som er fundet i litteraturen (Erichsen et al., 2006). Disse konstanter fremgår af tabel D.1.

Tabel D.1: Konstanter i henfaldsmodellen.

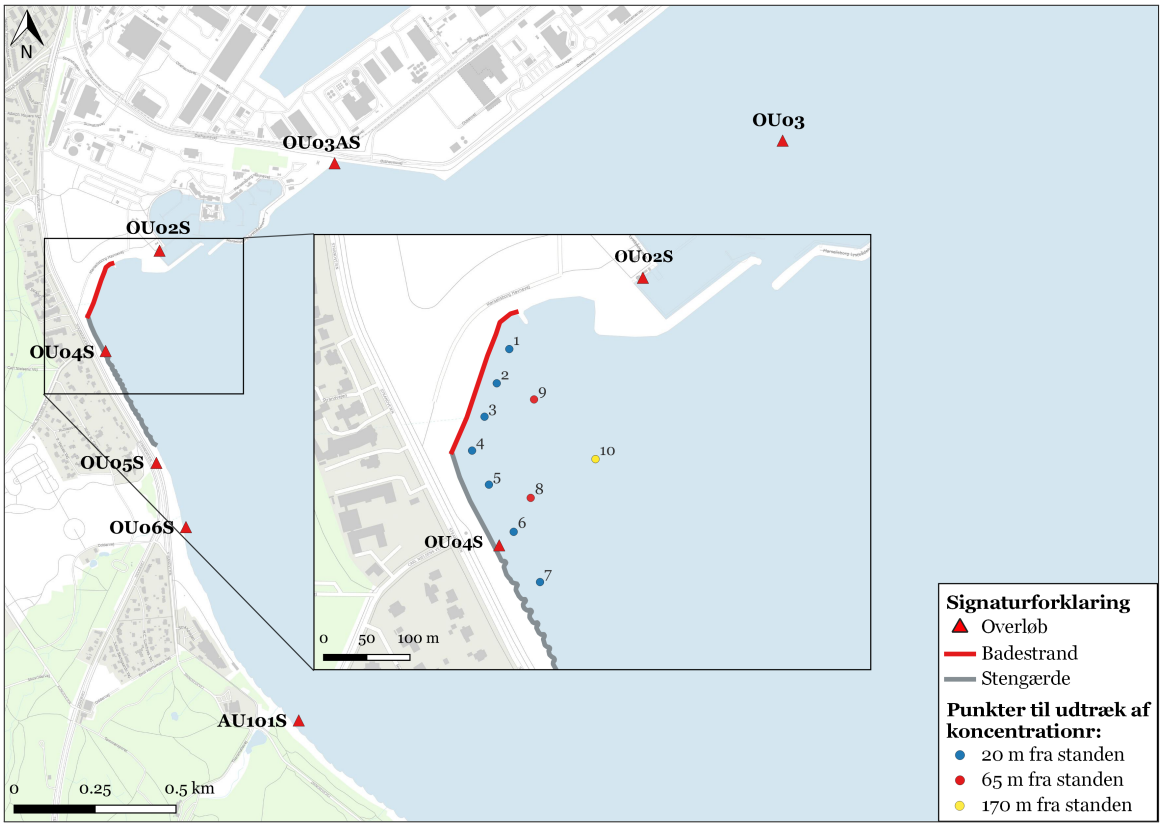
	Værdi	**Enhed**
S_m	34,5	PSU
b_T	0,000133	$m^2W^{-1}t^{-1}C^{-1}$
k_{l0}	0,002124	$m^2W^{-1}t^{-1}$
a	1,54	-
a_T	0,002425	$t^{-1}C^{-1}$
k_{m0}	0,00826	t^{-1}

Den samlede henfaldskonstant, hvor der er taget højde for både mørke- og lysforhold, bliver 0,000187 s^{-1}.

Bilag E | Forureningsprofiler

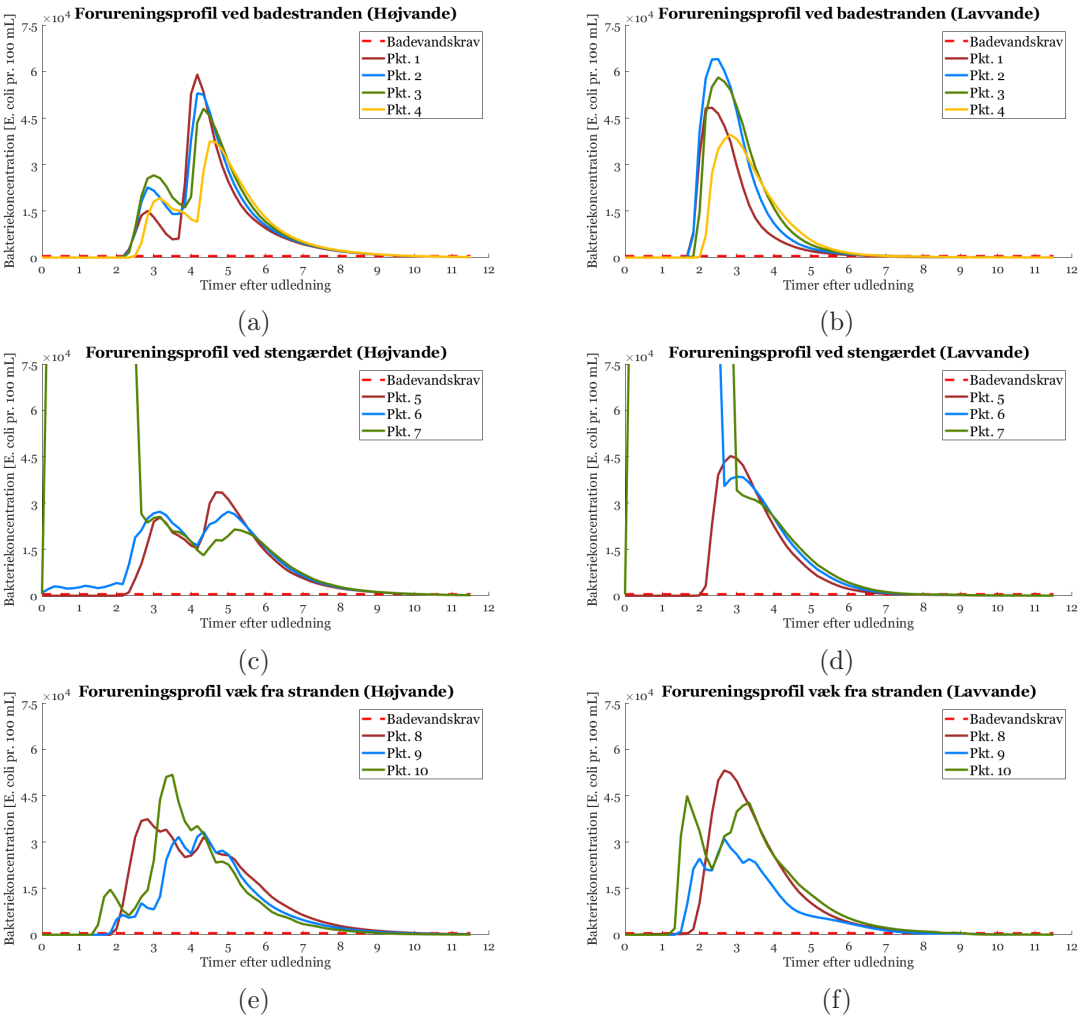
E.1 Forureningsprofiler for overløbsbygværker: Ved badestranden, stengærdet og væk fra badestranden

Bilaget viser forureningsprofiler udtrukket fra en række punkter vist på figur E.1. Profilerne viser den samlede koncentration fra alle overløb i punkterne 1-10 for alle otte vindretninger, og derudover præsenteres den maksimalt forekommende koncentration i hvert punkt for hver vindretning samt hvilket overløbsbygværk, der belaster mest. Den maksimale koncentration er angivet som den højeste koncentration, der forekommer, når koncentrationen fra alle overløb er lagt sammen i det givne punkt til en vilkårlig tid i perioden der er bakterier til stede. Det er valgt at benytte y-akser med intervallet 0-75.000 E coli/100mL for at give en bedre visuel præsentation af koncentrationernes forløb. Bilaget er relevant for kapitel 6.



Figur E.1: Lokation af de punkter, der er udtrukket koncentrationer fra i strømningsmodellen. Punkterne ligger med forskellig afstand fra stranden, herunder 20, 65 og 170 m. Punkt 10 er placeret i det røde bælte på figur 6.2a og 6.2b, hvor alle vindretninger resulterer i overskridelse af badevandskravet for *E. coli* på 500 bakter/100mL.

E.1.1 Nordenvind



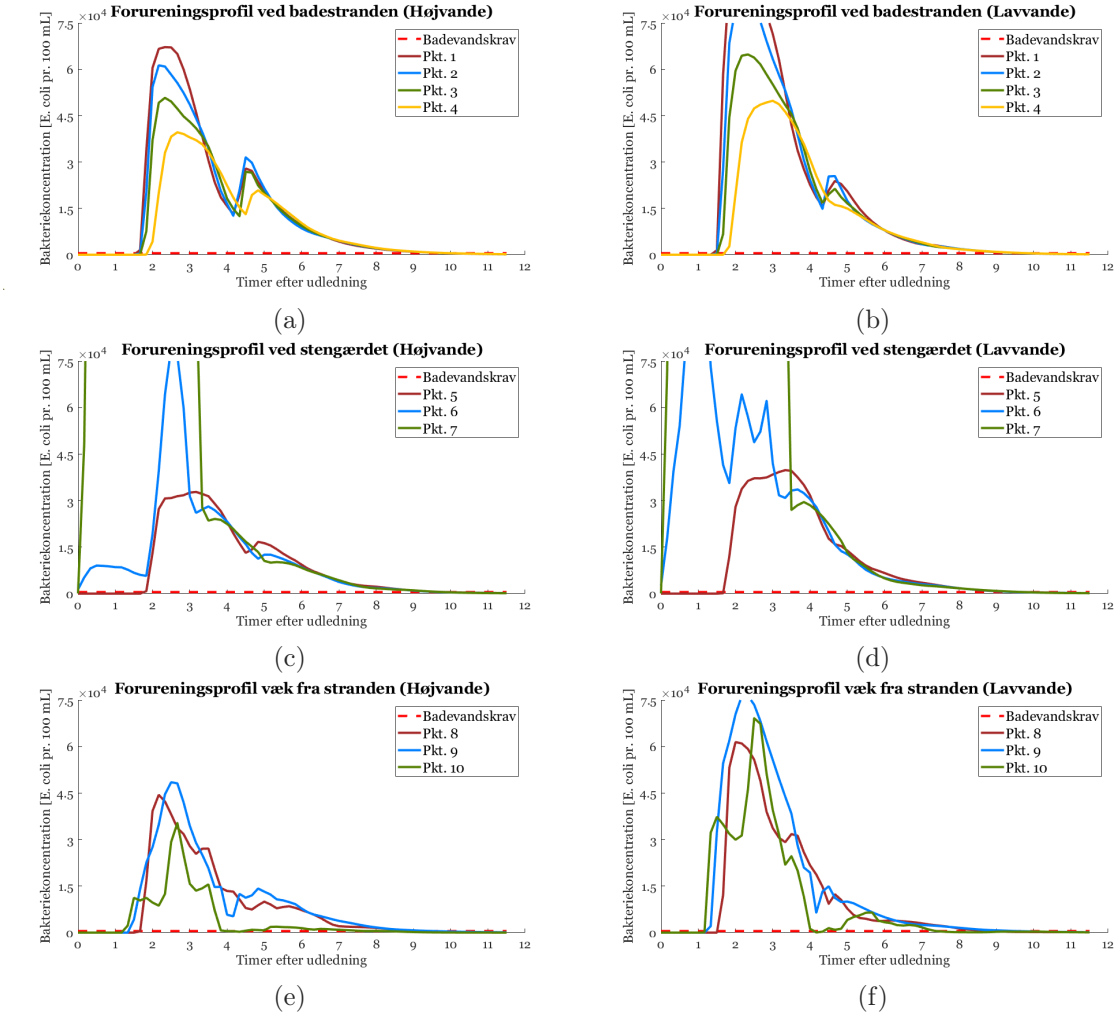
Figur E.2: Forureningsprofiler ved nordenvind.

Tabel E.1: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb.

Oversigt ved nordenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU02S	59030	OU02S	48316
2	OU02S	53003	OU02S	64026
3	OU02S	48022	OU02S	58107
4	OU02S	37468	OU02S	39590
5	OU02S	33488	OU02S	45206
6	OU02S	27206	OU04S	909792
7	OU04S	242487	OU04S	487574
8	OU02S	37399	OU02S	53174
9	OU02S	33290	OU02S	31030
10	OU02S	51780	OU02S	44855

E.1.2 Nordøstenvind



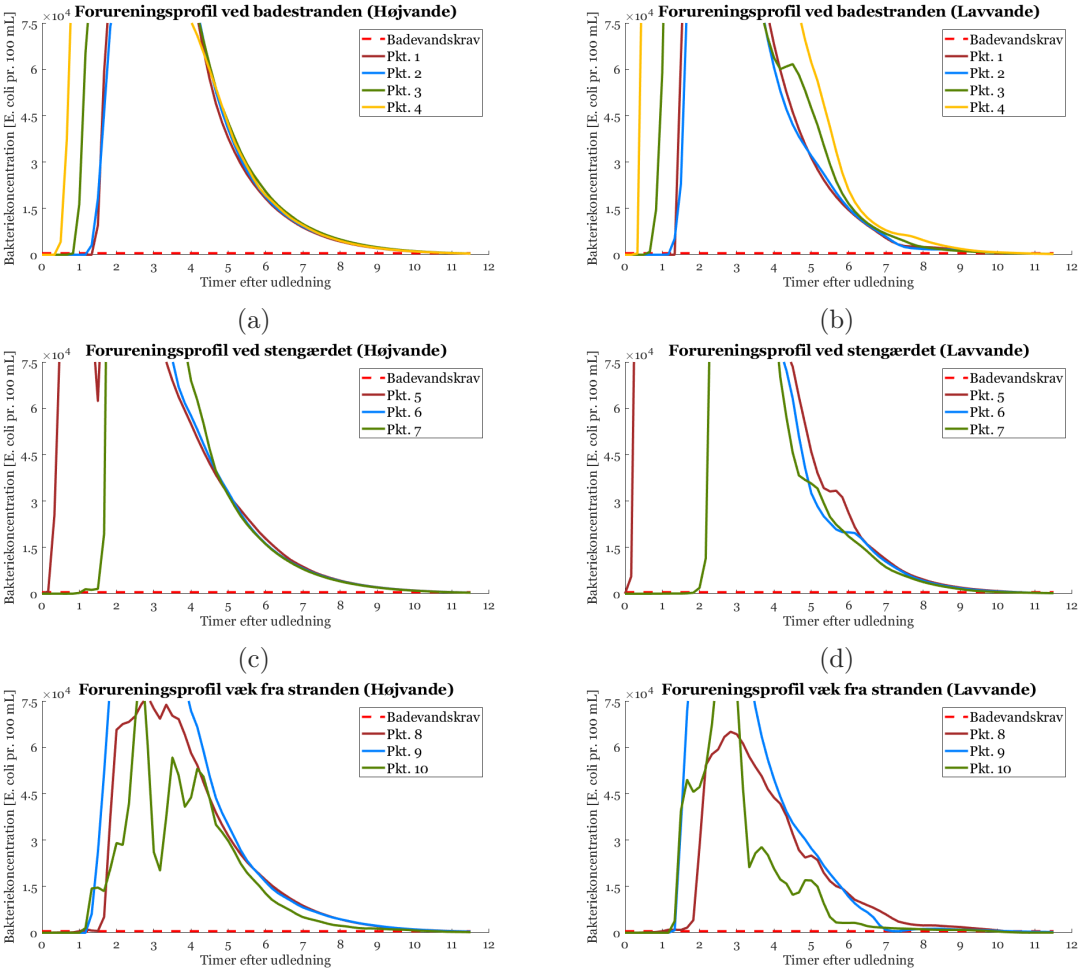
Figur E.3: Forureningsprofiler ved nordøstenvind.

Tabel E.2: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb.

Oversigt ved nordøstenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [$E.coli$/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [$E.coli$/100mL]
1	OU02S	67183	OU02S	96233
2	OU02S	61297	OU02S	81240
3	OU02S	50779	OU02S	64803
4	OU02S	39623	OU02S	49818
5	OU02S	32791	OU02S	39820
6	OU04S	79270	OU04S	125422
7	OU04S	287244	OU04S	728256
8	OU02S	44427	OU02S	61442
9	OU02S	48488	OU02S	76341
10	OU02S	35340	OU02S	69131

E.1.3 Østenvind



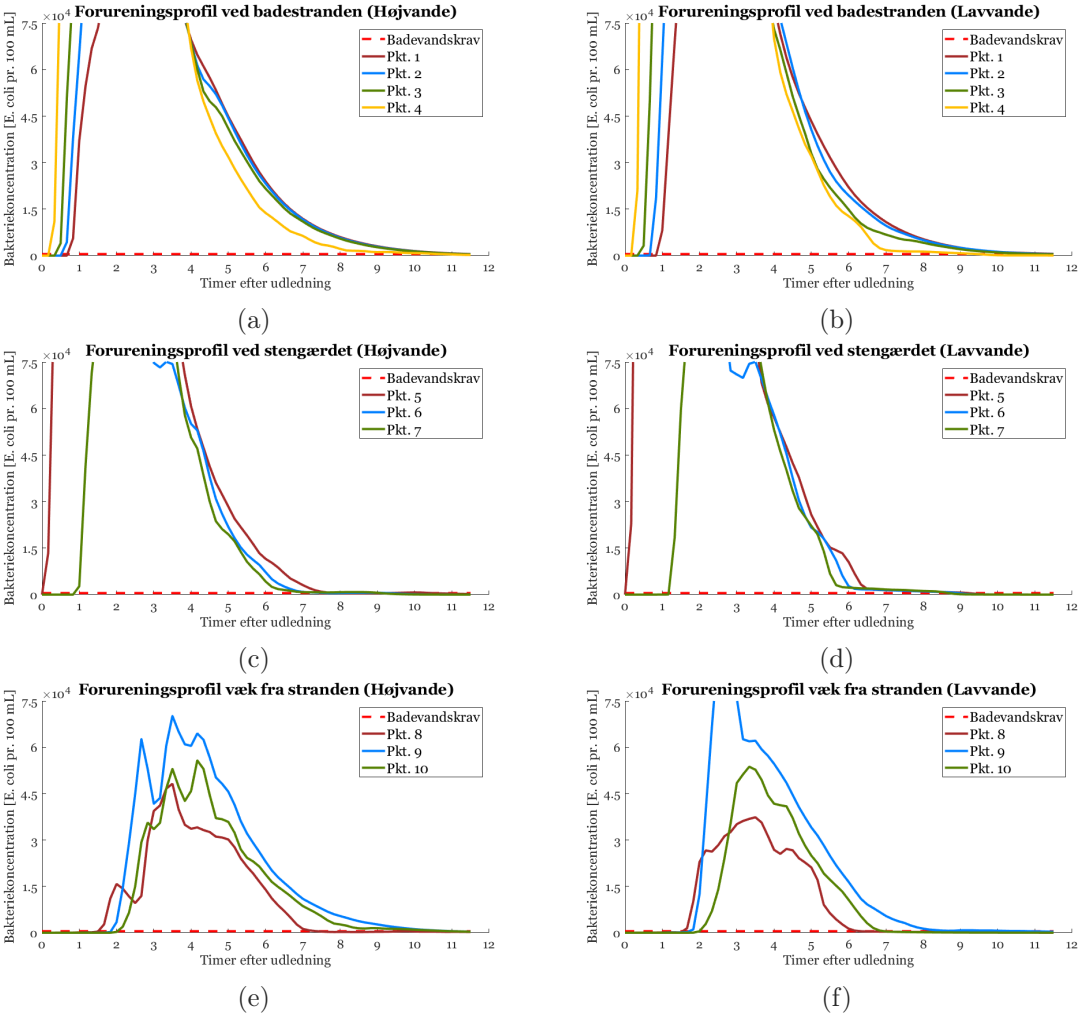
Figur E.4: Forureningsprofiler ved østenvind.

Tabel E.3: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb.

Oversigt ved østenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU02S	154864	OU02S	148309
2	OU02S	145160	OU02S	122289
3	OU02S	119826	OU04S	274209
4	OU04S	232681	OU04S	722387
5	OU04S	157184	OU04S	657729
6	OU04S	384704	OU04S	1339600
7	OU04S	343211	OU02S	416941
8	OU02S	76568	OU02S	65045
9	OU02S	119106	OU02S	115845
10	OU02S	90783	OU02S	97542

E.1.4 Sydøstenvind



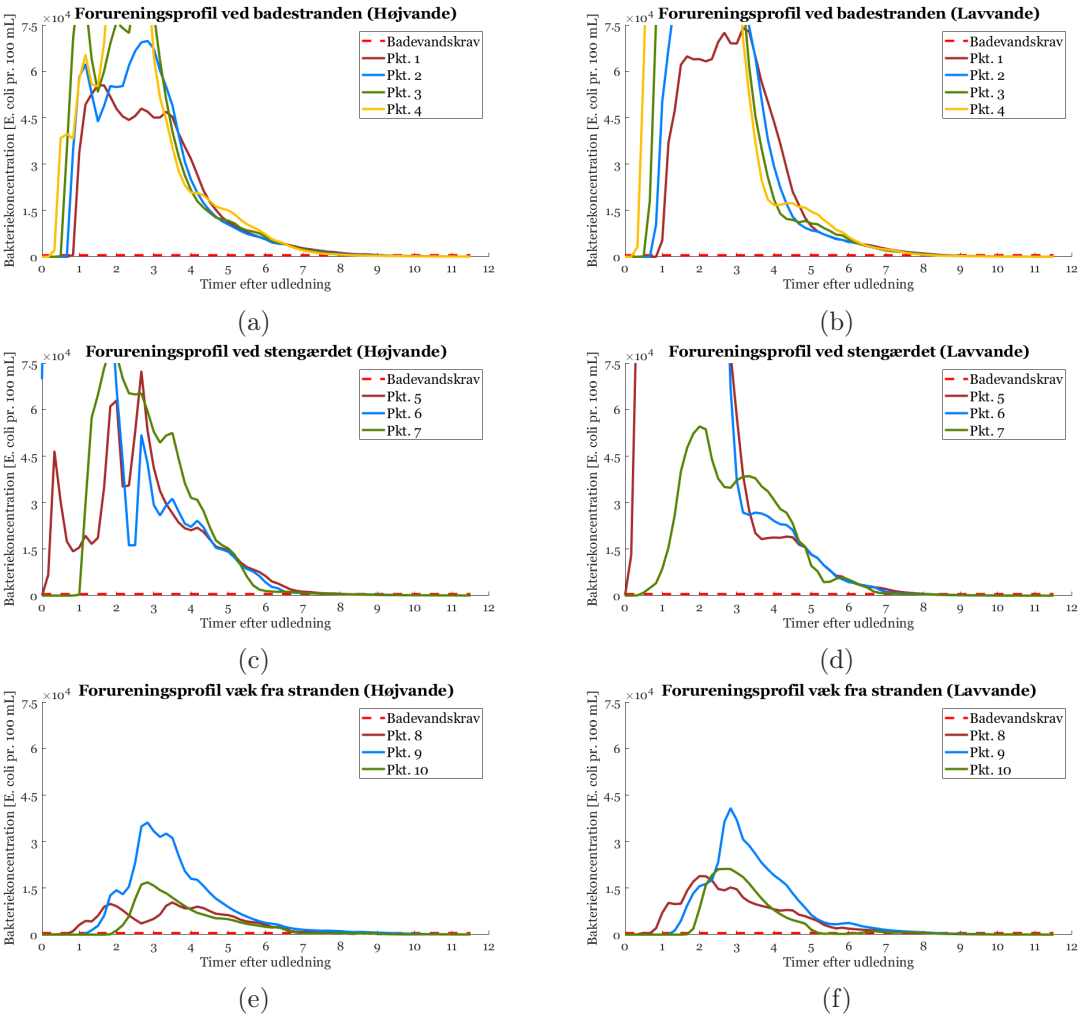
Figur E.5: Forureningsprofiler ved sydøstenvind.

Tabel E.4: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved sydøstenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU04S/OU02S	129973	OU02S/OU04S	180725
2	OU04S	151874	OU04S	209987
3	OU04S	201626	OU04S	332334
4	OU04S	292991	OU04S	595988
5	OU04S	239789	OU04S	561184
6	OU04S	469395	OU04S	945261
7	OU05S	113088	OU05S	101935
8	OU05S/OU02S	48203	OU05S	37359
9	OU02S	70154	OU02S	103083
10	OU02S	55751	OU02S	53719

E.1.5 Søndenvind



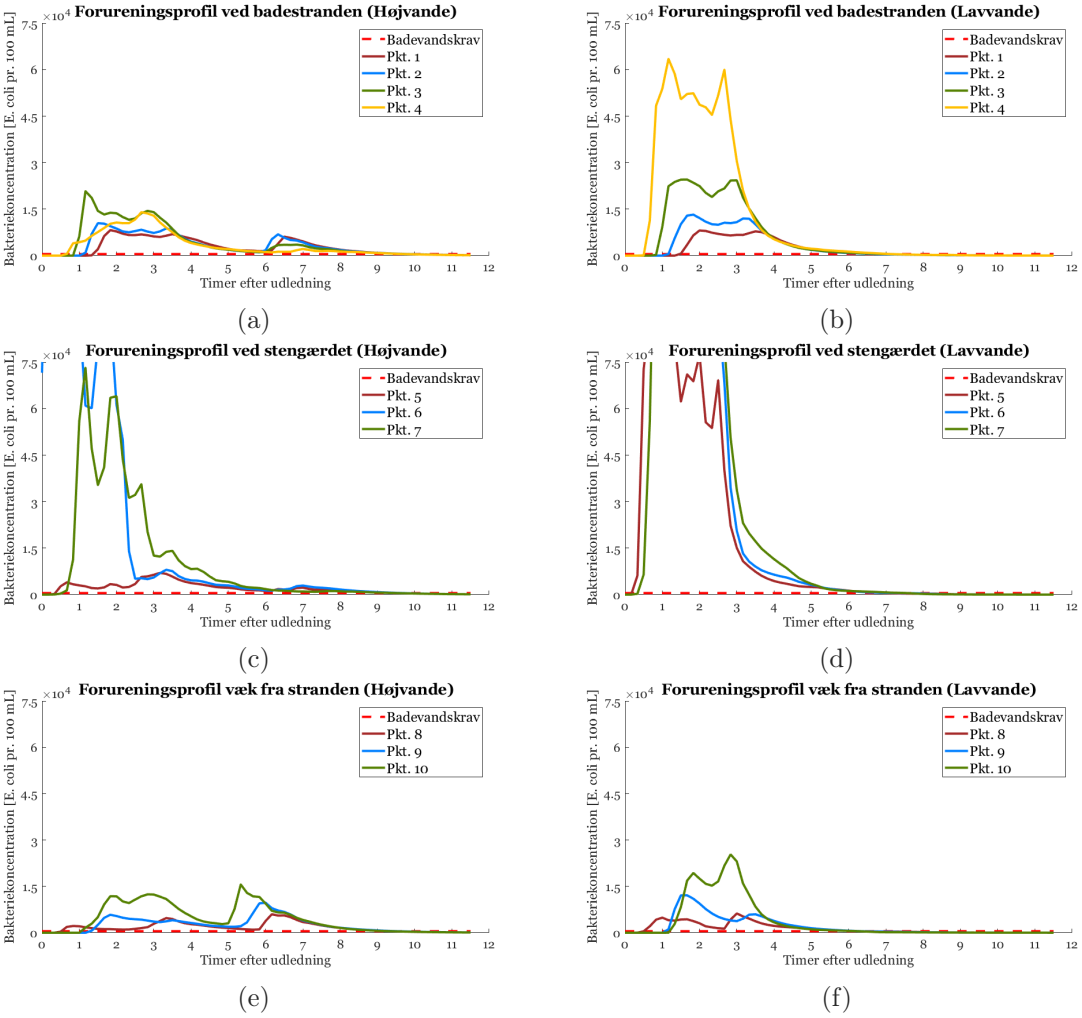
Figur E.6: Forureningsprofiler ved søndenvind.

Tabel E.5: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb.

Oversigt ved søndenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU04S	55499	OU04S	73967
2	OU04S	69823	OU04S	104860
3	OU04S	103335	OU04S	145845
4	OU04S	132462	OU04S	231768
5	OU04S	72284	OU04S	303062
6	OU04S	254696	OU04S	736799
7	OU05S	79280	OU05S	54532
8	OU05S	10390	OU05S	18864
9	OU02S	36137	OU02S	40714
10	OU05S	16858	OU05S	21182

E.1.6 Sydvestenvind



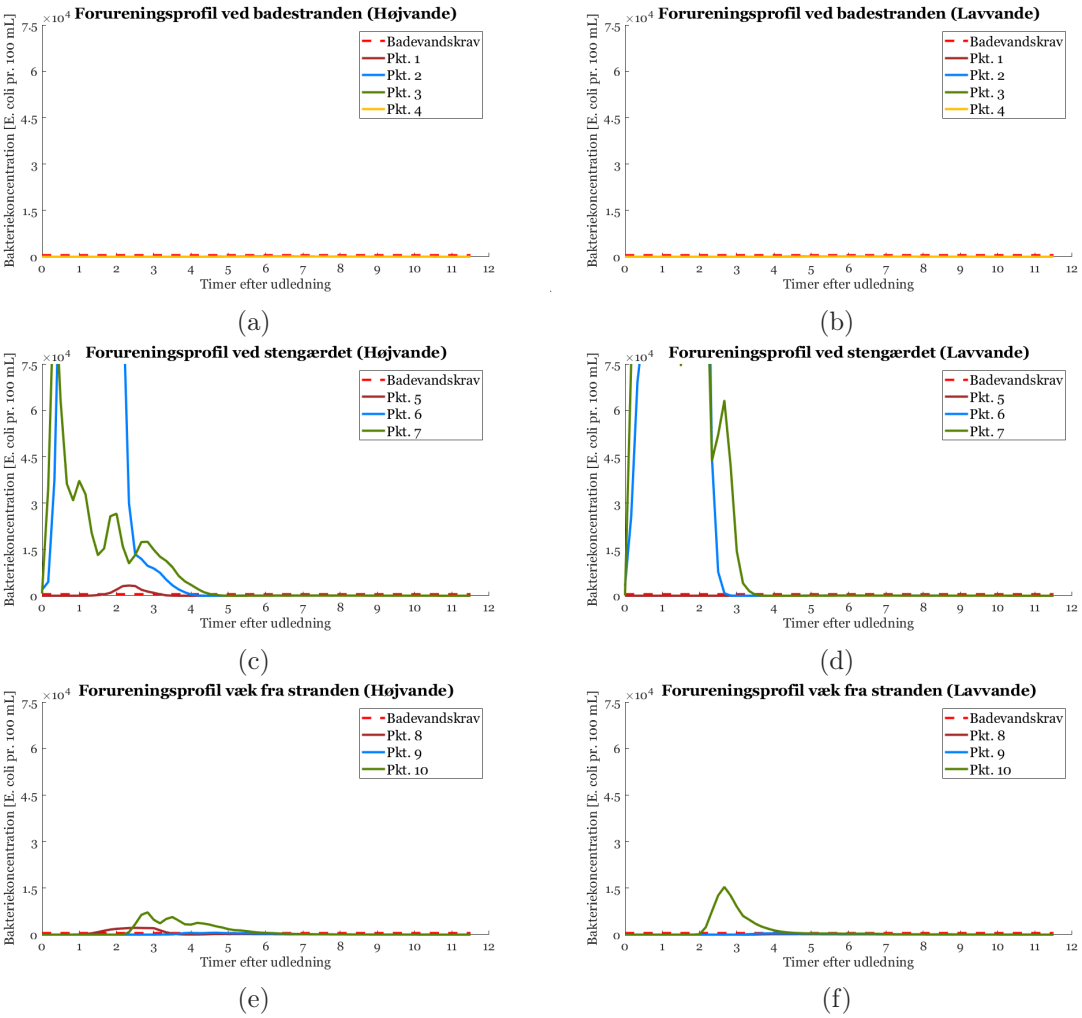
Figur E.7: Forureningsprofiler ved sydvestenvind.

Tabel E.6: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved sydvestenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU04S	8221	OU04S	8096
2	OU04S	10460	OU04S	13212
3	OU04S	20768	OU04S	24541
4	OU04S	14012	OU04S	63444
5	OU04S	7005	OU04S	117986
6	OU04S	148163	OU04S	777037
7	OU04S	73181	OU04S	402876
8	OU02S/OU04S	5979	OU04S	6229
9	OU02S	9705	OU04S	12109
10	OU02S/OU04S	15614	OU04S	25342

E.1.7 Vestenvind



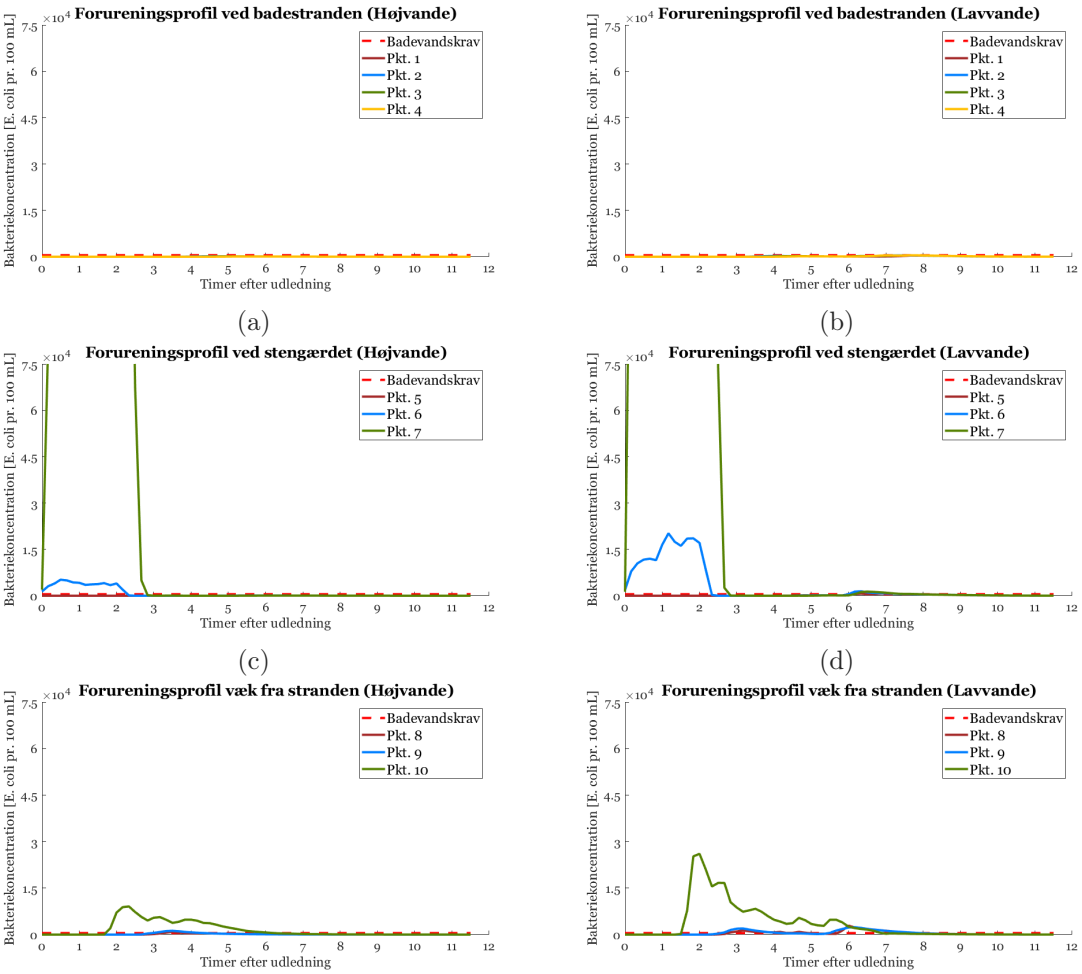
Figur E.8: Forureningsprofiler ved vestenvind.

Tabel E.7: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb.

Oversigt ved vestenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU02S	127	OU02S	106
2	OU02S	104	OU02S	103
3	OU02S	77	OU02S	71
4	OU02S	74	OU02S	68
5	OU04S	3296	OU02S	64
6	OU04S	161514	OU04S	284872
7	OU04S	105249	OU04S	308452
8	OU04S	2181	OU02S	152
9	OU02S	607	OU02S	388
10	OU02S	7175	OU02S	15377

E.1.8 Nordvestenvind



Figur E.9: Forureningsprofiler ved nordvestenvind.

Tabel E.8: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb.

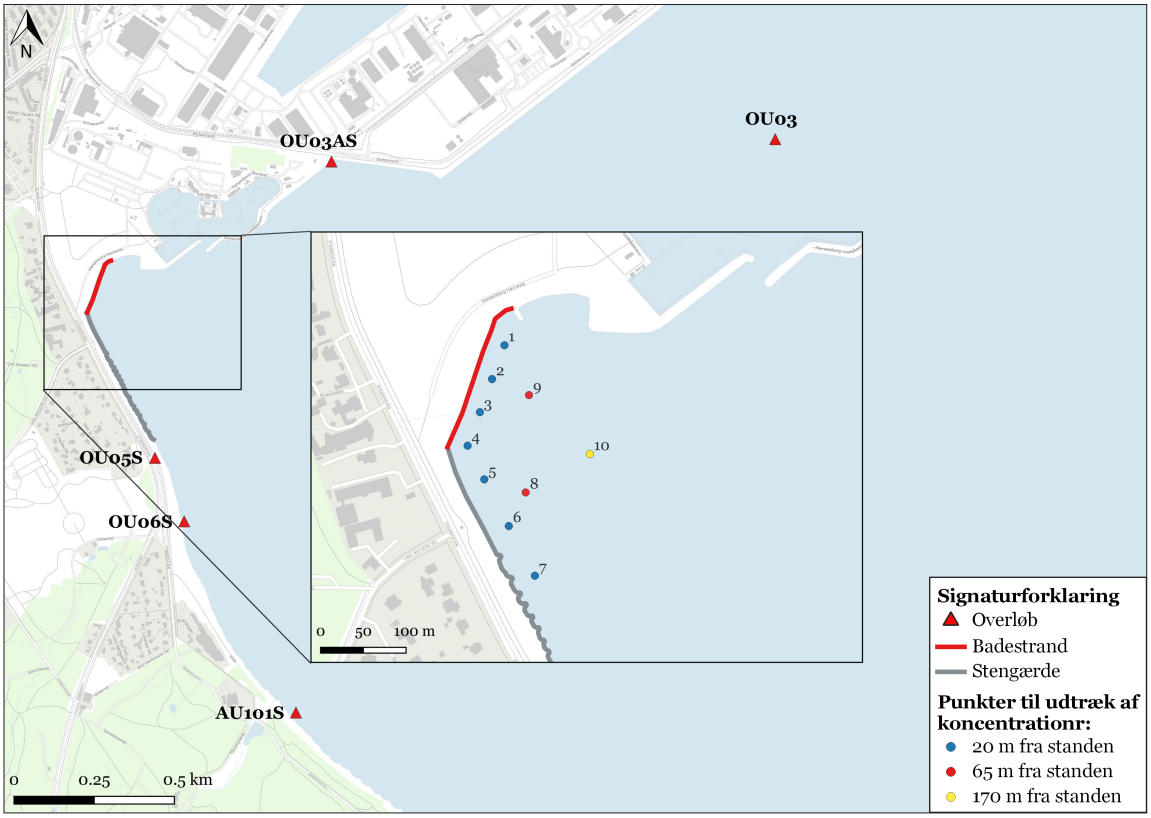
Oversigt ved nordvestenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU02S	118	OU02S	389
2	OU02S	141	OU02S	453
3	OU02S	112	OU02S	461
4	OU02S	80	OU02S	468
5	OU02S	80	OU02S	744
6	OU04S	5197	OU04S	20205
7	OU04S	267270	OU04S	560113
8	OU02S	876	OU02S	2869
9	OU02S	1239	OU02S	2385
10	OU02S	9081	OU02S	26050

Bilag F | Profiler efter nedlægning af OU02S og OU04S

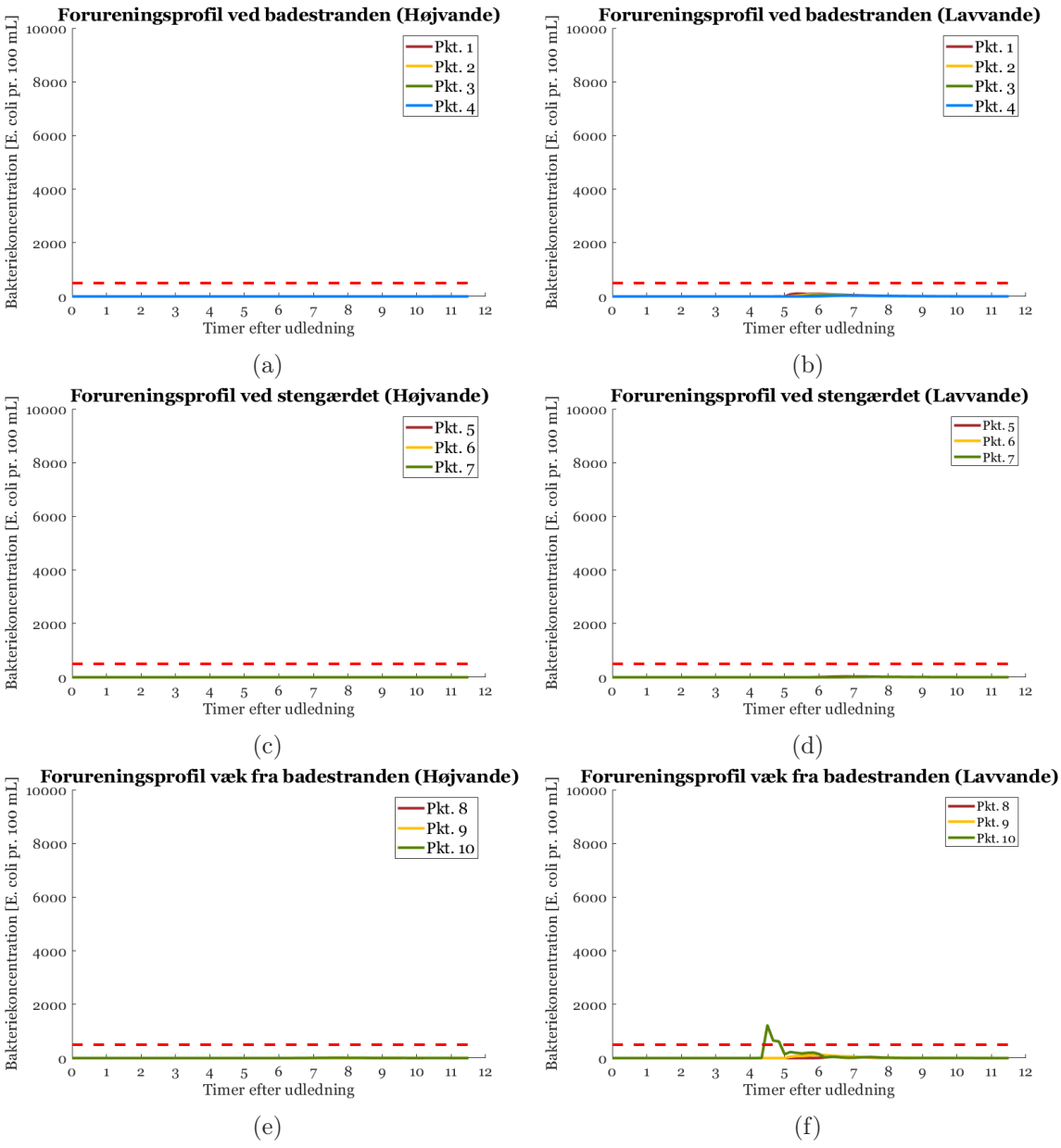
F.1 Forureningsprofiler for overløbsbygværker efter nedlæggelse: Ved badestranden, stengærdet og væk fra badestranden

Bilaget viser forureningsprofiler ligesom i appendiks E.1, men i disse profiler er overløbene OU02S og OU04S nedlagte. Profilerne viser den samlede koncentration fra alle overløb i punkterne 1-10 for alle otte vindretninger, jf. figur F.1, samt den maksimalt forekommende koncentration i hvert punkt, og hvilket overløb, der belaster mest. Den maksimale koncentration er angivet som den højeste koncentration, der forekommer, når koncentrationen fra alle overløb er lagt sammen i det givne punkt til en vilkårlig tid i perioden der er bakterier til stede. Det er valgt at benytte y-akser med intervallet 0-10.000 E coli/100mL for at give en bedre visuel præsentation af koncentrationernes forløb. Bilaget er relevant for kapitel 7.



Figur F.1: Lokation af de punkter, der er udtrukket koncentrationer fra i strømningsmodellen. Punkterne ligger med forskellig afstand fra stranden, herunder 20, 65 og 170 m.

F.1.1 Nordenvind



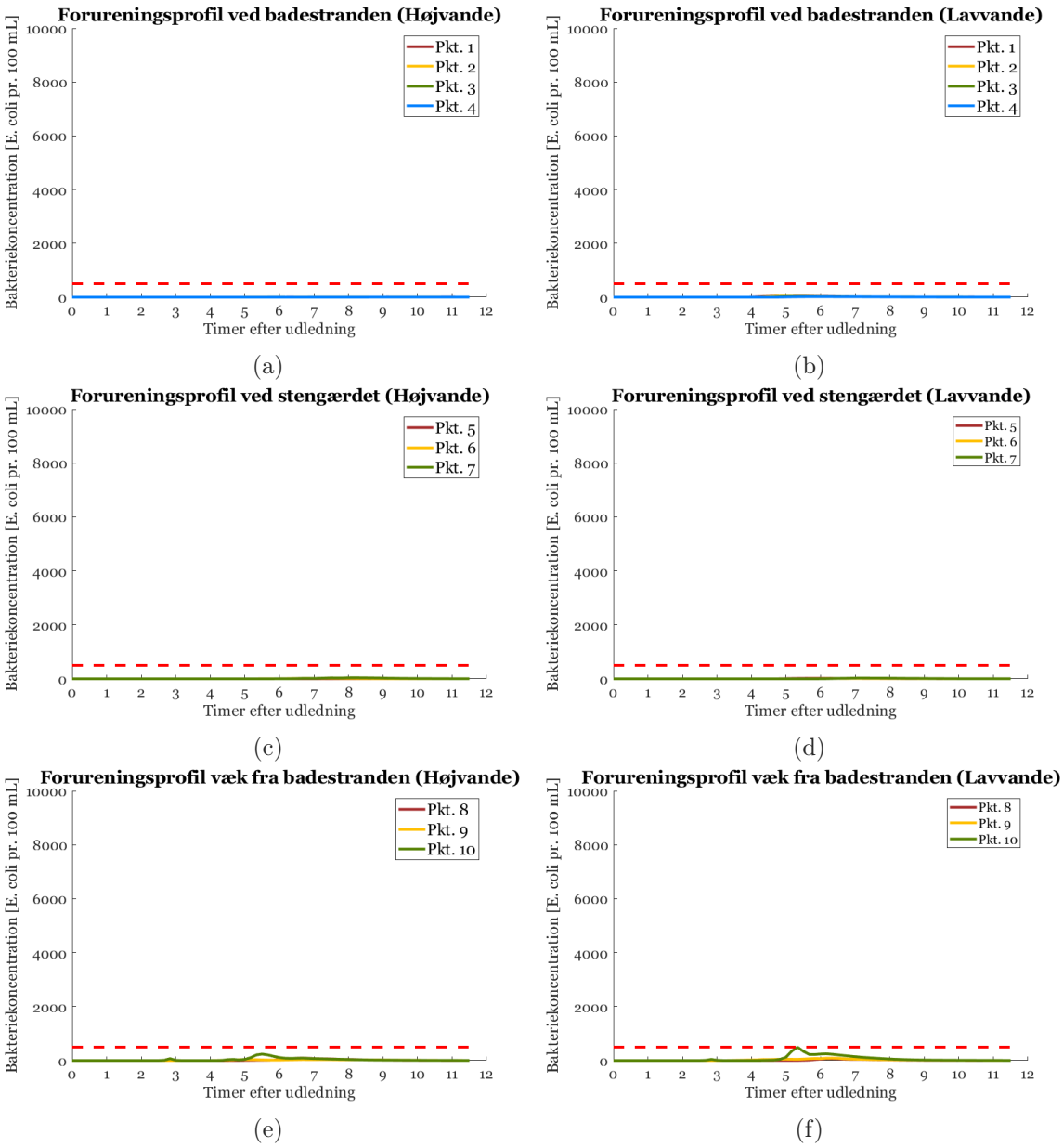
Figur F.2: Forureningsprofiler ved nordenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.1: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved nordenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU03AS	2	OU05S/OU06S	105
2	OU03AS	2	OU05S/OU06S	73
3	OU03AS	1	OU05S/OU06S	45
4	-	<1	OU05S/OU06S	31
5	-	<1	OU05S/OU06S	20
6	-	<1	OU05S/OU06S	17
7	-	<1	OU05S/OU06S	15
8	OU03AS	2	OU05S/OU06S	55
9	OU03AS	5	OU05S/OU06S	116
10	OU03AS	12	OU05S/OU06S	1223

F.1.2 Nordøstenvind



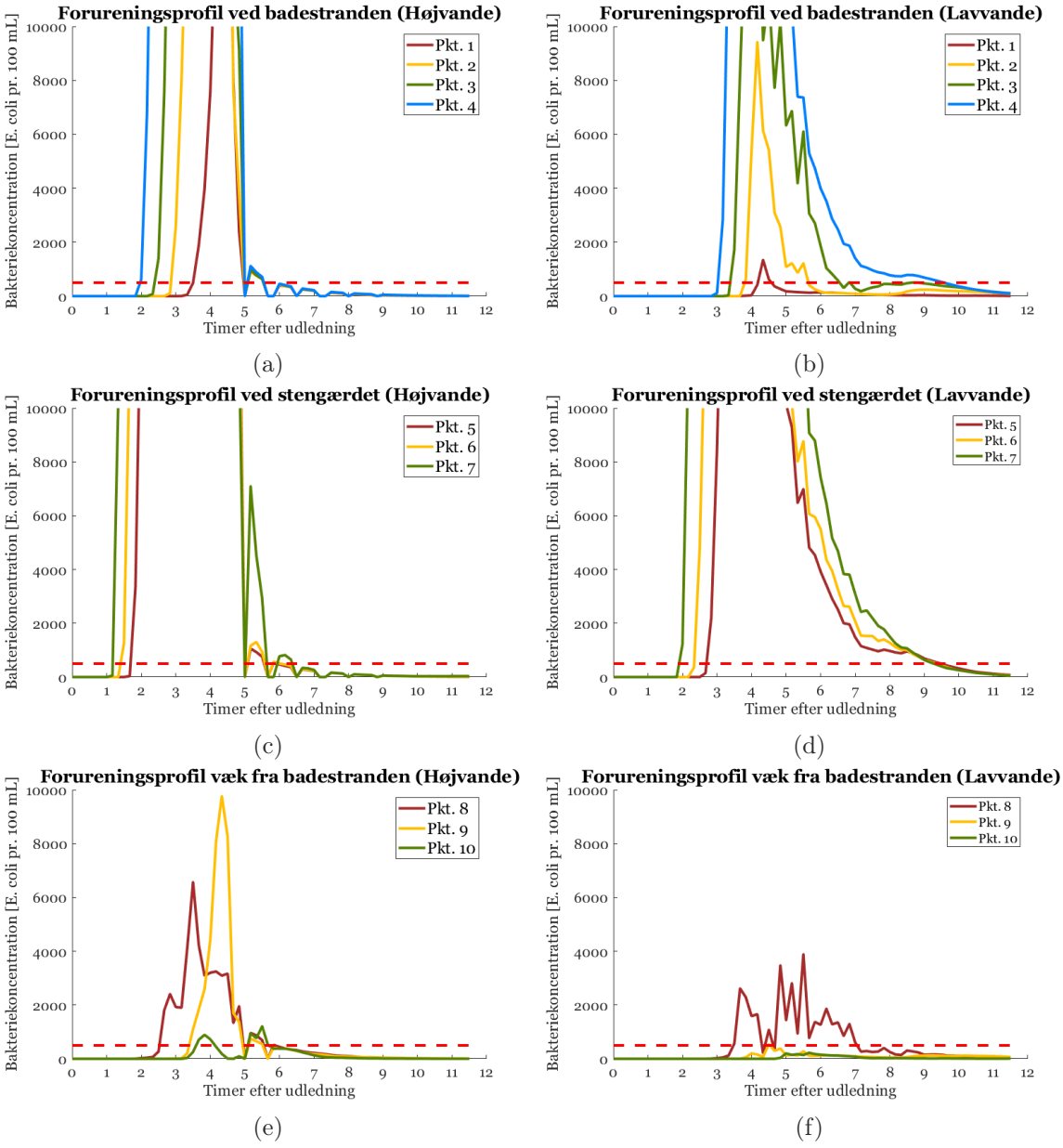
Figur F.3: Forureningsprofiler ved nordøstenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.2: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved nordøstenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU03AS/OU05S	5	OU03AS	42
2	OU03AS/OU05S	5	OU03AS	40
3	OU03AS/OU05S	5	OU03AS	29
4	OU03AS/OU05S	3	OU03AS	18
5	OU03AS/OU05S	4	OU03AS	14
6	OU05S/OU06S	21	OU03AS	15
7	OU05S/OU03AS	41	OU03AS/OU06S	29
8	OU05S	94	OU06S/OU03AS	74
9	OU03AS/OU05S	36	OU03AS	90
10	OU05S	238	OU06S	493

F.1.3 Østenvind



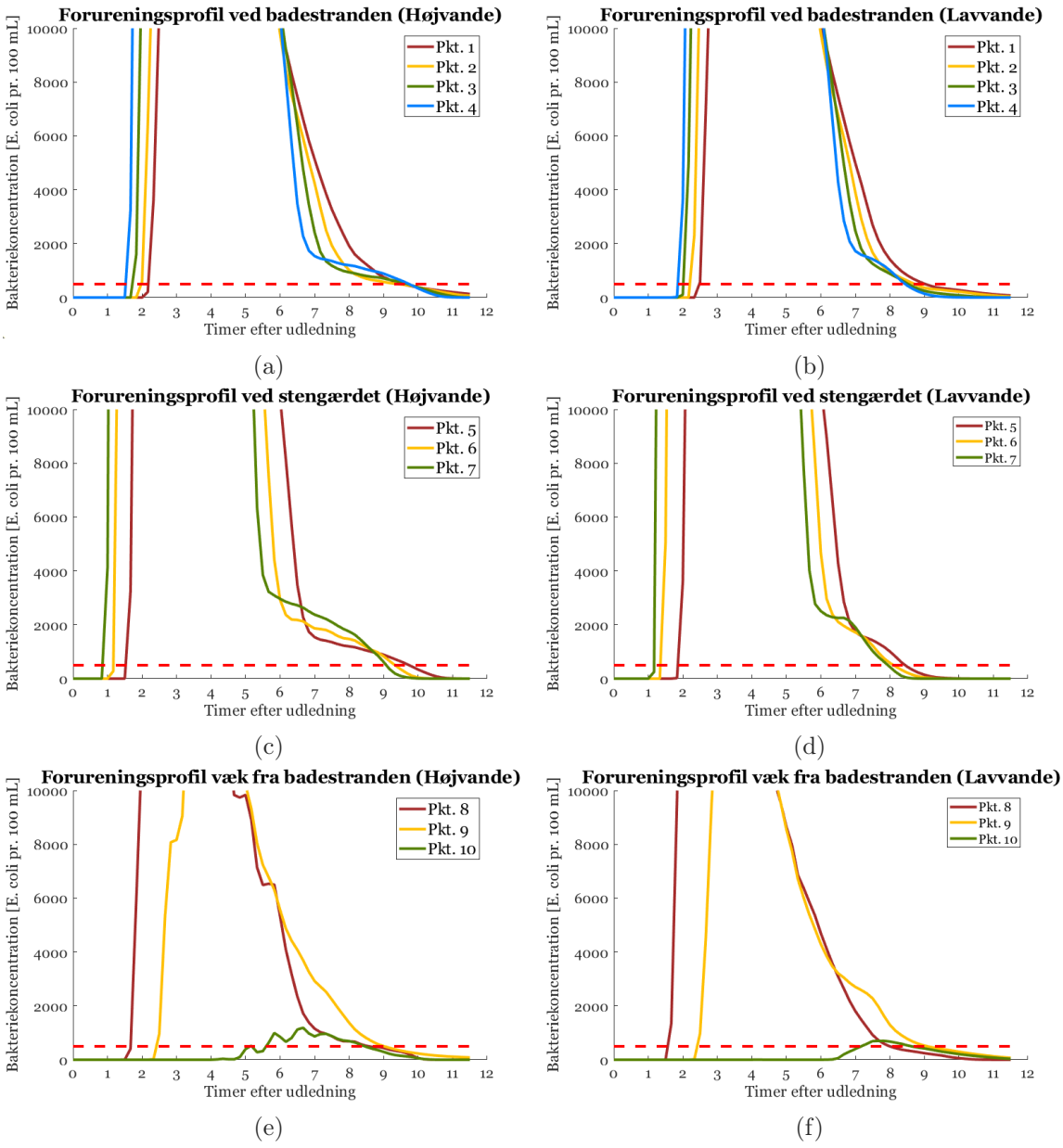
Figur F.4: Forureningsprofiler ved østenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.3: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved østenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU05S	21273	OU05S	1344
2	OU05S	29884	OU05S	9430
3	OU05S	47761	OU05S	17630
4	OU05S	64725	OU05S	33211
5	OU05S	73891	OU05S	39646
6	OU05S	99965	OU05S	56697
7	OU05S	139680	OU05S	95381
8	OU05S	6573	OU05S	3892
9	OU05S	9767	OU05S	550
10	OU03AS/OU05S	1210	OU03AS	222

F.1.4 Sydøstenvind



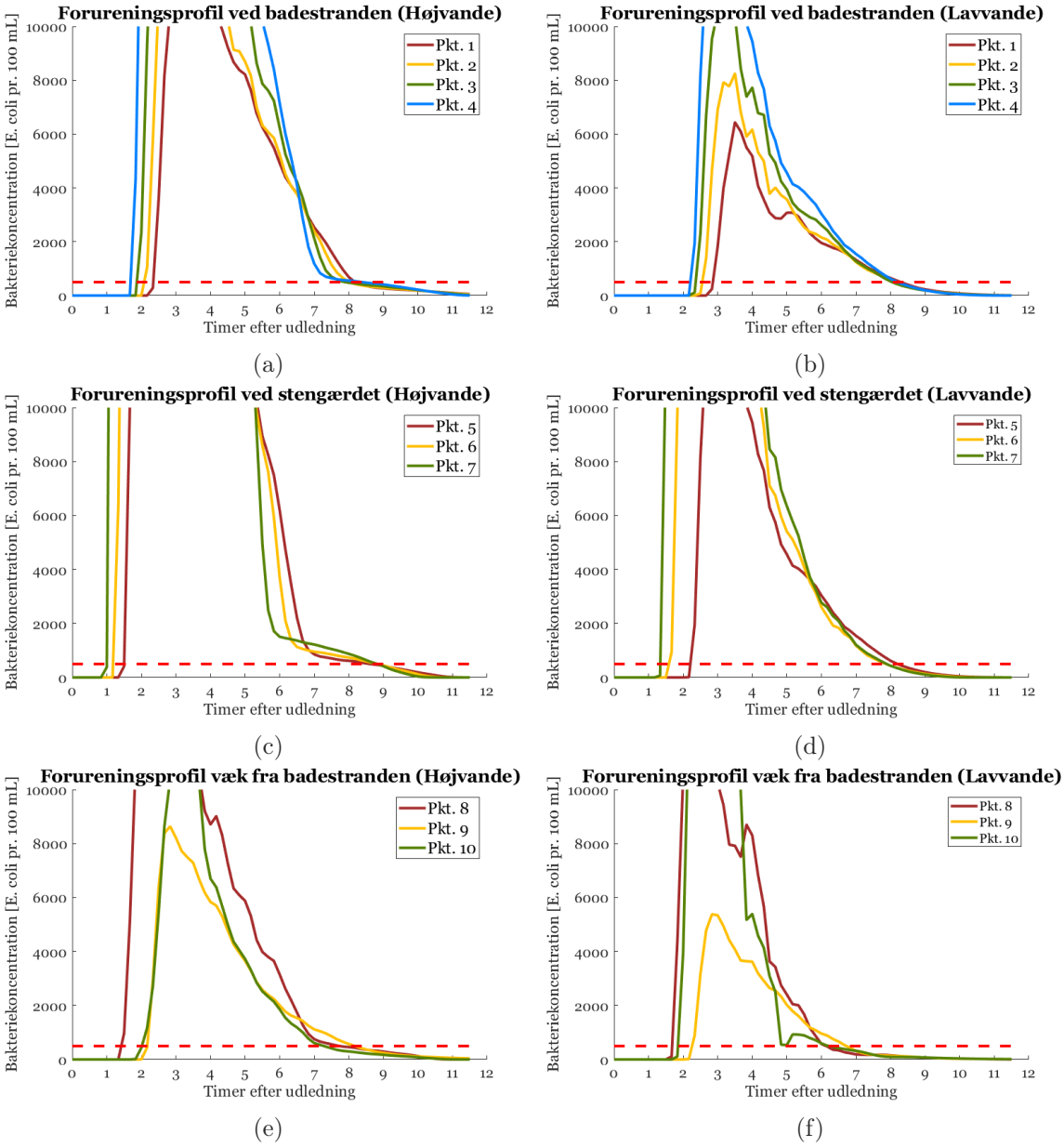
Figur F.5: Forureningsprofiler ved sydøstenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.4: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved sydøstenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU05S	25288	OU05S	21088
2	OU05S	32278	OU05S	27397
3	OU05S	43047	OU05S	36334
4	OU05S	61123	OU05S	52694
5	OU05S	66641	OU05S	61707
6	OU05S	79727	OU05S	76110
7	OU05S	112410	OU05S	105990
8	OU05S/OU06S	16747	OU05S/OU06S	26211
9	OU05S/OU06S	17162	OU05S/OU06S	21388
10	OU06S	1188	OU06S	701

F.1.5 Søndenvind



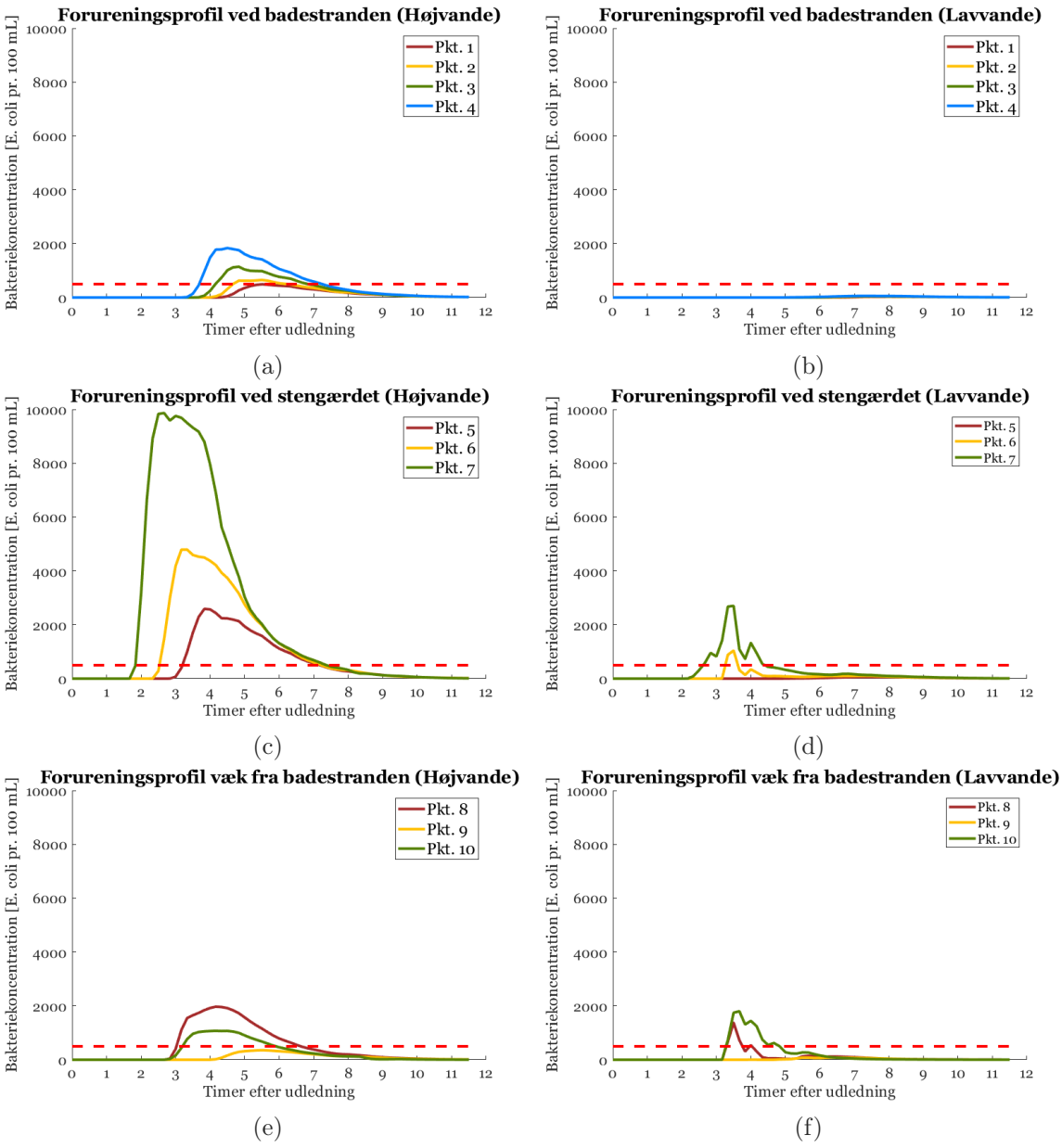
Figur F.6: Forureningsprofiler ved søndenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.5: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved søndenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU05S	12634	OU05S	6437
2	OU05S	15280	OU05S	8249
3	OU05S	21616	OU05S	10699
4	OU05S	30590	OU05S	14026
5	OU05S	32437	OU05S	17091
6	OU05S	45506	OU05S	22228
7	OU05S	73243	OU05S	28993
8	OU05S	13293	OU05S	13559
9	OU05S	8639	OU05S	5381
10	OU05S/OU06S	14619	OU05S/OU06S	19847

F.1.6 Sydvestenvind



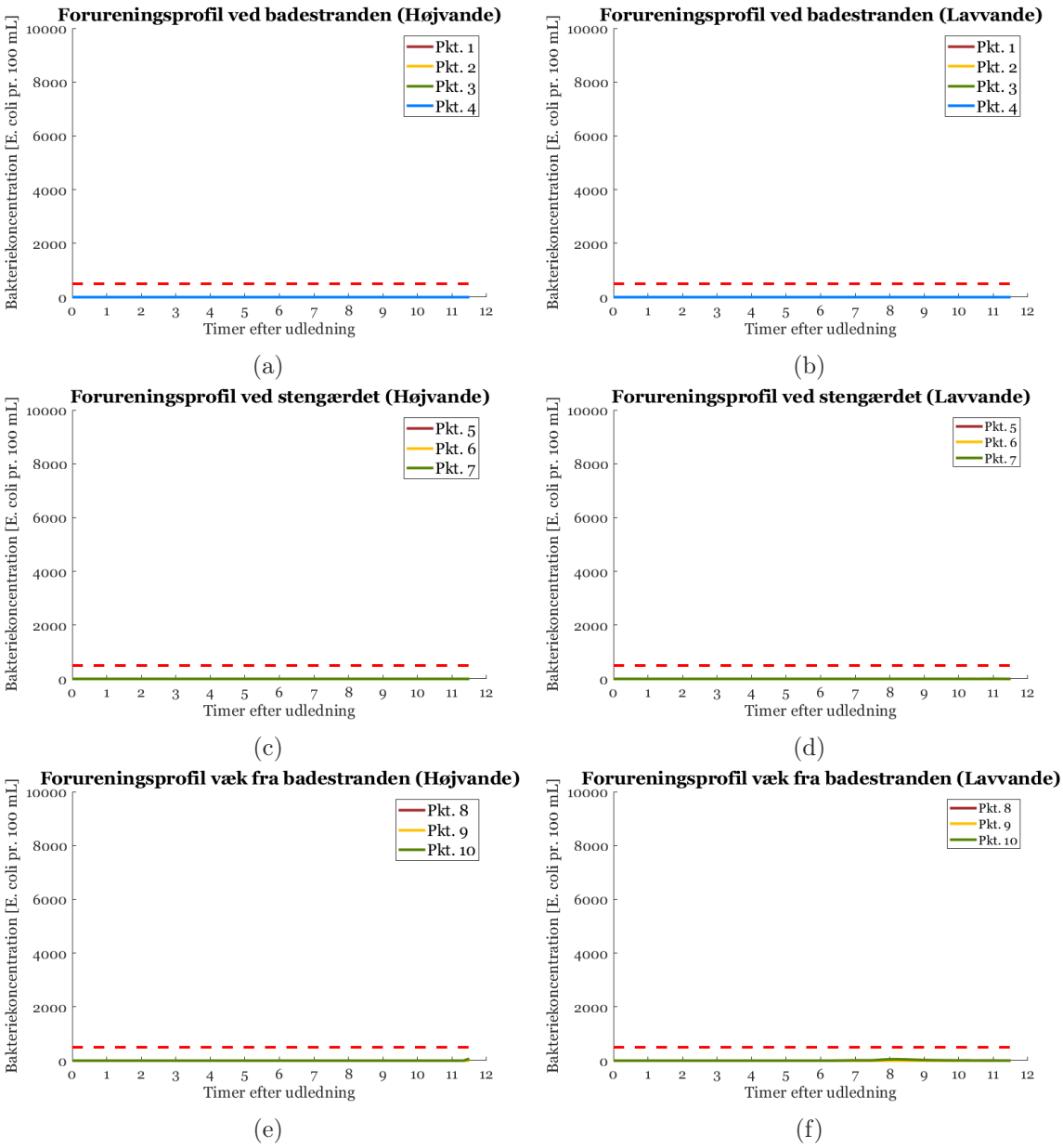
Figur F.7: Forureningsprofiler ved sydvestenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.6: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved sydvestenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	OU05S	491	OU05S	30
2	OU05S	652	OU05S	40
3	OU05S	1143	OU05S	49
4	OU05S	1838	OU05S	58
5	OU05S	2590	OU05S	75
6	OU05S	4793	OU05S	1045
7	OU05S	9866	OU05S	2704
8	OU05S	1971	OU05S	1375
9	OU05S	354	OU05S/OU06S	80
10	OU05S	1074	OU05S	1803

F.1.7 Vestenvind



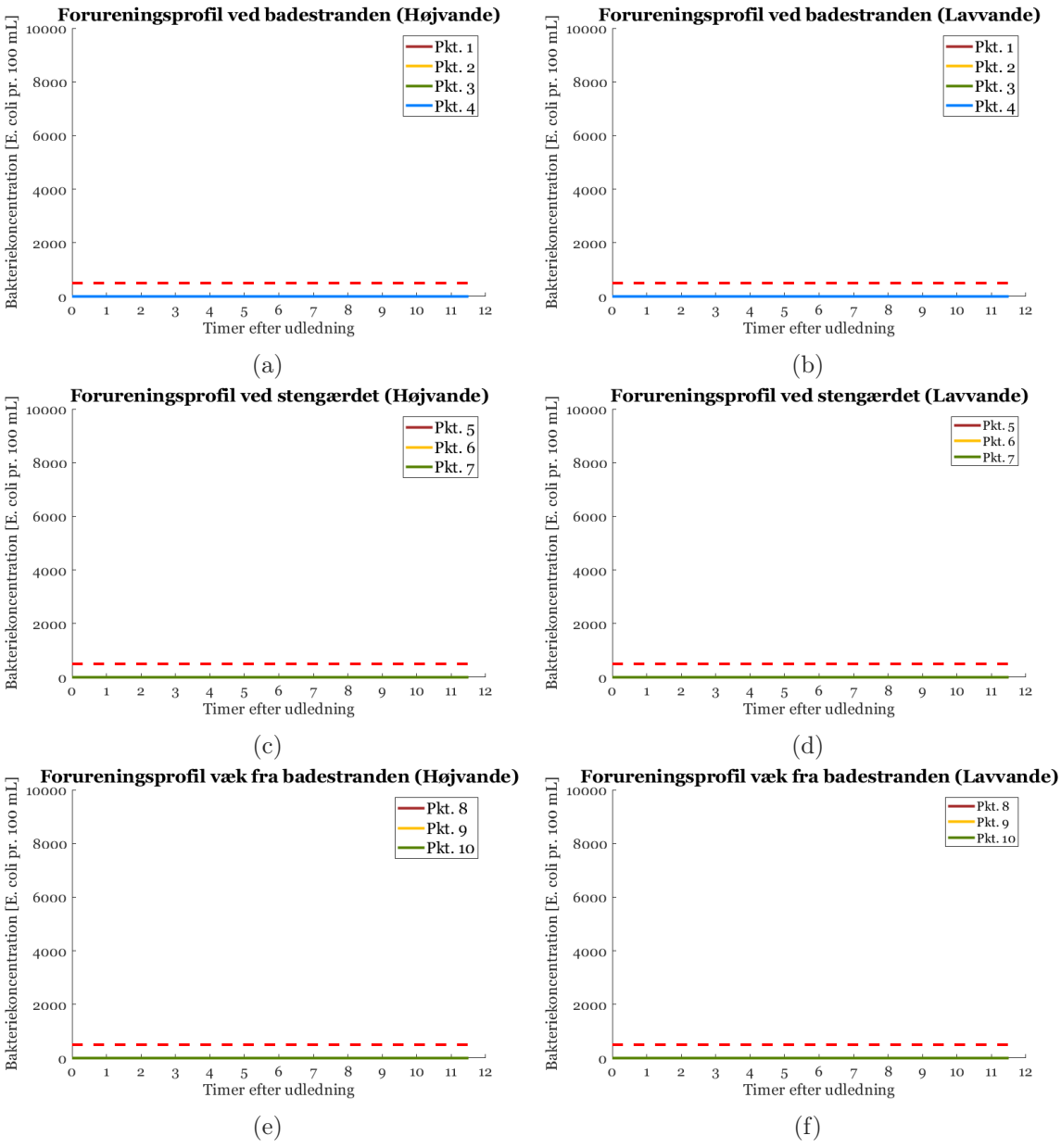
Figur F.8: Forureningsprofiler ved vestenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.7: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse. For nogle punkter er der angivet to bygværker, da begge overløb bidrager ca. lige meget til belastningen. Det førstskrevne bygværk er det værste.

Oversigt ved vestenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	-	<1	-	<1
2	-	<1	OU05S/OU06S	1
3	-	<1	OU05S/OU06S	1
4	-	<1	OU05S/OU06S	1
5	-	<1	OU05S/OU06S	1
6	-	<1	OU05S/OU06S	2
7	-	<1	OU05S/OU06S	2
8	-	<1	OU05S/OU06S	10
9	-	<1	OU05S/OU06S	3
10	OU05S	71	OU06S	53

F.1.8 Nordvestenvind



Figur F.9: Forureningsprofiler ved nordvestenvind efter nedlæggelse.

Tabel F.8: Oversigt over maksimalt forekommende koncentration og mest belastende overløb efter nedlæggelse.

Oversigt ved nordvestenvind

	Højvand		*Lavvand*	
Punkt	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]	Værste bygværk	Maks. koncentration [*E.coli*/100mL]
1	-	<1	-	<1
2	-	<1	-	<1
3	-	<1	-	<1
4	-	<1	-	<1
5	-	<1	-	<1
6	-	<1	-	<1
7	-	<1	-	<1
8	-	<1	-	<1
9	-	<1	-	<1
10	-	<1	-	<1