

Forundersøgelser og teknologiafprøvning til forbedret vandkvalitet og indeklima for svømmebade og badelande

Case Lalandia

Titel: Forundersøgelser og teknologiafprøvning til forbedret vandkvalitet og indeklima for svømmebade og badelande – Case Lalandia

Resume Denne rapport indeholder en gennemgang af resultaterne af en række undersøgelser og teknologiafprøvninger udført i forbindelse med gennemførelse af By- og Landskabsstyrelsens projekt: "Forundersøgelser og teknologiafprøvning til forbedret vandkvalitet og indeklima for svømmebade og badelande – Case Lalandia Rødby".

Forfatter: Morten Møller Klausen

Emneord: Bassinvand, system forståelse, massebalancer, partikler, klor biprodukter, organisk stof, vandbehandlingsteknologi

URL: www.blst.dk

ISBN: 978-87-92668-81-3 (PDF)

Udgiver: By- og Landskabsstyrelsen

Udgiverkategori: Statslig

År: 2010

Sprog: Dansk

Copyright© Må citeres med kildeangivelse.
By- og landskabstyrelsen, Miljøministeriet

By- og Landsskabsstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter inden for miljøsektoren, finansieret af By- og Landskabsstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for By- og Landskabsstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at By- og Landskabsstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	FORORD	1-1
2	SAMMENFATNING OG KONKLUSION	2-1
2.1	Opstilling af generel massebalancemodel	2-1
2.2	Udbygning af viden om forekomst, tilførsel og fjernelse af partikler i svømmebade	2-2
2.3	Udbygning af viden om dannelse af bundet klor og fjernelse med UV teknologi.....	2-3
2.4	Udbygning af viden om dynamikken i koncentrationen af organisk stof og betydning af partikler og renseteknologier	2-3
2.5	Indledende indeklimateundersøgelse med henblik på identifikation af hot-spots	2-4
3	INDLEDNING	3-1
4	OPSTILLING AF GENEREL MASSEBALANCEMODEL	4-1
4.1	Generel massebalancemodel for et svømmebassin.....	4-1
4.2	Belastnings-, fjernelses- og omdannelsesprocesser	4-3
4.2.1	Tilførsel af belastningsstoffer til bassinvandet	4-3
4.2.2	Fjernelses- og omdannelsesprocesser	4-4
4.3	Sammenfatning og konklusion.....	4-7
4.4	Perspektivering	4-7
4.5	Referencer	4-7
5	FOREKOMST, TILFØRSEL OG FJERNELSE AF PARTIKLER I SVØMMEBADE	5-1
5.1	Oprindelse af partikler i svømmebade	5-1
5.2	Tilførsel til bassinvand	5-1
5.3	Sandfilterfunktion og partikelkoncentration i Lalandia Rødby	5-3
5.3.1	Partikelfjernelsesmekanismer i sandfiltre	5-3
5.4	Sandfilterfunktion og partikelkoncentrationsdynamik i Lalandia	5-7
5.4.1	Sandfilterfunktion med og uden flokningsmiddel	5-8
5.4.2	Partikelkoncentrationsdynamik	5-10
5.5	Sammenfatning og konklusion.....	5-12
5.6	Perspektivering	5-13
6	DANNELSE AF BUNDET KLOR OG FJERNELSE MED UV TEKNOLOGI	6-1
6.1	UV-Anlæg, Spa-anlæg og måleprogram	6-1
6.2	Måleresultater	6-1
6.2.1	Badebelastning	6-1
6.2.2	Frit klor	6-2
6.2.3	Bundet klor.....	6-3
6.3	Sammenfatning og konklusion.....	6-8
6.4	Perspektivering	6-8
7	DYNAMIK AF ORGANISK STOF KONCENTRATION OG BETYDNING AF PARTIKLER OG RENSETEKNOLOGIER	7-1
7.1	Spa-anlæg og måleprogram	7-1
7.2	Måleresultater	7-2
7.2.1	Badebelastning	7-2

7.2.2	Partikelkoncentrationsdynamik	7-2
7.2.3	Variationsmønster i total organisk kulstof (TOC) og opløst organisk kulstof (DOC)	7-3
7.2.4	Beregning af person-specifik organisk stoftilvækstshastighed	7-5
7.2.5	Massejernelse af partikulært organisk stof i tromlefiltre kontra sandfiltre	7-7
7.3	Sammenfatning og konklusion.....	7-8
7.4	Perspektivering	7-9
7.5	Referencer	7-9
8	INDLEDENDE HOT-SPOT-ANALYSE AF INDEKLIMAET OG VENTILATIONSSYSTEMERNE I LALANDIA RØDBY	8-1
8.1	Sammenfatning og konklusion.....	8-1
9	ORDLISTE	9-1

BILAG

Annex A - Indledende hot-spot-analyse af indeklimaet og ventilationssystemerne i Lalandia Rødby

1 FORORD

Denne rapport indeholder en gennemgang af resultaterne af en række undersøgelser og teknologiafprøvninger udført i forbindelse med

gennemførelse af By- og Landskabsstyrelsens projekt: ” Forundersøgelser og teknologiafprøvning til forbedret vandkvalitet og indeklima for svømmebade og badelande – Case Lalandia Rødby”.

Projektet, der er en del af de projekter, som gennemføres under Virksomhedsordningen 2007 – rekreativt vand, er udført af DHI – Afdelingen for By og Industri – gruppen for Industri og Procesteknologi.

Aktiviteterne i projektet har taget afsæt i de videns- og udviklingmæssige behov, der er identificeret af den lukkede gruppe af aktører under Vandpartnerskabets tematiske spor om rekreativt vand. Denne gruppe har en fælles vision om at reducere akutte og kroniske komfortgener og sundhedseffekter forårsaget af klor-biprodukter, der fremkommer ved brug af klor i vand til rekreative formål. Gruppen af aktører i Vandpartnerskabet – Rekreativt Vand består for nuværende af Skjølstrup & Grønborg ApS (ULTRAAQUA), Grundfos A/S, Nordic Environment ApS, Aqua System A/S og DHI. Konsortiet har derudover etableret samarbejde med AAU på ventilations- og indeklimaområdet samt DTU inden for området kemisk og mikrobiologisk vandkvalitet. I forbindelse med gennemførelsen af projektaktiviteterne har konsortiet indgået en samarbejdsaftale med Lalandia A/S i Rødby omkring muligheder for forbedring af indeklimaet og vandkvaliteten i badelandet i Lalandia Rødby.

Projektgruppen har bestået af:

Morten Møller Klausen, DHI (Projektleder)

Gert Holm Kristensen, DHI

Virksomhedspartnerne i Vandpartnerskabet Rekreativt Vand

I en følgegruppe har udover projektgruppen deltaget:

BLST, v/Lise-Lotte Nielsen og Anne Christine Duer

Rambøll, v/Henning Hammerich

Dansk Svømmebadsteknisk Forening v/Henry Andersen

Lalandia A/S, v John Flade.

2 SAMMENFATNING OG KONKLUSION

Under Vandpartnerskabet er der dannet en gruppe af aktører med en fælles vision om at reducere akutte og kroniske komfortgener og sundhedseffekter forårsaget af klorbiprodukter, der fremkommer ved brug af klor i vand til rekreative formål ved brug af moderne vandbehandlings- og ventilationsteknologi tilpasset de konkrete belastningsforhold i svømmebade. Eksisterende vandbehandlingsteknologier er grundlæggende set adapteret fra drikkevandsbehandling, og der foreligger i dag ikke solid videnskabelig dokumentation for at disse teknologier er tilpasset de aktuelle belastningsforhold i svømmebade, ligesom mekanismerne bag og dynamikken i dannelsen af klorerede biprodukter i dag er mangelfuldt forstået. En mere dybdegående forståelse for systemsammenhænge i svømmebade er således en forudsætning for at nytænke og designe vandbehandlingssystemet til svømmebade til de aktuelle belastningsscenarier.

Med den modtagne støtte fra Miljøstyrelsens Virksomhedsordning – Område 3: Rekreativt vand, har gruppen ønsket at gennemføre en række undersøgelser der skal øge den grundlæggende forståelse om systemsammenhænge i svømmebadssystemer, herunder også at afprøve udvalgte teknologier med henblik på at opnå en større forståelse for deres virkningsmekanismer og effektivitet set i relation til belastningen. De konkrete aktiviteter har dækket følgende områder:

- Opstilling af massebalancemodel for et svømmebadssystem
- Udbygning af viden om forekomst, tilførsel og fjernelse af partikler i svømmebade
- Udbygning af viden om dannelse af bundet klor og fjernelse med UV teknologi
- Udbygning af viden om dynamikken i koncentrationen af organisk stof og betydning af partikler og renseteknologier
- Indledende indeklimateundersøgelse med henblik på identifikation af hot-spots.

2.1 Opstilling af generel massebalancemodel

En forudsætning for på længere sigt at udvikle nye innovative og mere bæredygtige vandbehandlingskoncepter til svømmebade er at have en dybdegående indsigt i sammenhængen mellem stoftilførsel, stofomdannelser og stoffjernelse i svømmebadssystemet. Ultimativt vil dette kunne resultere i en matematisk model for et svømmebadssystem der kan bruges til at simulere forskellige vandbehandlings- og belastningsscenarier. En grundlæggende forudsætning for at opstille en sådan model er at etablere en solid veldokumenteret massebalancemodel for et svømmebadssystem. Der er således i projektet opstillet en generel massebalancemodel for et svømmebassin, hvor alle væsentlige processer der beskriver tilførsel, omdannelse og fjernelse af de grundlæggende stofkomponenter, kulstof (C), kvælstof (N), frit klor (Cl), bundet klor, AOX og THM er identificeret. Efterfølgende er eksisterende videnskabelig litteratur gennemgået med henblik på at finde data, der kan understøtte procesbeskrivelserne i den opstillede massebalance.

På baggrund af de litterære studier kan det sammenfattende konstateres, at den viden der i dag foreligger omkring de væsentligste processer i svømmebade er for begrænset til at opstille en egentlig matematisk model af systemet. Der foreligger således et stort forsknings- og udviklingsbehov for at få undersøgt systemsammenhænge i svømmebade med hensyn til både belastning, tilførsel og omdannelse af stoffer til bi-produkter samt deres fjernelse i vandbehandlingsanlæg og stripning til halluften, således at processerne kan beskrives kvantitativt i modellen. En sådan model vil gøre det muligt at simulere en række forskellige belastnings- og eksponeringsscenarioer og vil være en solid støtte ved dimensionering af vandbehandlingsanlæg til svømmebade i fremtiden.

2.2 Udbygning af viden om forekomst, tilførsel og fjernelse af partikler i svømmebade

Med det formål at få en større forståelse for tilførslen af partikler og disses fjernelse i eksisterende vandbehandlingsanlæg er der gennemført en række målekampaner med avanceret laser-optisk partikelmåleudstyr, der på en gang tillader måling af partikelkoncentration og partikelstørrelsesfordeling. Derudover er der i relation til måleresultaterne gennemført et teoretisk studie af partikelfjernelsesmekanismerne i sandfiltre, der er den primære partikelfjernelsesteknologi i langt de fleste danske svømmebadsanlæg.

Sammenfattende viser resultaterne, at partikler frigives med en konstant hastighed til bassin vandet fra personer der benytter bassinet, og de frigivne partikler har en bimodal partikelstørrelsesfordeling med to toppe omkring henholdsvis 1-10 μm og 10-25 μm . I relation til de frigivne partiklers størrelse er den vigtigste partikelfjernelsesmekanisme i sandfiltrene sedimentation. Med baggrund i sandfilderteoretiske beregninger af sedimentationen på konkrete sandfiltre i Lalandia er det vist at disse vil kunne fjerne partikler ned til 5 μm , hvilket er fornuftigt i forhold til partikelstørrelsesfordelingen for partikler der frigives fra personer. Dette er også bekræftet af måleresultaterne fra målekampanen i Lalandia, der viste at de konkrete sandfiltre har den mest effektive partikelfjernelse ned til 5-6 μm , hvilket stemmer overens med de sandfilderteoretiske beregninger. Partikelfjernelseeffektiviteten for de eksisterende filtre i Lalandia er i gennemsnit ca. 80% af det indkomne partikelantal, hvilket svarer til ca. 90% af den indkomne masse. Imidlertid er der ved forsøgene i Lalandia ikke observeret nogen effekt af tilsætning af flokningsmiddel på partikelfjernelseeffektiviteten af sandfiltrene.

Med hensyn til dynamikken i partikelkoncentrationen i bassin vandet over en dag vil partikelkoncentrationen afhænge af omsætningstiden i forhold til den totale belastning. For morskabsbassinet i Lalandia er omsætningstiden for lav i forhold til den totale belastning hvilket resulterer i en jævnt stigende partikelkoncentration i løbet af åbningstiden, mens omsætningstiden for SPA-bassinet er høj, og dette resulterer i en konstant og til tider faldende partikelkoncentration i bassin vandet i løbet af åbningstiden.

Til trods for den øgede forståelse for partikelfrigivelsen fra de badende og fjernelsen i sandfiltrene er der stadig en række uafklarede spørgsmål i forhold til en mere optimal håndtering af den partikulære forurening i svømmebade. Ved den nuværende praksis med flokning og sandfiltrering sker der udelukkende en omplacering af det partikulære og kolloide organiske stof fra bassin vandet og til filtrene, hvor de opholder sig fra en uge og op til 14 dage afhængig af returskyllefrekvensen. Dette øger risikoen for hydrolysering og opløsning af de organiske partikler på sandkornene og dermed en øget organisk belastning på hele bassinet og deraf følgende øget biprodukt dannelse. Der er såle-

des stadig et stort behov for yderligere viden om partiklerne i forhold til både biproduktdannelse og alternative teknologier til fjernelse af partiklerne.

2.3 Udbygning af viden om dannelse af bundet klor og fjernelse med UV teknologi

Måleprogrammet for bundet klor i forbindelse med afprøvningen af UV-teknologi viste at koncentrationen af bundet klor udviser en typisk døgnvariation hvor koncentrationen steg tilnærmelsesvis lineært fra åbningstid til lukketid af bassinet for derefter at falde tilnærmelsesvist lineært om natten uafhængigt af driften af det afprøvede UV-anlæg. På baggrund af dataene fra målekampagnen kan der estimeres en personspecifik bundet klor dannelseshastighed på omkring 0,1 g bundet klor per person per time. Med den meget høje belastning i det givne anlæg overstiger dannelseshastigheden langt den bundne klor fjernelseskapaciteten for det afprøvede UV-anlæg der på baggrund af måledataene kan estimeres til gennemsnitligt 0,3 g/time. En interessant observation er at der uden drift af UV også observeres et henfald af bundet klor i form af en intern omsætning af det bundne klor i systemet. Dette skyldes reaktion af de bundne klorkomponenter med andre forbindelser under dannelse af frit kvælstof og nitrat, eller stripping af flygtige bundet klor forbindelser til atmosfæren. På grund af egenomsætningen af bundet klor ses der således ingen ændring i det gennemsnitlige bundne klorindhold under måleperioden.

Sammenfattende viser resultaterne at bundet klor bliver dannet umiddelbart når badegæsterne hopper i bassinet og hastigheden hvormed det bundne klor dannes er en funktion af antallet af badegæster og den tid hvormed de benytter bassinet. Den hurtige bundne klor dannelse indikerer således at en del af klor reaktionerne sandsynligvis foregår direkte på de badenes hud og ikke først efter udskillelse af forløbere til bassinvandet. Dette er afgørende i forhold til den strategi der skal ligge til grund for håndtering af det bundne klor idet det ikke er muligt at fjerne forløberne for bundet klor i en takt så det kan holde trit med dannelsen. Derfor vil det bundne klor skulle håndteres gennem effektiv fjernelse i dedikeret vandbehandlingsteknologi. Det aktuelt afprøvede UV anlæg med 640W lavtryks UV-lamper har imidlertid ikke tilstrækkelig kapacitet til at håndtere belastningen i det givne bassin og den målte fjernelseskapacitet er ligeledes relativt lav sammenlignet med andre typer af UV-anlæg til bundet klor fjernelse der anvender UV-lamper med et bredere spektrum af UV-lys.

2.4 Udbygning af viden om dynamikken i koncentrationen af organisk stof og betydning af partikler og renseteknologier

Med det formål at få en større forståelse for hvordan det organiske stof akkumuleres, omsættes og omdannes til biprodukter i et svømmebadssystem, er der gennemført et måleprogram på det nye udendørs Spa-anlæg i Lalandia Rødby, der dels understøtter opbygningen af viden om sammenhængen mellem belastning og koncentrationen af organisk stof og herunder fordelingen mellem partikulært og opløst organisk stof, og dels belyser hvor meget partikulært organisk stof der fjernes i to forskellige partikelfjernesteknologier.

Sammenfattende viser resultaterne af måleprogrammet, at koncentrationen af organisk stof følger en typisk døgnvariation, hvor koncentrationen steg tilnærmelsesvis lineært fra åbningstid til lukketid af bassinet for derefter at falde tilnærmelsesvist lineært om natten. Det organiske stof i bassinvandet bestod af >99% opløst organisk stof, mens bidraget fra den partikulære organiske forurening på det totale organiske stofindhold var ubetydelig. Over hele måleperioden var der ingen netto akkumulering af organisk stof, idet forøgelsen i koncentrationen af opløst organisk stof under den høje belastning om dagen omsættes fuldstændigt om natten af kloreens oxidation af det organiske stof. En interessant observation i relation til variationen i det opløste organiske stof er, at det følger samme variationsmønster som for bundet klor. Sammenholdes denne observation med den kemiske sammensætning af sved og urin, der med hensyn til både kulstof og kvælstof domineres af urea indholdet, antydes således at dannelsen af bundet klor og tilvæksten i opløst organisk stof langt overvejende er knyttet til frigivelsen af urea eller reaktioner mellem klor og urea direkte i huden på de badende, og at det i høj grad handler om at håndtere denne komponent i forhold at minimere biprodukt dannelsen.

Undersøgelsen omfattede også en sammenligning af massefjernelsen af partikulært organisk stof i to forskellige partikelfjernelsesteknologier – et tromlefilter med 10 µm dug og et sandfilter. Den gennemsnitlige massefjernelse af partikulært organisk stof blev fundet til 88 gC/dag og 95 gC/dag for henholdsvis tromlefiltere og sandfiltre. De aktuelt observerede forskelle i partikelfjernelse vurderes dog ikke umiddelbart at være et udtryk for en reel forskel i effektiviteten af de to typer filtre, idet de opgjorte skyllevandsmængder, der ligger til grund for masseberegningen, er relativt usikkert bestemt for især tromlefiltret, men også for sandfiltret. Vurderet ud fra de aktuelle målinger synes tromlefiltret at kunne udgøre et reelt alternativt til sandfiltrene som primær partikelfjernelsesteknologi. Der er imidlertid behov for mere detaljerede studier af de to teknologiers partikelfjernelseeffektivitet for at kunne bekræfte ovenstående første sammenligning af de to teknologier.

2.5 Indledende indeklimaundersøgelse med henblik på identifikation af hot-spots

Sammenfattende er der på baggrund af de gennemførte indeklima- og ventilationsmålinger ikke identificeret kritiske områder eller store variationer.

Der kan dog konstateres forskelle i indeklimaet, når man bevæger sig rundt i badelandet. Bl.a. er der områder, hvor man er meget tæt på indblæsningsarmaturerne, og lufthastigheden derfor er meget højere end generelt i badelandet. Målingerne blev gennemført på et tidspunkt, hvor badelandet var middel belastet både med hensyn til antallet af badende og vejret. Det bør derfor ikke undre, at målingerne generelt viser at indeklimaet er i orden.

Der er dog stadig mulighed for forbedringer, f.eks. ved at arbejde bevidst med valg af indblæsningsarmaturer for at opnå en bedre fordeling, opblanding og afgrænsning i og af de enkelte ventilationszoner. Ligeledes kunne man tilføje måling af CO₂ niveauet til reguleringen af ventilationsanlæggene, ligesom det bør være muligt at køre med reducerede luftmængder uden for åbningstiden og evt. også i åbningstiden ved få badende, så længe der sikres tilstrækkelig opblanding af luften.

3 INDLEDNING

Under Vandpartnerskabet er der dannet en gruppe af aktører, der har en fælles vision om at reducere akutte og kroniske komfortgener og sundhedseffekter forårsaget af klorbiprodukter, der fremkommer ved brug af klor i vand til rekreative formål.

Med henblik på at styrke forretningsgørelsen af konsortiet har gruppen ønsket at gennemføre en række forberedende aktiviteter, der skal sikre øget viden omkring system-sammenhænge i svømmebade, der direkte relaterer sig til valg af de mest optimale teknologiske løsninger for forbedret vandkvalitet i svømmebade og badelande. I forbindelse med gennemførelsen af projektaktiviteterne har konsortiet indgået en samarbejdsaftale med Lalandia A/S i Rødby omkring forbedring af indeklimaet og vandkvaliteten i badelandet i Lalandia Rødby.

Vandpartnerskabsgruppen har besluttet at lægge vægt på følgende aktiviteter med henblik på at opnå en forbedret viden om systemsammenhænge og teknologivalg i relation til vandkvaliteten:

- Opstilling af generelle massebalancer for de væsentligste stofkomponenter i forhold til klorbiprodukt dannelse med baggrund i eksisterende international videnskabelig litteratur.
- Etablering af større indsigt i processerne omkring tilførsel af partikler fra de badende og disses fjernelse i eksisterende vandbehandlingsanlæg
- Etablering af større indsigt i sammenhængen mellem badebelastning og dannelse af bundet klor og disse komponenters fjernelse med UV teknologi
- Etablering af større indsigt i dynamikken omkring organisk stofkoncentrationer og bidraget hertil fra partikler. Herunder sammenligning af nye partikelfjernelsesteknologier med eksisterende sandfilterteknologi i forhold til massefjernelse af partikulært organisk stof.

Med hensyn til indeklima og ventilationsdelen er der gennemført et indledende måleprogram i Lalandia med brug af traditionelle indeklima parametre i form af temperatur og luftfugtighedsfordeling, CO₂ niveau samt målinger af sporgas og lufthastigheder i relation til identifikation af kritiske hot-spots med manglende eller uhensigtsmæssig ventilation i relation til eksponering med flygtige klorerede biprodukter.

Resultaterne af disse aktiviteter er præsenteret i de følgende kapitler. Resultaterne af aktiviteterne omkring indeklima og ventilation er gengivet i resumé i rapporten, mens den egentlige afrapportering af det gennemførte måleprogram er afrapporteret i en særskilt rapport, der er indsat som annekst til denne rapport.

4 OPSTILLING AF GENEREL MASSEBALANCEMODEL

En forudsætning for på længere sigt at udvikle nye innovative og mere bæredygtige vandbehandlingskoncepter til svømmebade er at have en dybdegående indsigt i sammenhængen mellem stoftilførsel, stofomdannelser og stoffjernelse i svømmebadssystemet. Som en vigtig aktivitet i projektet har Vandpartnerskabsgruppen besluttet at få opstillet en generel massebalancemodel for de væsentligste stofkomponenter i svømmebade og få samlet op på den eksisterende viden om stoftilførsel, stofomdannelser og stoffjernelser i svømmebadssystemer som udgangspunkt for de videre undersøgelser og aktiviteter i kommende forsknings- og udviklingsprojekter.

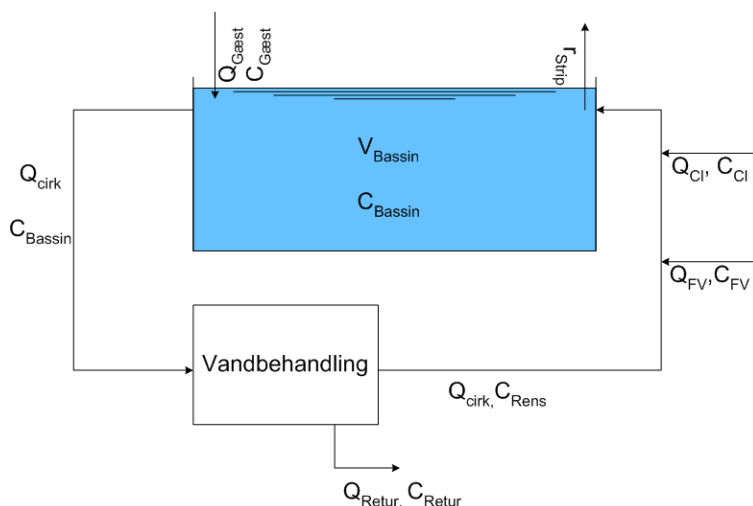
4.1 Generel massebalancemodel for et svømmebassin

En massebalance baserer sig på princippet om massebevarelse indenfor et givet system og kan således beskrives helt generelt som:

$$\text{Akkumuleret Masse} = \text{Tilført Masse} - \text{Fjernet Masse} - \text{Omdannet Masse}$$

Altså at den stofmængde, der er i systemet til en given tid, er et resultat af det der bliver tilført og det der bliver fjernet og det der bliver omdannet.

Med udgangspunkt i følgende generelle figur over et svømmebassin kan den generelle massebalance for en given stofparameter opstilles (Figur 4-1)



Figur 4-1 Svømmebassin med alle relevante flows og koncentrationer for opstilling af massebalancer

Under antagelse af en fuldt opblandet reaktor udtrykkes massebalancen som følger:

$$\text{Akkumuleret Masse} = \text{Tilført Masse} - \text{Fjernet Masse} - \text{Omdannet Masse} =$$

$$V_{\text{Bassin}} \cdot \frac{dC_{\text{Bassin}}}{dt} = (Q_{\text{Gæst}} \cdot C_{\text{Gæst}} + Q_{\text{FV}} \cdot C_{\text{FV}} + Q_{\text{Cirk}} \cdot C_{\text{Rens}} + Q_{\text{Cl}} \cdot C_{\text{Cl}}) - (Q_{\text{Cirk}} \cdot C_{\text{Bassin}} + Q_{\text{retur}} \cdot C_{\text{retur}} + r_{\text{Strip}}) - \text{Omdannet}$$

Hvor:

Tabel 4-1 Beskrivelse af parametre og processer der indgår i massebalancen for et svømmebassin

Parameter	Beskrivelse	Enhed
V_{Bassin}	Voluminet af bassinet	[m ³]
C_{Bassin}	Koncentrationen af en given stofparameter i Bassinet til en given tid	[mg/l]
dC_{Bassin}/dt	Ændringen i koncentrationen af en given stofparameter i bassinet over tidsrummet "dt"	[mg/(l-time)]
$Q_{\text{Gæst}}$	Badebelastningen	[personer/time]
$C_{\text{Gæst}}$	Stofafgivelse pr. person	[mg/person]
Q_{FV}	Friskvandsflowet til bassinet	[m ³ /time]
C_{FV}	Koncentrationen af en given stofparameter i friskvandet	[mg/l]
Q_{Cirk}	Cirkulationsflowet omkring bassinet og vandbehandlingen	[m ³ /time]
C_{Rens}	Koncentrationen af en given stofparameter i det rensede vand til bassinet	[mg/l]
Q_{Cl}	Flowet af kloropløsning til bassinet	[m ³ /time]
C_{Cl}	Koncentrationen af kloropløsning	[mgCl/l]
Q_{retur}	Flow af filterskyllevand	[m ³ /time]
C_{retur}	Koncentrationen af en given stofparameter i filterskyllevandet	[mg/l]
r_{Strip}	Fjerneshastighed af en given stofparameter via stripping fra overfladen af bassinet	[mg/time]
Omdannet	Fjerneshastighed af en given stofparameter via andre omdannelsesprocesser (oxidation/mineralisering, biproduktdannelse)	[mg/time]

De væsentligste stofparametre, der indgår i opstillingen af massebalancen for vandkvaliteten i svømmebassiner, er følgende (Tabel 4-2):

Tabel 4-2 Stofparametre, der indgår i opstillingen af massebalancen for vandkvaliteten i svømmebassiner

Parameter	Enhed	Beskrivelse
TOC	[mgC/l]	Udtrykker koncentrationen af total organisk kulstof i bassinvandet der er indikativ for badebelastningen og indholdet af forløbere for dannelsen af klorerede organiske biprodukter
Kjeldahl-N	[mgN/l]	Udtrykker koncentrationen af oxiderbart kvælstof(NH ₄ ⁺ -N og organisk-N) der ligeledes er indikativ for badebelastningen samt for indholdet af forløbere for dannelsen af bundet klor
Frit klor	[mg/l som Cl ₂]	Udtrykker koncentrationen af frit klor i bassinvandet
Bundet klor	[mg/l som Cl ₂]	Udtrykker koncentrationen af kvælstofbundet klor i bassinvandet
AOX	[mgCl/l]	Udtrykker koncentrationen af organisk bundet klor i bassinvandet
THM	[mg/l som CHCl ₃]	Udtrykker koncentrationen af klor bundet i halogenmethanforbindelser XCH

4.2 Belastnings-, fjernelses- og omdannelsesprocesser

I massebalanceudtrykket indgår der en række processer, der skal beskrive henholdsvis tilførslen af stof til bassinet, fjernelsen af flygtige stofkomponenter via stripping til luften samt kemiske omdannelsesprocesser af stofkomponenter i bassinet. Disse enkeltprocesser skal beskrives kvantitativt for at kunne regne på massebalancer for systemet. Kvantitative udtryk og data for disse processer er i det følgende beskrevet med baggrund i den eksisterende viden fra den internationale videnskabelige litteratur. For nuværende er processerne i vandbehandlingsanlægget samt omdannelsesprocesser i bassinet simplificeret som en "black-box", hvori der indgår en række komplicerede processer, der resulterer i en fjernelse af stofkomponenter fra bassinvandet, og kun de processer, hvor der med rimelig sandsynlighed kan findes pålidelige data og beskrivelser, vil indgå detaljeret.

4.2.1 Tilførsel af belastningsstoffer til bassinvandet

Den væsentligste årsag til, at der i svømmehaller dannes desinfektionsbiprodukter, er, at der fra de badende overføres forureningskomponenter til bassinvandet. Når svømmehallen tages i brug, vil der fra de badende tilføres både mikroorganismer, partikler og opløste stoffer fra sved, urin, sæber, hårprodukter, mv. som ved reaktion med klor vil kunne forårsage dannelse af potentielt sundhedsskadelige desinfektionsbiprodukter (DBP). Både typen og mængden af stof, som udskilles fra de badende, har stor betydning for

typen og mængden af DBP, der dannes. Det er imidlertid overordentligt vanskeligt at opgøre den reelle belastning fra de badende, da den afhænger af mange faktorer som eksempelvis, hvor grundigt de badende vasker sig og udskyller restsæbe inden brug af svømmebadet samt graden af uriner og tilførsel af sved og spyt og sved ved ophold i bassinet.

Ved opstilling af massebalancer er det derfor nødvendigt at simplificere belastningen til de to grundlæggende stofparametre – organisk kulstof (C) og oxiderbart kvælstof Kjeldahl-N – idet disse er de fundamentale forløbere for klorbiprodukterne THM og bundet klor(kloraminer). Endvidere antages det, at belastningsstofferne udelukkende stammer fra tilførsel af urin og sved, og i den videnskabelige litteratur angives en tilførsel på 200 ml sved og 50 ml urin fra en gennemsnitlig badegæst pr. time /1/. Ud fra kendskab til stofsammensætningen i urin og sved kan indholdet af organisk kulstof (C) og Kjeldahl-N beregnes i en 4:1 blanding af sved og urin og herfra kan den personspecifikke stofafgivelse beregnes ud fra en antaget volumentilførsel pr person på 250 ml (Tabel 4-3).

Tabel 4-3 Belastningsstoffer i en 4:1 blanding af sved og urin samt personspecifik stofafgivelse

Stofkomponent	Koncentration [mg/l]	Organisk kulstof [mgC/l]	Kjeldahl-N [mgN/l]
Ammoniumklorid	2.000	-	520
Urea	14.800	2.960	6.900
L-Histidine	1.210	560	320
Hippursyre	1.710	1.040	134
Urinsyre	490	180	160
Citronsyre	640	240	-
Creatinine	1.800	770	67
Total	-	4.980	7.890
Personspecifik afgivelse [mg/person]	-	1245	1973

På baggrund af personbelastningen opgjort som antallet af mennesker i bassinerne kan der således beregnes en stoftilførsel for de væsentligste parametre.

4.2.2 Fjernelses- og omdannelsesprocesser

Når stofferne tilføres bassinvandet indeholdende frit klor i en given koncentration indgår de momentant i en reaktion med det frie klor under en række komplicerede fjernelses- og omdannelsesprocesser. Langtfra alle processer er kendte, og processerne afhænger desuden af den øvrige kemi og hydraulik i bassinet samt ventilationsforholdene omkring bassinet. I forhold til opstilling af massebalancer er det således nødvendigt at foretage en række simplificeringer til beskrivelse af disse processer.

Kvantitativ beskrivelse af stripping af flygtige stoffer til halluften

Mange af de dannede biprodukter er flygtige og vil således stripes til halluften. Hastigheden hvormed disse biprodukter stripes er afhængig af en række forhold som koncentrationen i væskefasen, turbulensen i bassinvandet og ventilationsgraden. Grundlæggende følger stofferne Henry's lov der udtrykker at koncentrationen af en gas i væskefasen ved ligevægt er proportional med partialtrykket af gassen i gasfasen med en proportionalitetsfaktor H benævnt Henry's konstant:

$$p = H \cdot C_{aq}$$

Jo større Henry's konstant des større tendens har stoffet til at være i gasfasen. Henry's konstanter ved (25°C) for de væsentligste klorerede biprodukter fremgår af Tabel 4-4.

Tabel 4-4 Henry's konstanter for de væsentligste klorbiprodukter i svømmebade /2/

Stof	Henry's konstant [L·bar/mol]
Kloroform (Triklormethan)	3
Bromdiklormethan	2,5
Dibromklormethan	1,2
Bromoform (Tribrommethan)	0,56
Monokloramin	0,011
Dikloramin	0,035
Trikloramin	10

Som det fremgår er trikloramin det mest flygtige stof efterfulgt af de fire THM'er. Da biprodukterne dannes i vandfasen, vil der løbende ske en stripping til halluften, idet der vil ske en forskydning af gas-væske ligevægten i henhold til Henry's lov, når stofferne ventileres væk fra bassinoverfladen. Det er samtidig klart at hastigheden hvormed strippingen vil ske vil være afhængig af koncentrationen og vil følge et 1.-ordens henfald i forhold til væskekoncentrationen (ved lave væskekoncentrationer) jf. følgende generelle udtryk:

$$\frac{dC_{aq}}{dt} = -k_{strip} \cdot C_{aq}$$

Hvor k_{strip} er hastighedskonstanten for strippingen i et aktuelt bassin. k_{strip} vil være specifik for et givent bassin, idet den afhænger af omrøringen (turbulensen) i bassinet, temperaturen samt ventilationsgraden.

I litteraturen er der fundet en enkelt undersøgelse af afgasningshastigheden af kloroform fra et svømmebassin/3/. Heri blev afgasningen målt ved at følge kloroformfjernelsen i bassin vandet efter tilsætning af kaliumbromid, hvorefter alt dannet THM blev til bromoform. Hastighedskonstanten blev således fundet til 0,35 h⁻¹ svarende til en halveringstid på 2 timer. Dette svarer til at 35% af det kloroform, der dannes i væskefasen over en time, stripes til atmosfæren.

Imidlertid er det svært at overføre denne hastighedskonstant til andre bassiner med en anden hydraulik og temperatur, hvorfor det ved mere præcise beregninger af massebalancer er nødvendigt at foretage enkelte målinger af afgasningshastighederne. Hertil er der i litteraturen fundet en metode hvorpå man relativt nemt kan bestemme afgasningshastigheden af THM i et aktuelt bassin. Kaczmar et al., 1984 /4/ fandt således at forholdet mellem geniltningshastigheden og afgasningshastigheden for hver af de fire THM'er altid er konstant under faste betingelser for turbulens og temperatur. Forholdet mellem geniltningshastigheden og afgasningshastigheden for de fire THM'er som fundet i /4/ fremgår af Tabel 4-5.

Tabel 4-5 Forholdet mellem geniltningshastigheden og afgasningshastigheden for de fire THM'er. X står for et af de fire halogener (F, Cl, Br, I). /4/

THM	$K_L X / K_L O_2$
Kloroform	0,63
Bromdiklormethan	0,55
Dibromklormethan	0,41
Bromoform	0,29

Det betyder således at THM afgasningshastigheden i et aktuelt bassin under aktuelle bassinforhold kan beregnes på baggrund af en måling af geniltningshastigheden for bassinet under realistiske bassinforhold.

Kvantitativ beskrivelse af omdannelse af TOC og AOX og THM

Et af de væsentligste biprodukter ved reaktion mellem klor og organisk stof er trihalomethaner (THM) eller summen af kloroform, bromdiklormethan, dibromklormethan og bromoform. Ifølge den nyeste internationale viden går omdannelsen af organisk stof til THM via AOX der er en samlet betegnelse for indholdet af klorerede organiske forbindelser /5,6/. For at kunne estimere massebalancer for organisk stof og de organiske biprodukter er det således nødvendigt at kunne beskrive omdannelsesprocesserne mellem TOC, AOX og THM.

På baggrund af en 3 årig måleperiode af parametrene TOC og AOX på et friluftsbad har man i /5/ lavet massebalanceberegninger og beregnet et personspecifikt TOC og AOX bidrag på henholdsvis 1,64 gTOC/person og 0,18 g AOX(Cl)/person. Ud fra dette kunne det desuden beregnes, at kun omkring 2% af den tilførte TOC omdannes til klorerede biprodukter, mens de resterende ca. 98% bliver oxideret af klorene til CO₂ og H₂O. Endvidere er det værd at bemærke, at omdannelsen af TOC til AOX skete væsentligt langsommere end tilførslen af TOC, hvorfor det burde være muligt at fjerne TOC komponenterne inden de bliver til biprodukter. Ligeledes kunne det konstateres, at dannelsen af THM ud fra AOX skete langsommere end dannelsen af AOX, hvorfor det også burde være muligt at fjerne AOX komponenterne inden de blive omdannet til THM.

Dette bekræftes af resultater af et meget velkontrolleret massebalance-studie gennemført i en pilot-pool /1/. I dette studie er belastningen af poolen gennemført ved tilførsel af en såkaldt body-fluid-analogue baseret på indholdsstofferne i sved og urin (Tabel 3). Ved forskellige badebelastninger er opbygningen af grundelementerne kulstof, kvælstof og klor i bassinvandet undersøgt.

Resultaterne viser at der for en given konstant badebelastning sker en initial akkumulering af organisk kulstof, indtil der indtræder en ligevægt mellem kloromsætning og tilførsel. På baggrund af dataene ved ligevægt kan det beregnes, at omkring 98% af den tilførte mængde organisk stof mineraliseres som følge af klorene oxidation, og der sker således ingen netto akkumulering af organisk kulstof i svømmebade. Den tid det tager før ligevægten indtræder samt ligevægtskoncentrationen af organisk kulstof er lineært relateret til badebelastningen og varierer mellem 8 – 11 døgn ved badebelastninger mellem 0,06 og 0,3 personer/m³•h. Det forhold at der for en given belastning sker en akkumulering af organisk kulstof der først når ligevægt efter 8-11 døgn viser at omsætningen som følge af klorene oxidation er relativt langsom, og det burde derfor være muligt at fjerne de tilførte stoffer inden de omdannes til flygtige biprodukter.

Ligeledes observeres at THM akkumulerer med en hastighed bestemt af badebelastningen, indtil der for en given badebelastning opnås en ligevægts THM koncentration. THM ligevægtskoncentrationen opnås omkring samme tidspunkt som ligevægtskoncentrationen for organisk kulstof. Disse resultater antyder således at THM koncentrationen er nært knyttet til indholdet af organisk stof. Imidlertid er dannelsen af THM momentan, hvorfor det kan være nødvendigt parallelt med implementering af teknologi til at minimere TOC indholdet også at implementere teknologi til dedikeret fjernelse af THM for at fastholde lave THM koncentrationer i bassinvandet. At THM dannelsen er momentan bekræftes også i /3/, hvor THM koncentrationen er målt under kontrollerede forhold, hvor et menneskes arm er neddyppet i et kar med vand indeholdende klor. Her observeredes at THM dannelsen skete umiddelbart efter at armen var i kontakt med væsken.

4.3 Sammenfatning og konklusion

På baggrund af de litterære studier kan det sammenfattende konstateres, at den viden der i dag foreligger omkring de væsentligste processer i svømmebade er for begrænset til at opstille en egentlig matematisk model af systemet. Der foreligger således et stort forsknings- og udviklingsbehov for at få undersøgt systemsammenhængene i svømmebade med hensyn til både belastning, tilførsel og omdannelse af stoffer til bi-produkter samt deres fjernelse i vandbehandlingsanlæg og stripping til halluften, således at processerne kan beskrives kvantitativt i modellen.

4.4 Perspektivering

Perspektivet ved at øge viden om de væsentligst processer i svømmebade og dermed udvikle en kvantitativ model til beskrivelse af sammenhængende vil være at det vil blive muligt at simulere en række forskellige belastnings- og eksponeringsscenerier der vil være en solid støtte ved dimensionering af vandbehandlingsanlæg til svømmebade samt ved risikovurderinger.

4.5 Referencer

- /1/ Judd, S.J. & Bullock, G. (2003), The fate of chlorine and organic materials in swimming pools, *Chemosphere*, 51, pp. 869-879.
- /2/ NIST Chemistry WebBook- NIST Standard Reference Database Number 69, June 2005 Release, <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- /3/ Erdinger, L., Kühn, K. & Gabrio, T. (2005), Formation of Trihalomethanes in Swimming Pool Water – Identification of Precursors and Kinetics of Formation, Proceedings of the 1st International Conference on Health and Water Quality Aspects of the Man Made Recreational Water Environment, Budapest, 10.-11. March 2005.
- /4/ Kaczmar, S.W., D'Itri, F.M. & Zabik, M.J. (1984), Volatilization rates of selected haloforms from aqueous environments, *Environmental toxicology and chemistry*, Vol 3, pp. 31-35.
- /5/ Glauner, T., Frimmel, F.H. & Zwiener, C. (2004), Schwimmbadwasser – wie gut muss es sein und was kann man technisch tun, *Wasser und Abwasser*, Vol 145, No. 10, pp. 706-713.

- /6/ Glauner, T., Waldman, P., Frimmel, F.H. & Zwiener, C. (2005), Swimming pool water - fractionation and genotoxicological characterization of organic constituents, *Water Research*, Vol 39, pp. 4494-4502.

5 FOREKOMST, TILFØRSEL OG FJERNELSE AF PARTIKLER I SVØMMEBADE

Med det videngrundlag der i dag ligger omkring partikler i svømmebade kan det konstateres, at der ikke foreligger dybdegående dokumentation for eksisterende anlægs effektivitet samt data for partikeltilførsel i forhold til antal badende. Med det formål at få en større forståelse for tilførslen af partikler og disses fjernelse i eksisterende vandbehandlingsanlæg er der derfor med anvendelse af moderne partikelmåleudstyr gennemført en partikel målekampagne i henholdsvis et privat spa-bad uden vandbehandling og kloring samt i to udvalgte bassiner i Lalandia.

Målekampagnen har omfattet følgende aktiviteter:

- Etablering af tidsprofil for partikelkoncentration og partikelstørrelsesfordeling under kontrollerede forhold i privat spa-bassin uden vandbehandling og kloring
- Etablering af åbningstidsprofil for partikelkoncentration og partikelstørrelsesfordeling som funktion af badebelastningen i to bassiner i Lalandia
- Karakterisering af sandfilterfunktion med og uden flokningsmiddel for de to anlæg under målekampagner til etablering af døgnprofiler.

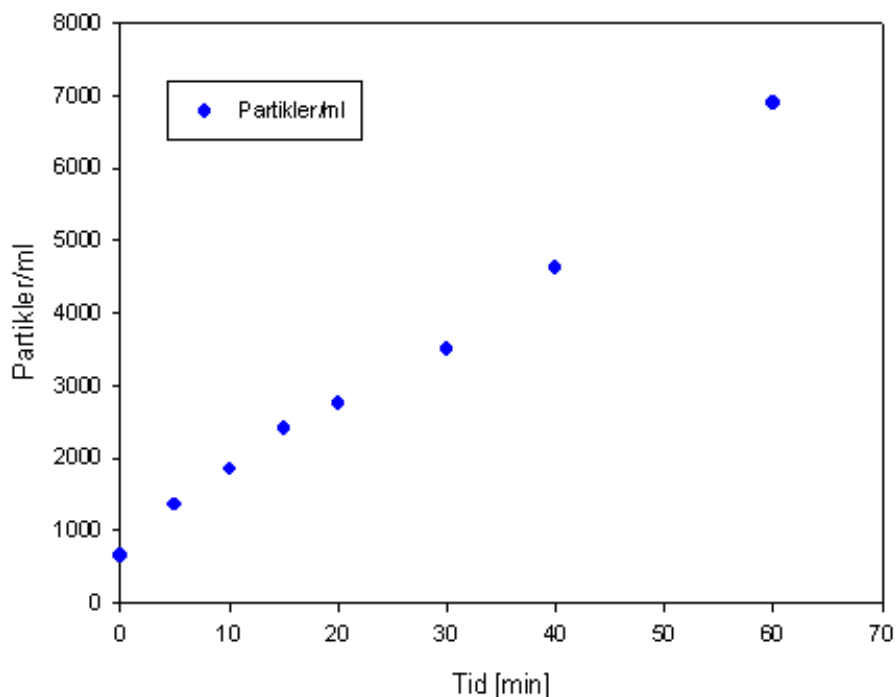
5.1 Oprindelse af partikler i svømmebade

De partikler der tilføres bassinvand fra de badende stammer altovervejende fra huden i form af døde hudceller der typisk falder af i flager. De døde hudceller stammer fra den yderste del af huden kaldet "Epidermis" der udgør de yderste 70 μm af huden /1/. Denne del af huden er under konstant fornyelse og i løbet af en måned har et menneske fornyet hele den yderste del af huden /1/. Det betyder at personer konstant afgiver flere tusinde hudceller fra deres krop og det vil således også ske når folk springer i svømmebassinerne. Som eksempel kan det nævnes at der fra et menneskes forarm frigives omkring 1300 hudpartikler/ $\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ der typisk ender som husstøv i hjemmet. For en gennemsnitsperson med et kropsoverfladeareal på 1,8 m^2 fås således en hudpartikel frigivelse på omkring 23 mio. hudpartikler/person $\cdot\text{h}$. Denne frigivelseshastighed må forventes at være forskellig for forskellige steder på kroppen samt at være væsentlig større i vand, idet der er en større mekanisk påvirkning fra vandet og at huden til en vis grad opløses. Endvidere findes det fra forskning indenfor astma og allergi, at de døde hudceller der er i husstøvet har størrelser mellem 5-30 μm /2/.

5.2 Tilførsel til bassinvand

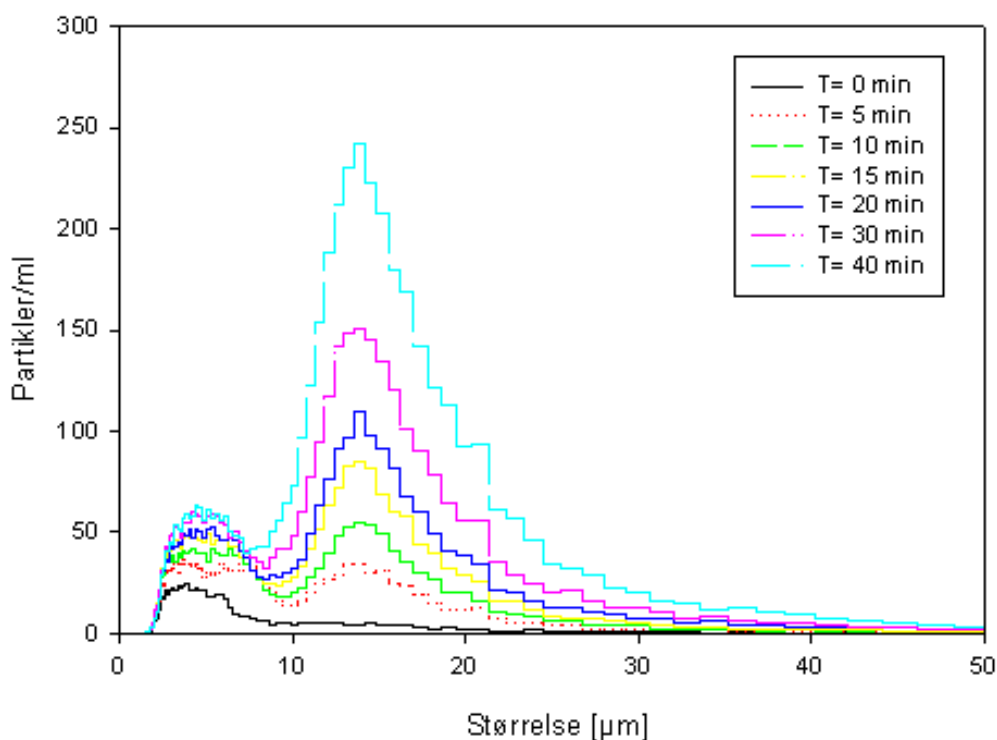
For at underbygge ovenstående litterære viden i forhold til partikelafgivelse i svømmebade er der gennemført et kontrolleret forsøg i et privat spa-bassin, hvor partikelkoncentrationen samt partikelstørrelsesfordelingen af partikler afgivet fra 1,5 normalperson (1 voksen og et barn) i en time er bestemt som funktion af tiden. Spa-bassinet har et volumen på 200 liter og blev under forsøget fastholdt på en temperatur på 37°C ved konstant cirkulation af vandet over et 3kW varmelegeme. Cirkulationen sikrede samtidig opblandingen af partiklerne i vandet i bassinet. De personer der benyttede bassinet og som således udgjorde belastningen var forinden afvasket grundigt med sæbe under bruser. Ud-

viklingen i partikelkoncentrationen ved belastning af bassinet over en time fremgår af Figur 5-1.



Figur 5-1 Partikelkoncentration i spa-bassinet over en time ved konstant belastning

Som det fremgår af figuren kunne der observeres en lineær stigning i partikelkoncentrationen over den time som forsøget forløb fra 640 partikler/ml inden forsøgsstart og til en koncentration på 6900 partikler/ml efter en time. Dette bekræfter således, at personer der benytter svømmebassiner afgiver en konstant mængde partikler per tidsenhed i den tid de befinder sig i bassinet, og det er således klart, at hvis de ikke fjernes hurtigere end frigivelseshastigheden ved den kontinuerlige recirkulering hen over et sandfilter, så vil koncentrationen i bassinet stige proportionalt med tiden. Omregnes den ovenstående stigning i partikelkoncentration i det givne volumen i forhold til personoverfladeareal (beregnet ud fra højde og vægt af testpersoner) fås en partikelfrigivelseshastighed på 44000 partikler/cm²•h eller 800 mio. hudpartikler/person•h, hvilket er omkring 30 gange højere end frigivelseshastigheden i luft. For ovenstående partikelmålinger er der ligeledes målt partikelstørrelsesfordeling for de partikler, der akkumulerer i bassinet. Udviklingen i partikelstørrelsesfordelingen over den ene times belastning fremgår af Figur 5-2.



Figur 5-2 Udviklingen i partikelstørrelsesfordelingen i spa-bassinet over den ene times belastning

Som det ses følger de partikler, der frigives fra mennesker til bassinvand, en såkaldt bimodal partikelstørrelsesfordeling med to markante toppe omkring henholdsvis 1-10 μm og 10-25 μm , hvilket stemmer overens med resultaterne af den forskning, der har været foretaget indenfor astma og allergiområdet. Det ses samtidig at den mest markante stigning i partikelkoncentrationen sker for partikler med størrelser mellem 10-25 μm , og med hensyn til partikelmasse ligger også omkring 95% i intervallet 10-25 μm . Resultaterne betyder således at sandfilteret inklusiv flokning effektivt skal fjerne partikler i størrelsesområdet 1-25 μm for at kunne holde en lav partikelkoncentration i bassinet.

5.3 Sandfilterfunktion og partikelkoncentration i Lalandia Rødby

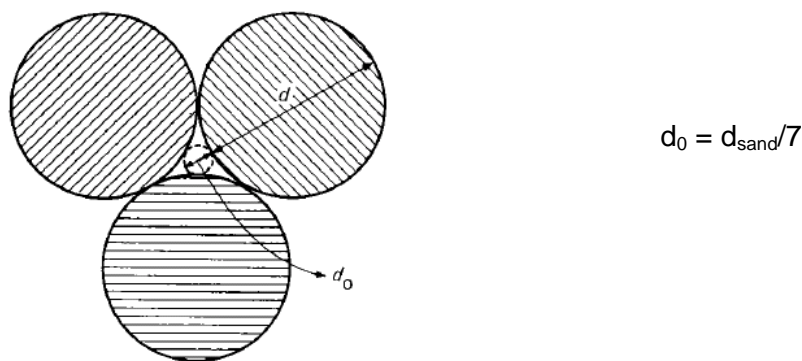
Med baggrund i den ovenfor etablerede viden om partikeltilførsel fra personer til bassinvand og partiklernes karakteristika er der gennemført en undersøgelse af, hvad dette betyder for funktionen af de sandfiltre, der anvendes i svømmebade i dag og hvordan partikelkoncentrationen i et bassin ser ud over et døgn afhængig af belastning, omsætningstid og sandfiltereffektivitet. Dette vil sammen med spa-badsundersøgelsen give en væsentlig større forståelse for partikeldynamikken i et svømmebad. Undersøgelsen har omfattet dels et teoretisk studie omkring partikelfjernelsesmekanismer i sandfiltre og dels et måleprogram på to bassinanlæg i Lalandia Rødby.

5.3.1 Partikelfjernelsesmekanismer i sandfiltre

Forudsætningen for at en partikel fjernes fra vandet ved passage af sandfilteret er at partiklen kommer i kontakt med sandoverfladen. Der er overordnet set fire transportmekanismer hvorved partiklerne kan bringes i kontakt med sandoverfladen:

- Filtrering(sining)
- Sedimentation
- Inerti og centrifugalkræfter
- Diffusion (Brownske bevægelser)

Filtrering eller sining er den mest umiddelbare mekanisme, idet partiklerne fjernes ved at de er større en porestørrelsen mellem sandkornene. Denne proces finder primært sted i toppen af filteret og er uafhængig af filtreringshastigheden. Porestørrelsen i et sandfilter er afhængig af kornstørrelsen af sandkornene og kan beregnes ved følgende relation (Figur 5-3).



Figur 5-3 Sammenhæng mellem kornstørrelse og porestørrelse i sandfiltre

For de gængse anvendte kornstørrelser i sandfiltrene i svømmebade i Danmark kan der således udregnes følgende porestørrelser (Tabel 5-1).

Tabel 5-1 Sammenhæng mellem kornstørrelse og porestørrelse

Kornstørrelse [mm]	Porestørrelse [μm]
0,4	57
0,7	100
1,2	170

Sammenholdes de beregnede porestørrelser med størrelsen af de partikler, der frigives fra de badende til bassinvand, er det tydeligt at filtrering/sining ikke initialt spiller nogen rolle for partikelfjernelsen i svømmebade. Under driften samles hudpartiklerne på overfladen af filtret, hvor de danner en såkaldt filterhud på sandkornene der vil betyde at filtreringen med tiden vil blive mere effektiv, idet porestørrelsen herved mindskes.

Sedimentation af partikler inde i porerne af et sandfilter er sammenlignelig med sedimentation af partikler i en bundfældningstank, idet det er forholdet mellem den hydrauliske belastning og det totale overfladeareal, der er bestemmende for bundfældningens effektivitet. I en bundfældningstank er det således overfladearealet af bunden af tanken, der er bestemmende for effektiviteten, hvorimod det i sandfilteret er hele den sandkornsoverflade der vender opad. For bundfældningstanken anvendes begrebet hydrau-

lisk overfladebelastning til at gennemføre beregninger for partikelfjernelsen. Den hydrauliske overfladebelastning er defineret som:

$$HOB = \frac{Flow}{Overfladeareal} = \frac{Q}{A_{Tværsnit}} \quad [m^3 \text{ vand}/m^2 \text{ Tværsnit} \cdot s]; [m/s]$$

Anvendes dette udtryk på et sandfilter fås således den gennemsnitlige filterhastighed for et sandfilter, idet A vil være tværsnitsarealet for filteret. Imidlertid er dette ikke den korrekte HOB for sandfilteret i forhold til at beregne partikelfjernelsen ved sedimentation, idet tværsnitsarealet ikke udtrykker det egentlige sedimentationsareal. Den gennemsnitlige filterhastighed skal derfor normeres i forhold til det totale sandkornsoverfladeareal per filteroverfladeareal, idet dette er det korrekte sedimentationsareal.

Sandkornsoverfladearealet kan beregnes som følger:

$$Total \ Sandkornsoverfladeareal = (6 / d_{sand}) \cdot (1 - \beta) \cdot V_{Total, Sand}$$

[m² Sandoverflade/m² Filteroverflade]

Hvor d_{sand} er kornstørrelsen på sandet og β er porøsiteten af sandlaget og $V_{Total, Sand}$ er det totale reaktorvolumen udgjort af sandlaget.

Den hydrauliske overfladebelastning der gælder for sandfilteret og som således skal ligge til grund for beregning af partikelfjernelsen kan således udtrykkes som:

$$HOB_{Sandfilter} = \frac{Q}{A_{Tværsnit} \cdot (6 / d_{sand}) \cdot (1 - \beta) \cdot V_{Total, Sand}} \quad [m/s]$$

For at en partikel skal kunne fjernes ved sedimentation i en bundfældningstank eller et sandfilter må den hydrauliske overfladebelastning ikke overstige bundfældningshastigheden for partiklen. Bundfældningshastigheden for en partikel er givet ved Stoke's lov:

$$u = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho_v) \cdot d_p^2}{18 \cdot \nu \cdot \rho_p} \quad [m/s]$$

Hvor u er bundfældningshastigheden [m/s]; ρ_p er densiteten af partiklerne [kg/m³]; ρ_v er densiteten af vand [kg/m³]; d_p er partikeldiameteren [m] og ν er vands kinematiske viskositet [m²/s].

Ved at sætte udtrykket for den hydrauliske overfladebelastning for et sandfilter lig udtrykket for bundfældningshastigheden for partikler fås således et udtryk, hvormed den mindste partikelstørrelse, der kan fjernes ved sedimentation i et sandfilter, under en given opbygning og filterhastighed kan bestemmes:

$$d_p = \sqrt{\frac{u \cdot 18 \cdot \nu \cdot \rho_p}{g \cdot (\rho_p - \rho_v)}} = \sqrt{\frac{HOB_{Sandfilter} \cdot 18 \cdot \nu \cdot \rho_p}{g \cdot (\rho_p - \rho_v)}} \quad [\text{m}]$$

Med baggrund i ovenstående udtryk og nedenstående data (Tabel 7) for et typisk sandfilter i et dansk svømmebad kan den mindste partikelstørrelse der vil kunne fjernes, beregnes under en antagelse af en partikeldensitet på 1020 kg/m³.

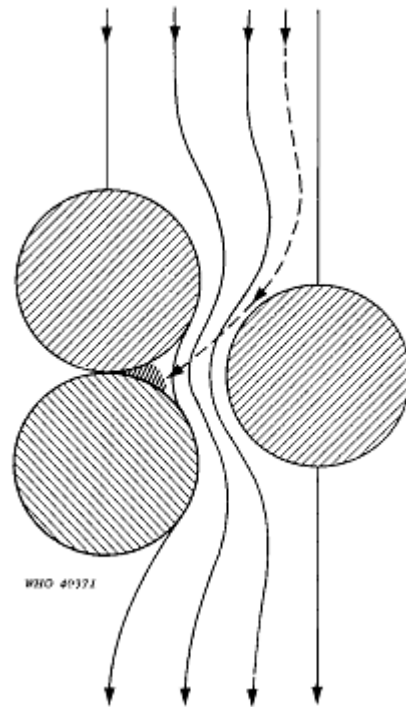
Tabel 5-2 Data for typisk dansk svømmebadssandfilter

Parameter		Værdi
Geometridata		
D	Diameter [m]	2
A _{Tværsnit}	Tværsnitsareal [m ²]	3,14
H _{0,4-0,7}	Filterhøjde kornstørrelse 0,4mm-0,7mm sand [m]	0,35
H _{0,7-1,25}	Filterhøjde kornstørrelse 0,7mm-1,25mm sand [m]	0,35
V _{0,4-0,7}	Filtervolumen udgjort af 0,4mm-0,7mm sand [m ³]	1,1
V _{0,7-1,25}	Filtervolumen udgjort af 0,7mm-1,25mm sand [m ³]	1,1
β _{0,4-0,7}	Porøsitet 0,4mm-0,7mm sand [m ³ luft/m ³ filtervolumen]	0,38
β _{0,7-1,25}	Porøsitet 0,7mm-1,25mm sand [m ³ luft/m ³ filtervolumen]	0,38
A _{Sandkorn, 0,4-0,7}	Sandkornoverfladeareal 0,4mm-0,7mm sand [m ²]	7650
A _{Sandkorn, 0,7-1,25}	Sandkornoverfladeareal 0,4mm-0,7mm sand [m ²]	4350
Flowdata		
Q	Flow [m ³ /s]	0,012
HOB	Filterhastighed(HOB) [m/s]	0,0037
Konstanter		
g	Tyngdeaccelerationen [m/s ²]	9,82
ρ _p	Partikelmassefylde [kg/m ³]	1020
ρ _v	Vands massefylde [kg/m ³]	1000
ν	Vands kinematiske viskositet [m ² /s]	10 ⁻⁶
Partikelfjernelse		
d _p	Mindste partikelstørrelse der kan fjernes [μm]	5

Et typisk svømmebadssandfilter kan således fjerne partikler ned til omkring 5 μm hvilket svarer til omkring 80% af antallet og omkring 90% af massen af partikler der er målt ved ovenstående undersøgelse af partikelfrigivelsen.

Inerti og centrifugalkræfter er den tredje mest betydende transportmekanisme der kan få partikler i kontakt med sandkornoverfladen. Denne mekanisme virker ved at der ved vandets bevægelse rundt om sandkornene sker en acceleration af vandets hastighed, der er i stand til at slynge partikler med en større densitet en vand ud af strømlinjerne og ind

i kontakt med sandkornsoverfladen svarende til den acceleration en partikel vil opleve i et centrifugalfelt. Dette er illustreret på nedenstående Figur 5-4.



Figur 5-4 Illustration af partikeltransport ved inertie og centrifugalkræfter i et sandfilter

Diffusion (Brownske bevægelser) beskriver den transport af partikler, der er styret af vandmolekylernes interne bevægelser i forhold til hinanden og deraf opståede partikelkoncentrationsforskelle i væsken. Diffusionen er i høj grad styret af vandets temperatur, idet højere temperaturer øger diffusionshastigheden. Diffusion som transportmekanisme er – til trods for at dens betydning for partikelfjernelsen er lille – tilstede i hele dybden af filteret og er desuden uafhængig af filtreringshastigheden.

5.4 Sandfilterfunktion og partikelkoncentrationsdynamik i Lalandia

Med henblik på at understøtte den teoretiske viden om partikelfjernelsesmekanismer i sandfiltre er der gennemført en partikelmålekampagne på to forskellige anlæg i Lalandia, hvor der dels er målt partikler i bassinet og dels målt partikler før og efter de respektive sandfiltre med henblik på at karakterisere deres funktion. Desuden er sandfilterfunktionen karakteriseret både med og uden tilsætning af flokningsmiddel. De to udvalgte anlæg har desuden væsentlig forskellig volumen, cirkulationsmængde (omsætningstid) og belastning, således at disse parametres betydning for partikeldynamikken i bassinet kan karakteriseres. Karakteristika for de to anlæg fremgår af Tabel 5-3.

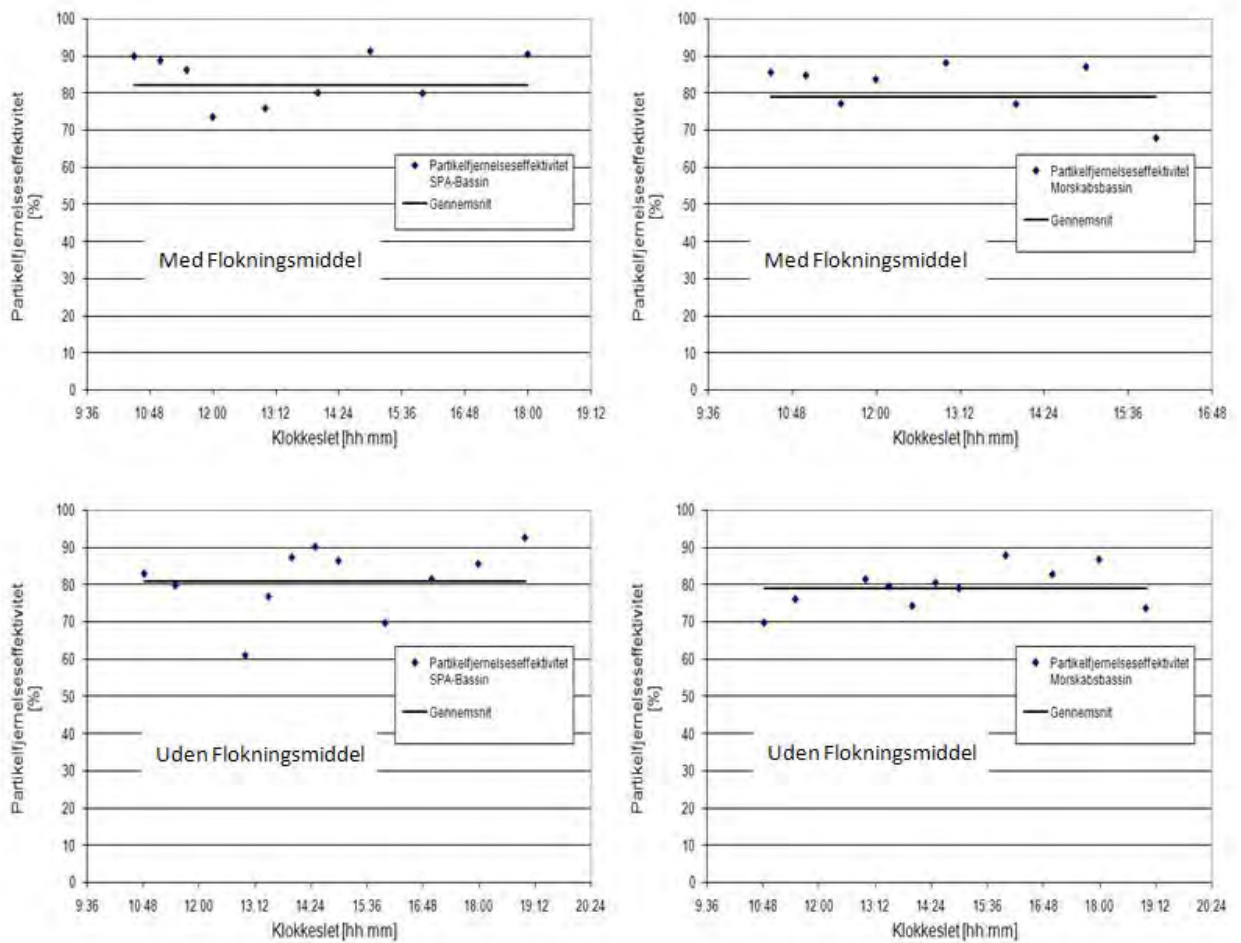
Tabel 5-3 Data for de to bassinlæg der er omfattet af måleprogrammet

Bassin	3+4	7+8
Bassintype	"Morskabsbassin"	Spa-bade
Vandbehandlingsanlæg	Anlæg 2	Anlæg 4
Volumen [m ³]	296+374	4,8+4,8
Areal [m ²]	238+238	6+6
Recirkulationsflow [m ³ /h]	240	36
Omsætningstid [h]	3	0,2
Belastning [pers/dag]	2000	300
Specifik belastning [pers/m ³ /dag]	3	31
Aktiv kul flow [m ³ /h]	2x20	9
UV-flow [m ³ /h]	-	-
Temperatur [°C]	28	37

Som det fremgår, er måleprogrammet gennemført på henholdsvis et morskabsbassin med stort volumen, lang omsætningstid, lav temperatur og lav specifik personbelastning, og et spa-bassin med lille volumen, hurtig omsætningstid, høj temperatur og høj specifik personbelastning.

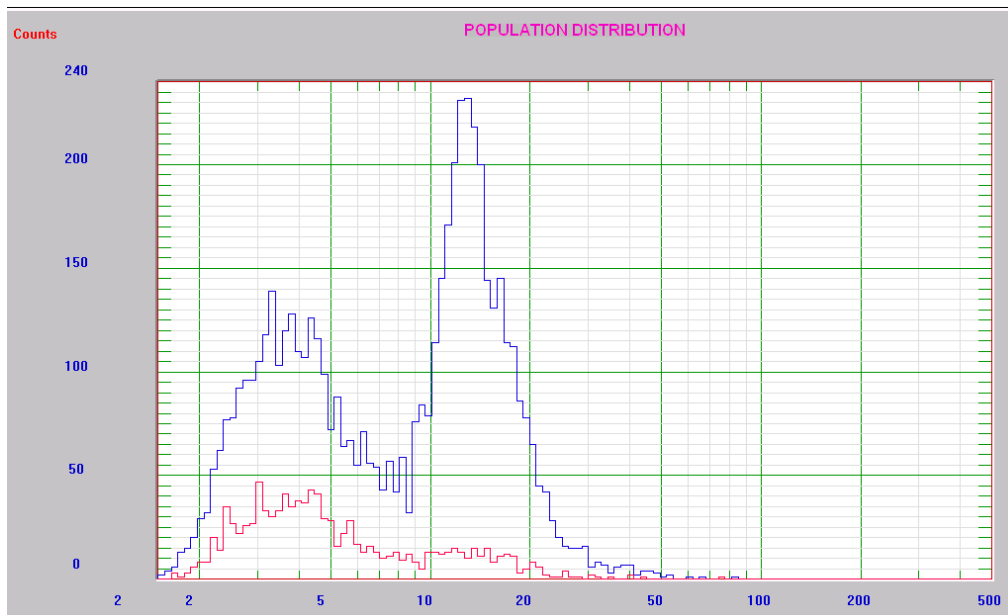
5.4.1 Sandfilterfunktion med og uden flokningsmiddel

Sandfilterfunktionen på de to anlæg i Lalandia er karakteriseret ved over to dage med en times prøvetagningsfrekvens at måle partikelstørrelsesfordelingen og partikelkoncentrationen i bassinvandet før og efter sandfilteret. Inden hver opstart af undersøgelserne blev der foretaget returskylning af sandfiltrene og tilførsel af flokningsmiddel blev henholdsvis stoppet (dag 1) og startet (dag 2) for at undersøge flokningsmidlets betydning for sandfilterfunktionen. Af nedenstående figur fremgår sandfiltrenes partikelfjernelses-effektivitet i de to anlæg henholdsvis med og uden tilsætning af flokningsmiddel.



Figur 5-5 Partikelfjernelseeffektivitet i sandfiltrene i morskabsbassinet og SPA-bassinet henholdsvis med og uden tilsætning af flokningsmiddel

Som det fremgår, er der en gennemsnitlig partikelfjernelse i de installerede filtre på omkring 80% af det indkomne partikelantal uafhængig af tilsætningen af flokningsmiddel. Omregnes partikelstørrelserne til partikelvolumen med en kendt densitet ($1,02 \text{ kg/m}^3$) ud fra en antagelse om at partiklerne har kugleform, svarer partikelfjernelsen til i gennemsnit en 90% fjernelse af den indkomne masse, hvilket skyldes at langt den største masse ligger i den store partikelfraktion, der fjernes mest effektivt i sandfilteret. Dette fremgår også af nedenstående eksempel på partikelstørrelsesfordelingen før og efter sandfilteret på SPA anlægget.



Figur 5-6 Partikelstørrelsesfordeling før (Blå kurve) og efter (Rød kurve) sandfilter

Af partikelstørrelsesfordelingen fremgår desuden at der er en relativt høj partikelfjernelseeffektivitet ned til omkring 5-6 μm , hvilket stemmer godt overens med den teoretiske beregning af den mindste partikelstørrelse, der vil kunne fjernes ved sedimentation i sandfilteret, og de kendte partikelfjernelsesmekanismer i sandfiltre understøttes således rimeligt af de eksperimentelle data. Imidlertid betyder det, at partikler med størrelser under 5 μm vil akkumulere i bassinet. Hvorvidt det vil give anledning til en øget biprodukt dannelse kan ikke uddrages af ovenstående resultater.

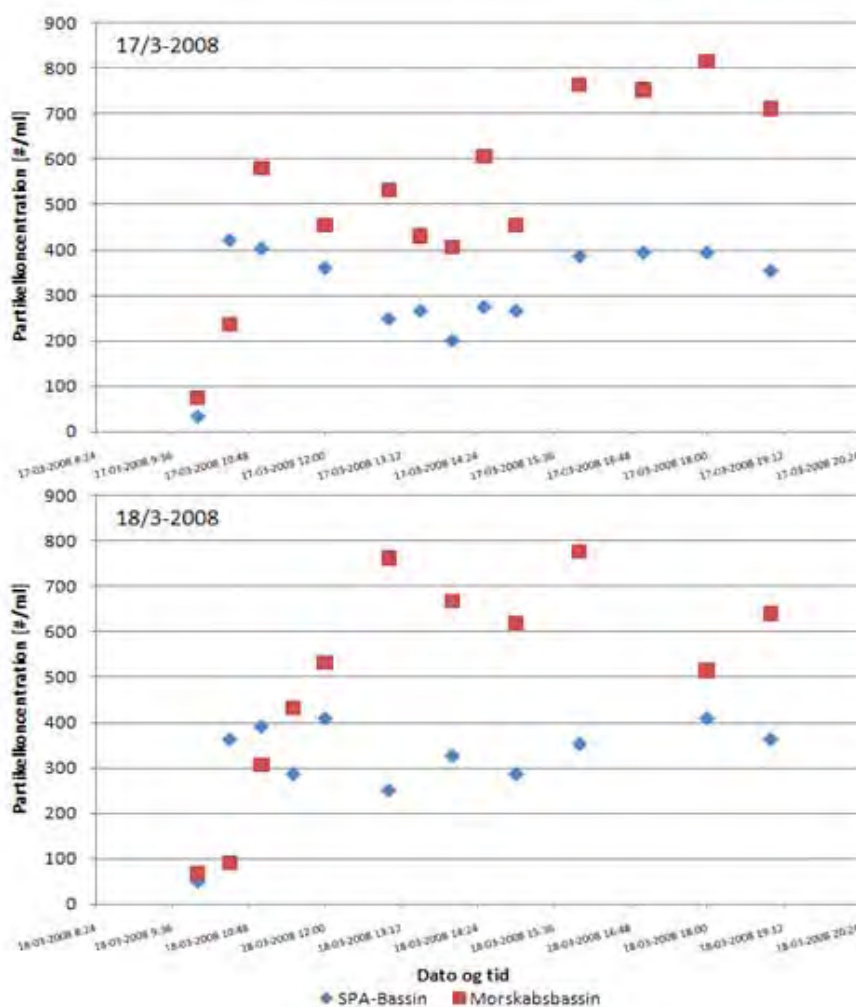
5.4.2 Partikelkoncentrationsdynamik

Sandfiltrene på de to anlæg har således en fornuftig partikelfjernelse set i forhold til både antal, størrelse og masse der kommer til filteret. Imidlertid drives de to anlæg med væsentlig forskellig omsætningstid af bassin vandet, hvilket betyder at den samlede partikelfjernelse per tid vil være væsentlig forskellig, og dette vil have betydning for dynamikken i partikelkoncentrationen i bassinet, idet massefjernelsen per tid skal være større end eller lig masetilførslen fra de badende for at kunne opretholde en lav partikelkoncentration i bassin vandet. Der er derfor parallelt med undersøgelsen af sandfiltrenes funktion målt døgnprofiler for partikelkoncentration i bassin vandet i de to anlæg for at belyse dynamikken og betydningen af omsætningstid i forhold til badebelastningen. Badebelastningen er bestemt ved optælling af gæster i de to bassiner med 30 minutters mellemrum. Omsætningstid og belastning for de to bassiner over de to måledage fremgår af nedenstående tabel.

Tabel 5-4 Omsætningstid og badebelastning for de to bassiner

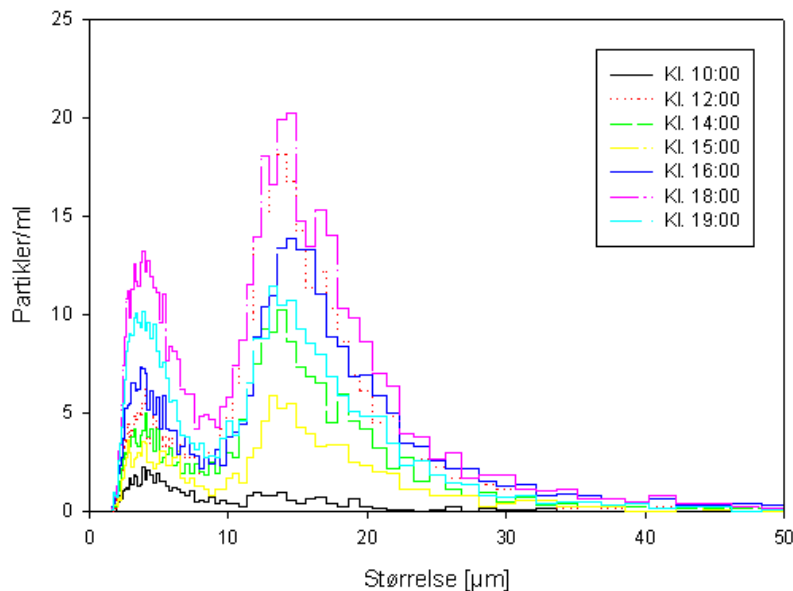
Parameter	SPA-Bassin	Morskabsbassin
Omsætningstid (min)	14	180
Belastning (Pers/dag)	295	2002
Belastning Pers/m ³ /dag	31	3

Som det fremgår, er morskabsbassinet belastet med ca. 7 gange så mange personer som SPA-bassinet til trods for en omsætningstid, der er ca. 13 gange langsommere, og det er således forventeligt at der over dagen vil være en større tilvækst i partikelkoncentrationen i morskabsbassinet i forhold til SPA-bassinet. Imidlertid er belastningen pr. volumen væsentlig højere for SPA-bassinet i forhold til morskabsbassinet, hvorfor det er forventeligt at de initiale partikelkoncentrationer er højere i SPA-bassinet. Resultaterne af partikelmålingerne i bassinerne over de to døgn fremgår af nedenstående figur.



Figur 5-7 Partikelkoncentrationsprofiler i morskabsbassinet og SPA-bassinet over de to måledøgn. Rød kurve er morskabsbassinet og blå kurve er SPA-bassinet.

For SPA-bassinet ses for begge dage en initielt hurtigere tilvækst i partikelkoncentration til omkring 400 partikler/ml. Herefter ses den hurtige omsætning af vandet og partikelfjernelsen i sandfilteret at kunne balancere tilførslen, idet partikelkoncentrationen fastholdes mellem 300-400 partikler/ml over hele åbningstiden for begge måledage til trods for en høj volumenspecifik badebelastning på omkring 30 pers/m³/dag. I modsætning hertil ses det for morskabsbassinet, at den initielle tilvækst i partikelindhold er væsentlig langsommere. Derimod er det tydeligt at den højere totalbelastning koblet med en væsentligt langsommere omsætningstid i morskabsbassinet betyder, at partikelkoncentrationen stiger løbende over dagen, og ligevægtskoncentrationen vil derfor være højere. Som det fremgår af figur 6 og 7 fjerner sandfiltrene ikke partiklerne 100% i det størrelsesområde, som de frigivne partikler har, og det betyder at de partikler, der akkumulerer i morskabsbassinet, vil repræsentere hele størrelsesspektret, hvilket også fremgår af nedenstående figur af de partikelstørrelsesfordelinger, der ligger bag partikelkoncentrationerne for morskabsbassinet d. 18/3 (Figur 5-8).



Figur 5-8 Partikelstørrelsesfordelinger for døgnprofil for morskabsbassin d. 18/3-2008

Som det ses sker der en akkumulering af partikler i hele størrelsesområdet for partikler frigivet fra personer. I forhold til akkumuleringen af partikler i et system uden partikelfjernelse (Figur 2) ses det at den relative akkumulering af partikler i området 1-10µm er større end for partikler i området 10-25 µm. Dette skyldes som før nævnt at sandfiltrene fjerner partikler i området 10-25 µm mere effektivt end partiklerne i området 1-10 µm.

5.5 Sammenfatning og konklusion

På baggrund af den gennemførte undersøgelse af partikeltilførsel og fjernelse i svømmebade kan følgende konkluderes:

- Partikler frigives med en konstant hastighed til bassinvandet fra personer der benytter bassinet
- Partikler der frigives fra personer har en bimodal partikelstørrelsesfordeling med to toppe omkring henholdsvis 1-10 µm og 10-25 µm

- Den vigtigste artikelfjernelsesmekanisme i sandfiltrene er med den aktuelle partikelstørrelsesfordeling sedimentation
- Med baggrund i sandfilderteoretiske beregninger vil eksisterende sandfiltre i svømmebade fjerne partikler ned til 5 µm hvilket er fornuftigt i forhold til partikelstørrelsesfordelingen for partikler der frigives fra personer
- Sandfiltrene i Lalandia har den mest effektive partikelfjernelse ned til 5-6 µm, hvilket stemmer overens med de sandfilderteoretiske beregninger
- Partikelfjernelseeffektiviteten for eksisterende filtre i Lalandia er i gennemsnit ca. 80% af de indkomne partikler, hvilket svarer til ca. 90% af den indkomne masse
- Ved forsøgene i Lalandia er der ikke observeret nogen effekt af tilsætning af flokningsmiddel på partikelfjernelseeffektiviteten af sandfiltrene
- Partikelkoncentrationen i bassin vandet over en dag vil afhænge af omsætningstiden i forhold til den totale belastning
- For morskabsbassinet i Lalandia er omsætningstiden for lav i forhold til den totale belastning hvilket resulterer i en jævnt stigende partikelkoncentration i løbet af åbningstiden
- For SPA-bassinet er omsætningstiden høj, og dette resulterer i en konstant og til tider faldende partikelkoncentration i bassin vandet i løbet af åbningstiden.

5.6 **Perspektivering**

Ovennævnte undersøgelse har medvirket til en øget forståelse for partikeltilførsel og fjernelse i svømmebade og vist at eksisterende sandfiltre har en fornuftig partikelfjernelseeffektivitet i forhold til egenskaberne af de partikler, der frigives fra mennesker. Imidlertid er der væsentlige ulemper ved den nuværende praksis med flokning og sandfiltrering, idet denne kun flytter placeringen af det partikulære og kolloide organiske stof fra bassin vandet og til filtrene, hvor de opholder sig fra en uge og op til 14 dage afhængig af returskyllefrekvensen. Dette fører sandsynligvis i længden til en hydrolysering af de organiske partikler på sandkornene og dermed en øget organisk belastning på hele bassinet, der sandsynligvis bevirker en øget DBP dannelse og koncentrationsniveau.

Der er således stadig et stort behov for yderligere viden om partiklerne i forhold til både biprodukt dannelse og alternative teknologier til fjernelse af partiklerne. Konkrete forskningsbehov der kan nævnes er:

- Hvad er betydningen af partiklerne for DBP-dannelsen og den samlede belastning med organisk stof og kvælstof
- Hvad er betydningen af opkoncentreringen af partiklerne i sandfiltrene på indholdet af biprodukter i bassin vandet

- Hvad er samspillet mellem partiklernes overfladekemiske egenskaber og effekten af forskellige flokningsmidler
- Hvordan er partikelfjernelseeffektiviteten af nye og mindre energikrævende filtertyper der løbende og automatisk returskyller partiklerne ud af systemet og hvad er effekten af dette på indholdet af biprodukter i bassinvandet.

6 DANDELSE AF BUNDET KLOR OG FJERNELSE MED UV TEKNOLOGI

I forbindelse med ibrugtagningen af det nye udendørs Spa-anlæg i Lalandia Rødby er det konstateret, at det er vanskeligt at holde indholdet af bundet klor i bassinvandet under 1 mg/l på grund af en meget høj badebelastning. Lalandia har derfor i forbindelse med Vandpartnerskabsprojektet ønsket at få undersøgt mulighederne for at anvende UV behandling til at nedbringe indholdet af bundet klor.

Vandpartnerskabsgruppen har derfor besluttet at gennemføre et måleprogram, der dels understøtter opbygningen af viden om sammenhængen mellem belastning og dannelse af bundet klor og dels belyser muligheden for at anvende UV-behandling til at nedbringe og kontrollere indholdet af bundet klor.

6.1 UV-Anlæg, Spa-anlæg og måleprogram

Lalandia har i forbindelse med denne første undersøgelse af mulighederne for at anvende UV til at nedbringe det bundne klorindhold i det udendørs Spa-anlæg monteret et Wallenius AOT testanlæg bestående af 4 dobbelt UV-rør med en samlet effekt på 640 W i vandbehandlingskredsløbet i den udendørs spa.

Det udendørs Spa-anlæg har et bassinvolumen på 10 m³ og et total volumen på omkring 35 m³ inklusiv vandmængden i vandbehandlingssystemet. Med det installerede Wallenius AOT testanlæg har anlægget en bassincirkulation på 90 m³/t svarende til en omsætningstid på 0,1 time (6 minutter). Det installerede vandbehandlingsanlæg består af et tromlefilter og et sandfilter efterfulgt af kloring inden vandet returneres til bassinet. Med faste intervaller membranfiltreres bassinvandet desuden i et ultrafiltreringsanlæg. Intervallerne styres af systemets PLC-styring. Tromlefilteret har en 30 µm dug der returskylles automatisk hele døgnet mens sandfilteret returskylles en gang i døgnet. Alt returskyllevand opsamles og regenereres via ultrafiltreringsanlægget.

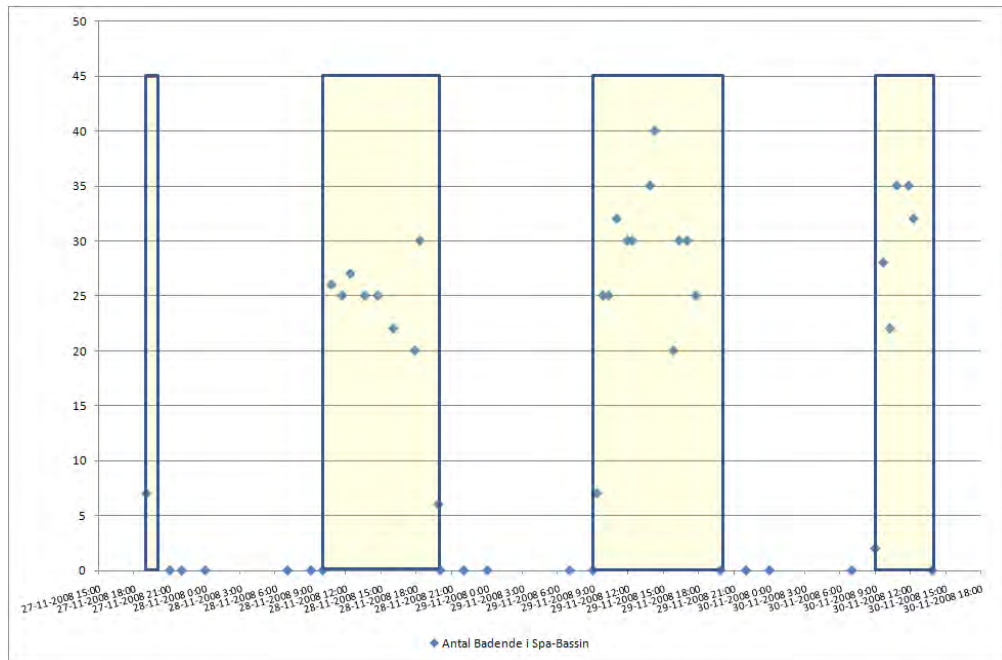
Vandpartnerskabsgruppen har i forbindelse med undersøgelsen gennemført et måleprogram over fire dage, hvor følgende parametre er blevet målt med tætte intervaller både før, under og efter åbningstiden for bassinet:

- Bundet klor (total-frit)
- Badebelastning (antal personer i spa-badet optalt med varierende frekvens i forsøgsperioden).

6.2 Måleresultater

6.2.1 Badebelastning

Målekampagnen blev gennemført fra d. 27/11-2008 til d. 30/11-2008 hvilket var den sidste weekend inden lukning af Lalandia i december måned, hvilket betød mange gæster og høj belastning i den udendørs Spa. Dette fremgår også af nedenstående kurve over optælling af gæster i spa-bassinet under forsøgsperioden.

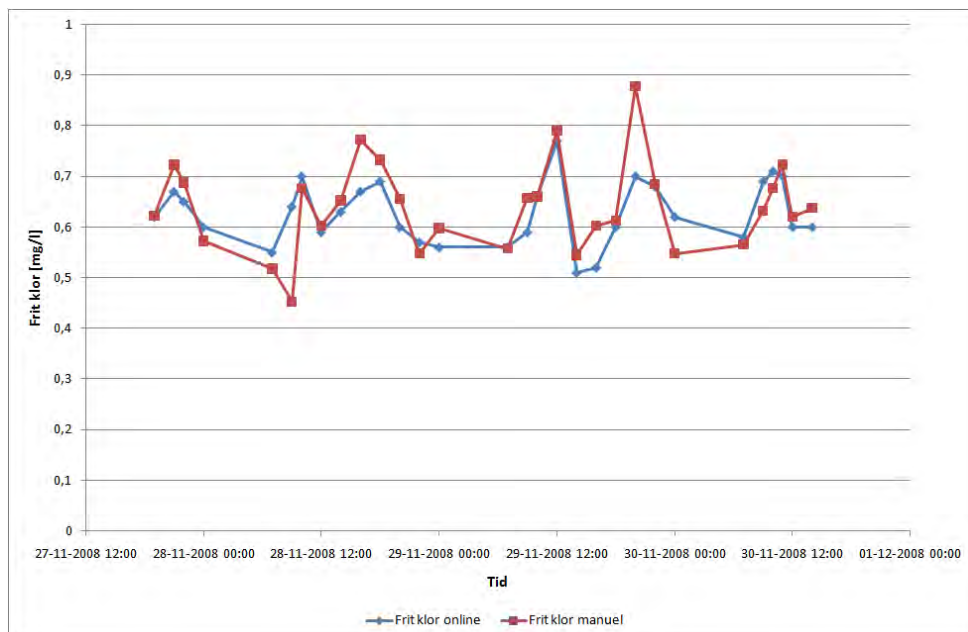


Figur 6-1 Badebelastning i forsøgsperioden

De markerede områder på figuren indikerer åbningstiden for Spa-bassinet i forsøgsperioden, og det fremgår tydeligt at Spa-bassinet er højt belastet allerede kort tid efter åbning, og denne belastning er tilnærmelsesvis konstant høj i hele åbningstiden. For de tre hele dage, hvor måleprogrammet har kørt, har belastningen i gennemsnit ligget på henholdsvis 23 pers/time (28/11), 30 pers/time (29/11 og 30/11).

6.2.2 Frit klor

I løbet af målekampagnen er frit klor målt manuelt med DPD metoden (DS/EN ISO 7393-2) i forbindelse med bundet klor målingerne samt ved aflæsning af online måleren, der anvendes i forbindelse med styring af klordoseringen. Variationen i indholdet af frit klor i Spa-bassinet i løbet af perioden fremgår af Figur 6-2.

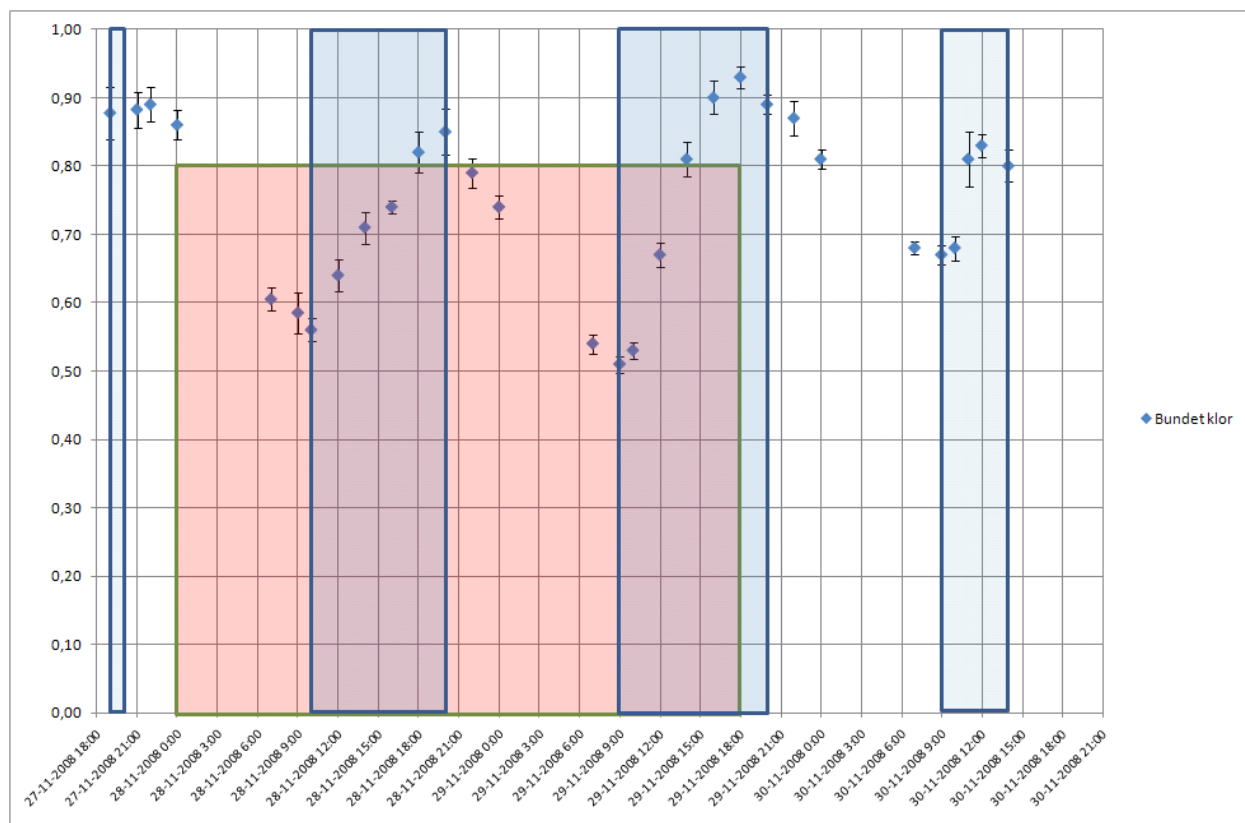


Figur 6-2 Frit klor i SPA-bassinet i løbet af forsøgsperioden

Klorindholdet i SPA-bassinet ses at være styret til omkring 0,6 mg/l, der ses dog en hvis variation i løbet af perioden, hvilket kan skyldes den store belastning og deraf følgende høje klorforbrugshastighed, der påvirker reaktionshastigheden af klordoseringen i både start og stop situationen. Imidlertid er der en fornuftig overensstemmelse mellem de manuelle frit klor målinger og online målingerne.

6.2.3 Bundet klor

Formålet med måleprogrammet var at undersøge dynamikken i indholdet af bundet klor under de høje belastningsforhold og samtidig undersøge Wallenius AOT (WAOT) anlæggets evne til at nedbringe det bundne klorindhold. Resultaterne af måleprogrammet for bundet klor fremgår af Figur 6-3.



Figur 6-3 Bundet klor i bassinvandet i det udendørs SPA-bassin i løbet af forsøgsperioden

Måleprogrammet for bundet klor er startet op d. 27/11 kl. 19:00, og bundet klor er herefter målt med tætte intervaller frem til d. 30/11 kl. 14:00. For at undgå for store brud på koncentrationsprofilen om natten er der hver dag målt frem til kl. 00:00 og målingerne er genoptaget igen kl. 7:00 hver morgen. De blå punkter på figuren viser således koncentrationen af bundet klor (mg/l) i løbet af forsøgsperioden, mens de blå områder indikerer åbningstiden for Spa-bassinet. Det lyserøde område på figuren viser den tid, hvor Wallenius AOT anlægget var tændt i løbet af forsøgsperioden.

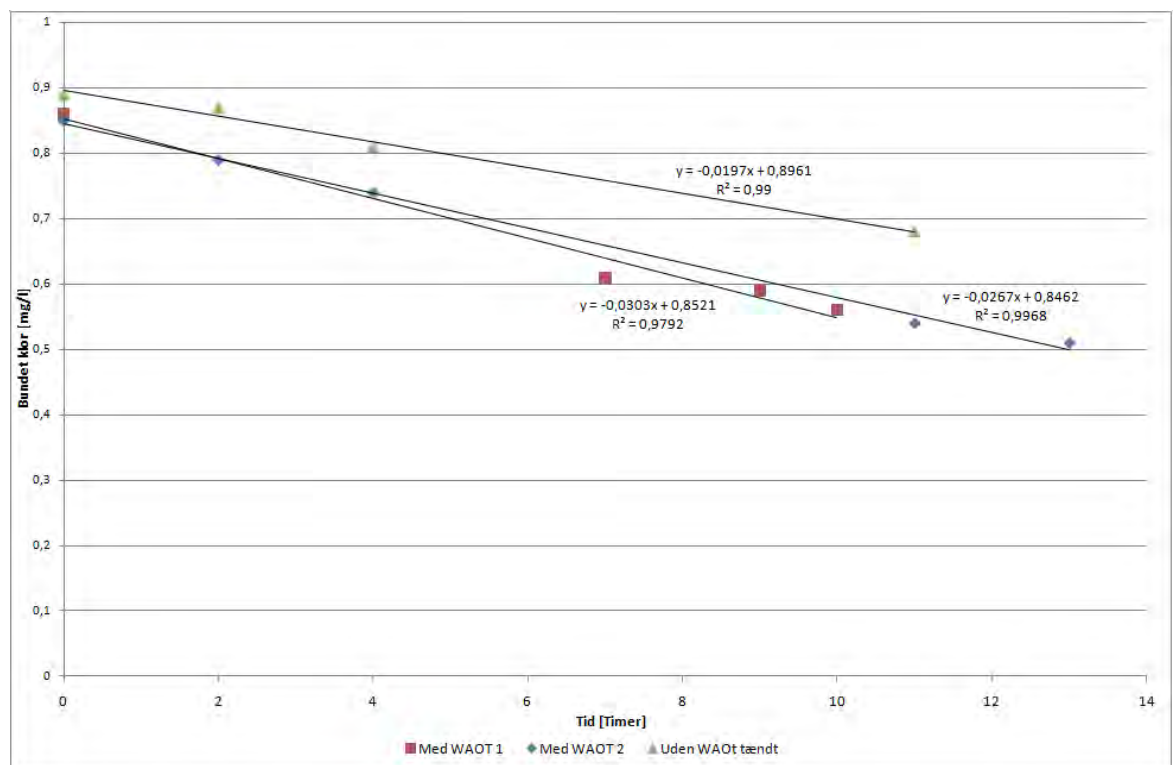
Umiddelbart inden opstart af Wallenius AOT anlægget ses koncentrationen af bundet klor at ligge omkring 0,89 mg/l. Efter opstart af WAOT anlægget ses koncentrationen af bundet klor at falde tilnærmelsesvis lineært til en koncentration på 0,56 mg/l frem til

åbning af SPA-bassinet næste dag kl. 10:00. Efter åbning af bassinet ses koncentrationen af bundet klor igen at stige tilnærmelsesvis lineært til en koncentration på 0,85 frem til lukning af SPA-bassinet kl. 20:00. Denne cyklus gentages det næste døgn, hvor der igen observeres et lineært fald i bundet klor koncentration henover natten til 0,51 mg/l frem til åbning næste dag kl. 9:00 og en efterfølgende stigning til 0,93 mg/l frem til kl. 18:00. WAOT anlægget blev herefter slukket og der kunne igen observeres et lineært fald i bundet klor koncentrationen til 0,67 mg/l frem til åbning d. 30/11 kl.9, hvorefter koncentrationen af bundet klor igen stiger lineært til 0,83 mg/l frem til kl. 13 hvor SPA-bassinet lukkede ned. Koncentrationen af bundet klor i SPA-bassinet ses således at følge en cyklus, hvor der sker et lineært fald om natten og en lineær stigning om dagen.

Beregning af bundet klor fjernelseskapacitet for WAOT anlægget

I perioden hvor WAOT er slukket, observeres et lineært fald i bundet klor koncentrationen, der viser at der i bassinet er en betydelig intern fjernelse af bundet klor, der enten kan skyldes reaktion af de bundne klorkomponenter med andre forbindelser under dannelse af frit kvælstof og nitrat, eller stripning af flygtige bundet klor forbindelser til atmosfæren. Det er således klart, at det observerede henfald af bundet klor i perioden med WAOT anlægget tændt ikke kan tilskrives WAOT anlægget alene, men at dette fald også indeholder et bidrag fra den interne fjernelse. Bundet klor fjernelseskapaciteten for WAOT anlægget beregnes derfor ud fra differencen mellem henfaldshastighedskonstanterne for perioderne med og uden WAOT på.

Henfaldshastighedskonstanterne findes således som hældningen på de lineære koncentrationsfald henover natten som vist på Figur 6-3.



Figur 6-4 Henfald af bundet klor i det udendørs Spa-anlæg henholdsvis med og uden WAOT anlægget tændt

På baggrund af de observerede bundet klor henfaldshastighedskonstanter og det totale vandvolumen i Spa-anlægget er der beregnet følgende bundet klor fjernelseskapacitet for WAOT anlægget (Tabel 6-1).

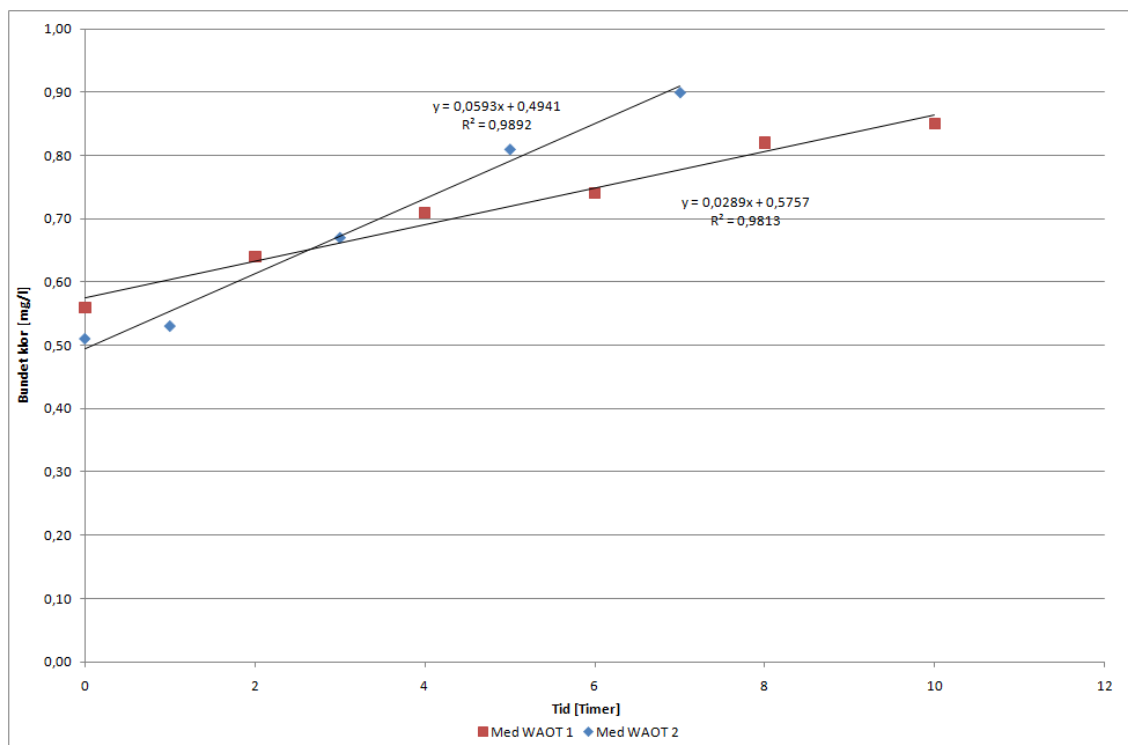
Tabel 6-1 Beregnet bundet klor fjernelseskapacitet for WAOT

	Enhed	Med WAOT 1	Med WAOT 2	Uden WAOT (Intern fjernelse)	Kapacitet WAOT
Bundet klor henfaldshastighedskonstant	[g/m ³ ·time]	0,0303	0,0267	0,0197	0,007-0,0106
Systemvolumen	[m ³]	35	35	35	35
Bundet klor omsætningshastighed	[g/time]	1,1	0,9	0,7	0,2-0,4

Det aktuelle WAOT anlæg har således en gennemsnitlig bundet klor fjernelseskapacitet på 0,3 g bundet klor per time, hvilket udgør omkring 30% af den samlede bundet klor fjernelse i systemet i perioden med WAOT tændt. Den aktuelle fjernelseskapacitet er relativt lav sammenlignet med andre typer af UV-anlæg til bundet klor fjernelse (1,3-3 g/time) og ses at være utilstrækkelig i forhold til at nedbringe indholdet af bundet klor i det udendørs Spa-anlæg i Lalandia, idet det bundne klorindhold ses at stige umiddelbart efter at bassinet igen tilføres belastning fra de badende og der ikke er nogen forskel i den gennemsnitlige bundet klor koncentration i perioden.

Beregning af person-specifik bundet klor dannelseshastighed

Som nævnt ovenfor overstiger bundet klor dannelseshastigheden ved den aktuelle belastning langt den aktuelle fjernelseshastighed i WAOT anlægget. Det er derfor væsentligt at kunne kvantificere den reelle bundet klor dannelseshastighed som funktion af personbelastningen for at kunne designe UV-anlæg til at nedbringe indholdet af bundet klor til trods for den høje belastning. Bundet klor dannelseshastighederne kan imidlertid beregnes på baggrund af den observerede lineære koncentrationstilvækst om dagen, på tilsvarende måde som fjernelseskapaciteten for WAOT anlægget og den interne fjernelse af bundet klor kunne beregnes på baggrund af de lineære henfald om natten. Dannelseshastighedskonstanterne for d. 28. og 29. november fremgår således af Figur 6-5.



Figur 6-5 Tilvækst i bundet klor koncentration i det udendørs Spa-anlæg d. 28. og 29. november 2008

På baggrund af de ovenstående tilvæksthastigheder for bundet klor, det totale vandvolumen i Spa-anlægget samt de opgjorte belastningstal er der i nedenstående tabel (Tabel 6-2) beregnet såvel en netto bundet klor dannelseshastighed for systemet, en brutto bundet klor dannelseshastighed (netto dannelseshastigheden plus den målte interne fjernelseshastighed) samt en person-normeret dannelseshastighed.

Tabel 6-2 Beregnede bundet klor dannelseshastigheder

Parameter	Enhed	Med WAOT 1	Med WAOT 2
Bundet klor dannelseshastigheds-konstant	[g/m ³ ·time]	0,0289	0,0593
Systemvolumen	[m ³]	35	35
Belastning	[Pers/time]	23	30
Bundet klor dannelseshastighed [netto]	[g/time]	1,0	2,1
Bundet klor dannelseshastighed [Brutto]	[g/time]	2,1	3,0
Person normeret dannelseshastighed	[g/pers·time]	0,09	0,1

Som det fremgår af tabellen er bundet klor dannelseshastigheden særdeles afhængig af belastningen, og under de aktuelle belastningsforhold i undersøgelsesperioden er nettodannelsen således målt til henholdsvis 1 og 2,1 g bundet klor per time. Den reelle dannelseshastighed er imidlertid større, idet det må forventes at den interne fjernelseshastighed, der er observeret om natten, forløber hele døgnet, ligesom den påtrykte fjernelse fra WAOT anlægget også har forløbet de pågældende dage. For derfor at få et mål for den reelle dannelseshastighed skal den målte interne fjernelseshastighed lægges til de målte netto dannelseshastigheder, og herved fås brutto bundet klor dannelseshastigheder ved de aktuelle belastningsforhold på henholdsvis 2,1 og 3 g bundet klor per time. Ved derudover at normere bruttodannelseshastigheden i forhold til den observerede personbelastning fås en personspecifik bundet klor dannelseshastighed på omkring 0,1 g bundet klor per person per time. Den personspecifikke bundet klor dannelseshastighed er særdeles vigtig som designparameter for såvel bassiner som for UV-anlæg, der installeres for nedbringe indholdet af bundet klor.

6.3 Sammenfatning og konklusion

Sammenfattende viser resultaterne at bundet klor bliver dannet umiddelbart når badegæsterne hopper i bassinet og hastigheden hvormed det bundne klor dannes er en funktion af antallet af badegæster og den tid hvormed de benytter bassinet. Den hurtige bundet klor dannelse indikerer således at en del af klor reaktionerne sandsynligvis foregår direkte på de badenes hud og ikke først efter udskillelse af forløbere til bassinvandet. Dette er afgørende i forhold til den strategi der skal ligge til grund for håndtering af det bundne klor idet det ikke er muligt at fjerne forløberne for bundet klor i en takt så det kan holde trit med dannelsen. Derfor vil det bundne klor skulle håndteres gennem effektiv fjernelse i dedikeret vandbehandlingsteknologi. Det aktuelt afprøvede UV anlæg med 640W lavtryks UV-lamper har imidlertid ikke tilstrækkelig kapacitet til at håndtere belastningen i det givne bassin og den målte fjernelseskapacitet er ligeledes relativt lav sammenlignet med andre typer af UV-anlæg til bundet klor fjernelse der anvender UV-lamper med et bredere spektrum af UV-lys. Den beregnede bundet klor dannelseshastighed i det aktuelle bassin kan fremtidigt anvendes til beregning af størrelsen af et UV-anlæg for et nyt bassin med samme temperatur ud fra viden om forskellige UV-teknologiers kapacitet til at fjerne bundet klor.

6.4 Perspektivering

Ovennævnte undersøgelse har medvirket til en øget forståelse for dannelsen af bundet klor i svømmebade og fjernelse af disse i UV anlæg.

Der er imidlertid stadig et stort behov for yderligere viden om processerne bag dannelsen af bundet klor således at anlæg til fjernelse heraf kan designes bedre og muligheder for styring af anlæggene med henblik på energibesparelser kan afdækkes. En del af denne viden er imidlertid genereret i regi af et andet BLST projekt med titlen: Undersøgesprojekt om afprøvning af forskellige renseteknologier på svømmebade der er gennemført af DHI i samarbejde med DTU.

7 DYNAMIK AF ORGANISK STOF KONCENTRATION OG BETYDNING AF PARTIKLER OG RENSSETEKNOLOGIER

Dannelsen af de organiske klorerede biprodukter i svømmebade er særdeles kompleks og der eksisterer i dag ikke en fuldstændig forståelse for sammenhængene. En vigtig parameter er naturligvis koncentrationen af organisk stof, og for at øge forståelsen for dannelsen af de organiske klorerede biprodukter i svømmebade er det nødvendigt at få en øget forståelse for dynamikken i koncentrationen af organisk stof for at få indblik i hvor meget der akkumuleres, omsættes og omdannes til biprodukter. Herunder er det også særdeles vigtigt at få en øget forståelse for fordelingen af det organiske stof mellem partikulært og opløst organisk stof for at vurdere, hvilke rensningsteknologier der i fremtiden kan implementeres med henblik på at forbedre vandkvaliteten.

Med baggrund heri har Vandpartnerskabsgruppen derfor besluttet at gennemføre et måleprogram på det nye udendørs Spa-anlæg i Lalandia Rødby, der dels understøtter opbygningen af viden om sammenhængen mellem belastning og koncentrationen af organisk stof og herunder fordelingen mellem partikulært og opløst organisk stof, og dels belyser hvor meget partikulært organisk stof der fjernes i to forskellige partikelfjernelsesteknologier.

7.1 Spa-anlæg og måleprogram

Det udendørs Spa-anlæg har et bassinvolumen på 10 m³ og et total volumen på omkring 35 m³ inklusiv vandmængden i vandbehandlingssystemet og drives ved en bassinvandtemperatur på 34°C. Vandbehandlingssystemet består af partikelfjernelse med tromlefiltere (30µm dug) og sandfiltre i serie samt UV behandling i hovedstrøm med henblik på fjernelse af bundet klor. Med faste intervaller membranfiltreres bassinvandet desuden i et ultrafiltreringsanlæg. Intervallerne reguleres af systemets PLC-styring. Derudover doseres der klor genereret ved klorelektrolyse. Ved gennemførelse af måleprogrammet blev tromlefilteret monteret med en 10 µm dug, idet dette vil være den fremtidige dug i svømmebadsanvendelser. Tromlefilteret returskylles automatisk hele døgnet, mens sandfilteret returskylles én gang i døgnet. Alt returskyllevand opsamles og regenereres via ultrafiltreringsanlægget. I det beskrevne setup har anlægget en bassincirkulation på 60 m³/t svarende til en omsætningstid på 0,16 time (10 minutter).

Vandpartnerskabsgruppen har i forbindelse med undersøgelsen gennemført et måleprogram over fire dage, hvor tromlefilteret var monteret som primær partikelfilter de første to dage, hvorefter filterdugen blev afmonteret, således at sandfilteret fungerede som primær filter de to sidste forsøgsdage. Følgende parametre er blevet målt med tætte intervaller både før, under og efter åbnings-tiden for bassinet:

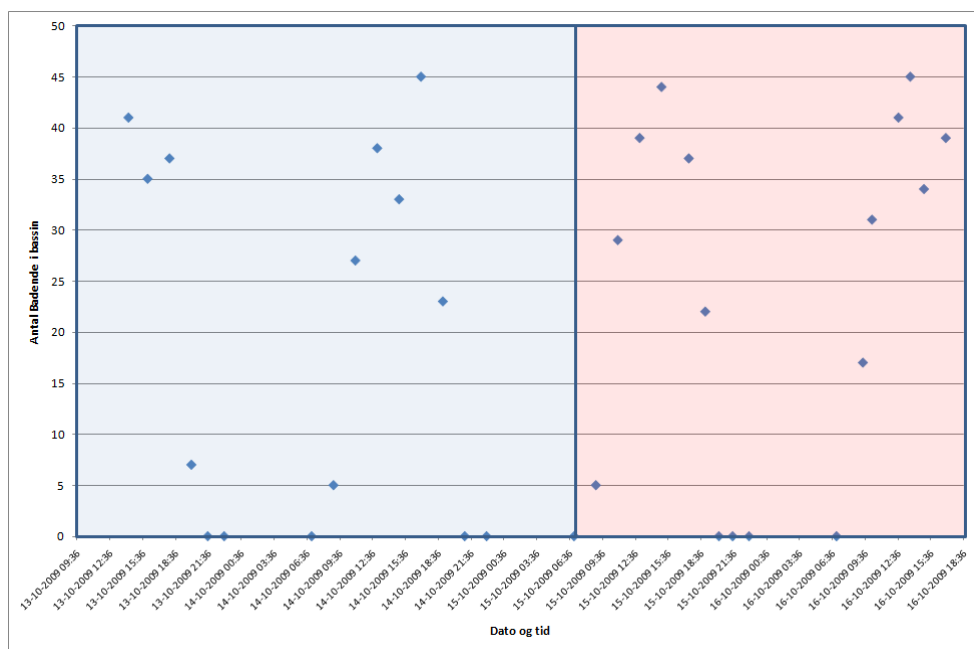
- Total organisk kulstof (TOC – Total Organic Carbon)
- Opløst organisk kulstof (DOC – Dissolved Organic Carbon – målt på 0,22µm filtreret bassinvand)
- Partikelkoncentration (antal/ml)
- Badebelastning (antal personer i spa-badet optalt med varierende frekvens i forsøgsperioden).

Derudover er der udtaget prøver af returskyllevand fra tromlefilteret (de to første forsøgsdage) og sandfilteret (de to sidste forsøgsdage) for at belyse massefjernelsen af partikulært organisk stof i de to typer af filtre. Returskyllevandsprøverne fra tromlefilteret er udtaget som blandprøver ved udtagning og sammenblanding af delprøver af en række returskyl fordelt over forsøgsdagene. Returskyllevandsprøverne fra sandfilterene er udtaget ved at udtage en stor delmængde af returskyllevandet under returskyllet. Den samlede organiske stofmængde fjernet af de to teknologier under de to dages belastning er opgjort på baggrund af den samlede returskyllevandsmængde og koncentrationen af partikulært organisk stof i returskyllevandsprøverne.

7.2 Måleresultater

7.2.1 Badebelastning

Målekampagnen blev gennemført i efterårsferien fra d. 13/10-2009 til d. 16/10-2009, hvilket betød mange gæster og høj belastning i den udendørs Spa. Dette fremgår også af nedenstående kurve over optælling af gæster i spa-bassinet under forsøgsperioden.



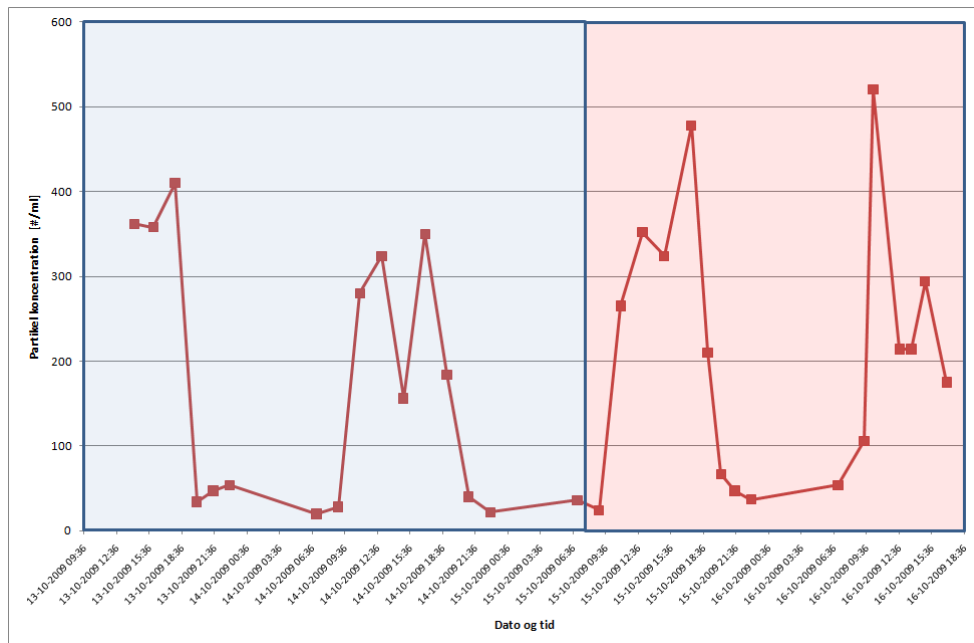
Figur 7-1 Badebelastning i forsøgsperioden

De blå områder på figuren indikerer belastningen af Spa-bassinet i perioden med tromlefilteret som primær partikelfilter, mens det røde område indikerer belastningen af SPA-bassinet i perioden med sandfilteret som primær partikelfilter. Det fremgår tydeligt at Spa-bassinet er højt belastet allerede kort tid efter åbning (Kl. 9), og denne belastning er tilnærmelsesvis konstant høj i hele åbningstiden. For de dage, hvor måleprogrammet har kørt, har belastningen i gennemsnit ligget på henholdsvis 30 pers/time (13/10), 29 pers/time (14/10), 29 pers/time (15/10) og 34 pers/time (30/11). Ved sammenligning af massefjernelsen af partikulært organisk stof i de to typer af filtre har belastningen således været ens.

7.2.2 Partikelkoncentrationsdynamik

Under alle forsøgsdagene er der samtidig med monitoringen af koncentrationen af organisk stof gennemført en monitorering af partikelkoncentration i SPA bassinet. Resultater-

ne af partikelkoncentrationsmålingerne i bassinerne over de fire døgn fremgår af nedenstående figur. Det skal bemærkes at den underliggende partikelstørrelsesfordeling for de angivne partikelkoncentrationer svarer til de tidligere fundne partikelstørrelsesfordelinger (se Figur 7-2) (data ikke vist).



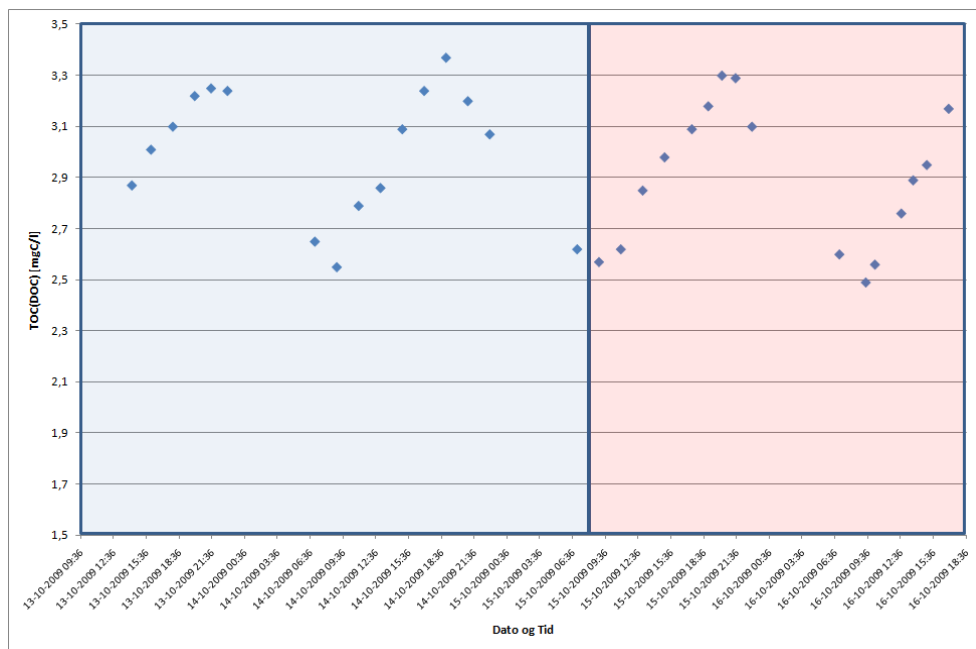
Figur 7-2 Partikelkoncentration i det udendørs SPA-bassin i forsøgsperioden

Det blå område på figuren indikerer igen belastningen af Spa-bassinet i perioden med tromlefilteret som primær partikelfilter, mens det røde område indikerer belastningen af SPA-bassinet i perioden med sandfilteret som primær partikelfilter.

Det fremgår at der for alle dagene i forsøgsperioden observeres en initial hurtig tilvækst i partikelkoncentration til mellem 300-500 partikler/ml. Herefter ses den hurtige omsætning af vandet og den effektive partikelfjernelse i tromlefilter/sandfilter at kunne balancere tilførslen, idet partikelkoncentrationen fastholdes mellem 300-500 partikler/ml over hele åbningstiden. Ved endt åbningstid ses den hurtige omsætning af vandet og den effektive partikelseparation at medfører en hurtig fjernelse af den tilbageværende partikelmasse, så bassin vandet kun indeholder meget få partikler ved åbningstid den efterfølgende dag. Den meget hurtige partikelfjernelse, der sker efter endt åbningstid, indikerer også at partikeltilførslen i åbningstiden med meget høj belastning må være meget hurtig for at kunne fastholde et niveau af partikler på mellem 300-500 partikler/ml. Dette stemmer meget godt overens med den hurtige lineære partikelfrigivelse, der blev observeret under det kontrollerede partikelfrigivelsesforsøg i det private spa-bassin (Se Figur 5-1).

7.2.3 Variationsmønster i total organisk kulstof (TOC) og opløst organisk kulstof (DOC)

Det primære mål med måleprogrammet var at øge forståelsen for dannelsen af de organiske klorerede biprodukter i svømmebade ved at øge forståelsen for dynamikken i koncentrationen af organisk stof og derigennem få indblik i, hvor meget der akkumuleres, omsættes og omdannes til biprodukter. Der blev således under de fire forsøgsdage gennemført målinger af TOC og delvis DOC med tætte intervaller både før, under og efter åbningstiden for bassinet. Resultaterne af TOC målinger fremgår af Figur 7-3.



Figur 7-3 TOC(DOC) koncentrationen bassinvandet i det udendørs SPA-bassin i løbet af forsøgsperioden

Måleprogrammet for TOC (DOC) er startet op d. 13/10 kl. 14:00, og TOC (DOC) indholdet er herefter målt med tætte intervaller frem til d. 16/10 kl. 17:00. For at undgå for store brud på koncentrationsprofilen om natten er der hver dag målt frem til kl. 23:00, og målingerne er genoptaget igen kl. 7:00 hver morgen. Det blå område på figuren indikerer igen belastningen af Spa-bassinet i perioden med tromlefilteret som primær partikel-filter, mens det røde område indikerer belastningen af SPA-bassinet i perioden med sandfilteret som primær partikelfilter. Indholdet af opløst organisk stof blev bestemt ved at filtrere bassinvandsprøverne gennem et 0,22 μm filter for at fjerne alt partikulært materiale. Imidlertid viste det sig ved de første fem prøver, at der ikke kunne måles forskel på filtrerede og ufiltrerede prøver, hvilket viste at det partikulære materiale ikke bidrog målbart til det totale indhold af organiske stof, og de aktuelle målinger af TOC er således alene et udtryk for bassinvandets indhold af opløst organisk stof (DOC).

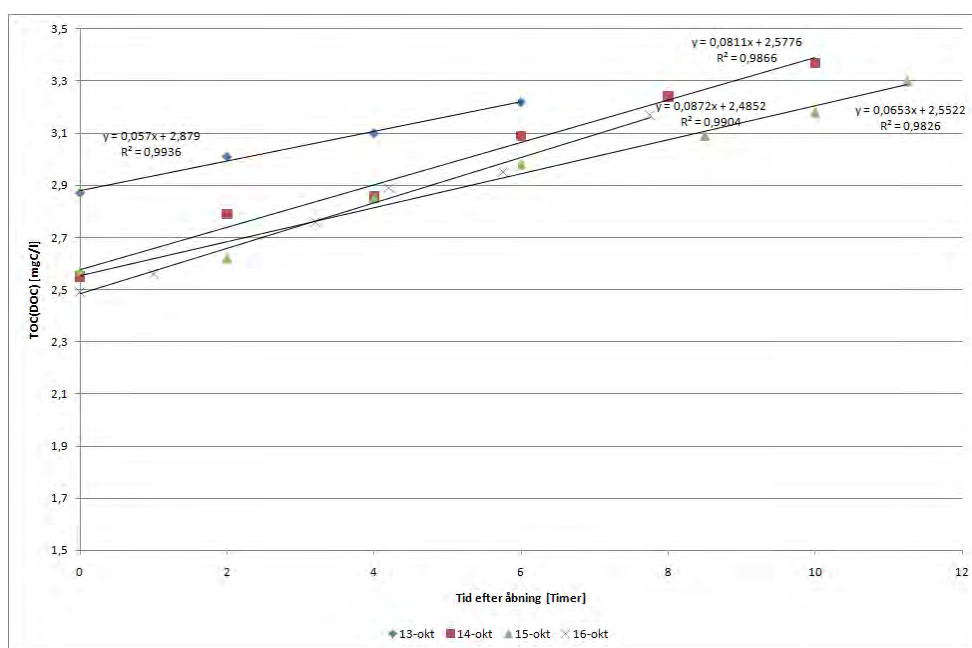
Målingerne over de fire dage viste således, at koncentrationen af opløst organisk stof følger et typisk mønster med en tilnærmelsesvis lineær stigning over dagen og et tilnærmelsesvist lineært fald over natten. For hele måleperioden ses der ingen netto akkumulering af opløst organisk stof, idet den forøgelse i DOC koncentrationen, der fremkommer under den høje belastning om dagen, omsættes fuldstændigt om natten, hvilket alene skyldes klørens oxidation af det organiske stof. Disse resultater bekræfter således to tidligere studier, der har vist at kun omkring 2% af den tilførte TOC omdannes til klørede biprodukter, mens de resterende ca. 98% bliver oxideret af kløren til CO_2 og H_2O , og at der ikke sker nogen netto akkumulering af organisk kulstof i svømmebade /1,2/. Af ovenstående resultater samt de to tidligere studier er det værd at bemærke, at omdannelsen af de opløste TOC komponenter er relativt langsom i forhold til tilførslen, hvorfor det burde være muligt med dedikeret teknologi at fjerne TOC komponenterne, inden de bliver omdannet til biprodukter.

En anden interessant observation er at variationen i det opløste organiske stof har et helt tilsvarende variationsmønster som bundet klor observeret ved den forrige undersøgelse

(figur 12). Sammenholdes denne observation med den kemiske sammensætning af sved og urin (tabel 3), der med hensyn til både kulstof og kvælstof domineres af urea indholdet, antydes således at dannelsen af bundet klor og tilvæksten i opløst organisk stof langt overvejende er knyttet til frigivelsen af urea eller reaktioner mellem klor og urea direkte i huden på de badende.

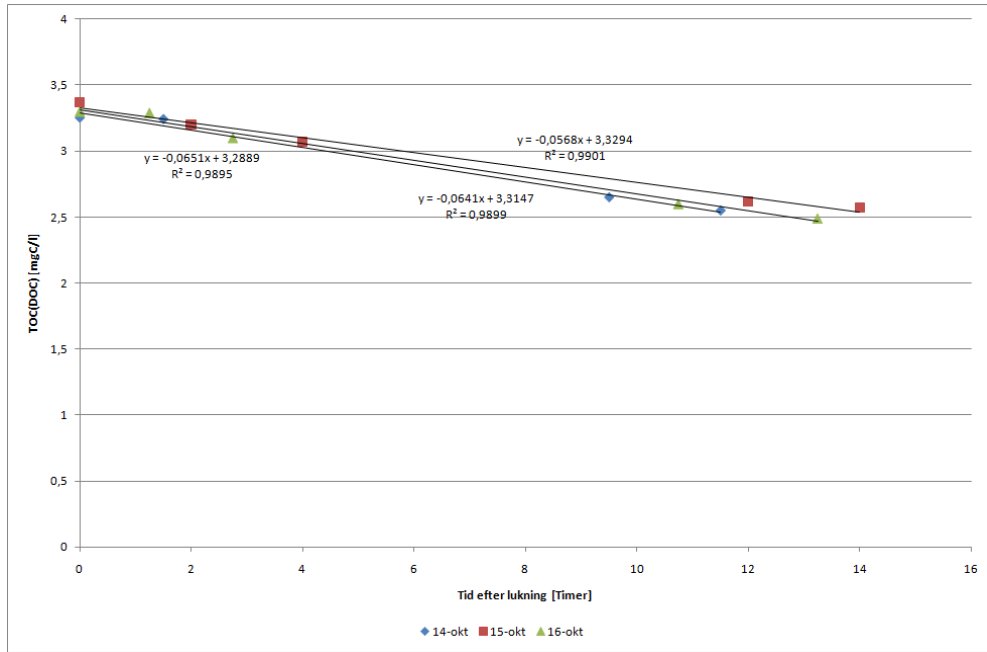
7.2.4 Beregning af person-specifik organisk stoftilvækstshastighed

På baggrund af de observerede data for tilvækst og henfald i indholdet af opløst organisk stof samt den opgjorte personbelastning er det muligt at beregne en person-specifik organisk stof tilførsel. De fire observerede lineære tilvækstforløb danner grundlag for beregning af netto tilførslen af opløst organisk stof. Disse tilvækstforløb fremgår af Figur 7-4.



Figur 7-4 Tilvækst i koncentrationen af opløst organisk stof i det udendørs Spa-anlæg 13-16. oktober 2009

For at kunne beregne brutto tilførslen og dermed det person-specifikke bidrag af opløst organisk stof er det imidlertid nødvendigt at lægge henfaldshastigheden, målt om natten, til netto tilvækstshastighederne, idet det må forventes at der om dagen er en tilsvarende omsætning af det opløste organiske stof om dagen. De observerede henfaldsforløb fremgår af Figur 7-5.



Figur 7-5 Henfald i koncentrationen af opløst organisk stof i det udendørs Spa-anlæg 14-16. Oktober 2009

På baggrund af de ovenstående tilvækst- og henfaldshastigheder for opløst organisk stof, det totale vandvolumen i Spa-anlægget samt de opgjorte belastningstal er der i nedenstående tabel (Tabel 7-1) beregnet såvel en netto som brutto organisk stof tilvæksthastighed for systemet.

Parameter	Enhed	13. Okt.	14. Okt	15. Okt.	16. Okt
TOC(DOC) tilvæksthastighed	[g/m ³ ·time]	0,057	0,081	0,065	0,087
TOC(DOC) henfaldshastighed		-	0,065	0,057	0,064
Systemvolumen	[m ³]	35	35	35	35
Belastning	[Pers/time]	30	29	29	34
TOC(DOC) Tilvæksthastighed [netto]	[g/time]	2,0	2,8	2,3	3,1
TOC(DOC) Henfaldshastighed	[g/time]	(Antaget 2,2)	2,3	2,0	2,2
TOC(DOC) Tilvæksthastighed [Brutto] (Sum af Netto og henfald)	[g/time]	4,2	5,1	4,3	5,3
Person normeret dannelseshastighed	[g/pers·time]	0,14	0,18	0,15	0,16

Tabel 7-1 Beregnede tilvæksthastigheder for opløst organisk stof

Af tabellen fremgår således, at en person ved ophold i bassinet i timen tilfører 0,16 g opløst organisk kulstof. Sammenlignes dette med tidligere rapporterede person-specifikke organisk stofbidrag svarer det fundne til kun omkring 10% af tidligere fundne værdier. Dette indikerer således, at tilførslen af urin og sved til bassinvandet fra en person over en time er væsentligt mindre end hidtil antaget, og dette er vigtigt i forhold til design af fremtidige anlæg til fjernelse af opløst organisk stof.

7.2.5 Massefjernelse af partikulært organisk stof i tromlefiltre kontra sandfiltre

For at belyse massefjernelsen af partikulært organisk stof i de to typer af filtre er der udtaget prøver af returskyllevand fra tromlefiltret (de to første forsøgsdage) og sandfiltret (de to sidste forsøgsdage). Returskyllevandsprøverne fra tromlefilteret er udtaget som blandprøver ved udtagning og sammenblanding af delprøver af en række returskyl fordelt over forsøgsdagene. Returskyllevandsprøverne fra sandfiltrene er udtaget ved at udtage en stor delmængde af returskyllevandet under returskyllet. For forsøgene alene med sandfilter er der foretaget returskylning af sandfiltret inden tromlefiltret blev taget ud af drift for at sikre der ikke var akkumuleret partikulært stof fra afløbet fra tromlefilteret fra dagen før. Den samlede partikulære organiske stofmængde fjernet af de to teknologier under de to dages belastning er opgjort som den samlede returskyllevandsmængde og koncentrationen af partikulært organisk stof i returskyllevandsprøverne. Returskyllevandsmængden for tromlefiltret er opgjort som antallet af skyl pr. døgn multipliceret med en estimeret skyllevandsmængde pr. skyl på 6 liter. Returskyllevandsmængden for sandfiltret er opgjort som returskylstiden multipliceret med det angivne returskylsflow på 205 m³/h. De opgjorte vandmængder, partikulær organisk stofkoncentrationer samt massefjernelser af partikulært organisk stof for de to filtertyper fremgår af Tabel 7-2.

Tabel 7-2 Massefjernelse for partikulært organisk stof i tromleiltre og sandfiltre

	Tromlefilter		Sandfilter	
	13-okt	14-okt	15-okt	16-okt
Antal returskyl [Antal]	735	753	1	1
Vand pr. skyl [liter]	6	6	8500	8500
Returskyllevandsmængde [m ³ /dag]	4,41	4,518	8,5	8,5
Koncentration af partikulært TOC [mgC/l]	19,5	19,8	10,7	11,7
Massefjernelse partikulært TOC [g/dag]	86	89	91	99
Gennemsnit for de to dage	88		95	

Som det fremgår er den gennemsnitlige massefjernelse af partikulært organisk stof 88 g/dag og 95 g/dag for henholdsvis tromleiltre og sandfiltre. Tages de aktuelle målte massefjernelser således til indtægt for en reel forskel i de to typer filteres partikelfjernelses-effektivitet, fjerner sandfiltret således 7% mere partikulært organisk stof end tromleiltret. Imidlertid er de opgjorte skyllevandsmængder for især tromleiltret men også for sandfiltret relativt usikkert bestemt, hvorfor der ikke umiddelbart vurderes at være en reel forskel i partikelfjernelseeffektiviteten af de to typer filtre. Vurderet herudfra synes tromleiltret at kunne udgøre et reelt alternativt til sandfiltrene som primær partikelfjernelsesteknologi. Der er imidlertid behov for mere detaljerede studier af de to teknologiers partikelfjernelseeffektivitet for at kunne bekræfte ovenstående første sammenligning af de to teknologier.

7.3 Sammenfatning og konklusion

Sammenfattende viser resultaterne af måleprogrammet, at koncentrationen af organisk stof følger en typisk døgnvariation, hvor koncentrationen steg tilnærmelsesvis lineært fra åbningstid til lukketid af bassinet for derefter at falde tilnærmelsesvist lineært om natten. Det organiske stof i bassinvandet bestod af >99% opløst organisk stof, mens bidraget fra den partikulære organiske forurening på det totale organiske stofindhold var ubetydelig. Over hele måleperioden var der ingen netto akkumulering af organisk stof, idet forøgelsen i koncentrationen af opløst organisk stof under den høje belastning om dagen omsættes fuldstændigt om natten af klorens oxidation af det organiske stof. En interessant observation i relation til variationen i det opløste organiske stof er, at det følger samme variationsmønster som for bundet klor. Sammenholdes denne observation med den kemiske sammensætning af sved og urin, der med hensyn til både kulstof og kvælstof domineres af urea indholdet, antydes således at dannelsen af bundet klor og tilvæksten i opløst organisk stof langt overvejende er knyttet til frigivelsen af urea eller reaktioner mellem klor og urea direkte i huden på de badende, og at det i høj grad handler om at håndtere denne komponent i forhold at minimere biprodukt dannelsen.

Undersøgelsen omfattede også en sammenligning af massefjernelsen af partikulært organisk stof i to forskellige partikelfjernelsesteknologier – et tromlefilter med 10 µm dug

og et sandfilter. Den gennemsnitlige massefjernelse af partikulært organisk stof blev fundet til 88 gC/dag og 95 gC/dag for henholdsvis tromlefiltere og sandfiltere. De aktuelt observerede forskelle i partikelfjernelse vurderes dog ikke umiddelbart at være et udtryk for en reel forskel i effektiviteten af de to typer filtre, idet de opgjorte skyllevandsmængder, der ligger til grund for masseberegningen, er relativt usikkert bestemt for især tromlefiltret, men også for sandfiltret. Vurderet ud fra de aktuelle målinger synes tromlefiltret at kunne udgøre et reelt alternativt til sandfilterene som primær partikelfjernelsesteknologi. Der er imidlertid behov for mere detaljerede studier af de to teknologiers partikelfjernelseeffektivitet for at kunne bekræfte ovenstående første sammenligning af de to teknologier.

7.4 Perspektivering

Ovennævnte undersøgelse har medvirket til en øget forståelse for dynamikken i koncentrationen af opløst organisk stof i svømmebade. Der er imidlertid behov for mere kontrollerede undersøgelser i laboratorie/pilot skala for at underbygge resultaterne af denne undersøgelse og for at øge viden om sammenhængen mellem den fundne dynamik og belastningen. Derudover er der behov for at etablere relationer mellem det organiske stofs koncentrationsdynamik og dannelsen af organiske biprodukter for at kunne etablere kvantitative modeller for forudsigelse af biprodukt-dannelsen ved forskellige belastningsscenerier. Dette kræver imidlertid yderligere undersøgelser hvor der samtidigt foretages målinger af opløst organisk stof, klorerede biprodukter og belastning over en længere periode. Derudover er der behov for at understøtte sådanne undersøgelser med mere kontrollerede forsøg i laboratorie/pilotskala hvor reaktionen mellem det organiske stof i svømmebade og klor kan undersøges mere detaljeret for at opnå en større forståelse for reaktionerne i de virkelige systemer.

7.5 Referencer

- /1/ Judd, S.J. & Bullock, G. (2003), The fate of chlorine and organic materials in swimming pools, *Chemosphere*, 51, pp. 869-879.
- /2/ Glauner, T., Frimmel, F.H. & Zwiener, C. (2004), Schwimmbadwasser – wie gut muss es sein und was kann man technisch tun, *Wasser und Abwasser*, Vol 145, No. 10, pp. 706-713.

8 INDLEDENDE HOT-SPOT-ANALYSE AF INDEKLIMAET OG VENTILATIONSSYSTEMERNE I LALANDIA RØDBY

Aktiviteterne omkring mulighederne for forbedring af indeklimaet i Lalandia Rødby har haft fokus på en indledende analyse af ventilationssystemet via gennemførelse af et måleprogram vedrørende temperatur og luftfugtighedsfordeling, CO₂ niveau samt målinger af sporgas og lufthastigheder i relation til identifikation kritiske hot-spots med manglende eller uhensigtsmæssig ventilation i relation til eksponering med flygtige klorerede biprodukter. På grund af badelandets kompleksitet er det praktisk talt umuligt at lave dybdegående analyser af hele badelandets indeklima. Ved måling af de ovenfor nævnte parametre, er der således udvalgt nogle områder og fokuspunkter. En mere detaljeret gennemgang af det de gennemførte målinger findes i Anneks 1 til denne rapport.

De etablerede data i denne aktivitet tjener således som et forberedende arbejde til en senere opstilling af stofmassebalancer og identifikation af behov for forbedrede data. Her til kommer opbygning af viden omkring dannelsen af biprodukter i bassinerne og udvekslingen med luften og ventilationen, der i kommende udviklingsprojekter på området vil kunne lede til udvikling af en computermodel af ventilationssystemet med henblik på opnåelse af optimal luftkvalitet i Lalandia og andre svømmebadsanlæg.

8.1 Sammenfatning og konklusion

Der er udført målinger på indeklimaet på 1. sal i badelandet i en weekend i maj 2009. Selvom der er målt i et forholdsvis stort og jævnt fordelt antal punkter, kan målingerne kun betragtes som punktmålinger på grund af badelandets størrelse. Der er og vil være områder, hvor forholdene er en del forskellig fra hvad målingerne viser.

I badelandets åbningstid er der målt lufttemperatur, luftfugtighed og CO₂ niveau. Uden for åbningstiden er der målt lokale ventilationsindekser ved hjælp af sporgas og lokale lufthastigheder ved bassinkanterne.

Temperaturmålingerne er generelt meget fine. Der er målt næsten konstante temperaturer tæt på de ønskede 30°C, men dog med en tendens til lidt lavere temperaturer. De målte luftfugtigheder varierer noget mere end temperaturerne – både over tid og mellem de forskellige målepunkter i badelandet. I forhold til komforten er de målte niveauer af luftfugtighed ikke noget problem, men i forhold til kravene i DS 477 og i forhold til afgasningen fra svømmebadene kunne en bedre styring af luftfugtigheden være ønskelig. Målingerne af CO₂ niveauer ligger på niveau med kravene til almindelige bygninger. Da forureningen fra svømmebade sandsynligvis er større end almindelige bygninger kunne det være ønskeligt at øge friskluftsmængden, ligesom det ville være ønskeligt med en registrering af CO₂ niveauet, så ventilationen kunne tilpasses efter behovet.

Sporgas målingerne indikerer ingen problemer i forhold til områder med utilstrækkelig ventilation. De viser dog en stor opblanding mellem de forskellige ventilationszoner, hvilket bevirker at forureninger et sted hurtigt spreder sig til resten af badelandet. Opblandingen mellem ventilationszonerne bevirker også at det er vanskeligere at holde konstante fugtniveauer, når luften er en blanding af luft fra flere anlæg, der forsyner forskellige dele med forskellige behov.

Målingerne af lufthastigheder ved bassinerne viser hastigheder omkring eller lidt over hvad der kræves i almindelige bygninger for at undgå træk. Lufthastighederne er der-

med relativt lave i forhold til luftskiftet på ca. 4 h^{-1} . I åbningstiden vil lufthastigheden

være kraftigt påvirket af personernes bevægelse i badelandet.

Overordnet set er der ved målingerne ikke identificeret kritiske områder eller store variationer. Der kan dog konstateres forskelle i indeklimaet, når man bevæger sig rundt i badelandet. Bl.a. er der områder, hvor man er meget tæt på indblæsningsarmaturerne og lufthastigheden derfor er meget højere end generelt i badelandet.

Målingerne blev gennemført på et tidspunkt, hvor badelandet var middel belastet både med hensyn til antallet af badende og vejret. Det bør derfor ikke undre at målingerne generelt viser at indeklimaet er i orden

Der er dog stadig mulighed for forbedringer, f.eks. ved at arbejde bevidst med valg af indblæsningsarmaturer for at opnå en bedre fordeling, opblanding og afgrænsning i og af de enkelte ventilationszoner. Ligeledes kunne man tilføje måling af CO₂ niveauet til reguleringen af ventilationsanlæggene, ligesom det bør være muligt at køre med reducerede luftmængder uden for åbningstiden og evt. også i åbningstiden ved få badende, så længe der sikres tilstrækkelig opblanding af luften.

9 **ORDLISTE**

AOX – Adsorberbart Organisk Halogen målt i mg Cl/l

THM – summen af koncentrationen af Trihalomethaner (Kloroform, bromdiklormethan, dibromklormethan, bromoform) målt i kloroform-ækvivalenter ($\mu\text{g CHCl}_3/\text{l}$)

Bundet klor – difference mellem total klor og frit klor målt ved DPD-metoden målt i mg Cl_2/l

TOC – Total organisk kulstof målt i mg C/l

DOC – Opløst organisk kulstof målt i mg C/l

DBP – Desinfektions Bi-Produkter

HOB – Hydraulisk Overflade Belastning målt i m/h

AOT – Avanceret Oxidations Teknologi

DPD – N,N-diethyl-1,4phenylendiamin – reagens til måling af frit og bundet klor

A N N E X A

***Indledende hot-spot-analyse af indeklimaet og
ventilationssystemerne i Lalandia Rødby***

Forundersøgelser og teknologiprøvning til forbedret vandkvalitet og indeklima for svømmebade og badelande – Case Lalandia Rødby



Indledende hot-spot-analyse af indeklimaet og ventilationssystemerne

*Udført af Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg
maj – november 2009*

Indledning

Lalandia er med sine 25.000 m² Danmarks største feriecenter. Det er samtidig yderst moderne med 2 biografale, en skøjtehal, stort legeland, et væld af restauranter og ikke mindst et stort, tropisk badeland. Denne rapport omhandler udelukkende målinger i badelandets 1. sal.

Rapporten indeholder udover denne indledning en konklusion, en beskrivelse af badelandet, samt et kapitel omhandlende det måleudstyr der er blevet benyttet. Derefter følger et kapitel for hver af de gennemførte målinger (indeklima, sporgas og lufthastighed).

Målingerne er gennemført d. 15-17 maj 2009 (fredag til søndag).

Arealet på 1. sal er ca. 3.500 m² med et anslået volumen på ca. 20 - 22.000 m³. Med en ventilationsmængde på ca. 79.400 m³/h giver det et luftskifte på ca. 4 h⁻¹.

Som det ses af oversigtsplanen og billede præsentationen er badelandet stort. Det gør det praktisk talt umuligt at lave dybdegående analyser af hele badelandets indeklima. Ved måling af de ovenfor nævnte parametre, er der således udvalgt nogle områder og fokuspunkter.

Det er valgt at rette fokus mod området omkring børnebassinet. Her er der mange mennesker samlet om den aktivitet der sker. Samtidig er der i området omkring såvel mulighed for ophold af stillesiddende karakter samt høj aktivitet i forbindelse med bestræbelserne på at nå hurtigt op til rutsjebanerne i grotten. Netop ved grotten er der ligeledes mulighed for målinger ved boblebadene og endelig foregår meget af indblæsningen af ventilationsluft i området. Forsyningen af luftmængder sker fra det største af de i alt 4 ventilationsanlæg.

Foruden dette område er der ved forskellige punktmålinger rettet fokus på arbejdsstationer, så forholdene for badelandets ansatte kan blive belyst. Det gælder f.eks. på livredderbroen og i kioskerne. Derudover er det forsøgt at dække badelandet jævnt med følere til registrering af indeklimaet (temperatur, luftfugtighed og CO₂ niveau).

Et typisk døgn i badelandet

Generelt er der åbent i badelandet hver dag hele året. Der er dog lukket en kortere periode omkring jul for at kunne servicere de tekniske installationer. På en typisk dag åbner badelandet kl. 9:00 og lukker kl. 20:00. Antallet af gæster varierer naturligvis henover året og henover dagen, men der er generelt altid et stort antal mennesker. På måletidspunktet var systemet til registrering af antallet af personer desværre ude af funktion og det har derfor ikke været muligt at få det præcise antal personer oplyst.

Når badelandet lukker starter rengøringen. Hele badelandet indsæbes og højtryksrensnes. Dette tager det meste af natten list varierende efter hvor mange der er til rengøringen.

Mulighed for placering af udstyr

Der er som tidligere omtalt foretaget tre typer af målinger. Indeklimamålingerne er foretaget henover åbningstiden, mens måling af lufthastighed og med sporgas er foretaget uden for åbningstiden, da udstyret ville genere brugen af badelandet og risikoen for at det ville blive beskadiget var for stor.

For følerne til måling af indeklima var det derfor nødvendigt at de kunne placeres uden gene for gæsterne og personalet og sådan at det ikke ville blive beskadiget ved normalt brug af badelandet. Til målingen af indeklimaet blev der benyttet følere der sendte målingerne trådløst til dataloggeren. Der blev anvendt to typer følere, hvor den ene kunne måle temperatur og luftfugtighed og den anden tillige CO₂ niveau. Følerne der kunne måle CO₂ niveau skulle tilsluttes strøm hvor i mod den anden type kunne køre på batteri. Følerne med CO₂ kunne dog måle knap 1 døgn på batteri. Ved placeringen af følerne blev det desuden forsøgt at placere dem så diskret som muligt, dels for at gæsterne ikke skulle undre og dels for at de ikke skulle påvirke målingerne ved at opholde sig ekstraordinært meget omkring følerne.

For placering af udstyret til måling af lufthastighed og sporgas var der færre bindinger. Da udstyret ikke kunne være i badelandet i brugstiden var længden af måleperioden begrænset. Dels tog det tid at stille udstyret op og tage det ned og dels skulle der stadig koordineres med rengøringen, så hele badelandet kunne blive rengjort.

Placeringen af samtlige følere og målepunkter er vist på nedenstående figur, hvor indeklimafølerne er markeret med grøn, måling af lufthastighed med rød og måling af sporgaskoncentration med blå.



Konklusion

Der er udført målinger på indeklimaet på 1. sal i badelandet i en weekend i maj 2009. Selvom der er målt i et forholdsvis stort og jævnt fordelt antal punkter kan målingerne kun betragtes som punkt målinger på grund af badelandets størrelse. Der er og vil være områder hvor forholdene er en del forskellig fra hvad målingerne viser.

I badelandets åbningstid er der målt lufttemperatur, luftfugtighed og CO₂ niveau. Uden for åbningstiden er der målt lokale ventilationsindekser ved hjælp af sporgas og lokale lufthastigheder ved bassinkanterne.

Temperaturmålingerne er generelt meget fine. Der er målt næsten konstante temperaturer tæt på de ønskede 30°C men dog med en tendens til lidt lavere temperaturer. De målte luftfugtigheder varierer noget mere end temperaturerne – både over tid og mellem de forskellige målepunkter i badelandet. I forhold til komforten er de målte niveauer af luftfugtighed ikke noget problem, men i forhold til kravene i DS 477 og i forhold til afgasningen fra svømmebadene kunne en bedre styring af luftfugtigheden være ønskelig. Målingerne af CO₂ niveauer ligger på niveau med kravene til almindelige bygninger. Da forureningen fra svømmebade sandsynligvis er større end almindelige bygninger kunne det være ønskeligt at øge friskluftsmængden ligesom det ville være ønskeligt med en registrering af CO₂ niveauet så ventilationen kunne tilpasses efter behovet.

Sporgas målingerne indikerer ingen problemer i forhold til områder med utilstrækkelig ventilation. De viser dog en stor opblanding mellem de forskellige ventilationszoner, hvilket bevirker at forureninger et sted hurtigt spreder sig til resten af badelandet. Opblandingen mellem ventilationszonerne bevirker også at det er vanskeligere at holde konstante fugt niveauer når luften er en blanding af luft fra flere anlæg der forsyner forskellige dele med forskellige behov.

Målingerne af lufthastigheder ved bassinerne viser hastigheder omkring eller lidt over hvad der kræves i almindelige bygninger for at undgå træk. Lufthastighederne er dermed relativt lave i forhold til luftskiftet på ca. 4 h⁻¹. I åbningstiden vil lufthastigheden være kraftigt påvirket af personernes bevægelse i badelandet.

Overordnet set er der ved målingerne ikke identificeret kritiske områder eller store variationer. Der kan dog konstateres forskellige i indeklimaet når man bevæger sig rundt i badelandet. Bl.a. er der områder hvor man er meget tæt på indblæsningsarmaturerne og lufthastigheden derfor er meget højere end generelt i badelandet.

Målingerne blev gennemført på et tidspunkt hvor badelandet var middel belastet både med hensyn til antallet af badende og vejret. Det bør derfor ikke undre at målingerne generelt viser at indeklimaet er i orden

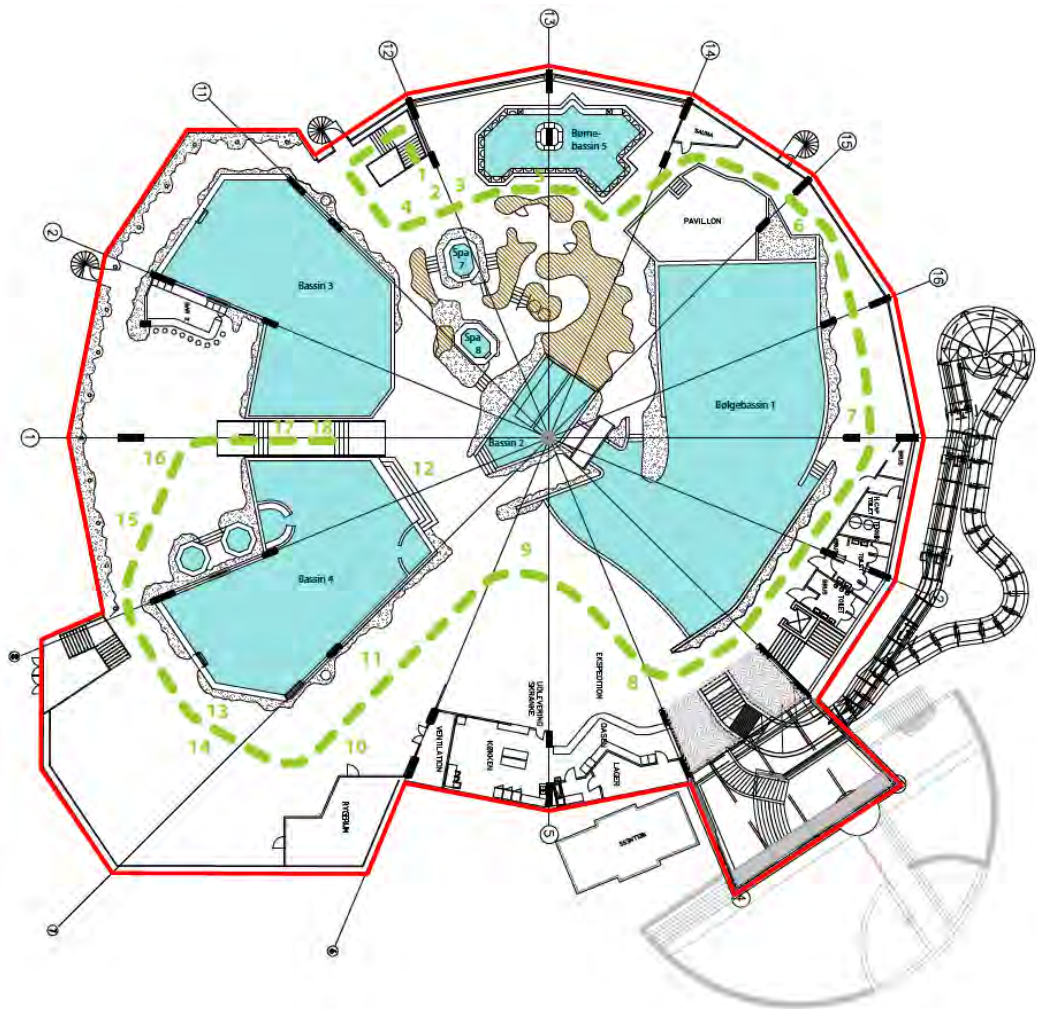
Der er dog stadig mulighed for forbedringer, fx ved at arbejde bevidst med valg af indblæsningsarmaturer for at opnå en bedre fordeling, opblanding og afgrænsning i og af de enkelte ventilationszoner. Ligeledes kunne man tilføje måling af CO₂ niveauet til reguleringen af ventilationsanlæggene ligesom det bør være muligt at køre med reducerede luftmængder uden for åbningstiden og evt. også i åbningstiden ved få badende, så længe der sikres tilstrækkelig opblanding af luften.

Præsentation af badeland

Dette afsnit indeholder en præsentation af badelandet. Først er der "rundtur" i badelandet der tjener til at give et overblik over den ganske komplekse bygning. Efterfølgende er der en beskrivelse af de tekniske installationer – primært badene og ventilationen.

Rundtur i badelandet

Det tropiske badeland er Danmarks største, med plads til hele 1300 badegæster. Badelandet består af 5 bassiner, 5 vandruksjebaner samt 4 boblebade, alle integreret i badelandet mellem klipper og planter. Derudover er der rig mulighed for afslapning og spising i områdets mange opholdszoner. De fleste af disse er i umiddelbar nærhed af de 2 kiosker; Oasen og Lagunen. På følgende figur ses indretningen af badelandet, som udgør hele 1. sal af den store bygning.



Fra omklædningsrummene i stueplanet er den korteste vej op i badelandet via trapperne i bygningens nordlige ende (ved modul 12). Her passerer samtidig det første af i alt 2 børnebassiner – det eneste bassin placeret i stueplanet.



På 1. sal i badelandet støder man som gæst først og fremmest på badelandets mest centrale del – den store klippeformation lokaliseret omtrentlig i midten af bygningen. Her er der integreret 2 boblebade og for enden af de mange trapper inde i ”grotten” begynder 4 vandrutsjebaner. Indblæsning af ventilationsluft sker samtidig fra de mange armaturer langs ringen af grotten.

Umiddelbart til venstre for opgangen ligger Lalandias andet og største børnebassin. Med masser af opholdsrum omkring bassinet er det et yndet mål for børnefamilierne.



I forlængelse af børnebassinet er der etableret en pavillon, hvor det er muligt at sidde i et flot miljø og eventuelt indtage mad og drikke. Herfra er der samtidig udsigt ud over det store bølgebassin samt det flotte plantedækkede espalier, som overdækker gangen over til Oasen.



Fra espalieret ved toiletterne er der ligeledes god udsigt ind til midten af bygningen og den høje klippeformation eller grotte, hvor vandrutsjebanerne snor sig mellem planter og effekter. Fra livredderbroen er der mulighed for at holde øje med aktiviteterne i bølgebassinet.

Længst væk på det følgende billede ses et væld af stole og borde foran Oasen, som er flittigt benyttet af badelandets gæster. På nabobilledet er der fokus på hele den store grotte med den lange livredderbro på tværs af det hele. Den strækker sig fra Spa 8 til bølgebassinet



På det følgende billede ses hele livredderbroen, der spænder over område, hvor rutsjebanerne ender. Broen er hævet ca. 4 meter over gulvet. På billedet ved siden af ses endnu engang klippeformation med vandrutsjebaner og indblæsning af luft. Ved den store opholdszone med borde og stole er der ligeledes placeret armaturer i den dertil indrettede klippe, som skal forsyne området samt bassin 4 med luft.



Fra opholdsområdet er udsigt ud over bassin 4. Det er mest af alt det hyggelige bassin med knap så højt til loftet, synlige klipper og palmer og ikke mindst den integrerede grotte, som man kan svømme ind i.



Fra den anden side af bassinet ses det tydeligt, at der ikke er så højt til loftet. De store glaspartier danner samtidig rammen om endnu et stort opholdsområde bagved bassin 4 i det store rum, som er skabt ved udvidelse af bygningen fra modul 6 til 8. Det er karakteriseret ved at afvige fra den oprindelige opbygning af badelandet – dels indretning og materialer og dels brydningen af den polygoniske form.

Området ligger lige fjernt fra begge kiosker og fungerer nok mest som mulighed for at nyde naturen og for afslapning.



Bagved grotten i bassin 4 er der integreret 2 boblebade i sten. Herfra er der udsigt over den mindste af badelandets 2 kiosker; Lagunen. Mellem de 2 bassiner er der etableret en gangbro delvist overdækket med klipper, som fører gæsterne over til grotten og det store spise-/opholdsområde.



Fra gangbroen ses hele Lagunen. Rundt om kiosken snor bassin 3 sig. Det er større end bassin 4 og forekommer mere åbent. I den ene side er der etableret en strømkanal, som gæsterne kan muntre sig i.



Ved siden af strømkanalen er nedgangen til omklædningsrummene og turen rundt i badelandet er således komplet.

Tekniske installationer

I dette afsnit beskrives de overordnede parametre for bassinerne, ventilationsanlæg og vejrstationen.

Bassinerne

På 1. sal er der 7 bassiner, se figuren nedenfor. Bassinerne er temperaturmæssigt inddelt i 3 kategorier. Bassin 1 - 4 er de store bassiner til at bade i samt de centrale rutsjebaner. Bassin 5 er børnebassinet og 7 og 8 er spabade. Ifølge DS 477 bør vandtemperaturen være 2°C lavere end rumluften. Dette er ikke muligt for alle bassinerne, da der er forskellige krav til vandtemperatur.

	Vandtemperatur [°C]
Bassin 1 – 4	28
Bassin 5	34
Bassin 7 – 8	37

Ventilation

Lalandias badeland ventileres af i alt 4 ventilationsanlæg. Disse er placeret i bygningens stueplan sammen med de mange vandbehandlingsanlæg. Anlæg 3 og 4 er de mindste af disse og kan ses på følgende billeder.



Anlæg 2 og især anlæg 1 er væsentlig større. På de følgende billeder kan dele af det større anlæg 1 ses.

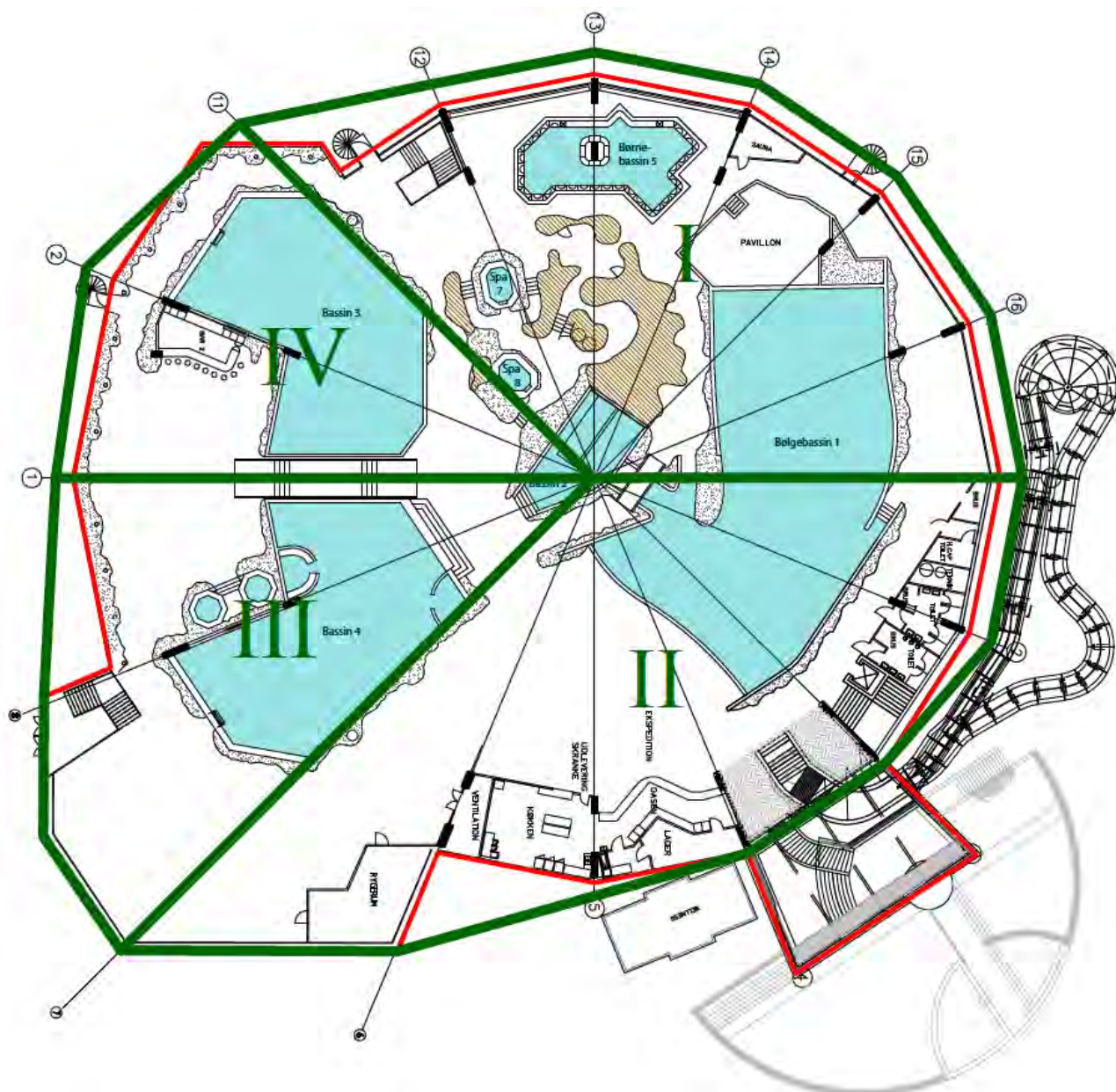


De samlede luftmængder er for henholdsvis indblæsning og udsugning 74.950 m³/h og 79.400 m³/h og ventilationen er dermed ikke helt balanceret. Det er dog helt normalt at designe anlægget, så der fremkommer et svagt undertryk i badelandet. Herved reduceres fugtpåvirkningen af de omgivende konstruktioner og spredning af den klorholdige luft til resten af Lalandia reduceres.

Luftmængderne for hvert af de 4 anlæg kan ses i tabellen.

	Indblæsning [m ³ /h]	Udsugning [m ³ /h]
Anlæg 1	30.000	40.000
Anlæg 2	18.100	13.800
Anlæg 3	15.500	13.950
Anlæg 4	11.200	11.650
I alt	74.950	79.400

De 4 ventilationsanlæg ventilerer hver deres del af badelandet. På oversigtsplanen er det illustreret, hvordan ventilationen er fordelt mellem anlæggene.



Regulering

Ventilationsanlæggene kører hele året, hele tiden med samme luftmængde. Temperatur setpunktet er 30°C (2°C varmere end de store badebassiner efter DS 477) og dette opnås ved at opvarme indblæsningsluften i ventilationsanlæggene. Setpunktet for den relative fugtighed er 60% i overensstemmelse med DS 477. Fugtigheden reguleres ved at ændre på forholdet mellem frikluftsmængde og recirkulering. Frikluftsmængden kan varieres mellem 25 og 100% af den samlede indblæsningsluftmængde. Der er ingen registrering af eller regulering efter luftkvaliteten (CO₂ niveau).

Armaturer

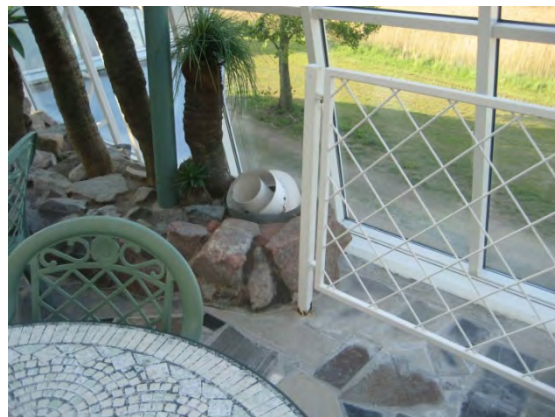
Der er benyttet en række forskellige armaturer til såvel indblæsning som udsugning i badelandet. Udsugning sker udelukkende i toppen af kuplen, hvor anlæg 1 suger den største mængde ud gennem en meget stor kanal skjult i klippeformationen, mens de øvrige anlæg suger luften ud langs hvert spær.



Valg af indblæsningsarmaturer er primært forskellig for de 4 anlæg eller områder. Anlæg 1 indblæser luft gennem de mange armaturer langs ringen af grotten samt rundt langs glasfacaden.



Indblæsningsluft fra anlæg 2 sendes gennem armaturer langs glasfacaden ligesom anlæg 1. Her er dog ligeledes anvendt nogle, som er rettet ind mod badelandet i stedet for mod facaden. Fra rygerummet og op mod anlæg 3 benyttes endvidere armaturer placeret lodret i stenene. Disse er anvendt i opholdszonerne med borde og stole samt bag bassin 3 og 4.



Anlæg 3 og 4 anvender ligeledes de lodret placerede armaturer langs glasfacaden i opholdszonen ved Lagunen samt bag bassin 3 og 4. Derudover anvendes nogle øvrige typer i område III og IV. Det drejer sig om en gruppe dyser med stor kastelængde, som sender luft ind over bassin 3 og 4. Derudover er i opholdszonen ved Lagunen anvendt lofthængte armaturer.



Vejrstation

Lalandia har deres egen vejrstation til at overvåge vejrforholdene i forbindelse med styring af ventilationsanlægget. Det er en stor mast opstillet bag teknisk forvaltning, som registrerer alle de væsentlige vejrparametre via CTS-anlægget. Der overvåges udetemperatur, vindhastighed, vindretning, fugtighed, regnfald, solintensitet samt lysintensitet. På de følgende billeder ses vejrstationen.



Måleudstyr

I dette afsnit omtales det benyttede måleudstyr kort med fokus på målenøjagtigheden.

Indeklimamåling

Til måling af indeklimaet er der benyttet et system bestående af en datalogger og et antal følere der sender data (målingerne) trådløst til dataloggeren efter et angivet interval. Udstyret er af fabrikatet Eltek.

Alle følerne er blevet kalibreret inden målingerne og der er dermed opnået en mindre usikkerhed end den udstyret er specificeret med. Usikkerheden ligger inden for:

- Temperatur: $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
- Fugtighed: $\pm 1\%$ point
- CO_2 : ± 30 ppm



Sporgasmåling

Til måling af sporgas er der benyttet en gasanalysator af mærket Innova (B&K) samt 2 multipleksere hver med 6 kanaler, så det er muligt at måle på i alt 12 kanaler. Som sporgas er benyttet lattergas N_2O . Udstyret er kalibreret inden brug og da resultaterne af målingerne er relative i forhold til den målte koncentration i udsugningen er måleusikkerheden uden praktisk betydning for resultaterne.

Ved denne type måling er det derimod afgørende at der måles over tilstrækkelig lang tid, da det tager ca. $\frac{1}{2}$ minut pr. måling pr. kanal. Derfor er der en forholdsvis stor tidsforskel mellem de 12 kanaler ligesom der altid vil være en tidlig variation i koncentrationen selvom målingerne foretages under nogen lunde stationære forhold. Der er opnået tilstrækkeligt stationære forhold i en passende tid.



Lufthastighedsmåling

Til måling af lufthastighed er benyttet et Dantec anemometer system. Dette system har 8 følere der måler farten af luftens hastighed. Udstyret er kalibreret til en nøjagtighed på $\pm 0,1$ m/s. Hver måling er en midelværdi over 3 minutter hvor der samples 10 gange i sekundet.

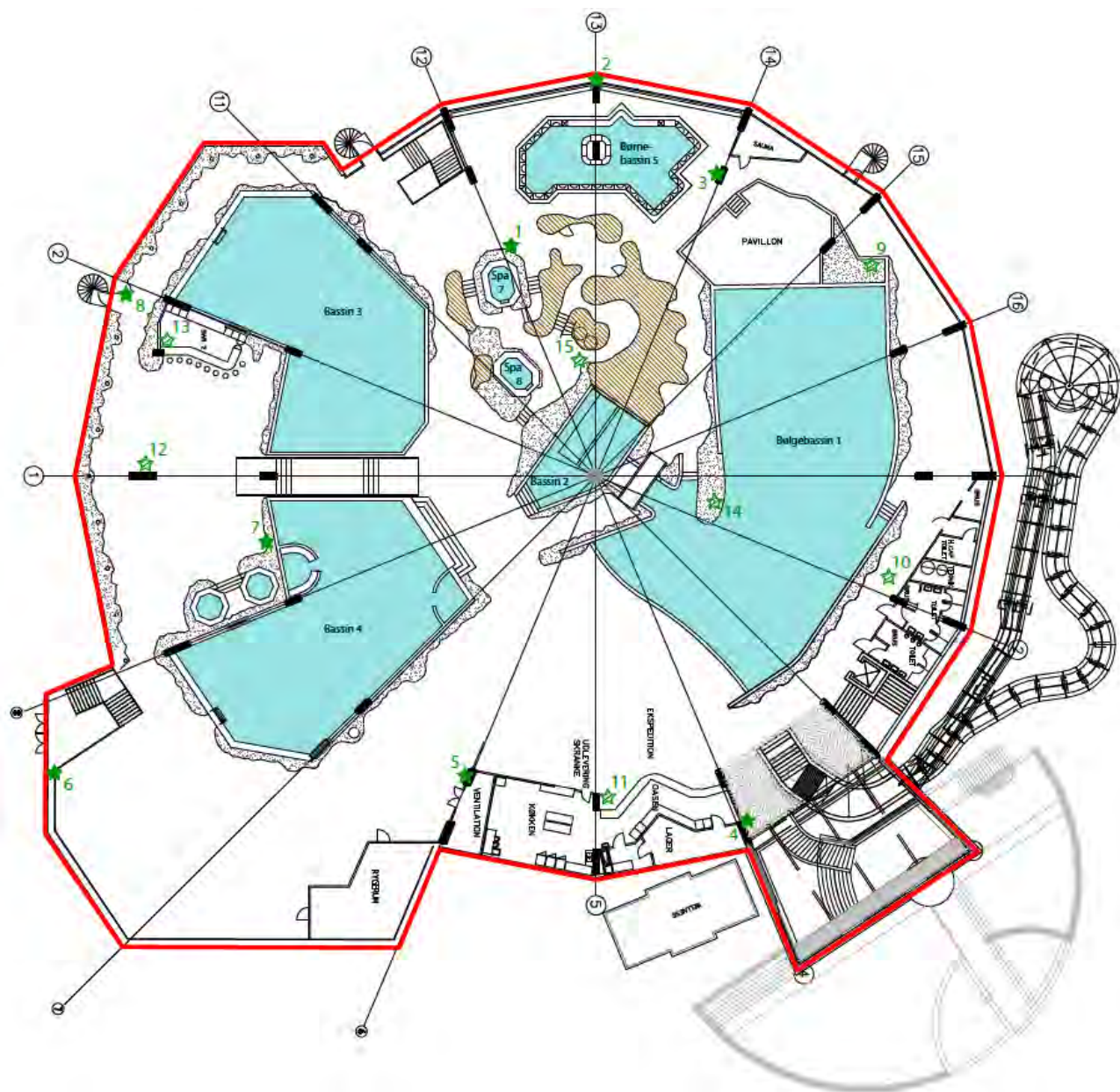


Indeklimamåling

I dette kapitel omtales indeklimamålingerne som består af måling af temperatur, relativ luftfugtighed og CO₂ niveau udvalgte steder i badelandets 1. sal. Der er benyttet to typer følere – en der måler temperatur og relativ fugtighed og en der tillige måler CO₂ niveau. Måleudstyret er nemmere beskrevet i kapitlet "Måleudstyr". Kapitlet indeholder først en beskrivelse af følerne placering og derefter en gennemgang af resultaterne for de enkelte følere og følerne indbyrdes.

Placering af følere

På figuren ses en oversigtsplan over badelandet, hvor de udvalgte steder til måling af temperatur og fugtighed er indtegnet med helt grønne stjerner (nr. 1-8). Med stribede stjerner er det markeret, hvor der ligeledes er målt CO₂-niveau (nr. 9-15).



#1 – Spa 7

Der er foretaget måling ved grotten og spa 7. Her befinder der sig mange mennesker – dels fordi opgangen fra omklædningsrummet er tæt på og dels fordi der er her er passage mellem børnebassinet og det øvrige badeland. Samtidig befinder der sig en af Lalandias egne målere i nærheden til styring af ventilationen og i den forbindelse er det interessant, hvordan niveauerne er her i forhold til resten af badelandet.



#2 – Søjle ved modul 13

Mange af placeringerne er vilkårlige punktmålinger spredt rundt i hele badelandet. Der er opstillet en måler ved et af modul 13's søjler tæt på facaden.



#3 – Eltavle ved modul 14

I området mellem børnebassinet og pavillonen, hvor der er stor gennemgang af mennesker er der opstillet en måler på en eltavle. I nærheden er desuden en af badelandets mange saunaer.



#4 – Wild River vandruksjebane

Ved badelandets seneste attraktion – Wild River vandruksjebane, som fører gæsterne en tur udenfor – er der placeret en måler, hvor det var muligt. Det blev på den viste lampe på muren. Der er samtidig indgang til badelandet fra rækken af udendørs bassiner gennem den tilbyggede glasfacade her.



#5 – Eltavle ved rygerum

Ved rygerummet er der placeret en måler på en eltavle. Det er samtidig i nærheden af det store opholds- og spiseområde ved Oasen.



#6 – Opholdsområde

Ved det andet store opholdsområde bag bassin 4 er der ligeledes placeret en måler. Det er sket i umiddelbar nærhed af trappen, der fører ned til toiletter.



#7 – Opholdsområde ved boblebade

Ved opholdsområdet ved Lagunen og de 2 mindre boblebade er der placeret en måler.



#8 – Passage ved Lagunen

Ved passagen bag bassin 3 og Lagunen er der placeret en måler tæt på bygningens glasfacade.



#9 – Parasol ved livredderstol

I den fjerne ende af bølgebassinet og ved siden af pavillonen er der placeret en måler i en parasol. I umiddelbar nærhed er der samtidig en stol, så livredderne kan observere aktiviteterne i bassinet. Placeringen er desuden valgt i forbindelse med det fokus, der er rettet mod arbejdsstationerne for badelandets ansatte.



#10 – Toiletter

Ved passagen om til Oasen er der placeret en måler i det espalier, der overdækker arealet foran toiletterne.



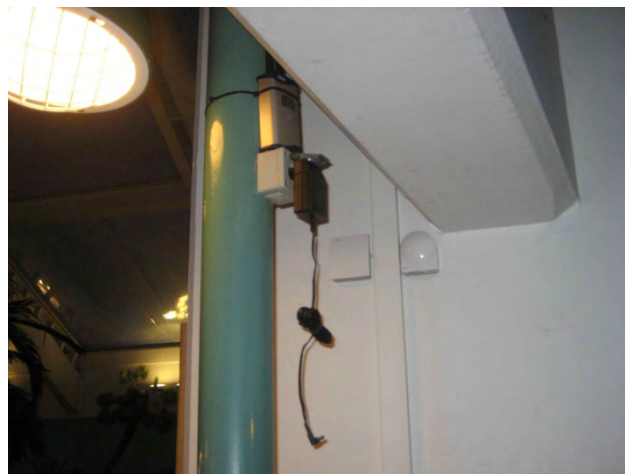
#11 – Oasen

I forbindelse med fokus på indeklimaet ved arbejdsstationerne er der placeret en måler lige udenfor Oasen. Her er samtidig mange mennesker som følge af det store salg af mad og drikke, der udleveres lige ved siden af. Som det ses på billedet til højre er føleren ligeledes placeret tæt på følerne til ventilationsanlægget der forsyner område nr. 2.



#12 – Opholdsområde ved Lagunen

Ved opholdsområdet foran Lagunen er der placeret en måler for at måle indeklimaet, som det opleves af de mange siddende mennesker i området.



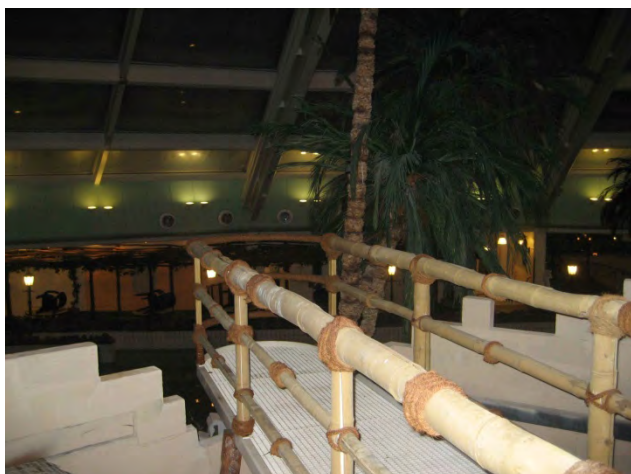
#13 – Lagunen

Føleren er i modsætning til ved Oasen her placeret inde i selve kiosken, så det er muligt at vurdere indeklimaet for de ansatte.



#14 – Livredderbroen

De foregående målere er overvejende placeret i indtil 2 meters højde for at afspejle opholdszonen for badelandets gæster. For at få en ide om evt. lodrette gradienter op gennem badelandet samt for at vurdere arbejdsmiljøet for badelandets livreddere, er der placeret en måler i den fjerne ende af livredderbroen. Her er højden for indånding ca. 6 meter over badelandets gulv.



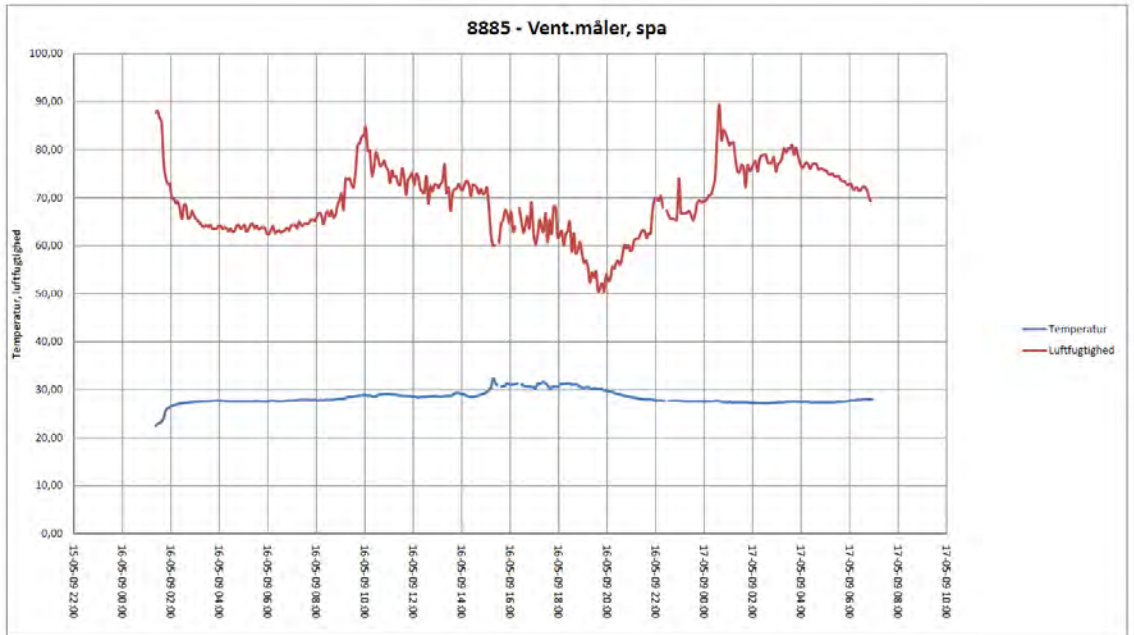
#15 – Udsugning ved vandruksjebane

Målingen ved udsugningen oppe ved starten af de mange vandruksjebaner tjener flere formål. For det første udgør placeringen det højeste tilgængelige punkt i badelandet. Resultaterne herfra bidrager til undersøgelsen af de gradienter der måtte være ved temperatur, fugtighed og CO₂. Samtidig har det været hensigten – så vidt muligt – at undersøge i umiddelbar nærhed af de samme punkter, hvor der blev benyttet sporgas til måling af ventilationseffektivitet.

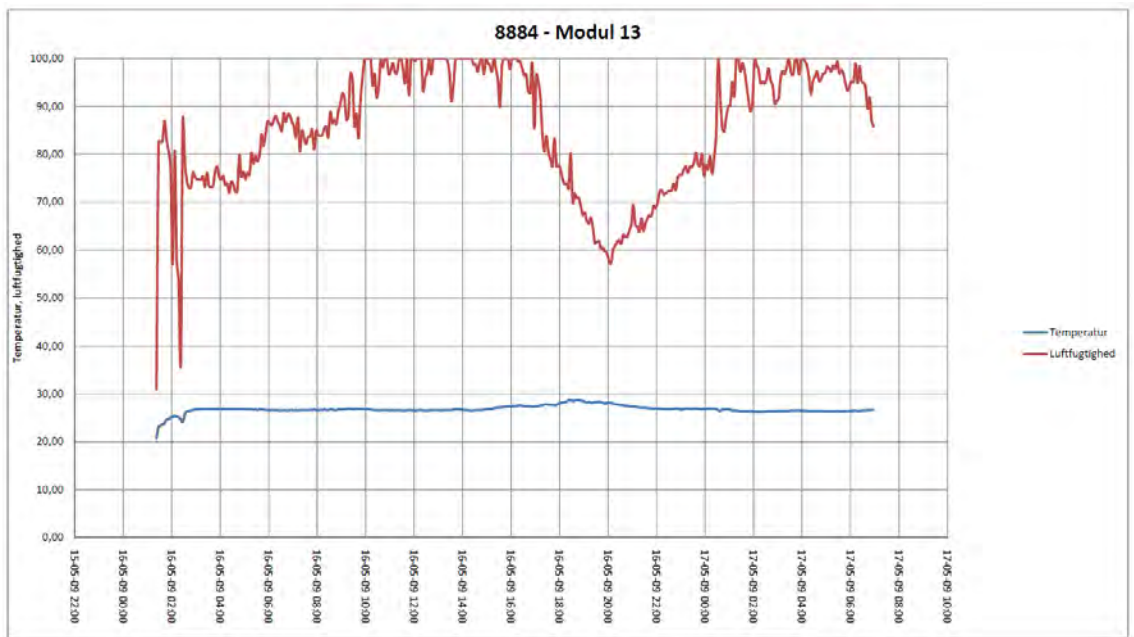


Resultater

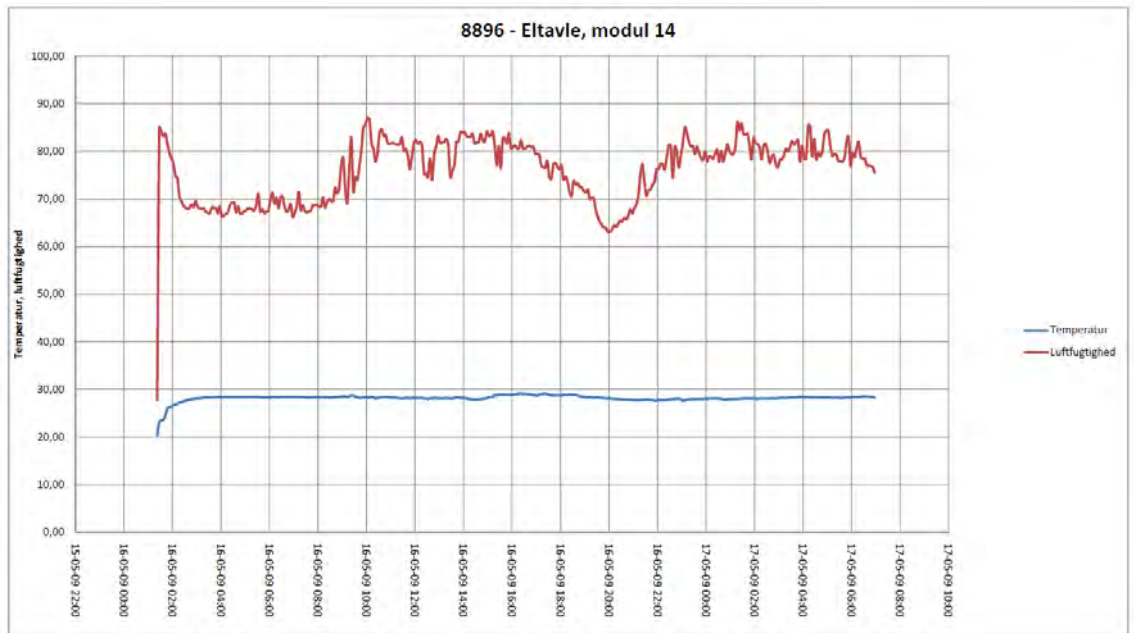
#1 – Spa 7



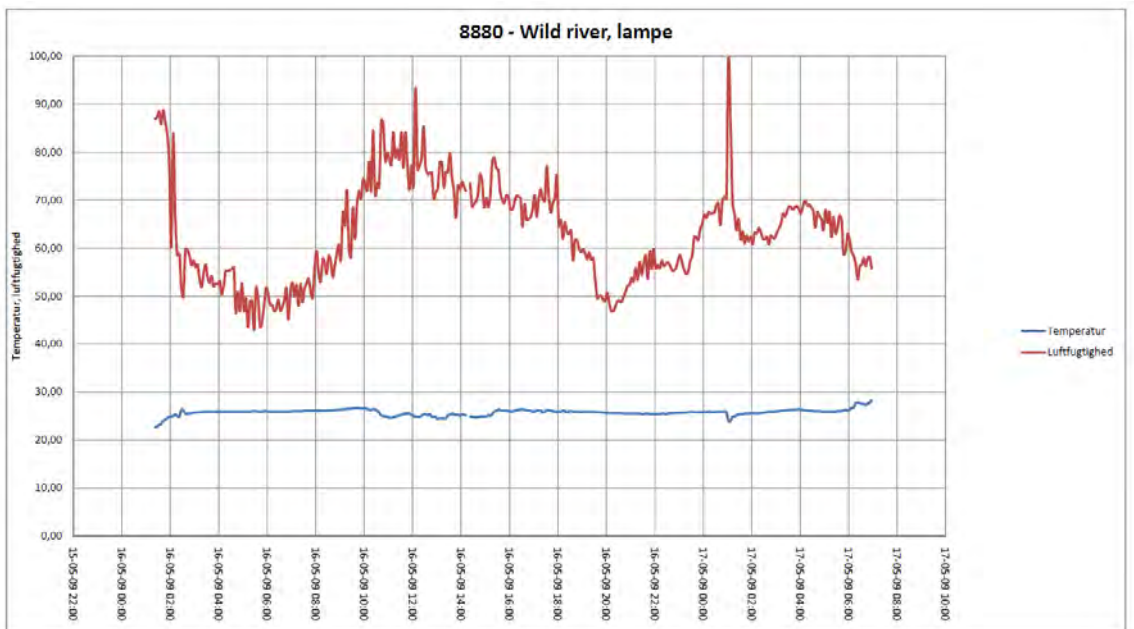
#2 – Søjle ved modul 13



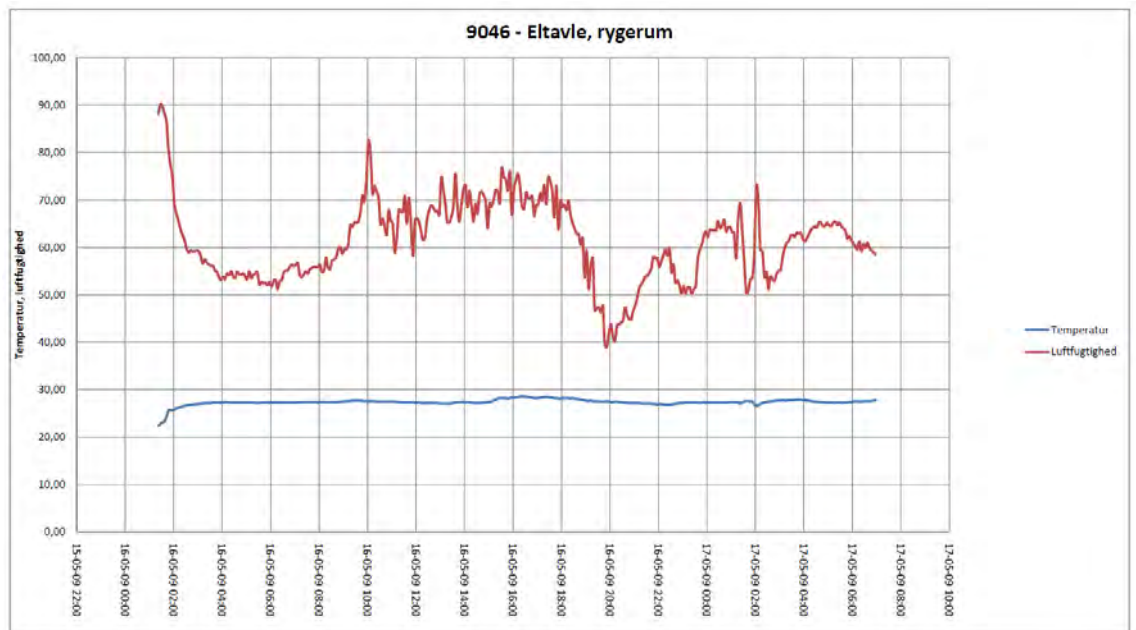
#3 – Eltavle ved modul 14



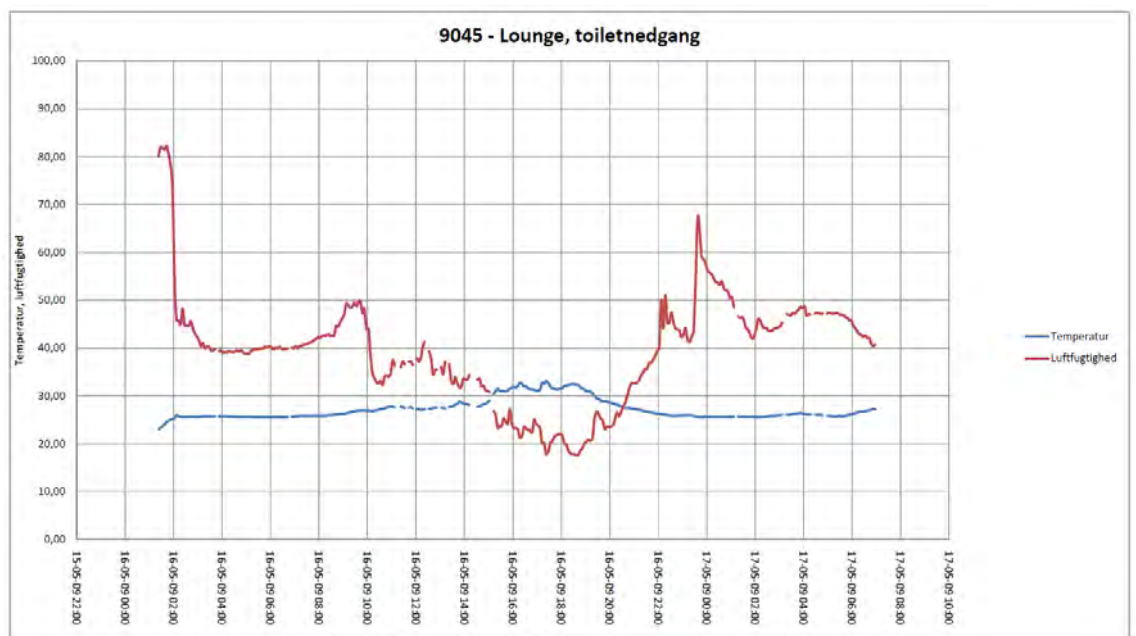
#4 – Wild River vandrutsjebane



#5 – Eltavle ved rygerum



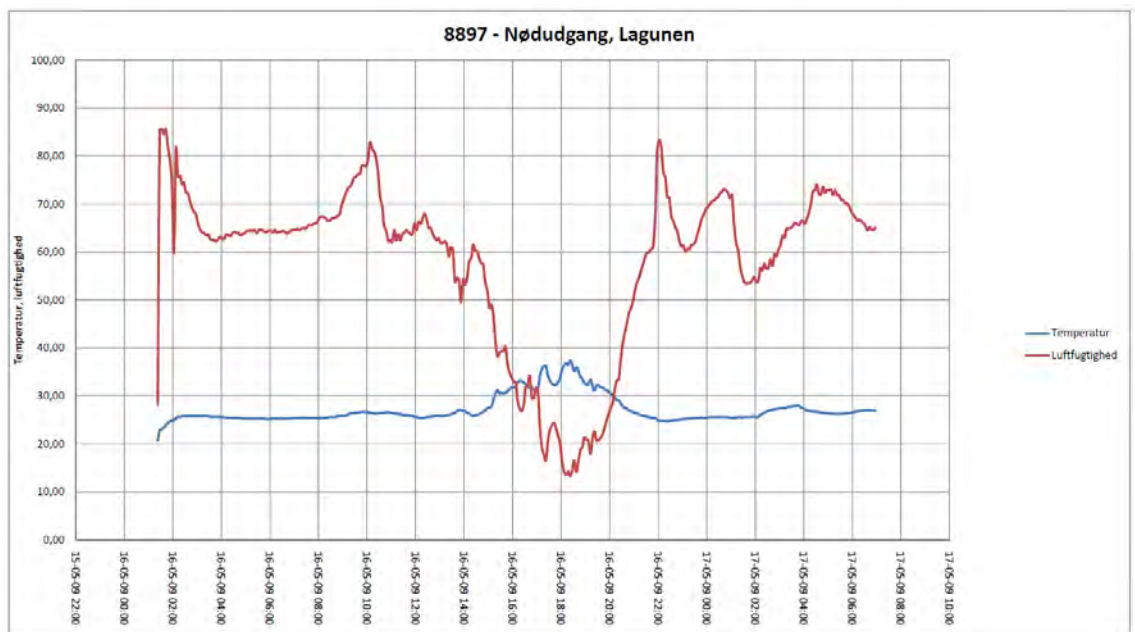
#6 – Opholdsområde



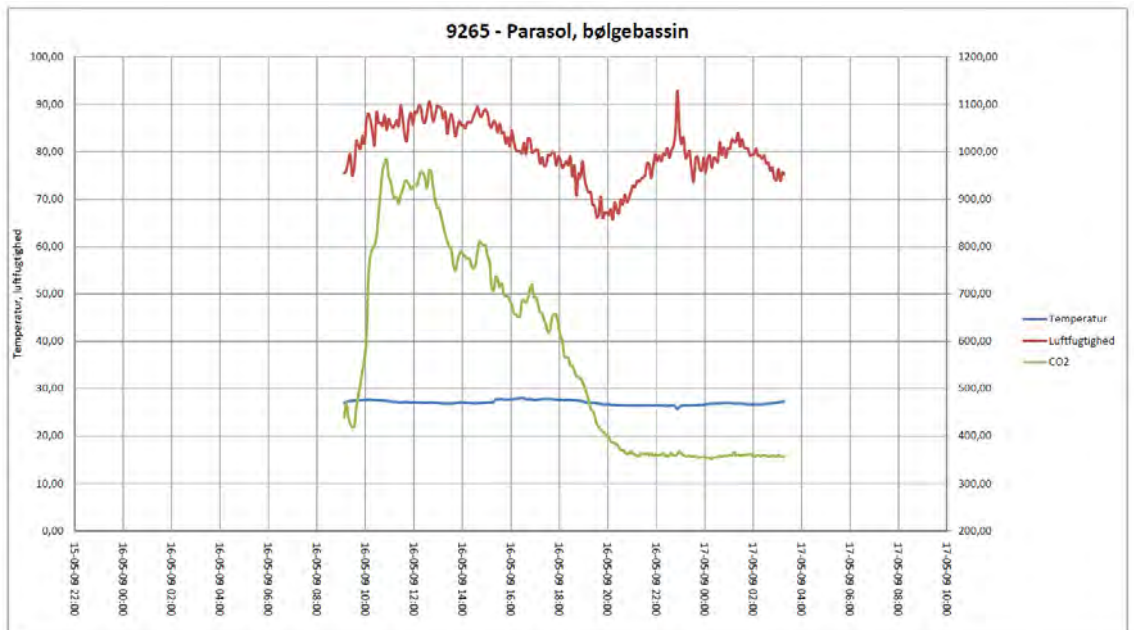
#7 – Opholdsområde ved boblebade



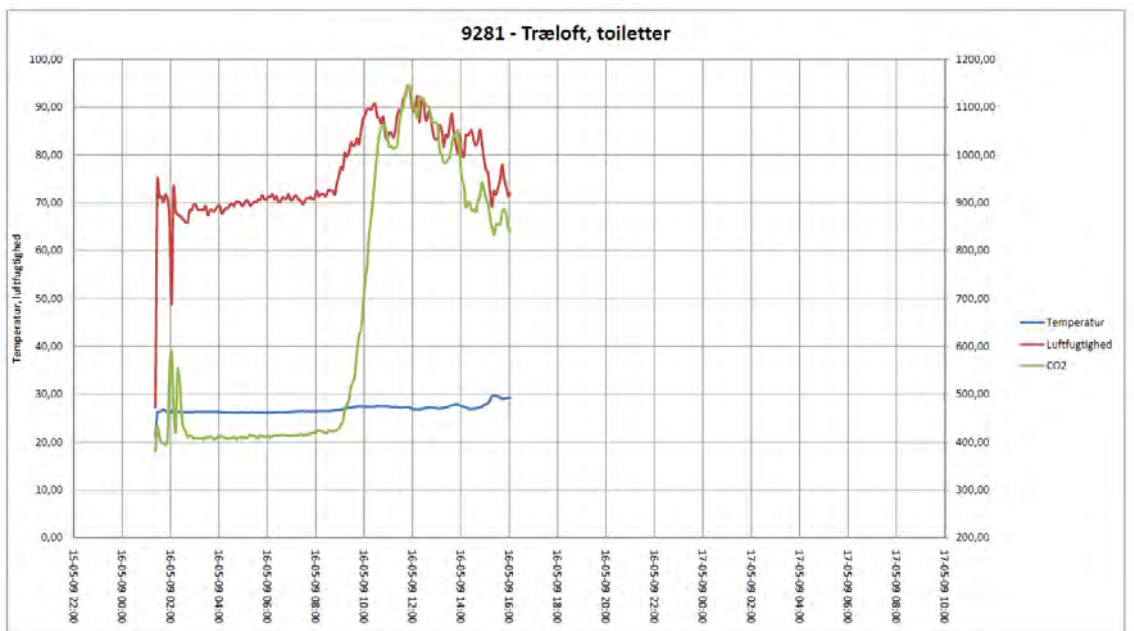
#8 – Passage ved Lagunen



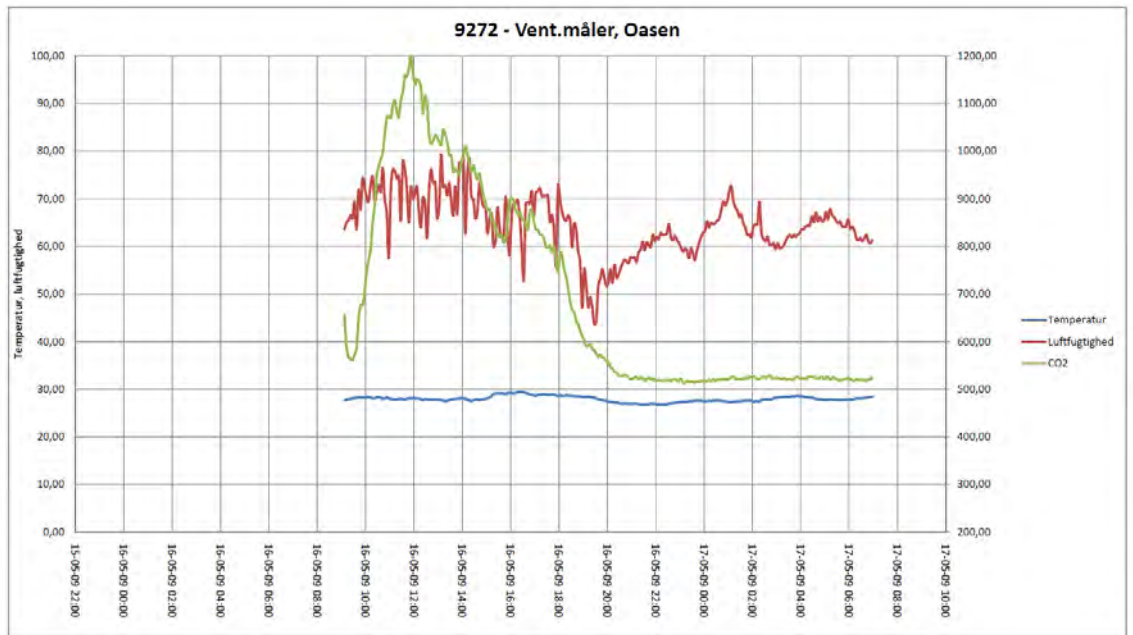
#9 – Parasol ved livredderstol



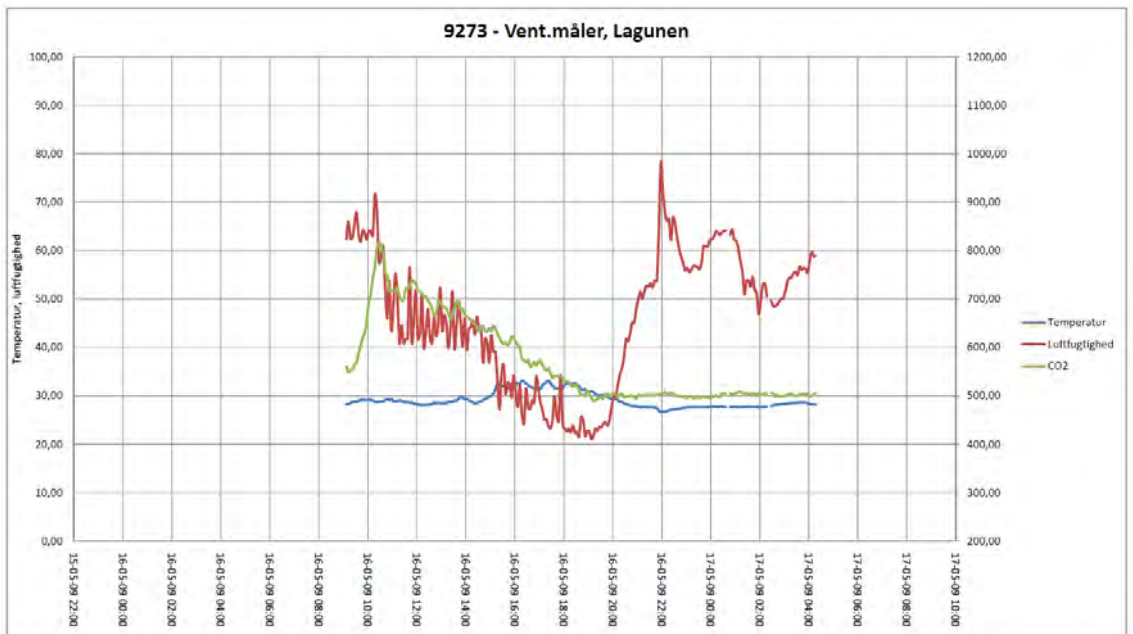
#10 – Toiletter



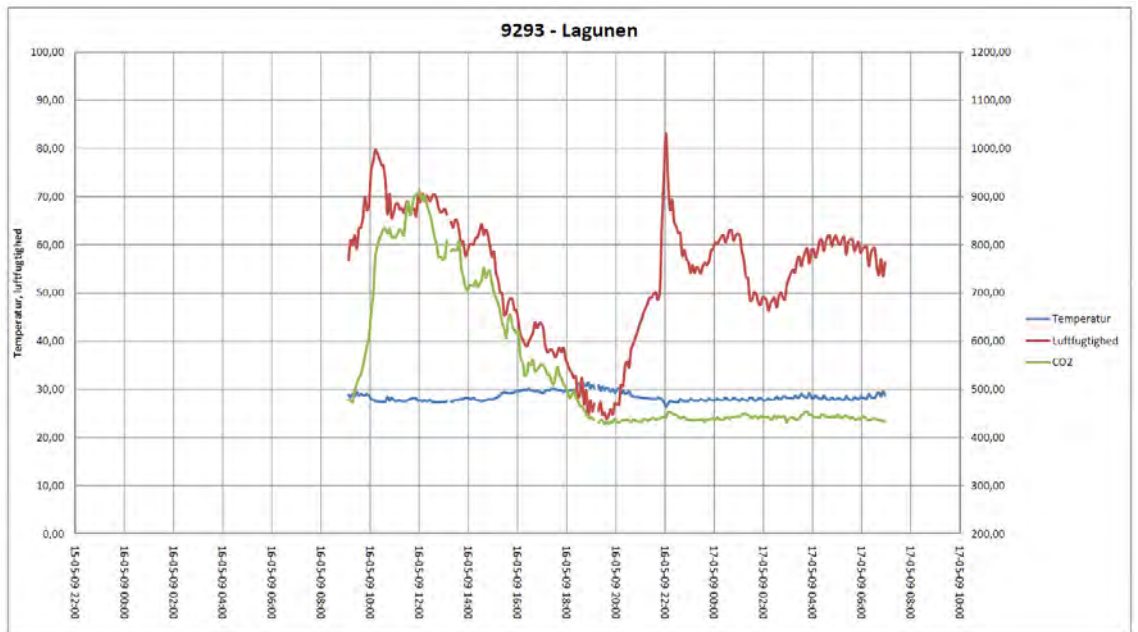
#11 – Oasen



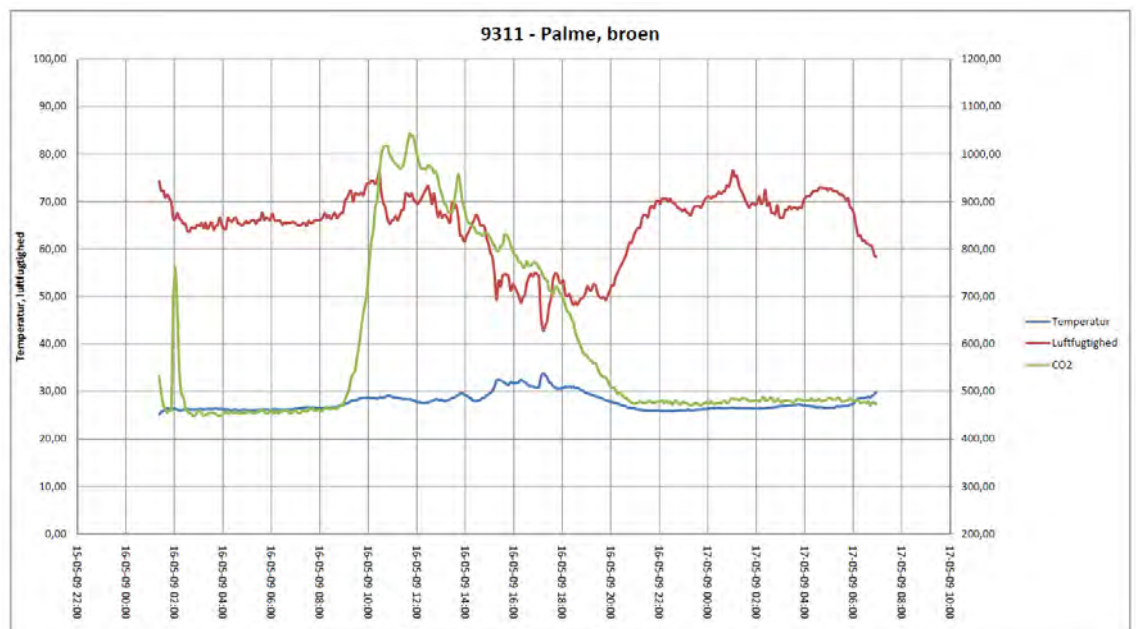
#12 – Opholdsområde ved Lagunen



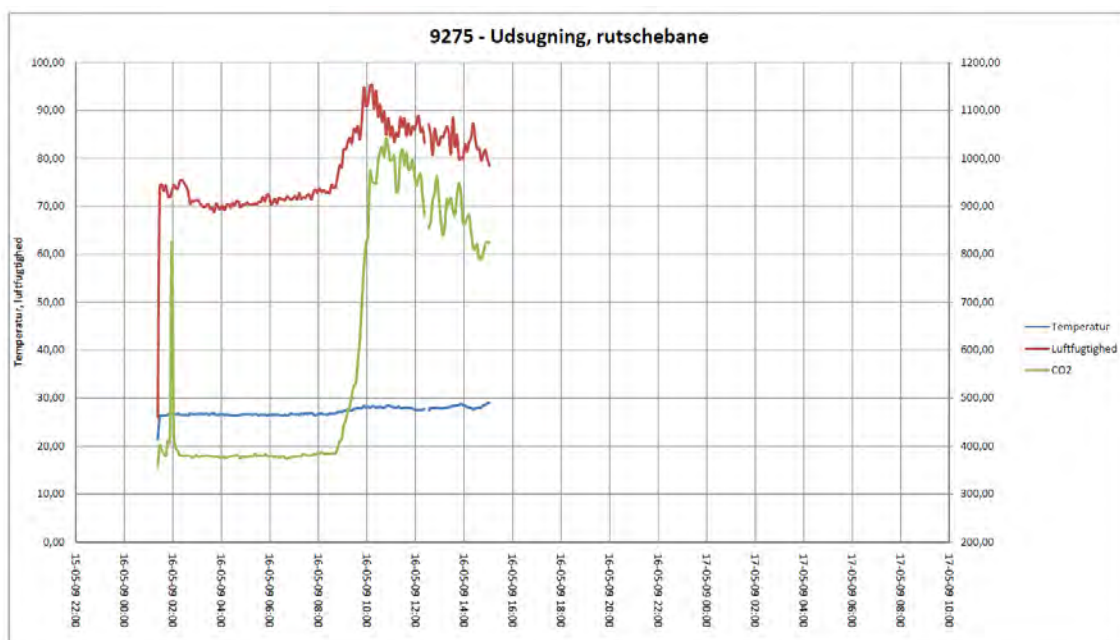
#13 – Lagunen



#14 – Livredderbroen



#15 – Udsugning ved vandrutsjebane



Temperatur

Temperaturmålingerne er generelt ganske ens for de forskellige punkter. Den målte temperatur ligger typisk lige under 30°C og med en beskedent variation. For målepunkterne 6, 7, 8, 12 og 13 der alle vender mod vest kan der ses en temperaturstigning kl. 15 og 19 på grund af solindfald.

Sammenlignes målepunkterne 10, 9, 14 og 15 placeret i hhv. 2, 3, 6 og ca. 12 m højde er der ingen lodret temperatur gradient at spore. Der er heller ingen nævneværdige forskelle rundt i badelandet og temperatur forholdene er generelt fine, men er dog generelt lidt under det ønskede setpunkt på 30°C.

Fugtighed

Fugtighedsmålingerne varierer generelt noget mere end temperaturmålingerne. Der er større variation mellem punkterne og også større tidslig variation. Nogle ligger ganske tæt på det ønskede setpunkt på 60% relativ fugtighed som fx målepunkt nr. 5, mens andre ligger noget højere, fx målepunkt nr. 2 og 10 (70-90% RH) og andre igen lavere, fx målepunkt nr. 6 (typisk 20 – 40% RH).

Da temperaturforholdene generelt er meget ens skyldes den varierende luftfugtighed lokale forhold som varierende fordampning og muligvis også forskelle i luftfordelingen.

For de tre følere der er placeret tæt på følerne til ventilationsanlæggene (nr. 1, 11 og 12) ligger fugtindholdet omkring de 60% for nr. 1 og 11, men set for nr. 12 flader hen over dagen. Det er ikke muligt at sige hvad denne forskel skyldes.

Generelt er fugtforholdene dog acceptable men det burde være muligt at opnå et mere ensartede fugtindhold ved at øge luftskiftet og evt. justere på indblæsningsarmaturerne. Det vil sandsynligvis ikke være fordelagtigt at øge luftskiftet for at opnå en jævnere fordeling af den relative fugtighed, da det vil øge energiudgifterne til ventilation og forvarmning af luften betydeligt.

CO₂ niveau

CO₂ niveauet bruges ofte til at vurdere luftkvaliteten i bygninger. For de fleste bygninger er CO₂ niveauet en god indikator – ikke fordi selve mængden af CO₂ er et problem, men fordi mængden er proportional med antallet af personer der i de fleste bygninger er den primære forureningskilde. Dette vil sandsynligvis også være tilfældet i et badeland da forureningen fra bassinerne også afhænger antallet af personer. Sammenhængen er dog ikke nødvendigvis så direkte som for almindelige bygninger, hvilket bør tages i betragtning ved tolkningen af resultaterne. Nedenfor at resultaterne af CO₂ målingerne tolket som var de foretaget i en almindelig bygning.

Generelt er de målte CO₂ niveauer fine. Kun i ganske korte perioder er CO₂ niveauet over arbejdstilsynets grænse på 1000 ppm og på intet tidspunkt er der målt CO₂ værdier på mere end 1200 ppm. På flere af målingerne ses en kraftig stigning omkring kl. 9-10 hvor badelandet åbner og herefter et jævnt fald hen over dagen. Dette fald kan skyldes at antallet af gæster er størst om formiddagen og falder i løbet af dagen. Dette er dog ikke så sandsynligt. Faldet kan også skyldes at andelen af udeluft i ventilationsluften øges henover dagen for at reducere luftens fugtindhold, hvilket stemmer med registreringerne fra CTS anlægget.

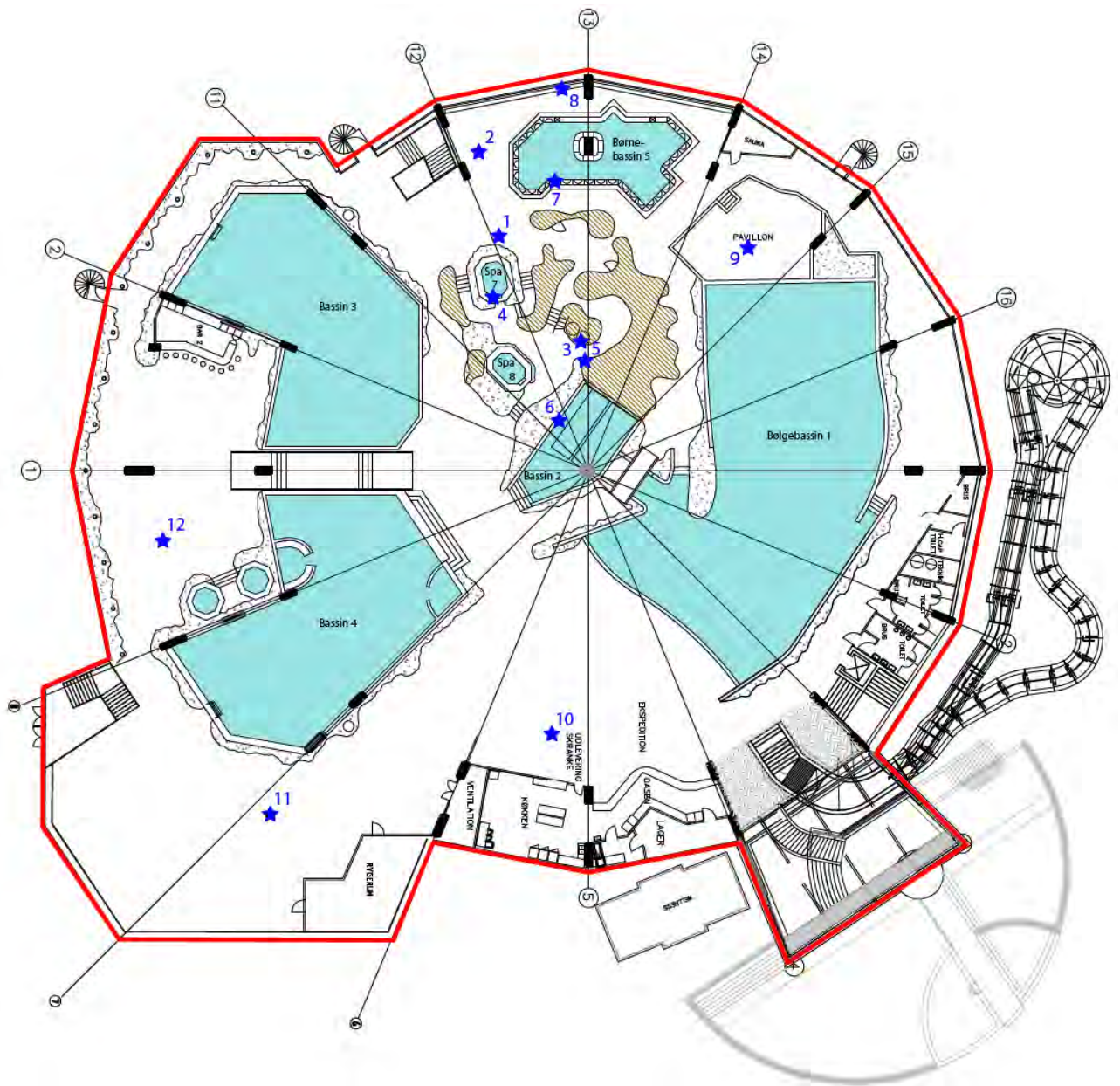
Da ventilationen ikke er styret efter CO₂ niveauet kan det ikke konkluderes at CO₂ niveauet generelt er som under måleperioden. Der vil ganske sandsynligt forekomme perioder hvor der er flere besøgende og mindre fugt i udeluften, hvilket resultere i et større behov for udeluft for at holde CO₂ niveauet nede, mens udeluftmængden reduceres for at holde luftfugtigheden på 60%. Tilsvarende vil der også være perioder hvor det modsatte gør sig gældende og CO₂ niveauet og dermed luftkvaliteten vil være bedre end under måleperioden. Det er dog sandsynligt at forureningen fra personer i et badeland inklusiv afgasning fra bassinerne er kraftigere end for typiske bygninger, hvorfor der bør opereres med lavere grænseværdier end for typiske bygninger. Det ligger dog uden for dette projekt at undersøge hvorvidt dette er tilfældet.

Sporgasmålinger

Dette kapitel indeholder en beskrivelse af sporgasmålingerne og resultaterne af disse. For præsenteres placeringen af målepunkter og dernæst gennemgås resultaterne.

Placering af målepunkter

På figuren ses en oversigtsplan over badelandet, hvor de udvalgte steder til måling af ventilationseffektiviteten er indtegnet med blå stjerner. De præsenteres herefter.



#1 - Indblæsning "ring"



r måles i begge typer indblæsningsarmaturer, der forsyner zone I omkring børnebassinet. Dette gøres dels for at kontrollere målingerne og dels for at undersøge hvordan fordelingen i tilførsel af friskluft sker mellem de to typer. På billederne ses et af de mange indblæsningsarmaturer rundt langs grotten.

#2 - Indblæsning "rand"



y
pe armatur er placeret i den bærende konstruktion og er rettet ud mod bygningens facade.

#3 - Udsugning



Ventilationseffektiviteten for et givent punkt angives relativt til udsugningen – altså forureningskoncentrationen i punktet målt mod den koncentration, der suges ud. Der er derfor målt i den store udsugning øverst i grotten.

#7 - Børnebassin



Bassinet ved grotten er et velbesøgt opholdsområde for familier og børn. Dette gør det interessant at måle ved bassinkanten. Der er målt i en højde, der svarer til indåndingszonen for en siddende voksen ved bassinkanten.

#8 - Børnebassin ved vindue



Rundt om børnebassinet er der rig mulighed for at sidde ved borde eller bænke. De mange mennesker koncentreret i området, gør dette opholdsområde interessant at undersøge. Der er udvalgt en bänk til måling i indåndingszonen for en siddende voksen.

#9 - Pavillon



I umiddelbart nærhed af børnebassinet er der mulighed for at sidde og/eller spise i pavillonen. Luftkvaliteten undersøges ved et af de mange borde.

#5 - Udsugning ved rutschebane



Der foretages måling ved en af de mange små udsugninger langs bygningens tagkonstruktion. Det sker dels for at måle på udsugningen fra et andet system end den store udsugning og dels for at finde ventilationseffektiviteten øverst oppe under taget samt tæt ved rutschebanernes platform, hvor der er mange mennesker.

#6 - Livredderbroen



Som en del af den fokus på indeklimaet for de ansatte på arbejdsstationerne, er det valgt at måle på livredderbroen. Der er udvalgt et sted, hvor det er sandsynligt, at der vil være aktivitet og der måles i en højde svarende til indåndingszonen for en voksen.

#4 - Spa ved grotten



I boblebadene er der megen aktivitet af den stillesiddende slags. Der er ofte flere mennesker samlet her og idet boblebadene samtidig er integreret i klippeformationen, er det interessant at undersøge, hvor effektivt luften udskiftes her.

#10 - Oasen (Zone II)



For at undersøge hvor meget af luften der strømmer fra den målte zone I til de andre 3 zoner, måles forekomsten af sporgas i disse. Ved det store opholdsområde med borde og stole foran Oasen måles der for at finde den eventuelle interaktion med anlæg 2.

#11 - Spiseområde (ved ryge rummet)



Ved bassin 4 tæt på rygerummet måles den eventuelle interaktion med anlæg 2 og 3.

#12 - Spiseområde ved Lagunen



I opholdsområdet ved Lagunen og de 2 øvrige boblebade måles den eventuelle interaktion med anlæg 3 og 4.

Resultater – sporgasmåling

Ved sporgasmålingerne blev der tilsat sporgas til indblæsningsluften og koncentrationen i udsugning er så sammenlignet med koncentrationen i de punkter hvor der er målt. Ved fuld opblanding som oftest tilstræbes vil koncentrationen være den samme i hele badelandet og dermed vil ventilationsindekset være 1 for alle punkter - for udsugningen vil indekset altid være 1.

Ventilationsindekset er beregnet som udsugningskoncentrationen divideret med den lokale koncentration – dvs. at et indeks under én indikerer dårligere luftkvalitet end generelt i rummet og et indeks større en én indikerer en bedre luftkvalitet end generelt i rummet.

For målingerne udført i badelandet er det dog lidt mere kompliceret. Dels er der fire ventilationsanlæg og zoner i badelandet og dels viste det sig efter målingerne var udført at sporgassen kun var tilført den del af indblæsningen fra ventilationsanlæg 1 der ventilerede området omkring børnebassinet. På billedet nedenfor er den ring hvor sporgassen blev tilført markeret. Som det kan ses gennem den fjernede ventilations låge er sporgassen tilført lige før den ventilationskanal der leverer luft til området omkring børnebassinet.

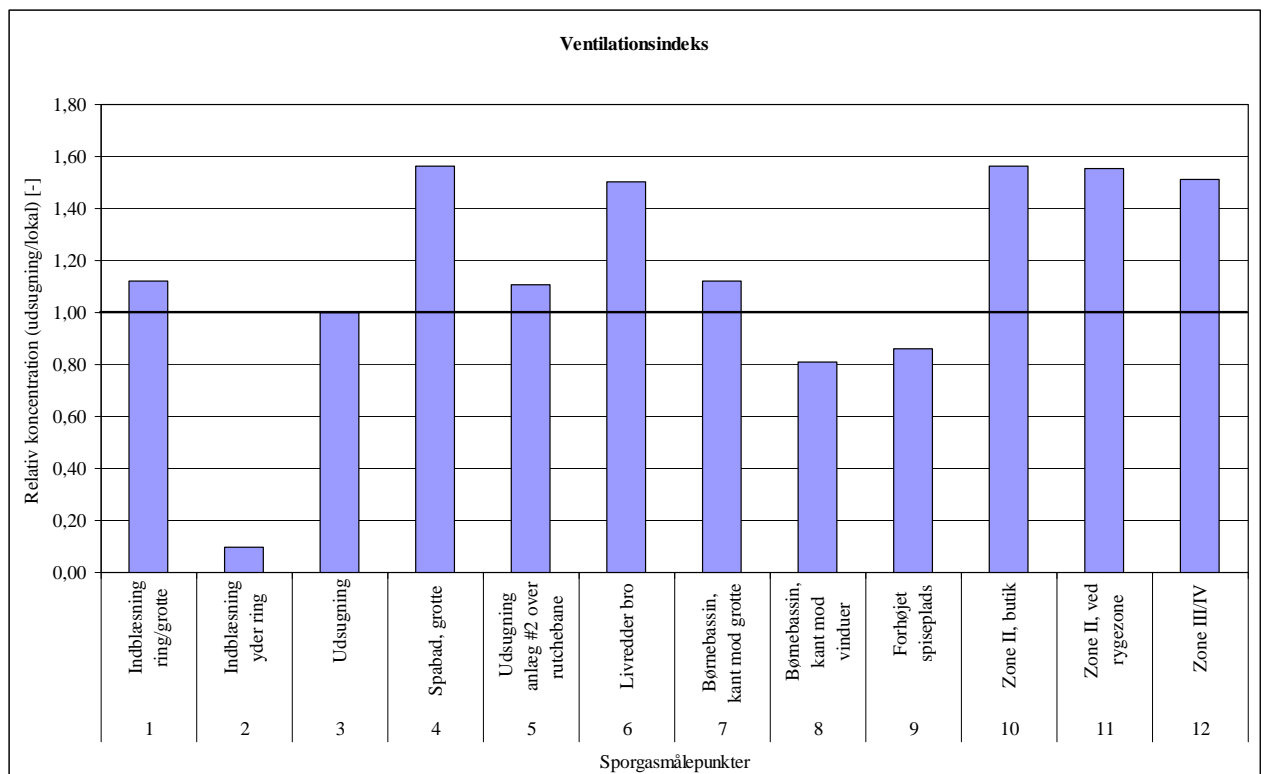


Dette kan også ses af ventilationsindeks nr. 1 og 2. Disse er begge indblæsning hvor der burde være tilsat sporgas hvilket skulle resultere i en meget lav værdi som for nr. 2. For nr. 1 er koncentrationen lavere i indblæsningen end den er i udsugning. Grunden til at koncentrationen i indblæsningen er tæt på koncentrationen i udsugningen er at luften recirkuleres.

For målingerne ved børnebassinet (punkt 8) og pavillonen (punkt 9) er indekserne under én, hvilket indikerer dårlig oplanding og dermed dårligere luftkvalitet. Men da der kun er tilsat sporgas til en mindre del af luften fra ventilationsanlæg 1 og koncentrationen i udsugningen derfor består dels af luft med høj koncentration og dels af luft med lav koncentration er det forventeligt at indekserne vil være under én. Det kan på baggrund af sporgasmålingerne derfor ikke konkluderes at luftkvaliteten ved børnebassinet og pavillonen skulle være dårligere end i resten af badelandet. For målepunkt 7 ligeledes ved børnebassinet er indekset over én hvilket indikerer at luftkvaliteten er bedre end gennemsnitligt. Dette sammen med de ovenfor beskrevne forhold vedrørende fordelingen af

sporgassen indikerer at luftkvaliteten på den ene side af børnebassinet er noget over gennemsnittet.

For de øvrige målepunkter er ventilationsindekset ganske ens (ca. 1,5). Ideelt set burde koncentrationen i disse punkter være tæt på 0, da luften skulle komme fra andre ventilationsanlæg en anlæg 1. At dette ikke er tilfældet indikerer at der sker en kraftig opblanding af luft mellem de forskellige ventilationszoner. I praksis betyder dette at en forurening i én zone hurtigt vil sprede sig til de øvrige, hvilket ikke er hensigtsmæssigt. Så længe der ikke er problemer med luftkvaliteten i zonerne er opblandingen mellem zonerne ikke noget problem.

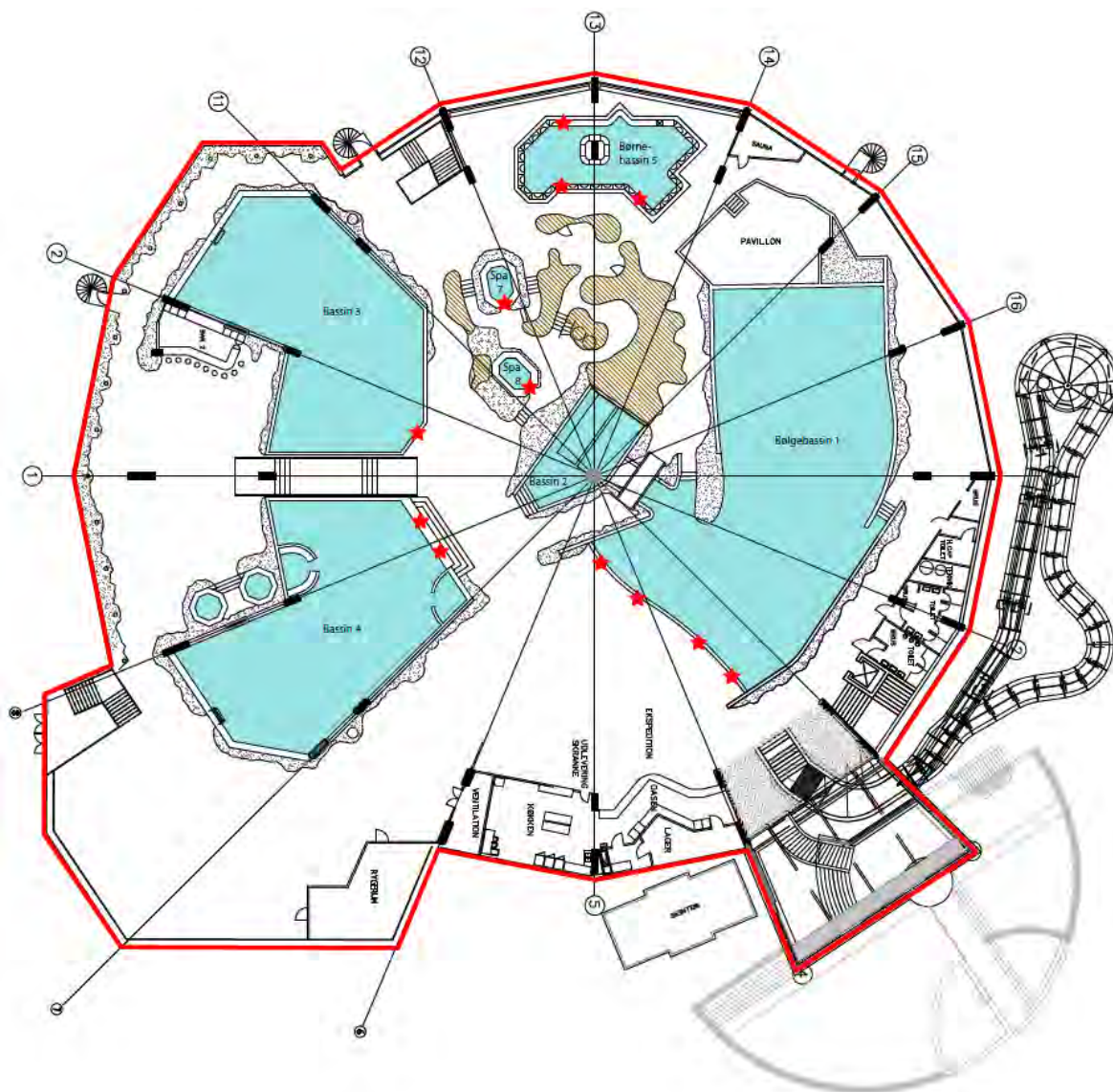


Hastighed

Såvel som temperaturforskellen mellem bassinets vand og den omgivende lufttemperatur, har lufthastigheden ved vandoverfladen betydning for den afgasning af klorforbindelser, der sker fra bassinet. I det følgende præsenteres hastighedsprofilerne, der er målt ved kanten af en række af Lalandias bassiner og spaer. Resultaterne præsenteres sammen med placeringen og kapitlet afsluttes med et afsnit, hvor der samles op på resultaterne.

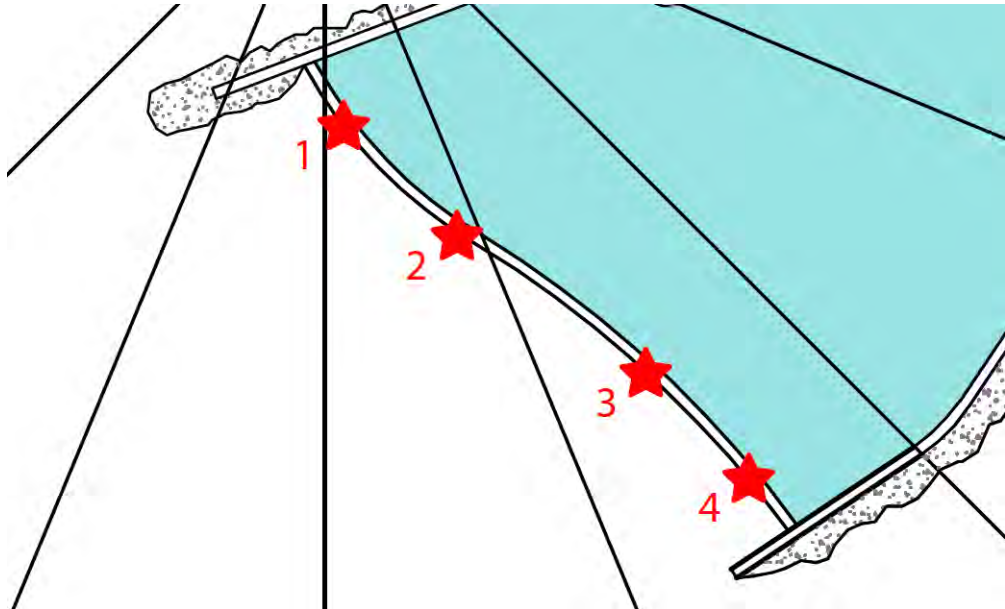
For alle resultaterne gælder at placeringen af følerne i højden er givet i forhold til vand-spejlet og ikke i forhold til bassinkanten. For de fleste positioner er der målt fem profiler ved hver måleposition.

På figuren ses en oversigtsplan over badelandet, hvor de udvalgte steder til måling af lufthastigheden er indtegnet med røde stjerner. Målingerne præsenteres fra bassin nr. 1 og med uret rundt (Bassin nr. 1, 4, 3, 8, 7 og 5)



Bølgebassin

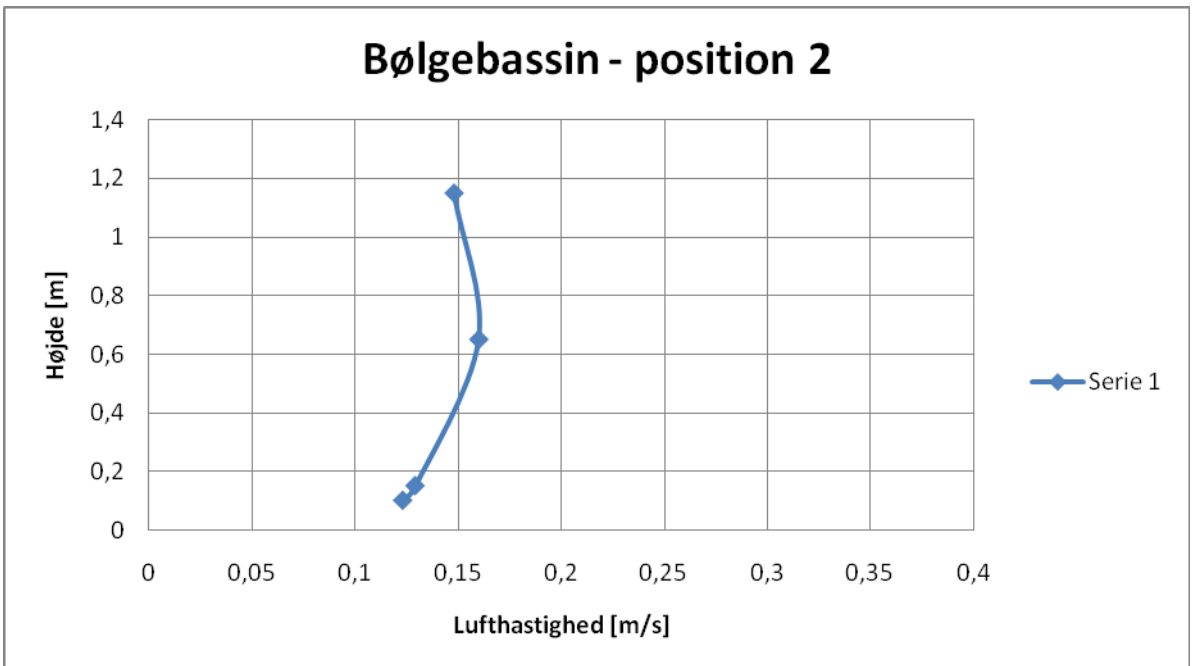
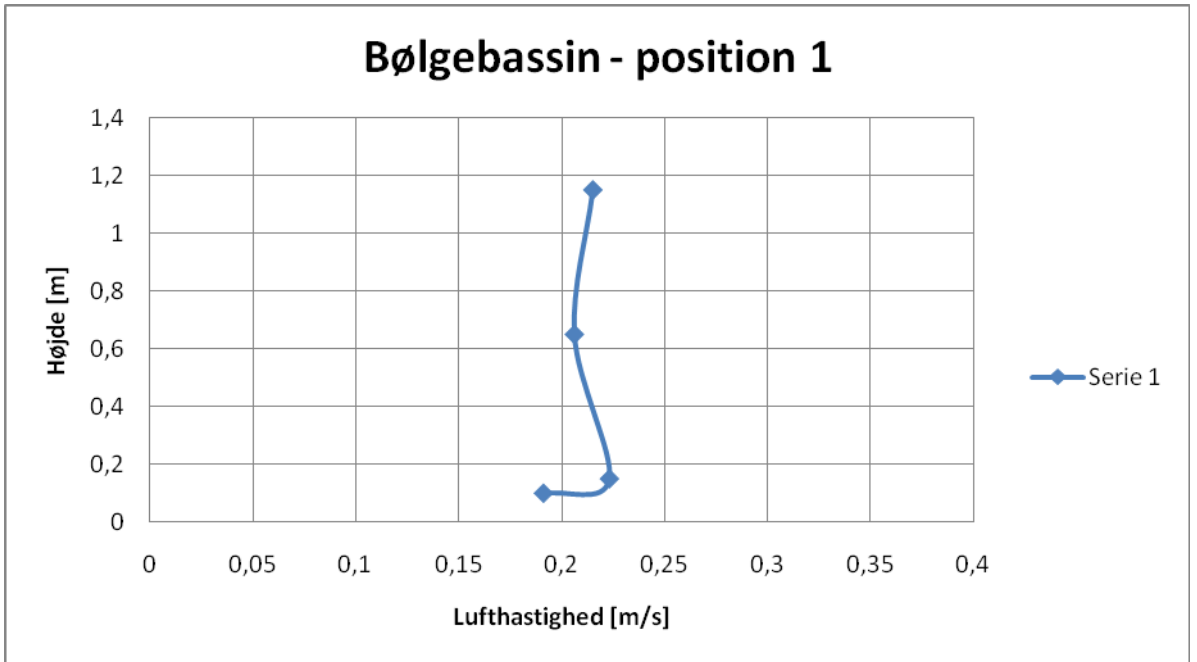
Bølgebassinet er Lalandias største bassin og et åbenlyst valg til undersøgelse af lufthastighed over vandoverfladen. På figuren er de fire målte positioner nummereret.



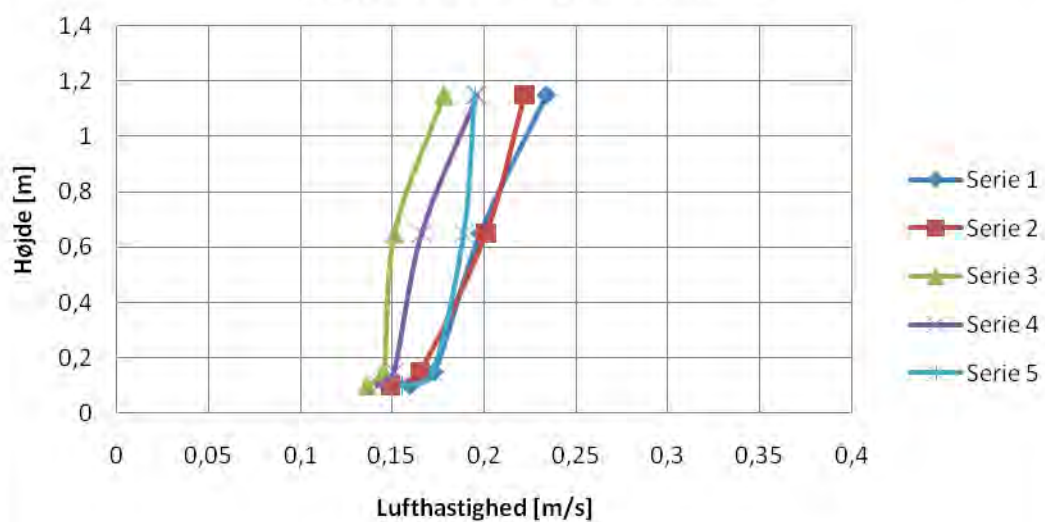
Billeder fra opstillingen:



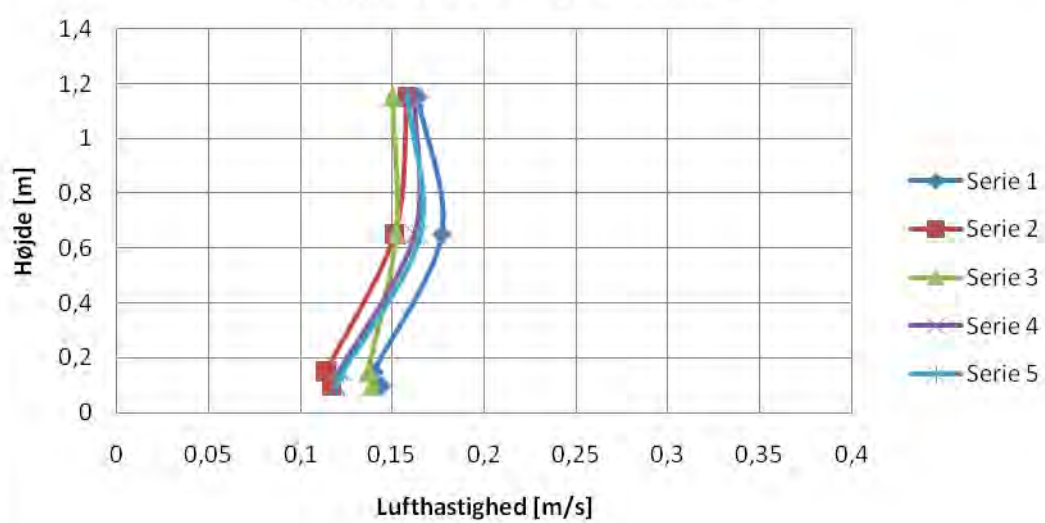
Hastighedsprofiler:



Bølgebassin - position 3

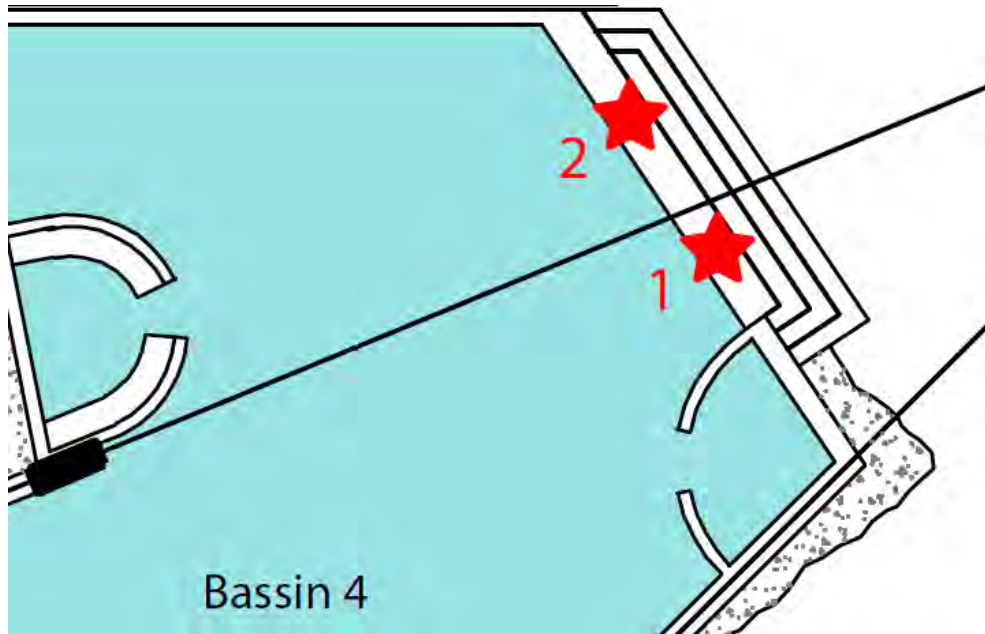


Bølgebassin - position 4



Bassin 4

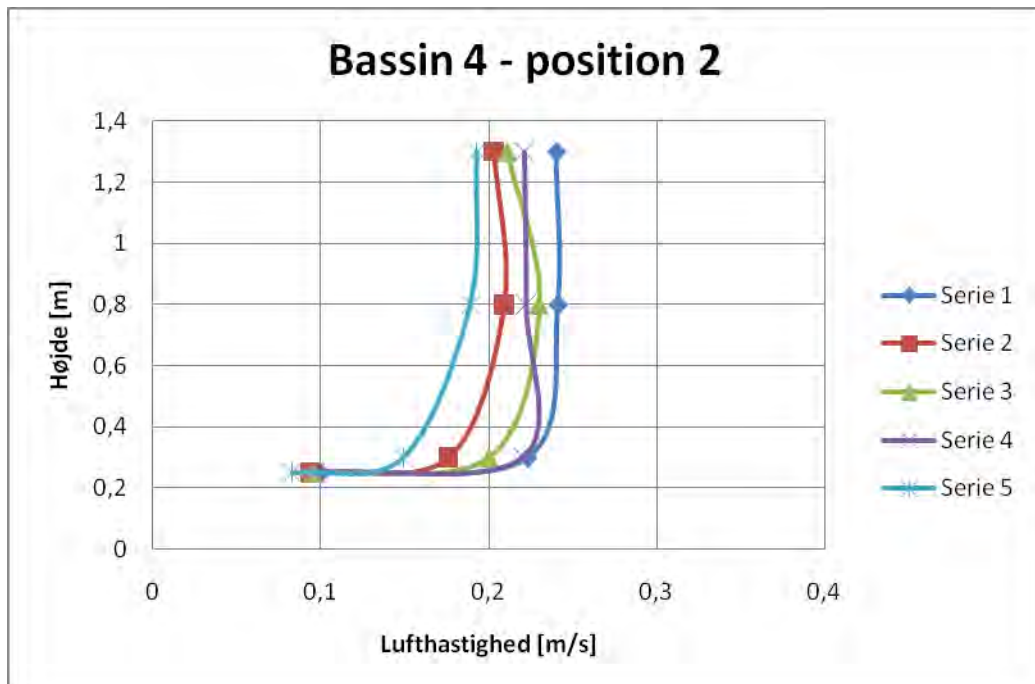
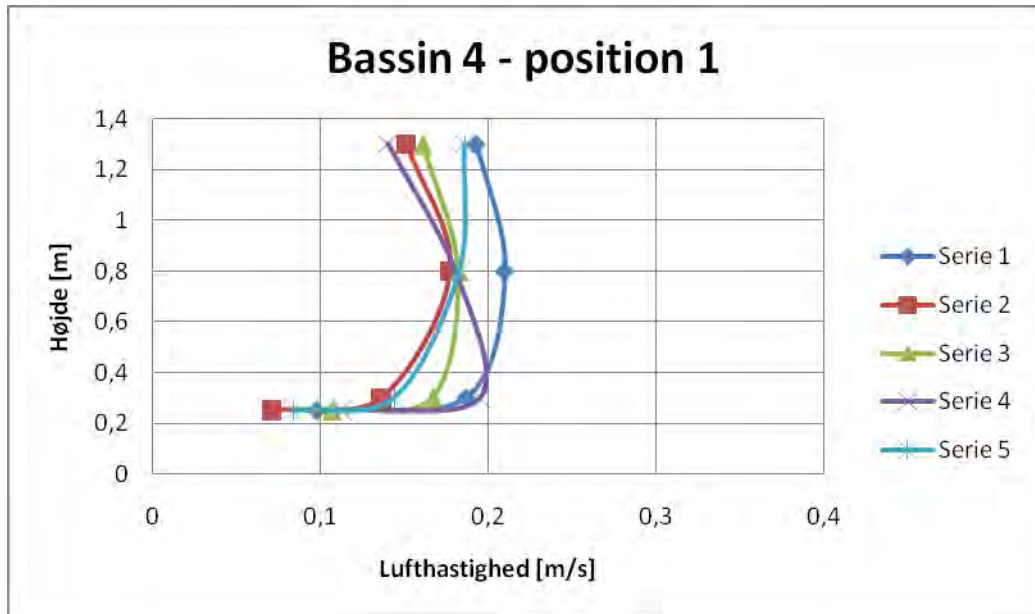
Bassin 4 er bassinet med grotte, sten og palmer samt knap så højt til loftet. Måling af lufthastigheden er foretaget på den brede trappeopgang til bassinet, som vist på figuren.



Billeder fra opstillingen:

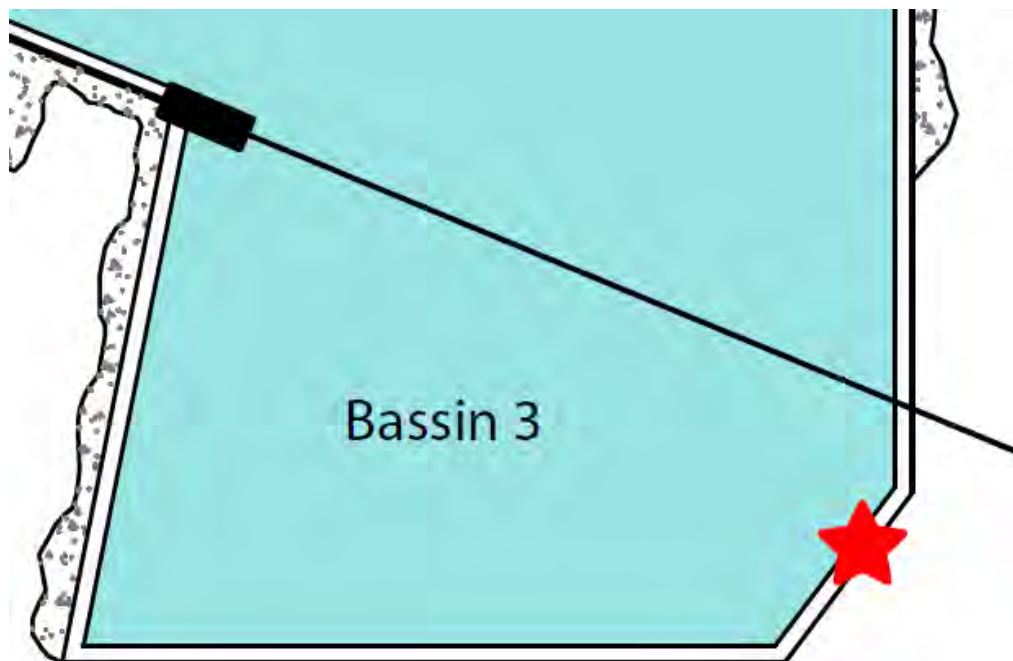


Hastighedsprofiler:

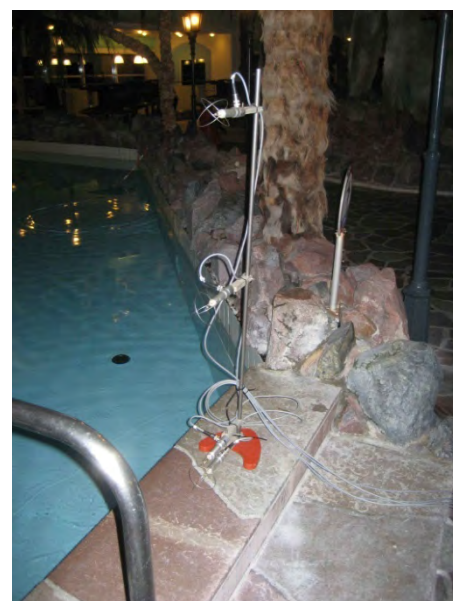


Bassin 3

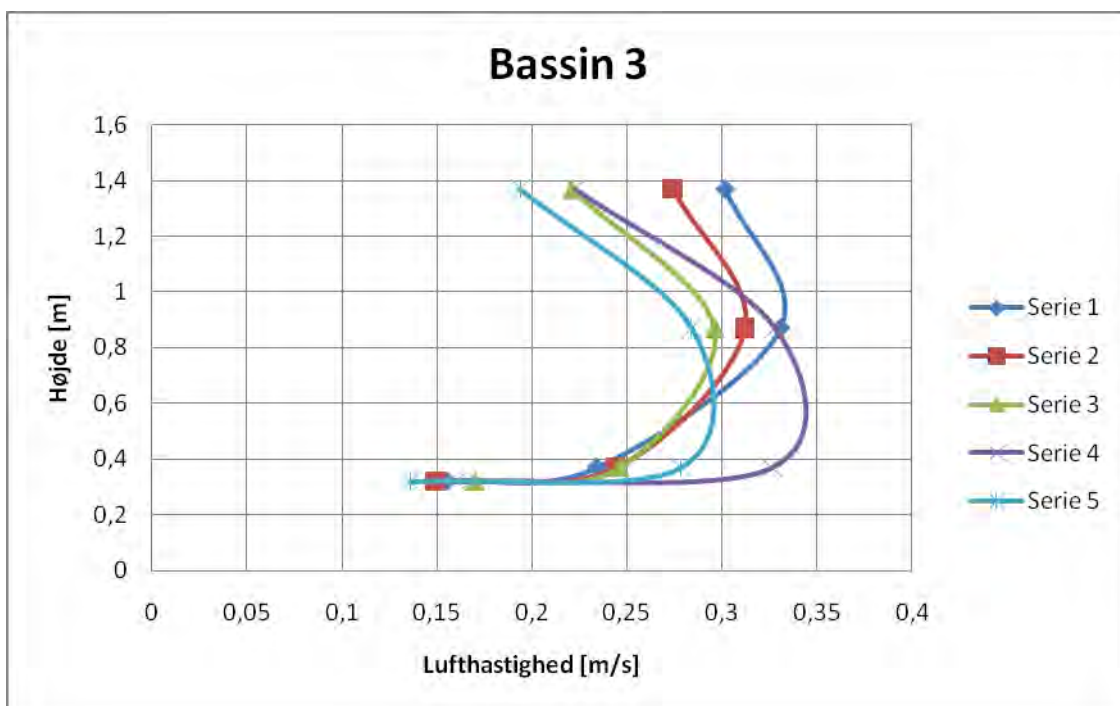
Bassin 3 minder en del om bassin 4, men området er mere åbent. Måling af lufthastigheden er tilsvarende foretaget ved opgangen til bassinet, som vist på figuren.



Billeder fra opstillingen:

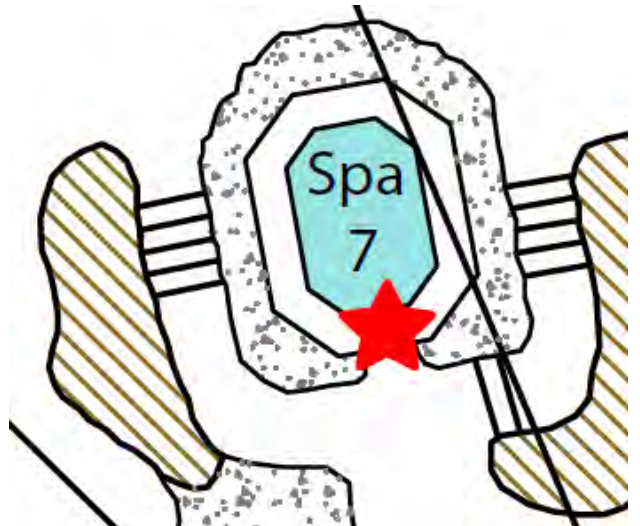
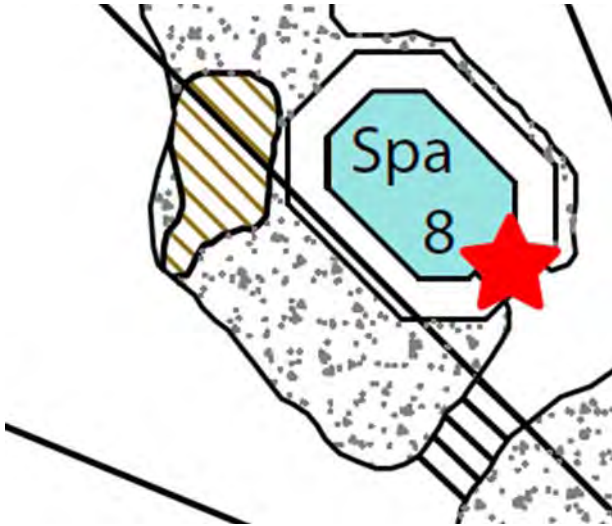


Hastighedsprofil:



Spa

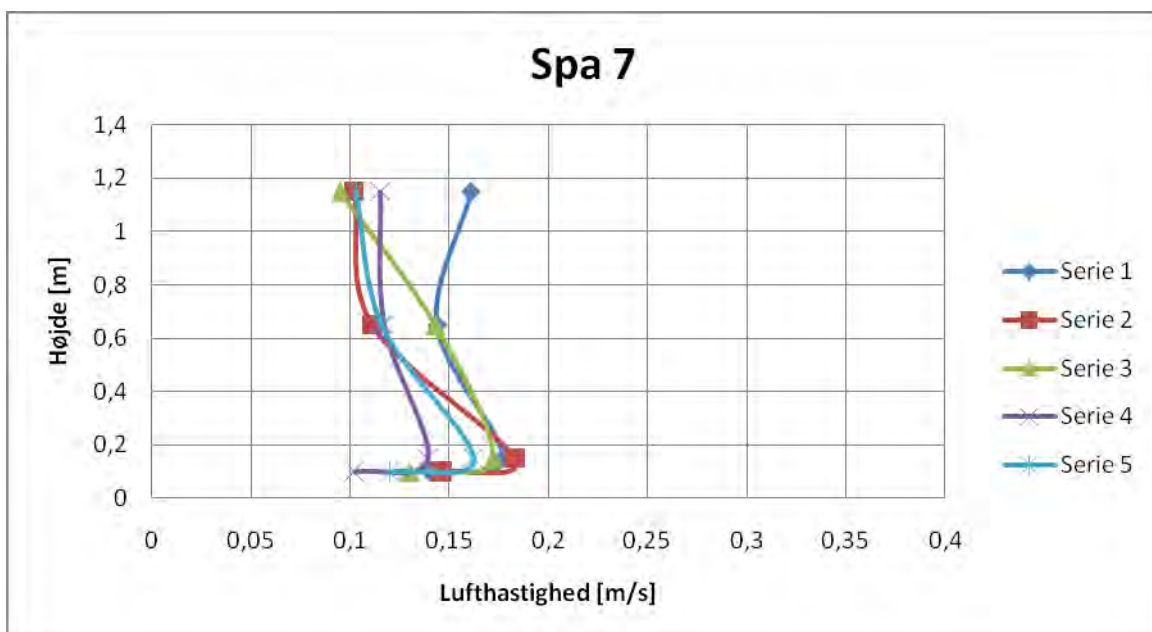
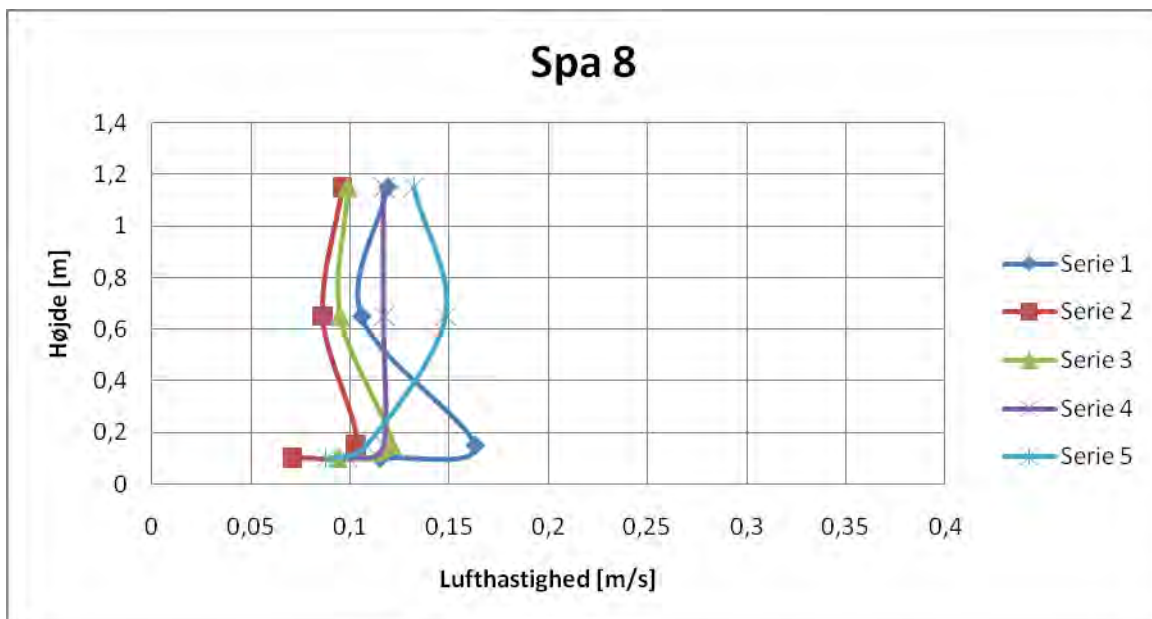
I den store grotte ligger spa 8 og 7 placeret. Der er foretaget hastighedsmålinger ved begge indgange, som vist på figuren.



Billeder fra opstillingen:

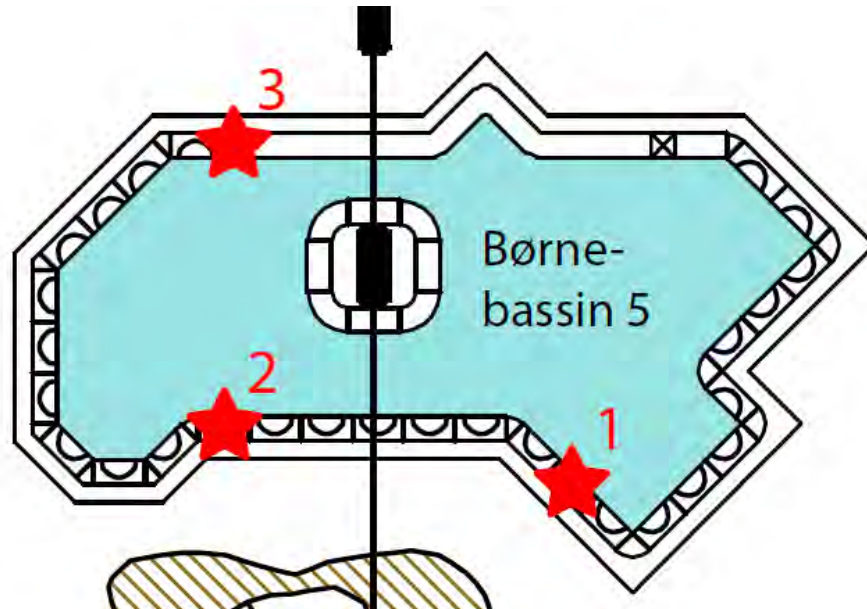


Hastighedsprofiler:



Børnebassin

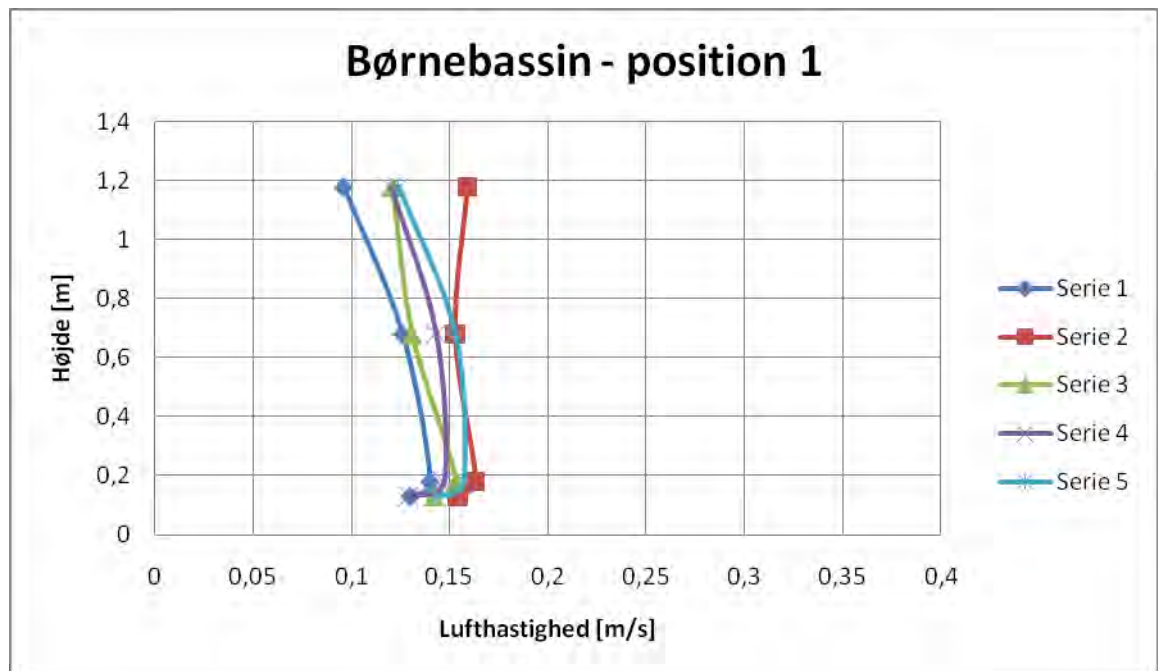
Ved børnebassinet er der målt tre steder langs kanten. Disse er vist på figuren. Målepunkt nr. 2 er placeret samme sted som hvor der blev målt sporgas og målepunkt nr. 3 er placeret så tæt på målingerne af sporgas og indeklima som muligt.

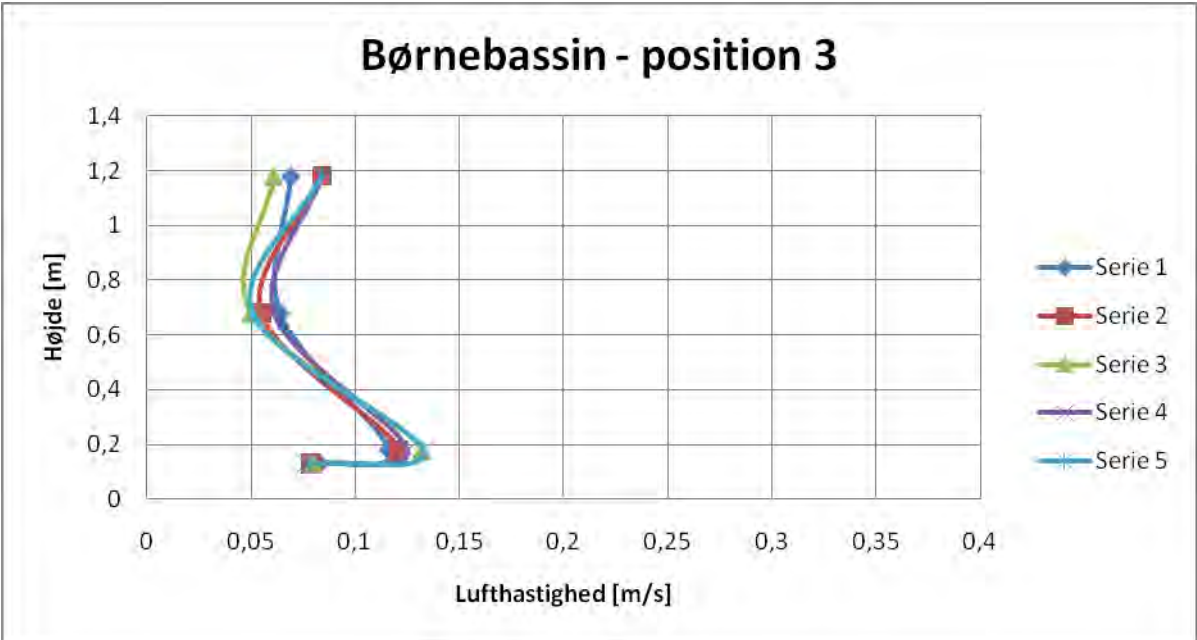
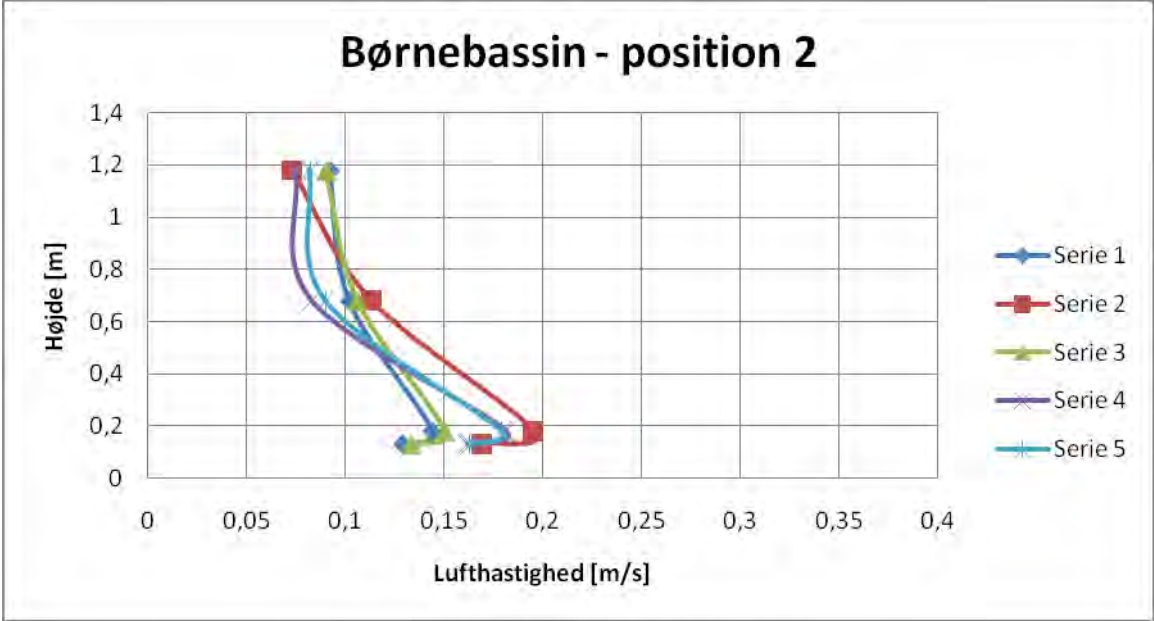


Billeder fra opstillingen:



Hastighedsprofiler:





Resultater

Generelt er de målte hastigheder lave. Langt de fleste ligger inden for det normale komfortinterval for at undgå træk (0 – 15 cm/s). På trods af den generelt lave hastighed vil der dog være risiko for at de badende kan opleve træk da de er mere eksponerede på grund af meget begrænset beklædning.

Den målte maksimale hastighed for de forskellige bassiner er vist i nedenstående tabel. Almindelig gang foregår typisk men en hastighed på 4 km/t svarende til ca. 1,1 m/s. Derfor vil lufthastighederne ved bassinerne i åbningstiden typisk være styret af personernes bevægelse rundt ved bassinerne.

	Maksimal hastighed [m/s]
Bassin 1	0,23
Bassin 3	0,33
Bassin 4	0,24
Bassin 5	0,19
Bassin 7	0,18
Bassin 8	0,16

For børne bassinet (nr. 5) hvor der blev målt hastigheder på begge sider af bassinet viser målingerne stort set samme hastighed og der er ingen grund til at formode at lufthastigheden over bassinet skulle være højere end langs kanten af bassinet.

Det kan derfor formodes at aktiviteterne i bassinerne ofte vil have en ret stor indflydelse på luft bevægelserne og dermed hastighederne tæt på vandet.



Miljøministeriet
By- og Landskabsstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

Telefon 72 54 47 00
blst@blst.dk
www.blst.dk