

Udvikling og afprøvning af svømmebadsvandteknologi til energieffektiv reduktion af THM og partikulært organisk stof

2016



Titel: Udvikling og afprøvning af svømmebadsvandteknologi til energieffektiv reduktion af THM partikulært organisk stof

Projektgruppe:
Ultraaqua A/S
DHI
Gladsaxe Svømmehal

Udgiver:

Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning
Haraldsgade 53
2100 København Ø

Redaktion [evt. fotos og illustrationer]:

Ole Grønborg, Ultraaqua A/S
Gert Holm Kristensen, DHI
Morten Møller Klausen, DHI

www.svana.dk

År:

2016

ISBN nr.

978-87-7175-597-8

Ansvarsfraskrivelse:

Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning offentliggør rapporter inden for vandteknologi, medfinansieret af Miljøministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	5
1. Indledning	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Projektets gennemførelse	9
2. Forsøgsbeskrivelse	10
2.1 Teknologibeskrivelse	10
2.1.1 Tromlefilterteknologi	10
2.1.2 Luftstrippingsteknologi	11
2.1.3 Måling af Partikler	12
2.1.4 Måling af flygtige biprodukter med Membran Inlet Massespektrometri (MIMS)13	
2.2 Gladsaxe svømmehal – varmtvandsbassin	14
2.2.1 Drift af måling og styring.....	14
2.3 Oversigt over teknologiafprøvningen.....	16
3. Resultater og diskussion	17
3.1 Undersøgelse af tromlefilterteknologi	17
3.1.1 Databearbejdning og fortolkning	17
3.1.2 Resultater og diskussion af resultater fra filtreringsforsøg	19
3.2 Undersøgelse af luftstrippingsteknologi	25
3.2.1 Udvikling af modelværktøj til analyse af måledata fra undersøgelse af luftstrippingsteknologi	25
3.2.2 Forsøgsplanlægning med baggrund i ligevægtsberegninger	27
3.2.3 Resultater af gennemførte undersøgelseskampagner og modellering af måledata for luftstrippingsteknologi	29
4. Konklusioner	37
5. Litteratur	39

Forord

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet ”Udvikling og afprøvning af svømmebadsvandteknologi til energieffektiv reduktion af THM og partikulært organisk stof”, der er gennemført med tilskud fra Miljøministeriet i perioden 2012-2015.

Projektgruppen har bestået af:

Ultraaqua A/S

DHI

Gladsaxe Svømmehal

Ultraaqua A/S har været projektholder og projektleder og har haft ansvar for kommunikation med Naturstyrelsen (fra 1. juli 2016 Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning). Ultraaqua A/S har desuden varetaget konstruktion, installering og indkøring af de teknologienheder, der har været afprøvet i projektet, og har derudover medvirket ved udarbejdning af forsøgsplaner målrettet mod afdækning af de teknologikarakteristika, der er vigtige i forhold til dimensionering og optimering.

Sammenfatning

Ved anvendelsen af klor til desinfektion af svømmebadsvand sker der en dannelse af klorerede desinfektionsbiprodukter ved klors reaktion med stoffer i vandet hidrørende fra badegæsterne. To af biprodukterne er reguleret i den danske bekendtgørelse for offentlige svømmebade: Bundet klor og THM. De forureninger, der tilføres bassinvandet fra de badende, vil være på både partikulær og opløst form og skal så vidt muligt fjernes, inden de bidrager væsentligt til dannelse af yderligere biprodukter. Opgaven for vandbehandlingssystemet i et svømmebad er således at fjerne tilførte forureningskomponenter og dannede klorerede biprodukter så hurtigt som muligt, så koncentrationen af disse i bassinvandet er så lav så muligt og til enhver tid opfylder de lovbestemte vandkvalitetskrav.

Projektet har omhandlet afprøvning og dokumentation af to vandbehandlingsteknologier til energieffektiv forbedring af vandkvaliteten i svømmebade. Den ene teknologi er et energieffektivt tromlefilter til hurtig fjernelse af partikler fra svømmebadsvandssystemet. Ved denne teknologi fjernes partikler tilført svømmebadsvandet fra de badende fra hele vandssystemet i modsætning til den konventionelle sandfilterløsning, hvor partiklerne fjernes fra vandet, men akkumuleres i filtrene til næste returskyl. I denne periode bidrager det partikulære materiale til klorforbrug samt dannelse af biprodukter, der frigives til svømmebadsvandet. Samtidig er tromlefilterløsningen langt mere energieffektiv og vandbesparende end den konventionelle sandfilterløsning. Ud over tromlefilteret er der i undersøgelsen indgået afprøvning af en luftstrippingsteknologi til fjernelse af flygtige klorbiprodukter som eksempelvis THM (trihalomethaner) og trikloraminer. Ved anvendelse af denne teknologi fjernes disse uønskede biprodukter kontrolleret og løbende fra svømmebadsvandet, hvorved vandkvaliteten forbedres. Samtidig opnås et forbedret indeklima i svømmehallen, da frigivelsen af de uønskede flygtige biprodukter til luften over svømmebadsvandet reduceres betydeligt.

Til undersøgelse og karakterisering af partikelseparationen i det installerede tromlefilter er der i projektet anvendt en avanceret laseroptisk partikelstørrelses- og partikelantalsmåler i form af en PSS-Nicom Accusizer 780 fra Particle Sizing Systems Inc. Måleren er monteret med en sensor til størrelses- og antalsbestemmelse af partikler i størrelsesområdet 1-400 μm , hvilket er det relevante område for partikler i svømmebade.

Til undersøgelse af effektiviteten af udluftningen af THM (primært kloroform) fra bassinvandet ved passage af den installerede luftstrippingsteknologi er der anvendt Membrane Inlet Mass Spectrometry (MIMS). MIMS er en veletableret metode til direkte online analyse af flygtige stoffer i vandig opløsning. I projektet er MIMS'en sat op til at måle instrumentsignalet ved de karakteristiske ioner for kloroform og bromdiklormethan, idet disse udgør omkring 99% af det tilstedeværende THM indhold.

Teknologiafprøvningen har fundet sted i Gladsaxe Svømmehal, hvor teknologien blev monteret i vandbehandlingssystemet for svømmehallens varmtvandsbassin. Tromlefiltrene blev monteret i vandbehandlingsanlæggets hovedcirkuleringsstrøm, mens luftstrippingsteknologien blev monteret i en delstrøm på typisk 15-30% af hovedstrømmen.

De to tromlefilterenheder, der er afprøvet i projektet, havde hver en designkapacitet på 50 m^3/h , hvilket giver en samlet filtreringskapacitet på 100 m^3/h , svarende til det samlede design cirkulationsflow. Fokus for undersøgelserne har været at vurdere partikelfjernelseskapaciteten af de installerede tromlefilterenheder samt indflydelsen af den hydrauliske belastning på driften og partikelfjernelsen. I optimeringsøjemed er undersøgt varierende tilløbsflow på 50, 75 og 100 m^3/h .

På baggrund af de samlede data fra forsøgsarbejdet kan det konkluderes, at der med den aktuelle tromlefiltertype - monteret med en InBlue Sub 5 filterdug - kan opnås en samlet

partikelseparationseffektivitet på omkring 93% af den tilførte partikkelmasse og omkring 65% af det tilførte partikelantal.

Såvel antallet som den tilsvarende masse af partikler større end 10 μ m reduceres ved filtreringen med en effektivitet på over 90%. For partikler mindre end 10 μ m ses en separationseffektivitet på omkring 80% for partikler i størrelsesområdet 5-10 μ m og omkring 60% for partikler i området 1-5 μ m. Den opnåede massefjernelseskapacitet er på niveau med tidligere målte massefjernelseskapaciteter for traditionelle tryksandfiltre, mens den tilsvarende reduktion i partikelantalskoncentrationen er lavere end tidligere målte værdier for tryksandfiltre. Dette skyldes, at de virkningsmekanismer, der giver anledning til partikelseparation i tryksandfiltre, bevirker en bedre separation af de helt små partikler. Den store forskel i forhold til tromlefilteret er en forbedret reduktion i antalskoncentrationen af partikler mindre end 5 μ m. Det er således også erfaringen, at anlæg, der bygges med tromlefilterteknologi med InBlue Sub 5 filterdug som hovedfiltreringsteknologi, bør suppleres med et delstrømssandfilter for at undgå akkumulering af helt små partikler i bassin vandet.

Samlet set viser tromlefilterundersøgelsen, at mere end 90% af den organiske partikkelmasse, der tilføres via de badende, fjernes umiddelbart fra svømmebadsvandsystemet. Herved elimineres denne kilde til klorforbrug og dannelse af klorbiprodukter i forhold til de konventionelle vandbehandlingssystemer, hvor denne partikkelmasse opbevares og reagerer med klor i sandfiltrene frem til næste returskyl.

Den afprøvede luftstrippingsteknologi er designet af Ultraaqua til en kapacitet på ca. 25 m³/h, og enheden blev testet ved tilløbsflow på 15 m³/h, henholdsvis 25 m³/h. For begge flow blev funktionen af luftstripperen i optimeringsøjemed testet ved varierende luftflow til fjernelse af aktuelle flygtige klorbiprodukter. Der blev endvidere udtaget prøvestrømme flere steder gennem luftstripperen for at karakterisere massefjernelseshastigheden med henblik på optimering af luftstripperens design. Resultaterne blev anvendt til kalibrering af en matematisk model af luftstripperen, der efterfølgende kan anvendes ved optimering af luftstripperens design og drift.

Resultaterne viste, at luftstripperen er særdeles effektiv til kontrolleret fjernelse af de uønskede klorbiprodukter, der således ikke frigives til forringelse af indeklimaet i svømmehallen. De opnåede resultater vil i kombination med den udviklede og kalibrerede matematiske model blive anvendt til yderligere optimering af luftstrippingsenheden.

Summary

The application of chlorine for disinfection of swimming pool water results in formation of chlorinated disinfection by-products. This is due to the chemical reaction of chlorine with the components in the water originating from the bathers. Two by-products are included in the Danish Regulations for public swimming pool water quality: Combined chlorine and THM (tri-halo-methanes). The contaminations entering the pool water from the bathers will be on particulate as well as dissolved form and should be removed as far as possible before they contribute significantly to the formation of additional by-products. The purpose of the water treatment in a swimming pool is therefore to remove the added pollutants and the developed chlorinated by-products as soon as possible to ensure that the concentration of these substances in the pool water is as low as possible and always meet the statutory water quality standards.

The project included testing and documentation of two water treatment technologies for energy efficiency improvement of water quality in swimming pools. One technology is an energy-efficient drum filter for quick removal of particles from the swimming pool water system. When using this technology, particles originating from the bathers are removed from the entire water system in contrast to the conventional sand filter solution, where the particles are removed from the pool water but are accumulated in the filters until the next backwashing. During this period, the particulate material contribute to the consumption of chlorine as well as to the development of by-products that are released to the swimming pool water. At the same time, the drum filter solution is much more energy- and water-efficient than the conventional sand filter solution. In addition to the drum filter, the study included testing of an air stripping technology for removal of volatile chlorinated by-products such as THM (tri-halo-methanes) and tri-chloramines. When using this technology, these unwanted by-products will be removed continuously from the swimming pool water in a controlled process improving the water quality. At the same time, the indoor air quality of the public swimming pool or recreational water theme park will be improved due to a significant reduction of the release of undesirable volatile by-products into the air.

For examination and characterization of the separation of particles in the installed drum filter, the project applied an advanced type of optical laser device, which is able to measure the size and number of particles, i.e. a PSS Nicomp Accusizer 780 from Particle Sizing Systems Inc., equipped with a sensor for determination of the size and number of particles in the size range from 1 to 400 microns, which is the relevant size range of particles in swimming pool water. A Membrane Inlet Mass Spectrometer (MIMS) has been used to study the efficiency of the ventilation of the THM (primarily Chloroform) from the pool water by means of the installed air stripping technology. The MIMS is a well-established method for direct online analysis of volatile substances in aqueous solution. In this project, the MIMS is set up to measure the concentrations of Chloroform and bromdichlormethane, since these substances constitute around 99% of the THM content.

The technology test took place in Gladsaxe Public Swimming Pool, where the technology was installed in the water treatment system of the warm water pool. Drum filters were installed in the main circulating flow of the water treatment system, while air stripping technology was installed in a side-stream flow corresponding to typically 15-30% of the main flow.

Each of the two drum filter units tested in this project had a design capacity of 50 m³/h, amounting to a total filtration capacity of 100 m³/h, which corresponds to the total circulation design flow. The main focus of the studies has been to assess the particle removal capacity of the installed drum filter units as well as the influence of the hydraulic load on the operation and on the particle removal. For optimization purposes, different inlet flows of 50, 75 and 100 m³/h have been investigated.

Based on the collected data from the testing, it can be concluded by using the current drum filter type installed with a InBlue Sub 5 filter cloth, it is possible to obtain an overall particle separation efficiency of around 93% of the incoming particle mass and about 65% of the total number of particles.

Both the number and the corresponding mass of particles bigger than 10 microns are reduced with an efficiency of more than 90%. For particles smaller than 10 microns, the separation efficiency is about 80% for particles of the size range 5-10 μ m and about 60% for particles of the size range 1-5 μ m. The obtained mass removal capacity is in line with the previously measured mass removal capacities of traditional pressure sand filters, while the corresponding reduction in the number concentration of the particles is lower than the previously measured values for pressure sand filters. This is due to the fact that the fundamental mechanisms, which lead to the particle separation in the pressure sand filters, result in a better separation of the very small particles, and the big difference compared to the drum filter is an improved reduction by the sand filter in the concentration of the number of particles smaller than 5 microns. Likewise, it has been experienced that installations based on the drum filter technology as the main filtration technology should be complemented by a side-stream sand filter to avoid accumulation of very small particles in the pool water.

Overall, the study of drum filters has shown that more than 90% of the mass of organic particles originating from the bathers is removed immediately from the swimming pool water system. As a result, this source of chlorine consumption and formation of chlorinated by-products is eliminated compared to the conventional water treatment systems, where this organic particulate mass is stored and reacts with chlorine in the sand filters until the next backwash.

The tested air stripper technology is designed by Ultraaqua for a capacity up to 25 m³/h. The unit was tested at hydraulic loads of 15 m³/h and 25 m³/h respectively. For both hydraulic loads, various counter-current air flows were applied to characterize the stripping efficiency as a basis for further optimization of the technology. Sampling flows were taken from different locations in the air stripper in order to characterize the mass removal efficiency towards the unwanted volatile by-products. The results were applied for calibration of a mathematical model for the air stripper.

The test results showed, that the designed air stripper is highly efficient for controlled removal of harmful volatile by-products. By removing these by-products in the water treatment system uncontrolled release to the indoor air is avoided, thereby improving the indoor air quality. The results in combination with the calibrated mathematical model will serve as a solid base for further optimization of design and operation of the air stripper technology.

1. Indledning

1.1 Baggrund

Dannelsen af klorerede desinfektionsbiprodukter (DBP) i svømmebade er særdeles kompleks og i dag ikke fuldt ud forstået. Grundlæggende sker biprodukt-dannelsen som følge af kemiske reaktioner mellem klor og de forureninger, der befinder sig direkte på de badendes hud, samt de forureninger, der frigives fra de badende, og som akkumulerer i systemet - i såvel bassinvandet som i vandbehandlingssystemet. Den biprodukt-dannelse, der sker ved reaktioner direkte på huden af de badende, kan ikke undgås, og de dannede biprodukter skal således håndteres i vandbehandlingsanlægget, når bassinvandet recirkuleres. Dette gælder således især bundet klor, men også THM. De forureninger, der tilføres bassinvandet fra de badende, vil være på både partikulær og opløst form og skal så vidt muligt fjernes, inden de bidrager væsentligt til dannelse af yderligere biprodukter. Opgaven for vandbehandlingssystemet i et svømmebad er således at fjerne tilførte forureningskomponenter og dannede DBP'er så hurtigt som muligt, så koncentrationen af disse i bassinvandet er så lav så muligt og til enhver tid opfylder de lobestemte vandkvalitetskrav.

Med hensyn til reduktion af koncentrationen af den partikulære forurening har der i mange årtier været anvendt standard vandbehandlingsteknologier adapteret fra drikkevandsbehandling - primært i form af sandfiltre og i mindre grad pulverfiltre. Såvel sandfiltre som pulverfiltre er imidlertid kendetegnet ved at være ressourcekrævende teknologier med højt energiforbrug til pumpning og højt vandforbrug til returskylning. Konsekvensen af dette er, at returskylning af filtrene sker sjældnere, hvilket betyder, at de separerede partikler opholder sig længere tid i systemet. Derfor øges risikoen for, at den partikulære forurening kommer til at bidrage til biprodukt-dannelsen, idet partiklerne oxideres og omdannes til biprodukter og opløst organisk stof af klor i det forbigående bassinvand. Dermed sendes den allerede fjernede partikel forurening retur til bassinvandet, hvor det vil bidrage til en øget biproduktkoncentration.

De identificerede ulemper ved eksisterende vandbehandlingssystemer i svømmebade har de senere år medført en række forsknings- og udviklingsaktiviteter, der med baggrund i opnåede resultater og større forståelse for svømmebadssystemet har ledt til en redefinering af, hvordan svømmebadsvand behandles set i forhold til både vandkvalitet og ressourceforbrug. Den større forståelse har ligeledes medført et åbenlyst innovations- og markedspotentiale for teknologileverandører af ny og mere ressourceeffektiv vandbehandlingsteknologi, der effektivt fjerner både forureningskomponenter og biprodukter fra svømmebadsvandet.

1.2 Projektets gennemførelse

Med baggrund i ovenstående har Ultraaqua A/S og Gladsaxe Svømmehal sammen med DHI i regi af Miljøstyrelsens/Naturstyrelsens Tilskudsordning for Miljøeffektiv Teknologi gennemført et projekt med det formål at videreudvikle, afprøve og optimere to nye og centrale teknologienheder i et nyt dansk teknologikoncept til energieffektiv behandling af svømmebadsvand. De to nye teknologier består af henholdsvis et tromlefilter til fjernelse af partikulære forureningskomponenter og en luft-strippingsteknologi til fjernelse af flygtige klorerede desinfektionsbiprodukter som THM og trikloraminer.

2. Forsøgsbeskrivelse

2.1 Teknologibeskrivelse

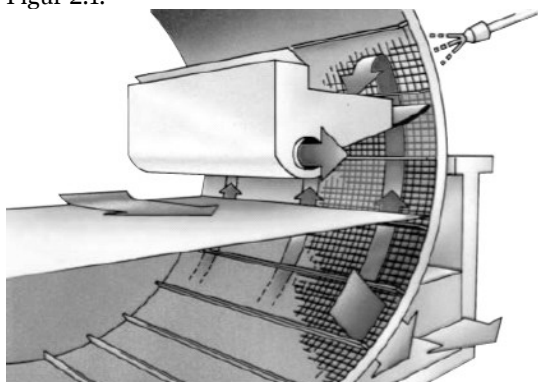
Den tromlefilter- og luftstripnings teknologi, der har været genstand for undersøgelse i projektet, udvikles, markedsføres og sælges af Ultraaqua A/S i Danmark samt af datterselskabet inBlue AB i Sverige. Drifts- og virkningsprincippet i de to teknologier vil blive beskrevet i det følgende.

2.1.1 Tromlefilterteknologi

Tromlefilteret er et mekanisk selvrensende filter, der er designet til partikelfjernelse ved hjælp af filterduge med varierende porestørrelse. Tromlefilteret drives uden tryk og har kun få bevægelige dele. Hvis det kan opnå en tilstrækkelig god partikelseparationseffektivitet, vil det derfor udgøre et energibesparende alternativ til de tryksandfiltre, der traditionelt anvendes til behandling af svømmebadsvand. Filterdugen i tromlefilteret er monteret på en tromle, der er opdelt i et antal filtersektioner og placeret i en tank.

Bassin vandet ledes ind i tromlen og passerer filterdugen, hvorefter det filtrerede vand opsamles i tanken og ledes videre i vandbehandlingssystemet. Ved separation af partiklerne sker der en løbende tilstopning af dugen, så vandstanden inde i tromlen stiger. Når vandstanden rammer en niveauføler, roterer tromlen, så ubrugt filterdug overtager filtreringen og nedbringer vandstanden i tromlen. Under rotationen sker der en samtidig returskylning af den brugte del af filterdugen til et indbygget returskylskar, hvorfra returskyllevandet afledes til kloak. Returskylsfrekvensen afhænger af belastningen.

De testede tromlefiltre i forbindelse med projektet i Gladsaxe Svømmehal er to styk Hydrotech tromlefiltre af typen 803-1G med en kapacitet på 50 m³/h hver. Disse er de tromlefiltre, som Ultraaqua normalt markedsfører inden for svømmebadsområdet. En principskitse af virkemåden i et tromlefilter fremgår af Figur 2.1.



Figur 2.1 Principskitse af opbygningen af et tromlefilter samt installation i Gladsaxe Svømmehal

Partikelseparationen i et tromlefilter sker ved filtrering (sining), hvor partikler større end porestørrelsen af dugen separeres fra. Partikler mindre end porestørrelsen i dugen vil dog kunne fjernes på grund af den løbende opbygning af filterkage, der sker på dugen under drift. Til behandling af svømmebadsvand anvendes typisk en InBlue Sub 5 filterdug som en afvejning mellem hydraulisk kapacitet og partikeludskillelse. Figur 2.2 viser et foto af de to installerede testfiltre.



Figur 2.2 De to parallelt installerede tromlefiltre med InBlue Sub 5 filterdug.

2.1.2 Luftstrippingsteknologi

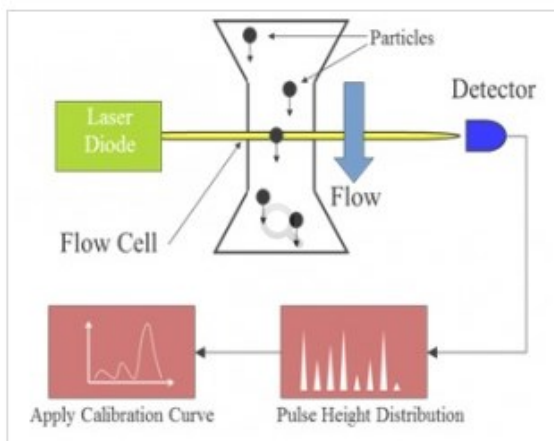
Ved luftstripping udnyttes det, at flygtige stoffer har en naturlig tendens til at forlade vandfasen og afgasse til den omgivende luft, der ikke indeholder det pågældende stof. Ved kontinuert at blæse ren luft i modstrøm i forhold til vandet sker der en forøgelse af afgangningen af de flygtige stoffer. Dette skyldes en konstant koncentrationsforskel mellem ligevægtskoncentration i luften ved den givne vandkoncentration og den aktuelle koncentration i luften. Endvidere bevirker den aktuelle fysiske opbygning af luftstrippingskolonnen en forøgelse af kontaktoverfladen mellem luft og vand, der medvirker til en øget overførselshastighed af de flygtige stoffer fra vand- til gasfasen, så processen kan ske effektivt i en kompakt reaktor, der nemt kan integreres i et svømmebadssystem. Den aktuelt afprøvede luftstrippingsteknologi er opbygget som en cirkulær kolonne, hvori der er monteret et antal vandretliggende perforerede plader med en given afstand. Imellem de enkelte plader er der indbygget afstandsror, der samtidig fungerer som lufttransportrør, som skal sikre, at lufttransporten sker med maksimal kontakt med den modstrømmende vandfase, der ledes ind gennem et centerrør i toppen af kolonnen. Et billede af den afprøvede luftstrippingsteknologi monteret i Gladsaxe Svømmehal med prøveudtag til online måling af THM i de forskellige strippingstrin fremgår af Figur 2.3.



Figur 2.3 Luftstrippingsteknologi monteret i Gladsaxe Svømmehal

2.1.3 Måling af Partikler

Til undersøgelse og karakterisering af partikelseparationen i det installerede tromlefilter er der i projektet anvendt en avanceret laseroptisk partikelstørrelses- og partikelantalsmåler i form af en PSS-Nicomp Accusizer 780 fra Particle Sizing Systems Inc. Måleren er monteret med en sensor til størrelses- og antalsbestemmelse af partikler i størrelsesområdet 1-400 μm , hvilket er det relevante område for partikler i svømmebade. Sensoren kan opdele størrelsesområdet i op til 512 størrelseskanaler med både lineær og logaritmisk fordeling. I projektet er der anvendt en logaritmisk opdeling af størrelsesområdet i 256 størrelseskanaler for at få en realistisk størrelsesopløsning for partikler i svømmebadsvand. Måleprincippet for antals- og størrelsesbestemmelse af partikler i det valgte størrelsesområde er såkaldt ”Enkelt Partikel Laserlys Blokering”, hvilket fremgår af Figur 2.4.



Figur 2.4 Principskitse for måleprincip i den anvendte partikelmåler

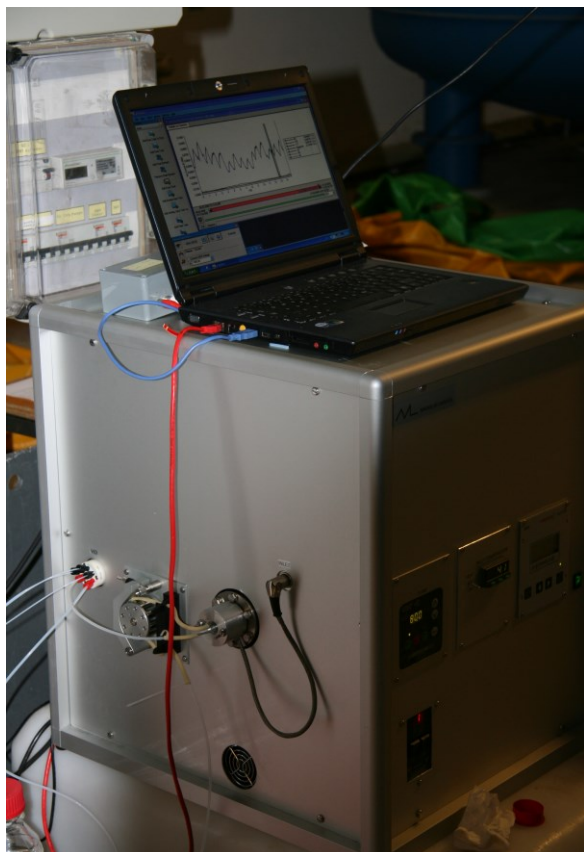
Målecellen i instrumentet består af en målekanal, hvori en laser konstant udsender ensrettet laserlys i retning af en detektor. Prøven indeholdende de partikler, der ønskes talt og størrelsesbestemt, pumpes igennem målecellen med et veldefineret flow. Når en partikel passerer laserlyset, blokerer den for en delmængde af laserlyset, hvilket forårsager en pulse i detektorsignalet, og når mange partikler passerer lysfeltet over kort tid, fås en fordeling af pulser med forskellig størrelse. Højden på den genererede puls er proportional med størrelsen af den passerende partikel, og sammenhængen mellem pulshøjde og partikelstørrelse samt tælleøjagtighed opnås ved kalibrering af instrumentet med NIST-sporbare (National Institute of Standards and Technology) monodisperse partikelstørrelses- og tællestandarder.

Måleprincippet er begrænset til anvendelse på relativt tynde partikelsuspensioner, hvilket gør den særdeles velegnet til undersøgelser i svømmebadssystemer, men kræver fortynding ved anvendelse i andre applikationer.

2.1.4 Måling af flygtige biprodukter med Membran Inlet Massespektrometri (MIMS)

I forbindelse med karakterisering af udluftningen af THM (primært kloroform) fra bassinvandet ved passage af den installerede luftstrippingsteknologi er der anvendt Membrane Inlet Mass Spectrometry (MIMS). MIMS er en veletableret metode til direkte analyse af flygtige stoffer i vandig opløsning. MIMS anvender en tynd polymermembran som den eneste barriere mellem vandprøven og vakuumkammeret i et massespektrometer. De flygtige komponenter opløses i og transporteres igennem membranen og fordamper ind i massespektrometeret, hvor de ioniseres og analyseres efter deres molekylvægt. I projektet er MIMS'en sat op til at måle instrumentsignalet ved de karakteristiske ioner for kloroform og bromdichlormethan, idet disse udgør omkring 99% af det tilstedeværende THM indhold. Målesignalet ved de enkelte parametre blev kalibreret over for friskfremstillede standarder med faste intervaller, således at koncentrationerne kunne bestemmes. Målesignalet blev logget hver 5. sekund og midlet over 1 minut, således at der hvert minut blev beregnet en koncentration af de udvalgte stoffer. Ved hjælp af den i MIMS'en indbyggede 6-vejs ventil er det muligt at monitorere koncentrationen af kloroform og bromdichlormethan i seks målepunkter, og der blev således etableret prøvetagning fra luftstripperteknologiens indløb og udløb samt ved mellembund nummer 1, 2, 3 og 5. For at opnå et stabilt signal ved måling af koncentrationen ved hvert målepunkt blev der målt i 15 minutter ved hver position.

Et foto af den anvendte MIMS i drift i Gladsaxe Svømmehal er vist i Figur 2.5.



Figur 2.5 Membran Inlet Masse Spektrometer anvendt ved undersøgelse af luftstrippingsteknologi

2.2 Gladsaxe svømmehal – varmtvandsbassin

Varmtvandsbassinet i Gladsaxe Svømmehal består af et traditionelt varmtvandsbassin med et lille, parallelt soppebassin koblet på samme vandbehandlingsanlæg. Varmtvandsbassinets volumen udgør langt størsteparten af det samlede bassinvolumen. Varmtvandsbassinet med tilhørende soppebassin er vist i

Figur 2.6. Data for varmtvandsbassinet er:

- Volumen: 50 m³
- Omsætningstid: 30 minutter
- Temperatur: 31-34°C



Figur 2.6 Gladsaxe varmtvandsbassin

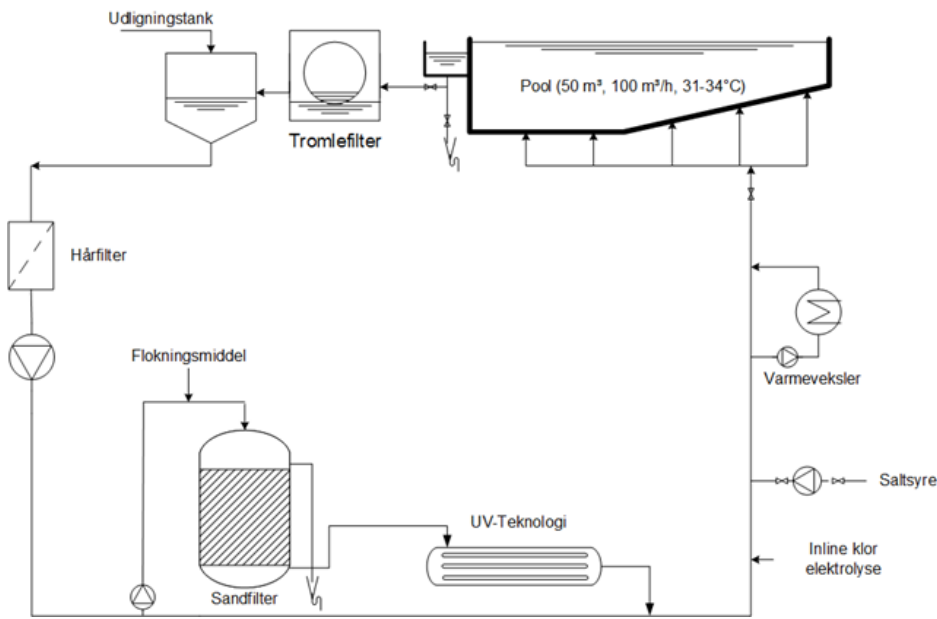
Den eksisterende vandbehandling og monitorering af vandkvaliteten omfatter:

- Grovfilter (1 stk.)
- Sandfilter (6 stk.)
- UV-behandling på delstrøm – kombineret mellemtryk (1200W) og lavtryk (1200W)
- Klorelektrolyse i in-line-anlæg (2 stk.)
- Online måling af frit klor, bundet klor, pH, redox og temperatur
- Online styring af frit klor, pH og temperatur

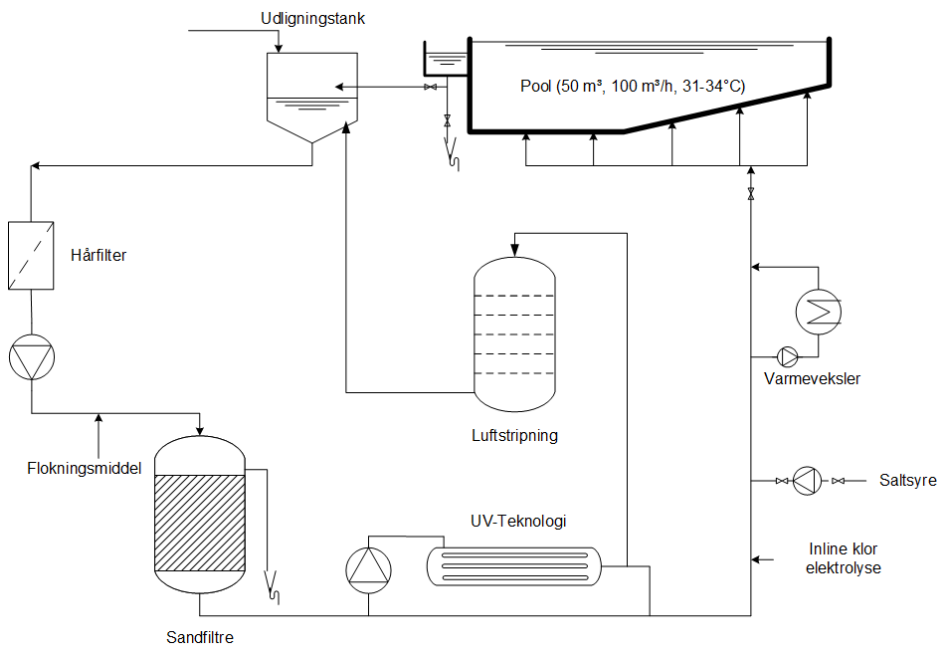
Opbygningen af vandbehandlingsanlægget for varmtvandsbassinet i Gladsaxe Svømmehal under teknologiafprøvningen med indbygget tromlefilter og luftstrippingsteknologi er vist på Figur 2.7, henholdsvis Figur 2.8.

2.2.1 Drift af måling og styring

Fra bassinet er etableret en målestrøm, der konstant cirkulerer bassinvand til et AMI Codes-II CC online målesystem, hvor der foretages måling af frit og bundet klor, pH og temperatur. Målingen af frit klor vil - afhængigt af den målte koncentration i forhold til det valgte set-punkt for bassinet - sende et signal til klorelektrolyseanlægget om start/stop af klordoseringen, som beskrevet ovenfor. I forsøgsperioden er der styret efter et indhold af frit klor på 1,0-1,1 mg/l. Signalet fra pH-sensoren anvendes til styring af saltsyredoseringen, og der er i forsøgsperioden styret efter pH på 7,1. Der er gennem hele forsøgsperioden med afprøvning af luftstrippingsteknologien fastholdt en recirkuleret vandmængde over sandfiltrene/tromlefiltrene på 100 m³/h, svarende til en omsætningstid på 30 minutter. Sandfiltrene er i denne periode skyllet manuelt med halvdelen af filtrene hver uge, således at skyllefrekvensen på filtrene typisk har været to uger. I perioden med afprøvning af tromlefiltrene blev en delstrøm på ca. 30 m³/h rensat gennem sandfilter.



Figur 2.7 Principdiagram for opbygningen af vandbehandlingsanlægget med tromlefilter.



Figur 2.8 Principdiagram for opbygningen af vandbehandlingsanlægget med luftstrippingsteknologi.

2.3 Oversigt over teknologiafprøvningen

De to tromlefilterenheder, der er afprøvet i projektet, havde hver en designkapacitet på 50 m³/h, hvilket giver en samlet filtreringskapacitet på 100 m³/h svarende til det samlede design cirkulationsflow i Gladsaxe Svømmehal. Fokus for undersøgelserne af tromlefilterenheden har ikke været at vurdere ændringer i vandkvaliteten i systemet som helhed som følge af den kontinuerte fjernelse af partikelmasse fra systemet via det løbende returskyl. Fokus for undersøgelserne har derimod været at vurdere partikelfjernelseskapaciteten af de tromlefilterenheder, Ultraaqua normalt markedsfører i svømmebadsbranchen, hvor indledende erfaringer har vist, at der med en Inblue Sub 5 filtreringsdug kan opnås mellem 90-95% fjernelse af den tilførte partikelmasse. Samtidig har indflydelsen af den hydrauliske belastning på driften og partikelfjernelsen i tromlefiltrene – i optimeringsøjemed - været genstand for undersøgelse ved at variere tilløbsflowet mellem 50, 75 og 100 m³/h.

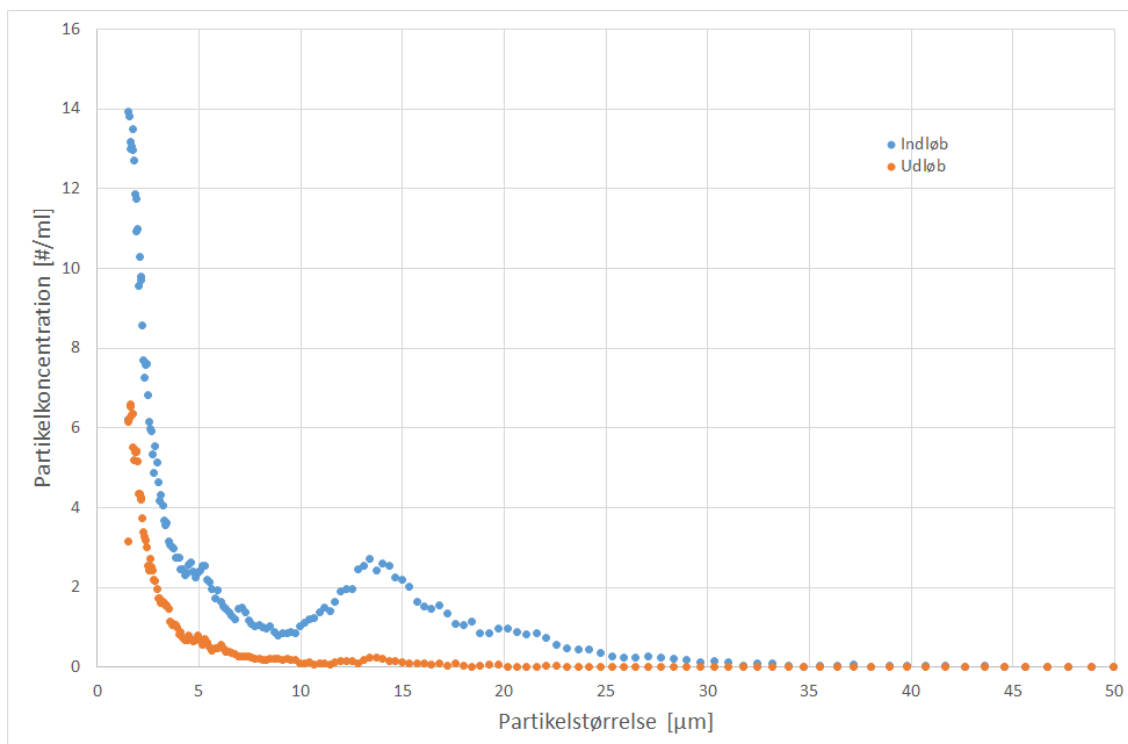
Den afprøvede luftstrippingsteknologi er designet af Ultraaqua til en kapacitet på ca. 25 m³/h, og enheden blev testet ved tilløbsflow på 15 m³/h, henholdsvis 25 m³/h. For begge flow blev funktionen af luftstripperen i optimeringsøjemed testet ved varierende luftflow til fjernelse af aktuelle flygtige klorbiprodukter. Der blev endvidere udtaget prøvestrømme flere steder gennem luftstripperen for at karakterisere massefjerneshastigheden med henblik på optimering af luftstripperens design. Resultaterne blev anvendt til kalibrering af en matematisk model af luftstripperen, der efterfølgende kan anvendes ved optimering af luftstripperens design og drift.

3. Resultater og diskussion

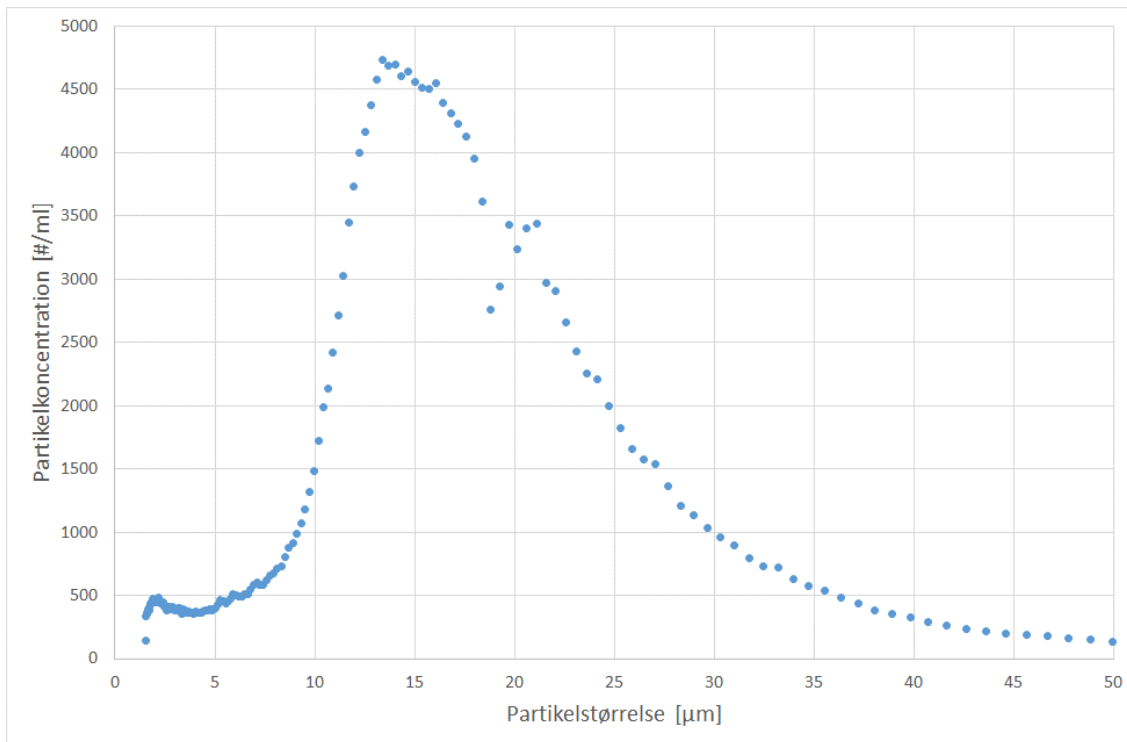
3.1 Undersøgelse af tromlefilterteknologi

3.1.1 Databearbejdning og fortolkning

De rådata, der genereres ved anvendelse af den laseroptiske partikelstørrelses- og partikelantalsmåler, er et plot og en tilhørende datafil for antallet af partikler i hver størrelseskategori i den 256 kanalers logaritmiske opdeling af størrelsesområdet 1-400 μm i det anvendte prøvevolumen. Det målte antal partikler i hver størrelseskategori kan således omregnes til en partikelkoncentration ved at dividere med det anvendte prøvevolumen. Et eksempel på målte partikelkoncentrations- og størrelsesfordelinger i indløb og udløb fra tromlefilteret ved varmtvandsbassinet i Gladsaxe er vist nedenfor med x-aksen afskåret ved 50 μm . I figur 3.2 er ligeledes vist partikelkoncentrations- og størrelsesfordeling for opsamlet returskyllevand målt efter fortynding. I bassin vandet er partikelkoncentrationen ved størrelser over 50 μm langt under 1 partikel/ml og repræsenterer analytisk støj, hvorfor størrelsesfordelingen herudover ikke er repræsentativ og ikke bør indgå i kvantitative beregninger og vurderinger.



Figur 3.1 Eksempel på partikelstørrelsesfordeling målt på indløb og udløb fra tromlefilter afprøvet i Gladsaxe Svømmehal.



Figur 3.2 Eksempel på partikelstørrelsesfordeling målt på opsamlet returskyllevand

Når partikelfiltreringsteknologi skal undersøges og vurderes ud fra partikelmålinger som vist ovenfor, er det afgørende at bearbejde de opnåede rådata korrekt for at kunne foretage retvisende fortolkninger. En række karakteristiske størrelser, der beskriver de opnåede prøver, og som derfor kan anvendes til kvantitative beregninger ved teknologivurderingen, kan beregnes ud fra de opnåede rådata. Disse størrelser præsenteres kort i matematisk form nedenfor.

Den samlede antalskoncentration C_N af partikler i prøven er en generel parameter, der er relevant ved en umiddelbar vurdering af partikelfiltreringsteknologiens effekt, og denne opnås simpelt ved at summere koncentrationen af partikler i de enkelte repræsentative størrelseskategorier $C_{N,d}$.

I mange tilfælde vil en partikelfiltreringsteknologi ikke alene skulle vurderes ud fra reduktionen i antallet af partikler, men i lige så høj grad ud fra fjernelsen af partikelmasse. Partikelmassen vil ved kendt partikeldensitet være direkte proportional med partikelvoluminet. For at vurdere partikelmassefjernelsen omregnes den målte antalskoncentration C_N til volumenkoncentration C_V ved at antage, at partiklerne er sfæriske. Volumenkoncentrationen i en given størrelseskategori kan beregnes ved at bestemme voluminet af en partikel i hver størrelseskategori og multiplicere denne med antalskoncentrationen målt i denne størrelseskategori. Herefter opnås den samlede volumenkoncentration ved at summere over alle størrelseskategorier. Dette kan matematisk udtrykkes ved nedenstående ligning.

$$C_V = \sum_{d=i}^{d=n} C_{N,d} \cdot V_d = \sum_{d=i}^{d=n} C_{N,d} \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6}$$

Hvor d er diameteren af en partikel i en given størrelseskategori i intervallet fra i til n .

I to tilfælde er der opsamlet prøver af returskyllevandet til analyse på akkrediteret laboratorium for suspenderet stof med henblik på at få estimeret en densitet af de separerede partikler. Dette gør det muligt at omregne de beregnede volumenkoncentrationer til en egentlig massekoncentration ved de forskellige forsøg og dermed estimere tromlefilterets partikelmassefjernelsekapacitet. De samhörende data for volumenkoncentration og koncentration af suspenderet stof i de to skyllevandsprøver fremgår af nedenstående tabel sammen med en estimering af partikeldensiteten.

Tabel 3.1 Estimering af gennemsnitlig densitet af partikler i svømmebadsvand

Parameter	Skyllevand 1	Skyllevand 2
Suspenderet Stof konc. [mg/l]	210	410
Partikel Volumenkonc. [ml/l]	0,34	0,75
Partikeldensitet [g/ml-Partikel]	0,62	0,55

På baggrund af ovenstående data er der i projektet anvendt en gennemsnitlig partikeldensitet til beregning af massekoncentration og massefjernelse på 0,6 g/ml.

Ud over ændringer i antals- og volumenkoncentrationer vil effekten af en partikelfiltreringsteknologi ofte også kunne karakteriseres ved en ændring i middeldiameteren af suspensionen fra indløb til udløb. Der er imidlertid en række forskellige karakteristiske middeldiameterer, der kan beregnes på baggrund af de opnåede måledata, dvs. den antalsvægtede middeldiameter \bar{x}_N , den volumenvægtede diameter \bar{x}_V samt den filtreringsmodstandsrelaterede gennemsnitlige overflade-volumen partikelstørrelse \bar{x}_{OV} , også benævnt Sauter Mean Diameter.

Den antalsvægtede middeldiameter beregnes på baggrund af nedenstående matematiske udtryk:

$$\bar{x}_N = \frac{\sum_{d=1}^{d=n} d \cdot C_{N,d}}{C_N}$$

Den volumenvægtede middeldiameter beregnes på baggrund af nedenstående matematiske udtryk:

$$\bar{x}_V = \frac{\sum_{d=1}^{d=n} d^3 \cdot C_{V,d}}{\sum_{d=1}^{d=n} d^2 \cdot C_{V,d}}$$

Den gennemsnitlige overflade-volumen partikelstørrelse \bar{x}_{OV} defineres som den partikelstørrelse, der - hvis alle partikler i prøven havde denne størrelse - ville den have samme overflade-volumen forhold som den faktiske samlede partikelstørrelsesfordeling.

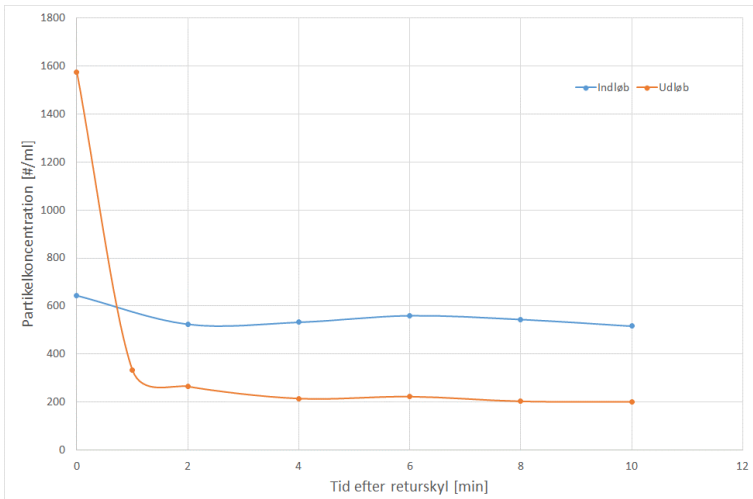
Den gennemsnitlige overflade-volumen partikelstørrelse \bar{x}_{OV} for en faktisk partikelfordeling beregnes som:

$$\bar{x}_{OV} = 6 \cdot \frac{\sum_{d=1}^{d=n} d^3 \cdot C_{N,d}}{\sum_{d=1}^{d=n} d^2 \cdot C_{N,d}}$$

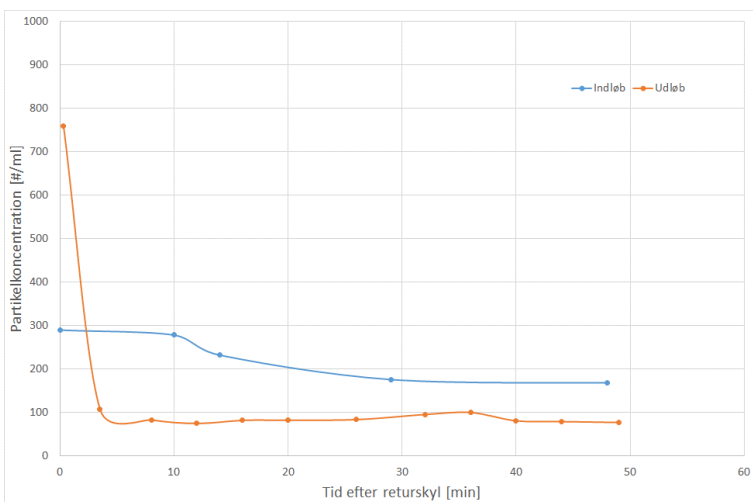
hvor d er diameteren af en partikel i en given størrelseskategori, og $C_{N,d}$ er den målte partikelkoncentration i en given størrelseskategori.

3.1.2 Resultater og diskussion af resultater fra filtreringsforsøg

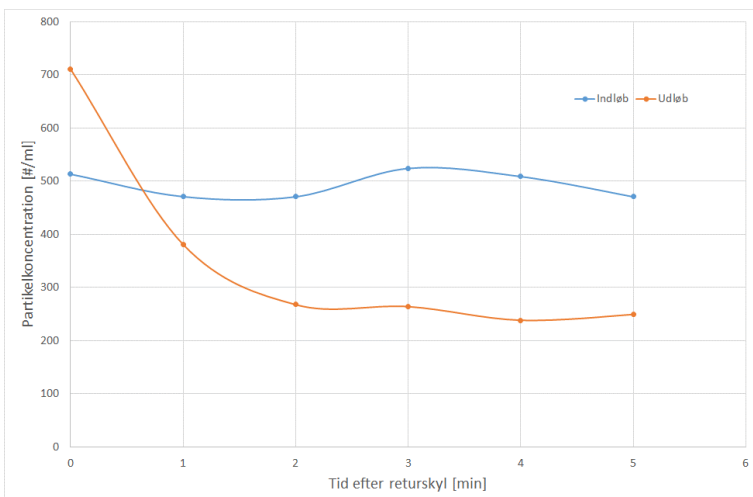
Som nævnt i afsnit 2.3 er de tromlefilterenheder, der er afprøvet i projektet, undersøgt med hensyn til partikelfjernelsekapacitet under varierende hydrauliske belastninger. Undersøgelserne er gennemført som et antal undersøgelser med intensive målekampanjer for partikelkoncentration i indløb og udløb umiddelbart i forbindelse med og i en kort periode efter et returskyl. Eksempler på tidsserier af partikelantals- og partikelmassekoncentration i indløb og udløb fra tromlefilterenhederne i forbindelse med og umiddelbart efter et returskyl ved varierende tilløbsflow er vist i nedenstående figurer 3.3-3.8.



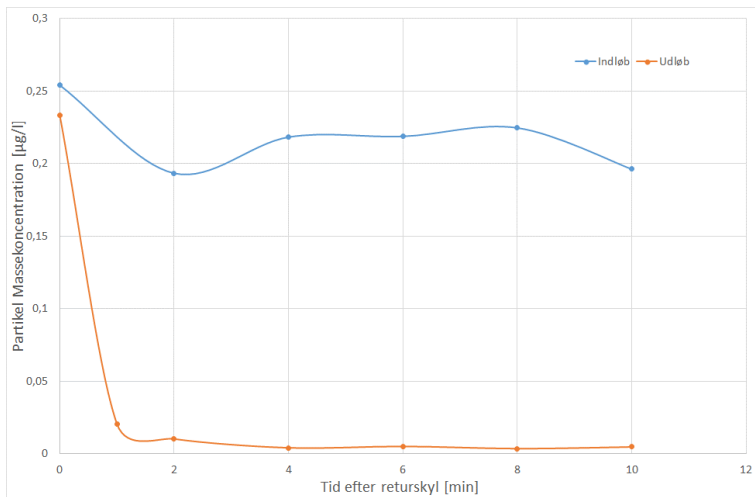
Figur 3.3 Eksempel på tidsserie af måleresultater fra tromlefilter indløb og udløb – antalskoncentration – ved 50 m³/h



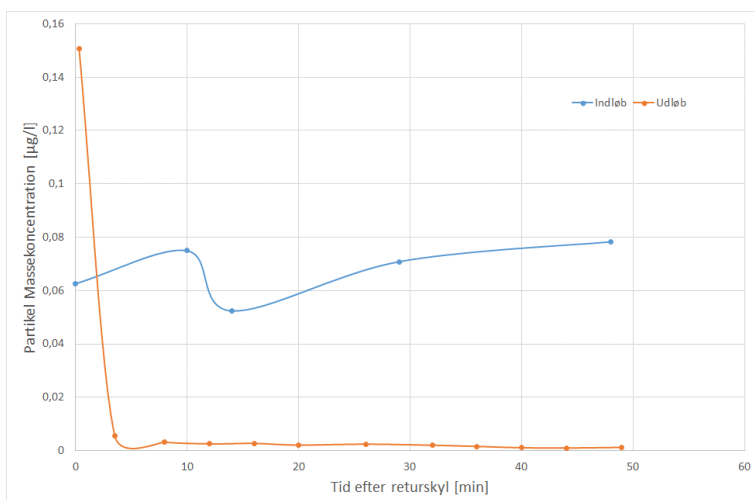
Figur 3.4 Eksempel på tidsserie af måleresultater fra tromlefilter indløb og udløb – antalskoncentration – ved 75 m³/h



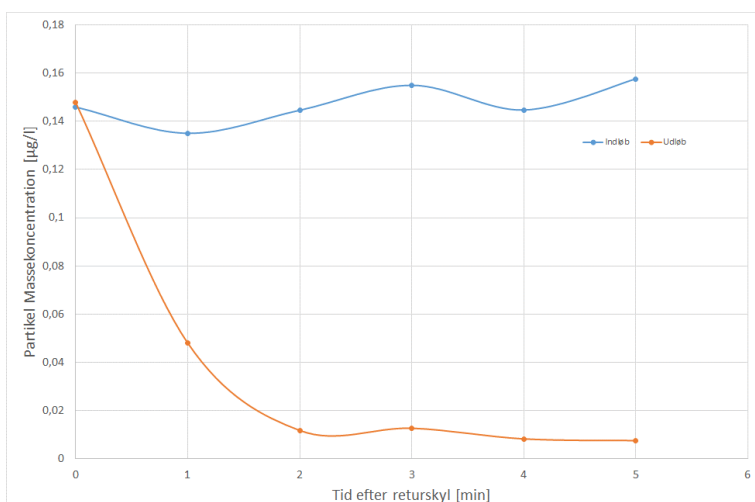
Figur 3.5 Eksempel på tidsserie af måleresultater fra tromlefilter indløb og udløb – antalskoncentration – ved 100 m³/h



Figur 3.6 Eksempel på tidsserie af måleresultater fra tromlefilter indløb og udløb – massekoncentration – 50 m³/h



Figur 3.7 Eksempel på tidsserie af måleresultater fra tromlefilter indløb og udløb – massekoncentration – 75 m³/h



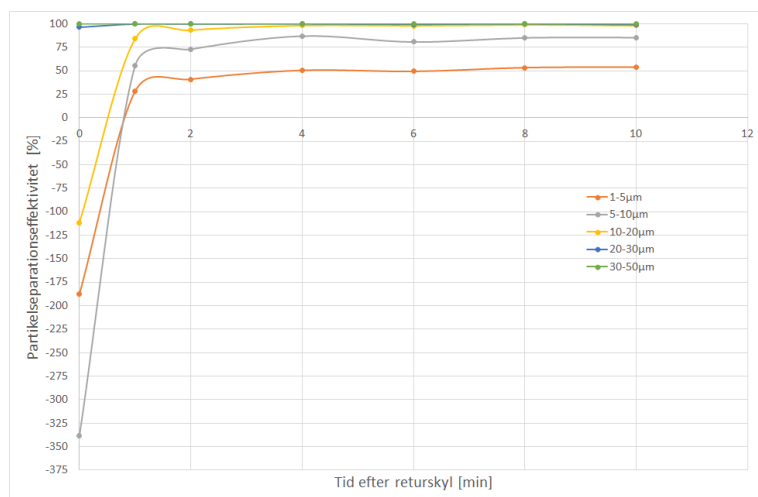
Figur 3.8 Eksempel på tidsserie af måleresultater fra tromlefilter indløb og udløb – massekoncentration – 100 m³/h

Af tidsserierne fremgår det, at der umiddelbart efter et returskyl er en kort forhøjet koncentration af partikler og partikelmasse i filtratet, som overstiger koncentrationen i indløbet. Dette viser, at der ved selve spulingen af dugen løsrives partikler, der overføres til filtratet ved bassinvandes gennemløb af dugen. En anden årsag til disse koncentrationstoppe kan også være, at skyllevandspumpen suger skyllevand fra

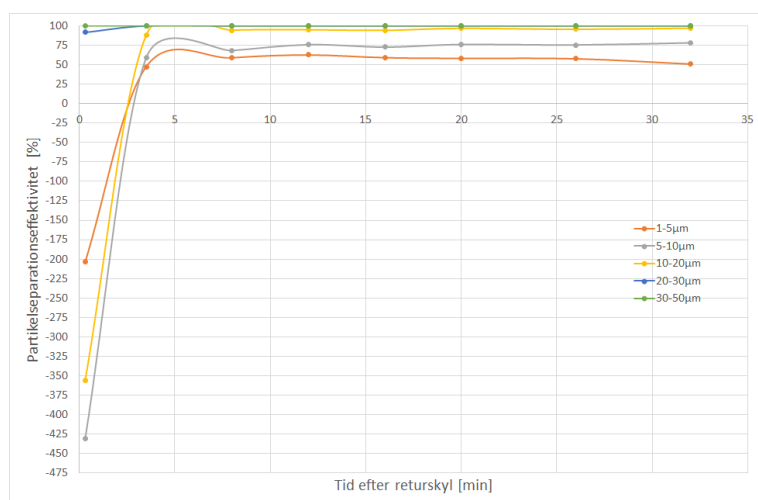
bunden af filtratkarret i tromlefilteret, hvor sedimenterede partikler kan være ophobet og give afsmitning på det første filtrat, der passerer. På grund af den voldsomme hydraulik og korte opholdstid i bunden af filterkarret vurderes indflydelsen af sedimentation dog at være uden betydning.

Disse koncentrationstoppe er imidlertid meget kortvarige, og filtreringseffektiviteten er således typisk genetableret inden for det første minut efter returskyllet, hvorfor denne spuleeffekt ikke vil have målbar indflydelse på den samlede partikelfjernelse i svømmebadssystemet.

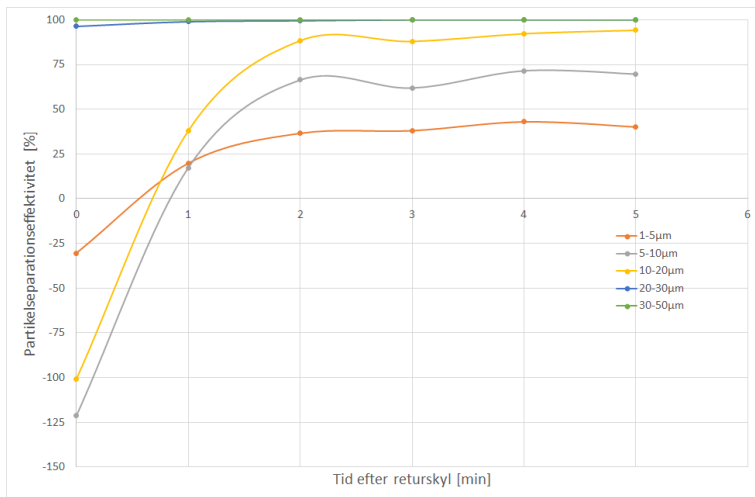
Den hurtige genetablering af filtreringseffektiviteten skyldes, at de separerede partikler hurtigt danner en tynd filterkage oven på filtreringsdugen, som er tættere end den nominelle porestørrelse af selve dugen. Opbygningen af filterkage er således medvirkende til, at filtreringseffektiviteten af partikler, der er mindre end dugens nominelle porestørrelse, stiger betydeligt efter returskyllet. Den løbende forbedring i den samlede separation af partikelantal og -masse, der observeres i løbet af en driftsfase efter skyl, dækker således over en løbende forbedring i separationen af partikler i forskellige størrelseskategorier i forhold til bassinvandets partikelstørrelsesfordeling, som fremgår af Figur 3.1. For at illustrere den løbende forbedring i separationseffektiviteten for forskellige partikelstørrelser i tidsrummet efter skyllet er de opnåede partikelstørrelses- og partikelkoncentrationsdata inddelt i 5 størrelsesintervaller (1-5 μm , 5-10 μm , 10-20 μm , 20-30 μm , 30-50 μm). For hvert af disse intervaller er den resulterende partikelseparationseffektivitet derefter beregnet og plottet som funktion af tid efter returskyl. Eksempler på disse plots baseret på både antals- og massekoncentration ved de forskellige hydrauliske belastninger fremgår af nedenstående figurer 3.9-3.14.



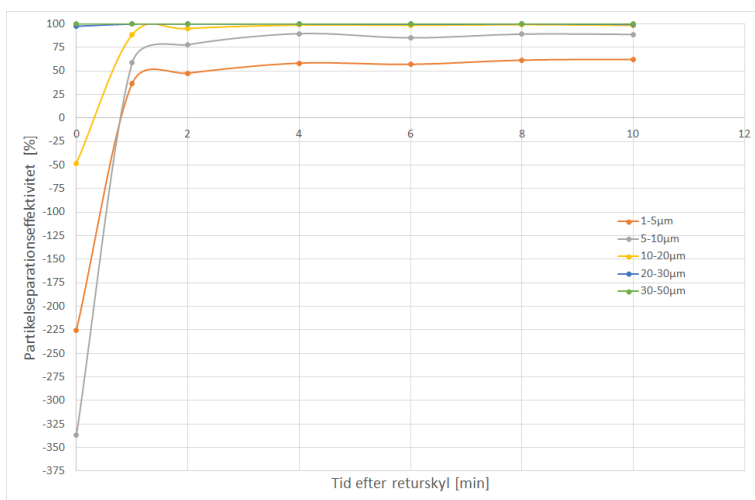
Figur 3.9 Separationseffektivitet i størrelseskategorier baseret på antalskoncentration – Flow 50 m³/h



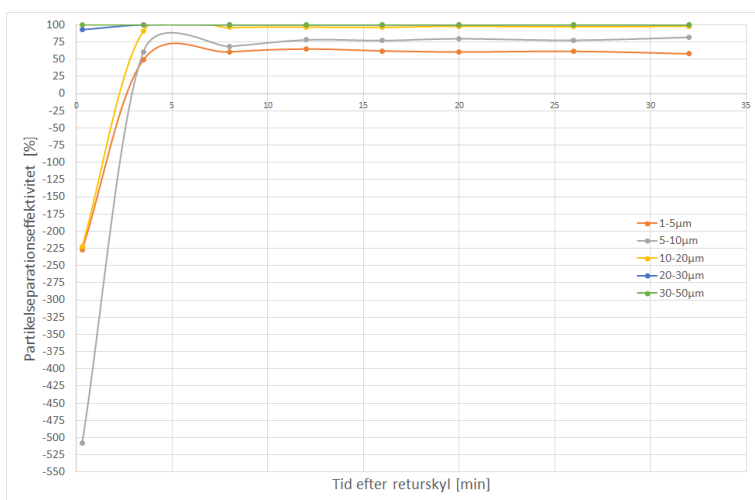
Figur 3.10 Separationseffektivitet i størrelseskategorier baseret på antalskoncentration – Flow 75 m³/h



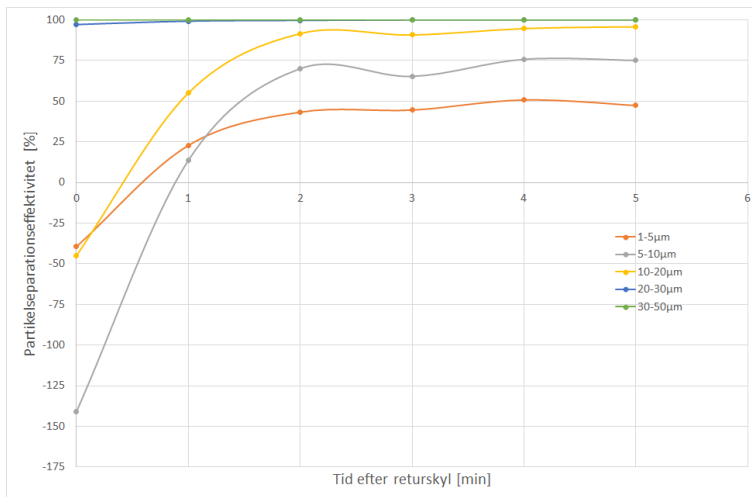
Figur 3.11 Separationseffektivitet i størrelseskategorier baseret på antalskoncentration – Flow 100 m³/h



Figur 3.12 Separationseffektivitet i størrelseskategorier baseret på massekoncentration – Flow 50 m³/h



Figur 3.13 Separationseffektivitet i størrelseskategorier baseret på massekoncentration – Flow 75 m³/h



Figur 3.14 Separationseffektivitet i størrelseskategorier baseret på massekoncentration – Flow 100 m³/h

Af resultaterne for separationseffektiviteten baseret på såvel antal som masse ses, at de store partikler i området 20-50 µm separeres nærvæd fuldstændigt og er upåvirkede af returskyllet. Separationen af de mindre partikler er umiddelbart mere påvirket af returskyllet. Separationen af partikler i størrelsesområdet 10-20µm reetableres imidlertid til tæt på 100% i løbet af meget kort tid (mindre end 1 minut) efter skyllet, mens separationen af de helt små partikler i størrelsesområdet 1-5µm og til dels også 5-10µm forbliver lavere efter reetablering af normal filtreringssituation. Da antalskoncentrationen af partikler i de små størrelseskategorier samtidig er høj, bliver den totale separationseffektivitet vurderet på antal lavere, hvilket fremgår tydeligt af Figur 3.2-3.4 samt 3.8-3.10. Til trods for det høje antal udgør de små partikler imidlertid en begrænset masse, så separationseffektiviteten vurderet på partikelmasse er derfor højere, hvilket fremgår af Figur 3.5-3.7 samt 3.11-3.13. For at opnå et bedre overblik over tromlefilterteknologiens partikelseparationseffektivitet i svømmebadsvand, baseret på såvel antals- og massekoncentrationsdata fra de mange forsøg, er der i nedenstående tabel lavet en sammenfattende statistisk analyse af samtlige partikelseparationsdata ved de tre hydrauliske belastninger.

Tabel 3.2 Sammenfatning af statistisk bearbejdede partikelseparationsdata for tromlefilterteknologi til filtrering af svømmebadsvand

Partikelstørrelseskategori	Partikelseparationseffektivitet Antal [%]
Samlet effektivitet	65±8
Effektivitet 1-5µm	55±10
Effektivitet 5-10µm	78±6
Effektivitet 10-20µm	91±4
Effektivitet 20-30µm	97±4
Effektivitet 30-50µm	99±1
Partikelstørrelseskategori	Partikelseparationseffektivitet Masse [%]
Samlet effektivitet	93±3
Effektivitet 1-5µm	61±9
Effektivitet 5-10µm	80±6
Effektivitet 10-20µm	93±4
Effektivitet 20-30µm	97±3
Effektivitet 30-50µm	99±1

De sammenfattede data bekræfter de observationer, der kan udledes af de grafiske repræsentationer, og den indbyrdes statistiske sikkerhed af de opnåede måleresultater mellem de forskellige forsøg er endog meget god. De opnåede data udgør således et solidt grundlag for at vurdere tromlefilterteknologiens partikelfjernelseeffektivitet ved filtrering af svømmebadsvand. På baggrund af dataene kan det derfor konkluderes, at der med den tromlefiltertype, der i dag markedsføres af Ultraaqua til filtrering af

svømmebadsvand, monteret med en InBlue Sub 5 filterdug, kan opnå en samlet partikelseparations-effektivitet på omkring 93% af den tilførte partikelmasse og omkring 65% af det tilførte partikelantal.

Såvel antallet som den tilsvarende masse af partikler større end $10\mu\text{m}$ reduceres ved filtreringen med en effektivitet, der er større end 90%. For partikler mindre end $10\mu\text{m}$ ses en separationseffektivitet på omkring 80% for partikler i størrelsesområdet $5\text{-}10\mu\text{m}$ og omkring 60% for partikler i området $1\text{-}5\mu\text{m}$. Den opnåede massefjernelseskapa-citet er på niveau med tidligere målte massefjernelseskapa-citeter for traditionelle tryksandfiltre, mens den tilsvarende reduktion i partikelantalskoncentrationen er lavere end tidligere målt for tryksandfiltre. Dette skyldes, at de virkningsmekanismer, der giver anledning til partikelseparation i tryksandfiltre, bevirker en bedre separation af de helt små partikler. Den store forskel i forhold til tromlefilteret er her en forbedret reduktion i antalskoncentrationen af partikler mindre end $5\mu\text{m}$. Det er således også Ultraaqua's erfaring, at anlæg, der bygges med tromlefilterteknologi som hovedfiltreringsteknologi, bør suppleres med et delstrømssandfilter for at undgå akkumulering af helt små partikler i bassin-vandet.

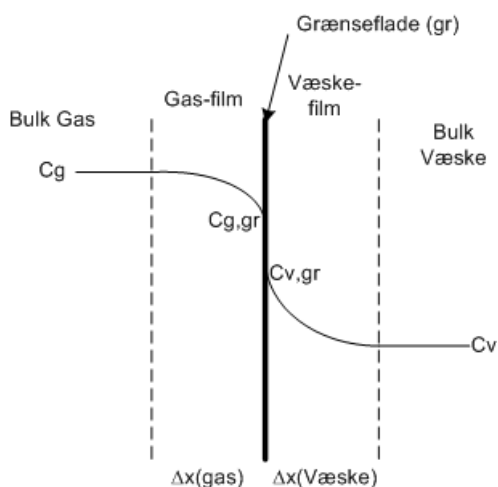
Samlet set viser tromlefilterundersøgelsen, at mere end 90% af den via de badende tilførte organiske partikelmasse fjernes umiddelbart fra svømmebadsvandssystemet. Derved elimineres denne kilde til klorforbrug og dannelse af klorbiprodukter i modsætning til de konventionelle vandbehandlings-systemer, hvor denne partikelmasse opbevares i sandfiltrene og reagerer med klor i sandfiltrene frem til næste returskyl.

3.2 Undersøgelse af luftstrippingsteknologi

3.2.1 Udvikling af modelværktøj til analyse af måledata fra undersøgelse af luftstrippingsteknologi

Som et værktøj til analyse af de opnåede måledata af THM koncentrationen ved de forskellige målepunkter i den afprøvede luftstrippingsteknologi blev der under projektperioden opstillet en matematisk model til beskrivelse af kinetik og ligevægt for masseoverførselsprocessen i luftstrippingsreaktoren. Den matematiske model præsenteres i det følgende.

Når en gasart skal overføres fra gasfase til vandfase over grænsefladen mellem de to faser, vil massetransporten i hver fase foregå som molekylær diffusion. Massetransporten vil medføre en koncentrationsgradient i det laminare grænselag i begge faser, der udgør den drivende kraft for masseoverførslen. Ved en given drivende kraft vil størrelsen af masseoverførslen være styret af transportmodstanden, der antages at ligge i det laminare grænselag for hver fase. Det laminare grænselag antages at ligge i en vis afstand fra grænsefladen mellem de to faser. Transportmodstanden i bulk-fasen antages at være uden betydning. Dette er illustreret i Figur 3.1.



Figur 3.15 To-film modellen til beskrivelse af masseoverførsel mellem gas og væske

Den matematiske beskrivelse af massetransporten mellem de to faser over grænselaget tager udgangspunkt i Fick's lov for molekylær diffusion:

$$J = D \cdot \frac{dc}{dx}$$

hvor J er fluxen [mol/m²·s], D(t) er den molekylære diffusionskoefficient for den givne gas [m²/s] ved den aktuelle temperatur, c er den molære koncentration af gas [mol/m³], og x er afstanden relativt til grænsefladen (grænsefladetykkelsen) [m].

Ved anvendelse af Fick's lov antages det, at massetransporten i grænselaget er i ligevægt, således at der ikke sker en akkumulering af masse i filmen. Under antagelse af at:

- Der er en lineær koncentrationsgradient i grænselagene
- Modstanden for massetransport udelukkende ligger i den ene fase – i dette tilfælde væskefasen
- Modstanden mod massetransport kan beskrives ved en areal-volumenvægtet samlet masseoverførselskoefficient defineret i forhold til væskefasen (K_{La})

kan der af Fick's lov udledes følgende udtryk til beskrivelse af gas-væske massetransporten over grænselaget mellem de to faser:

$$\frac{dC_{vand}}{dt} = K_{La} \cdot (C_{Liqevægt} - C)$$

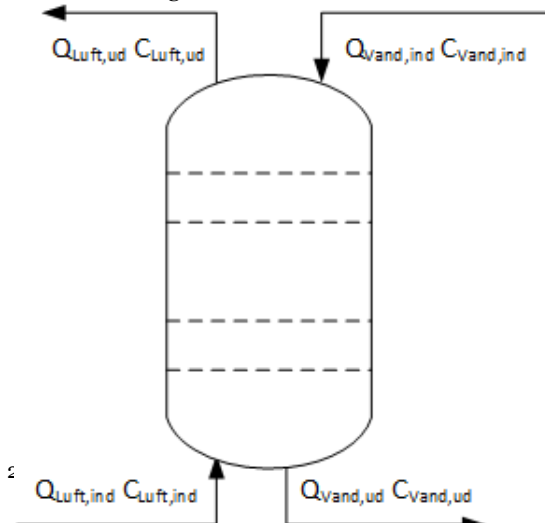
Sammenfattende udtrykker ovenstående ligning, at masseoverførslen af en gasart mellem gas- og væskefase er styret af to faktorer:

- Et modstandsled K_{La} , som i én parameter samler de fysiske forhold i et givet system, der bidrager til modstanden mod massetransport, dvs. forholdet mellem diffusionskoefficienten for gassen (D) og tykkelsen af grænselaget (Δx) samt overflade-volumenforholdet mellem gas og væske (A/V):

$$K_{La} = \frac{D}{\Delta x} \cdot \frac{A}{V}$$

- En drivende kraft udtrykt som differencen mellem ligevægtskoncentrationen af gasarten i vandfasen $C_{Liqevægt}$ ved den givne koncentration af gasarten i gasfasen og den aktuelle koncentration af gassen i vandfasen C.

Med baggrund i ovenstående udtryk for massetransporten mellem gas- og væskefase samt gas- og væskeflowene over en modstrøms luftstrippingsteknologi, som skitseret nedenfor (Figur 3.2), kan der for en ikke reaktiv gasart udledes en matematisk model til beskrivelse af masseoverførslen i teknologien.



Figur 3.16 Principskitse af modstrøms luftstrippingsteknologi

Ligevægtskoncentrationen for en gas i vandfasen beskrives ved Henry's lov ved hjælp af Henry's konstant (K_H) for den givne gasart ved en given temperatur samt partialtrykket (p) af gassen i gasfasen:

$$C_{Ligevægt} = K_H \cdot p$$

Ved substitution af Henry's lov ind i masseoverførselsudtrykket fås således:

$$\frac{dC_{vand}}{dt} = K_L a (K_H p - C)$$

Partialtrykket af gassen i gasfasen p kan udtrykkes ved ændringen i koncentrationen i vandfasen samt forholdet mellem vand- og gasflow:

$$p = \frac{Q_{vand}}{Q_{luft}} \cdot (C_{vand,ind} - C)$$

Og ved substitution af dette udtryk ind i massetransportligningen kan følgende omskrivning laves:

$$\frac{dC_{vand}}{dt} = K_L a \cdot \left(K_H \cdot \frac{Q_{vand}}{Q_{luft}} \cdot (C_{vand,ind} - C) - C \right) = K_L a \cdot K_H \cdot \frac{Q_{vand}}{Q_{luft}} \cdot C_{vand,ind} + C \cdot \left(-K_L a \cdot K_H \cdot \frac{Q_{vand}}{Q_{luft}} - K_L a \right)$$

Denne ligning kan simplificeres ved at isolere C og samle de øvrige parametre i konstanter:

$$\frac{dC_{vand}}{dt} = K_1 + K_2 C$$

Hvor K_1 og K_2 er:

$$K_1 = K_L a \cdot K_H \cdot \frac{Q_{vand}}{Q_{luft}} \cdot C_0 \quad \wedge \quad K_2 = -K_L a \cdot K_H \cdot \frac{Q_{vand}}{Q_{luft}} - K_L a$$

Den simplificerede ligning kan omskrives til følgende bestemte integral med grænserne gående fra indløbskoncentrationen $C_{vand,ind}$ til udløbskoncentrationen C inden for tiden $t=0$ til t svarende til opholdstiden for vandet i strippingreaktoren.

$$\frac{dC}{dt} = K_1 + K_2 C \Leftrightarrow \frac{1}{K_1 + K_2 C} dC = dt \Leftrightarrow \int_{C_{vand,ind}}^C \frac{1}{K_1 + K_2 C} dC = \int_0^t dt$$

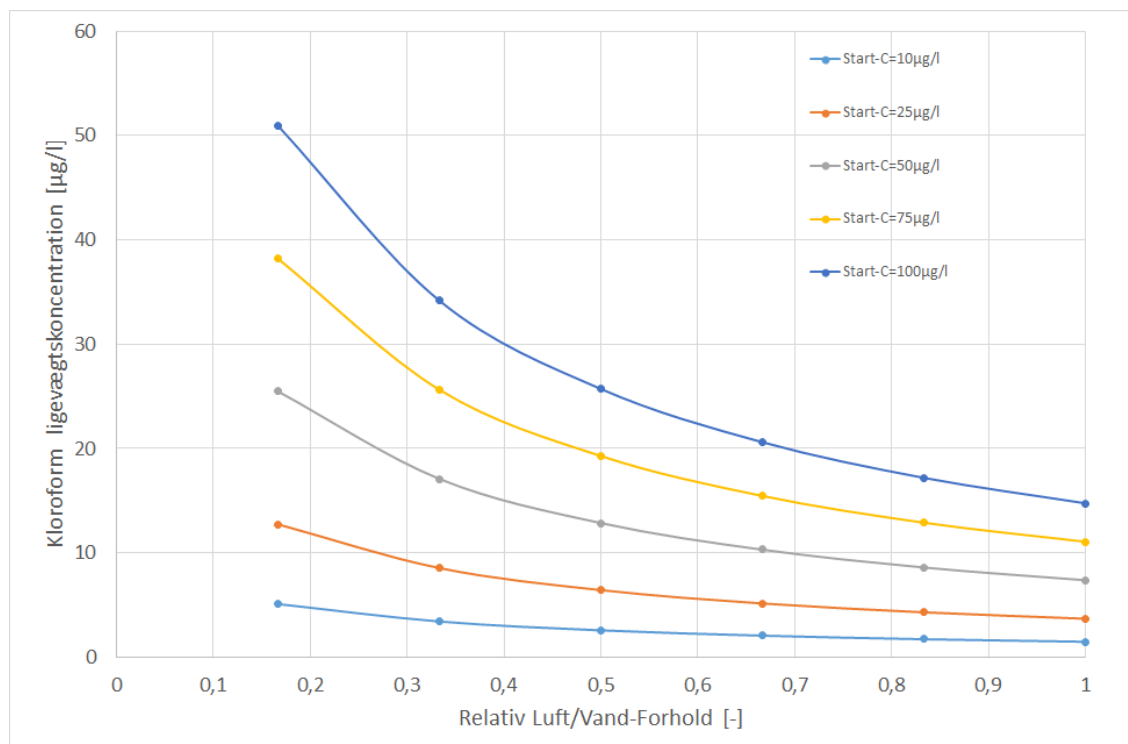
Til dette bestemte integral findes følgende analytiske løsning, som udgør den matematiske model til beskrivelse af kinetik og ligevægt for masseoverførselsprocessen i den undersøgte luftstrippingsreaktor:

$$C(t) = \frac{(K_1 + K_2 C_{vand,ind})}{K_2} \exp(K_2 t) - \frac{K_1}{K_2}$$

Opholdstiden som funktion af placeringen i reaktoren er estimeret ved at beregne den gennemsnitlige flowhastighed ud fra flowet og det samlede hulareal i hver plade og relatere denne til højden af hvert kammer. Den samlede opholdstid for reaktoren ved et givet flow er således beregnet som reaktorens samlede højde i forhold den gennemsnitlige flowhastighed. Der er ikke taget hensyn til den ekstra opholdstid, der fremkommer som følge af den svage opstuvning af vand, der observeres på hver mellembund. Den udviklede matematiske model er opbygget i et Excel regneark med anerkendte termodynamiske data for Henry's konstant for kloroform og bromdichlormethan, således at variationer i vand- og lufttemperatur kan korrigeres korrekt ved modellering af måledata.

3.2.2 Forsøgsplanlægning med baggrund i ligevægtsberegninger

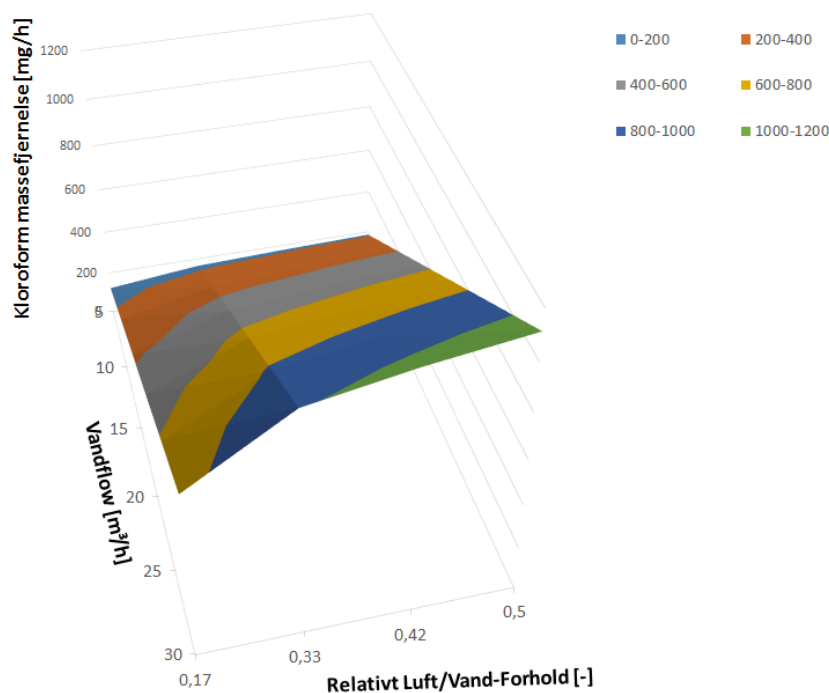
Som input til planlægningen af strippingsteknologiundersøgelserne blev der på baggrund af anerkendte termodynamiske data for kloroform (NIST) gennemført teoretiske beregninger af den opnåelige ligevægtskoncentration af kloroform i vand ved forskellige startkoncentrationer og varierende luft/vandforhold ved de temperaturforhold for vand og luft, som er tilstede i Gladsaxe Svømmehal. Derudover blev der med baggrund i disse data beregnet kloroform-massefjernelsesrater ved varierende vandflow og luft/vandforhold angivet relativt til det maksimale luft/vandforhold, der er anvendt i beregningerne. Resultatet af disse beregninger fremgår af nedenstående figur.



Figur 3.17 Opnåelig ligevægtskoncentration af kloroform ved varierende luft-vandforhold

Det fremgår, at den opnåelige ligevægtskoncentration falder med stigende relativt luft/vandforhold, omend den relative ændring mindskes gradvist ved stigende luft-vandforhold. På baggrund af en afvejning mellem energiforbruget til drift af luftstrippingsteknologien samt fjernelse af kloroform synes det således ikke relevant at køre forsøg med relative luft/vandforhold, der overstiger 0,5 i forhold til det maksimale luft/vandforhold anvendt i beregningerne.

Da kloroform dannes kontinuert i et svømmebadssystem med en vis dannelseshastighed, er det – ud over at opnå en fornuftig reduktion i kloroformkoncentrationen henover strippingreaktoren – afgørende, at den vandmængde, der behandles i strippingreaktoren, er tilstrækkeligt stor til at sikre en samlet kloroform-massefjernelse, der står mål med eller er større end dannelseshastigheden i systemet, for at kunne fastholde eller nedbringe koncentrationen i bassin vandet. For at få et indtryk af, hvordan massefjernelsen ændrer sig med vandflowet ved forskellige relative luft/vandforhold, er der gennemført tilsvarende ligevægtsberegninger ved en fastholdt tilløbskoncentration af kloroform på 50 µg/l. Resultatet af denne beregning fremgår af nedenstående 3D-plot.



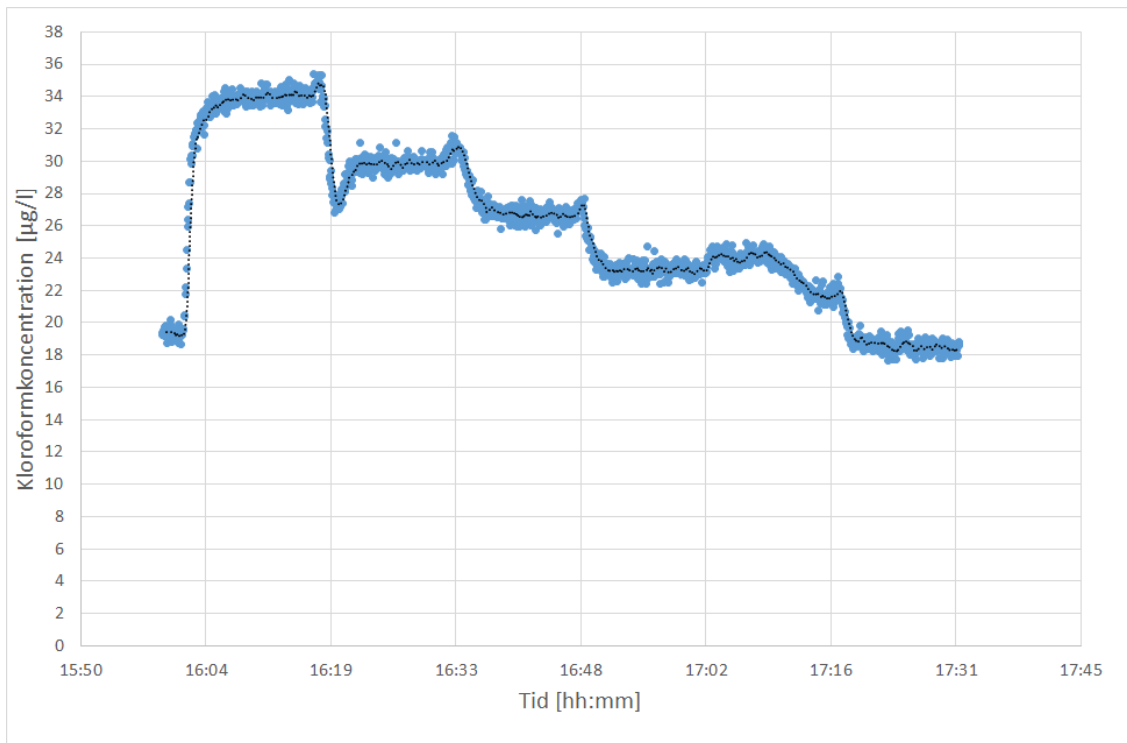
Figur 3.18 Sammenhæng mellem kloroform-massefjernelse, vandflow og relativt luft/vandforhold ved afgasning til ligevægt ved en initial kloroformkoncentration på 50 µg/l

Det er logisk, at massefjernelsen ved et givet luft/vandforhold vil stige lineært med flowet og tilløbskoncentrationen, hvorfor det umiddelbart kan sluttet, at det vil give bedst mening af have så højt et luft/vandforhold og vandflow som muligt. Imidlertid er det energikrævende at pumpe svømmebadsvand omkring stripningsreaktoren og samtidig pumpe en stor luftmængde i modstrøm hertil. Det er derfor vigtigt at lave en afvejning mellem luft- og vandflow og opnåelig massefjernelse. Beregningerne og figuren viser således, at forøgelsen i den opnåelige massefjernelse falder ved luft/vandforhold over 0,3 relativt til det maksimalt anvendte luftflow, hvor en forøgelse i det relative luft/vandforhold fra 0,3 til 0,5 kun bevirker en forøgelse i massefjernelsen på 13%. Ved en given tilløbskoncentration og et relativt luft/vandforhold på 0,3 eller derover vil massefjernelsen som nævnt alene være lineært afhængig af det anvendte vandflow. Således vil en fordobling i vandflow ved et givet luft/vandforhold give en fordobling i massefjernelsen. Imidlertid er det vigtigt at være opmærksom på, at energiforbruget til pumpning stiger mere end proportionalt med vandflowet, idet tryktabet alene i rørstrømningen stiger med flowhastigheden kvadreret. Under hensyntagen til såvel kloroform-massefjernelse som pumpeenergi kan et vejledende driftsområde for luftstrippingsteknologien anslås til et relativt luft/vandforhold på 0,3-0,5 i forhold til det i disse beregninger anvendte maksimale luft/vandforhold og et vandflow på 20-25 m³/h.

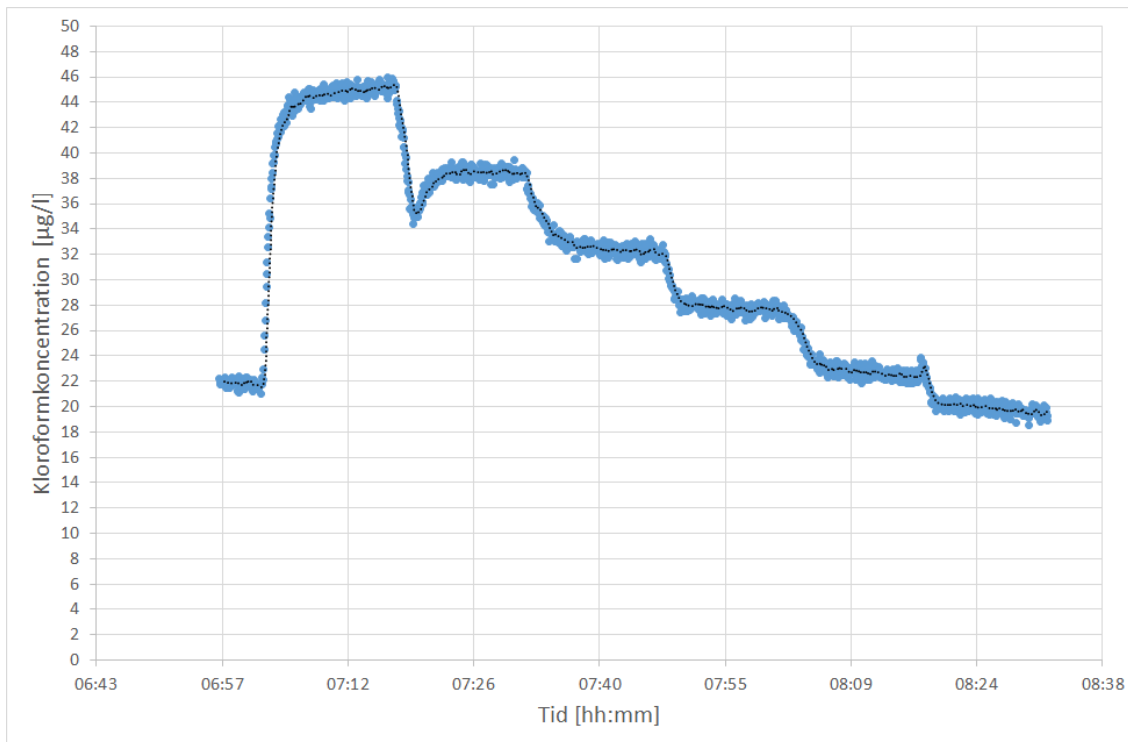
Ovenstående resultater og overvejelser har som nævnt taget udgangspunkt i termodynamiske ligevægtsberegninger og kan derfor alene bruges som vejledende i forhold til drifts- og forsøgsplanlægning. Beregningerne giver således ingen information om luft- og vandflowets betydning for masstransporthastigheden (K_{La}) og dermed for, om den givne reaktor inden for opholdstiden vil kunne afgasse kloroform til ligevægt. Med baggrund i beregningerne er det derfor besluttet at undersøge den installerede luftstrippingsteknologi ved vandflows på henholdsvis 15 og 25 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,16-0,5 i forhold til det i beregningerne anvendte maksimale luft/vandforhold. Dette sker for at få afdækket, hvilke massefjernelsesrater der i praksis kan opnås i et udsnit af den mest relevante del af den ovenstående massefjernelseskurve.

3.2.3 Resultater af gennemførte undersøgelseskampagner og modellering af måledata for luftstrippingsteknologi

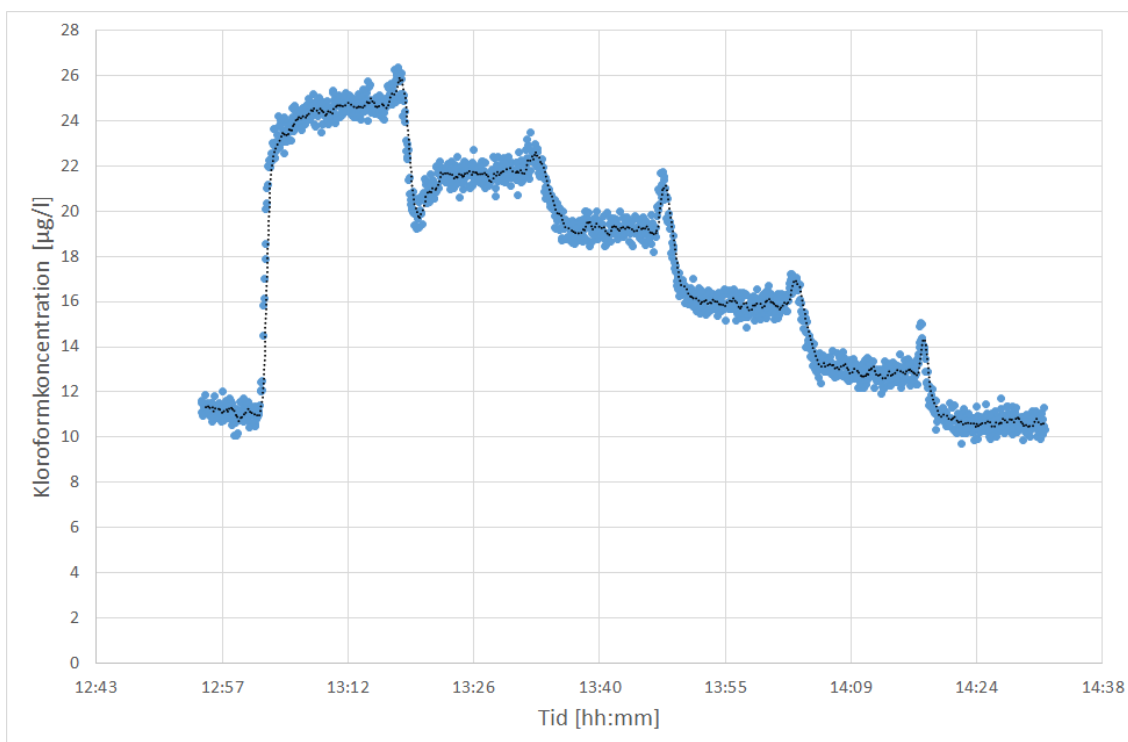
Som nævnt i afsnit 2.1.4 blev stripningsprocessen i den afprøvede luftstrippingsteknologi karakteriseret ved online måling af kloroform ved hjælp af MIMS og dennes indbyggede 6-vejs ventil, der blev koblet til prøvetagningsnpler fra luftstripperteknologiens indløb og udløb samt ved mellembund nummer 1, 2, 3 og 5. For at opnå et stabilt signal ved måling af koncentrationen ved hvert målepunkt blev der målt i 15 minutter ved hver position. Den samlede måletid for gennemmåling af hele reaktoren var således 1,5 time, hvilket gav lidt usikkerheder i forhold til modellering af de opnåede data, da indløbskoncentrationen af kloroform i perioder kunne ændre sig en del på 1,5 time. Derfor modsvarede de målte koncentrationer i mellembundene ikke altid helt den målte indløbskoncentration i koncentrationsprofilen. Nedenfor vises eksempler på det målte kloroformkoncentrationsprofil igennem luftstrippingsteknologien under forskellige flow og relative luft/vandforhold.



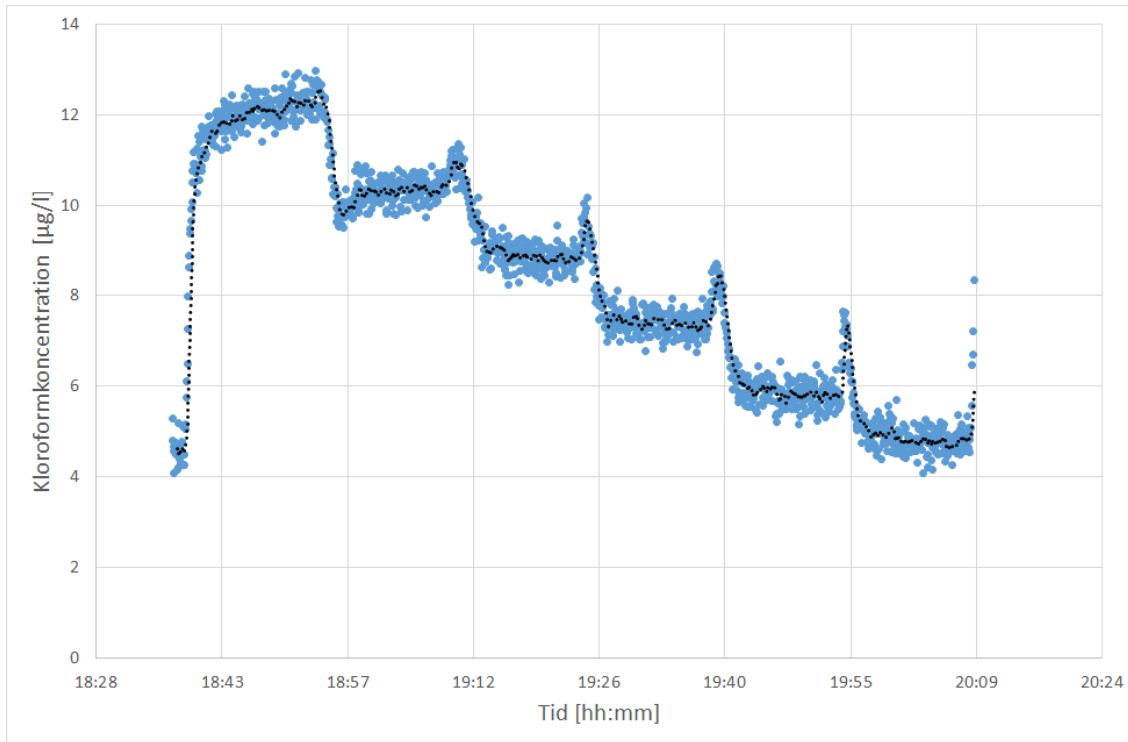
Figur 3.19 Kloroformprofil gennem luftstrippingsteknologien med måling af indløb og udløb og 4 målepunkter i reaktoren – flow 15 m^3/h og relativt luft/vandforhold på 0,14.



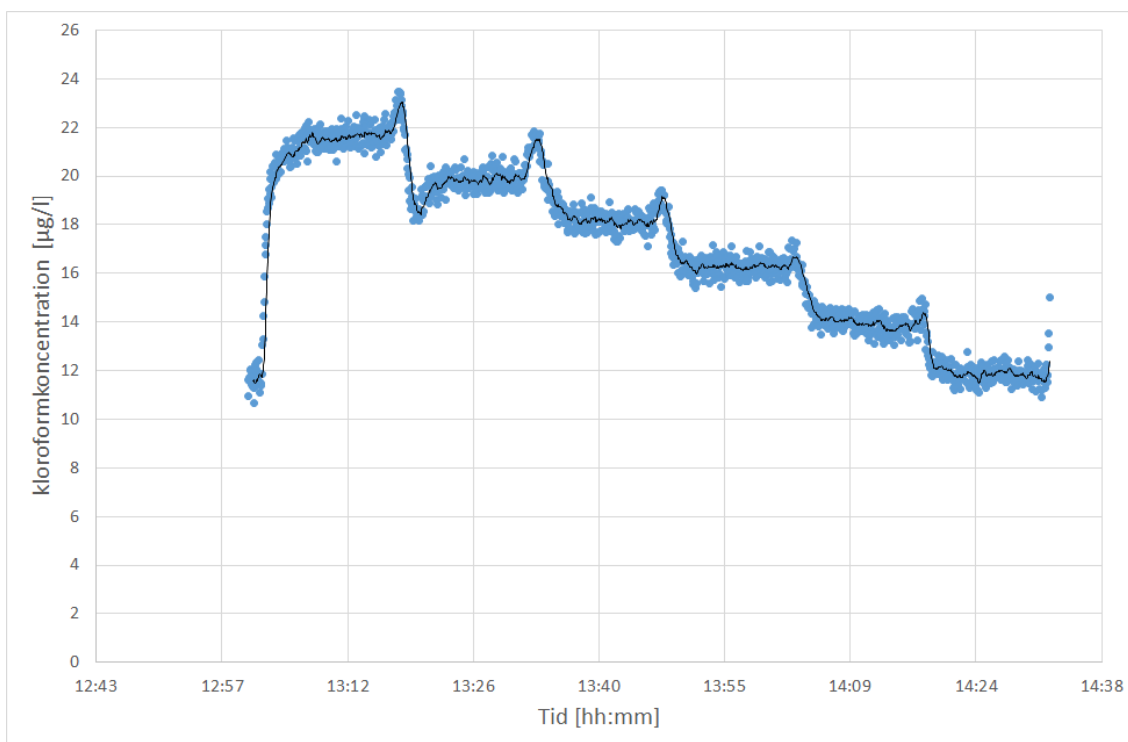
Figur 3.20 Kloroformprofil gennem luftstrippingsteknologien med måling af indløb og udløb og 4 målepunkter i reaktoren – flow 15 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,21.



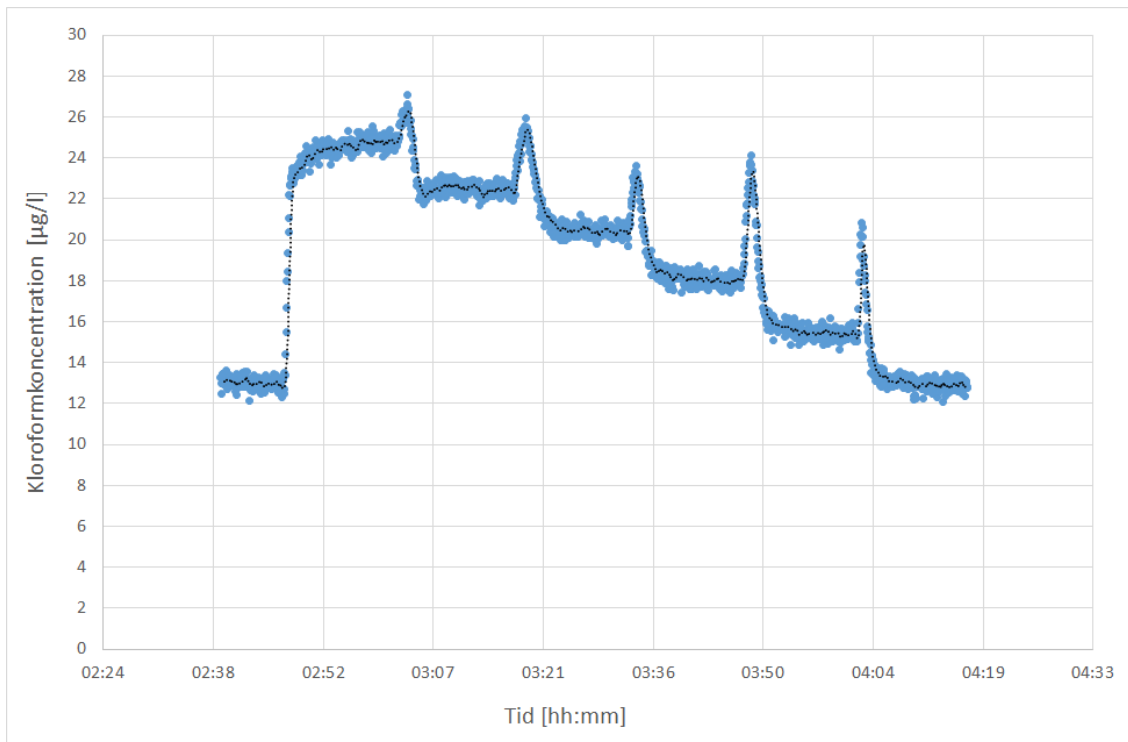
Figur 3.21 Kloroformprofil gennem luftstrippingsteknologien med måling af indløb og udløb og 4 målepunkter i reaktoren – flow 15 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,3.



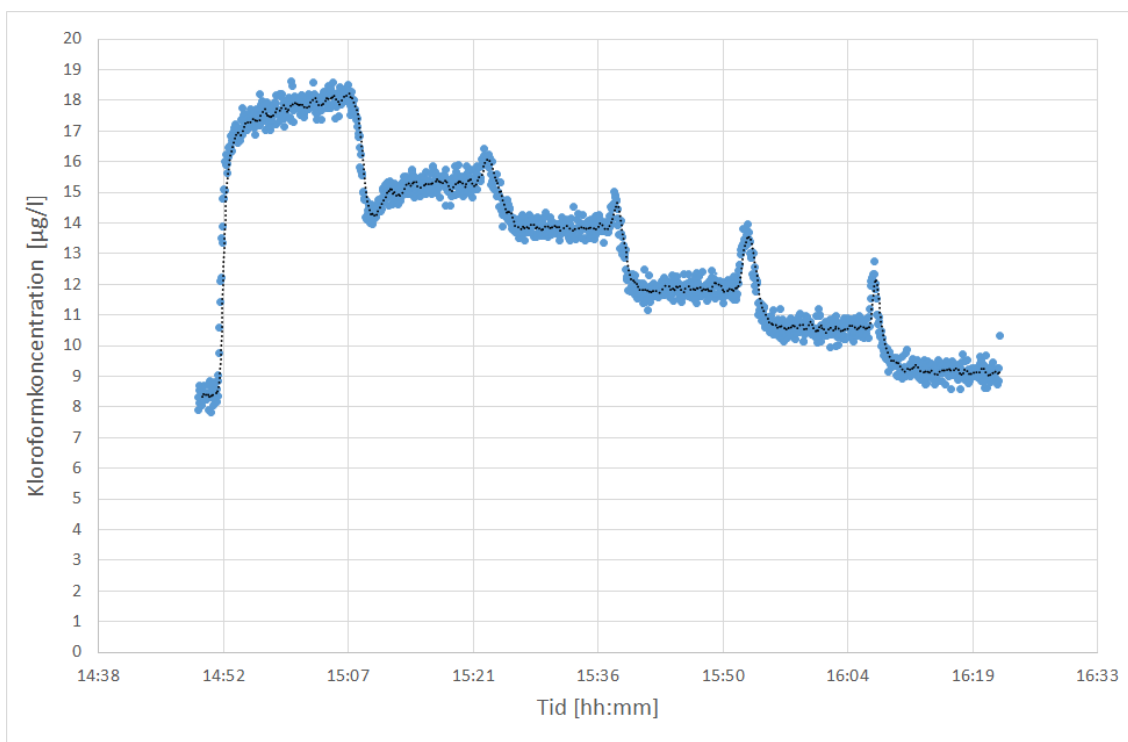
Figur 3.22 Kloroformprofil gennem luftstrippingsteknologien med måling af indløb og udløb og 4 målepunkter i reaktoren – flow 15 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,4.



Figur 3.23 Kloroformprofil gennem luftstrippingsteknologien med måling af indløb og udløb og 4 målepunkter i reaktoren – flow 25 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,14.



Figur 3.24 Kloroformprofil gennem luftstripnings teknologien med måling af indløb og udløb og 4 målepunkter i reaktoren – flow 25 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,25.

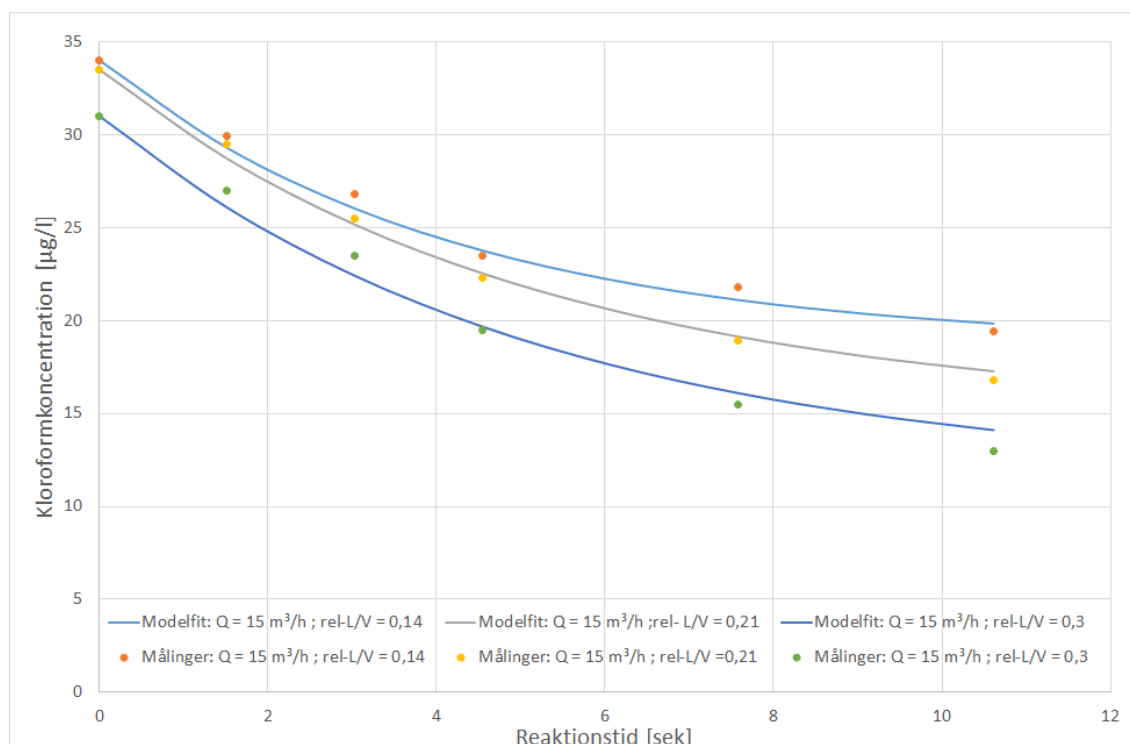


Figur 3.25 Kloroformprofil gennem luftstripnings teknologien med måling af indløb og udløb og 4 målepunkter i reaktoren – flow 25 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,35.

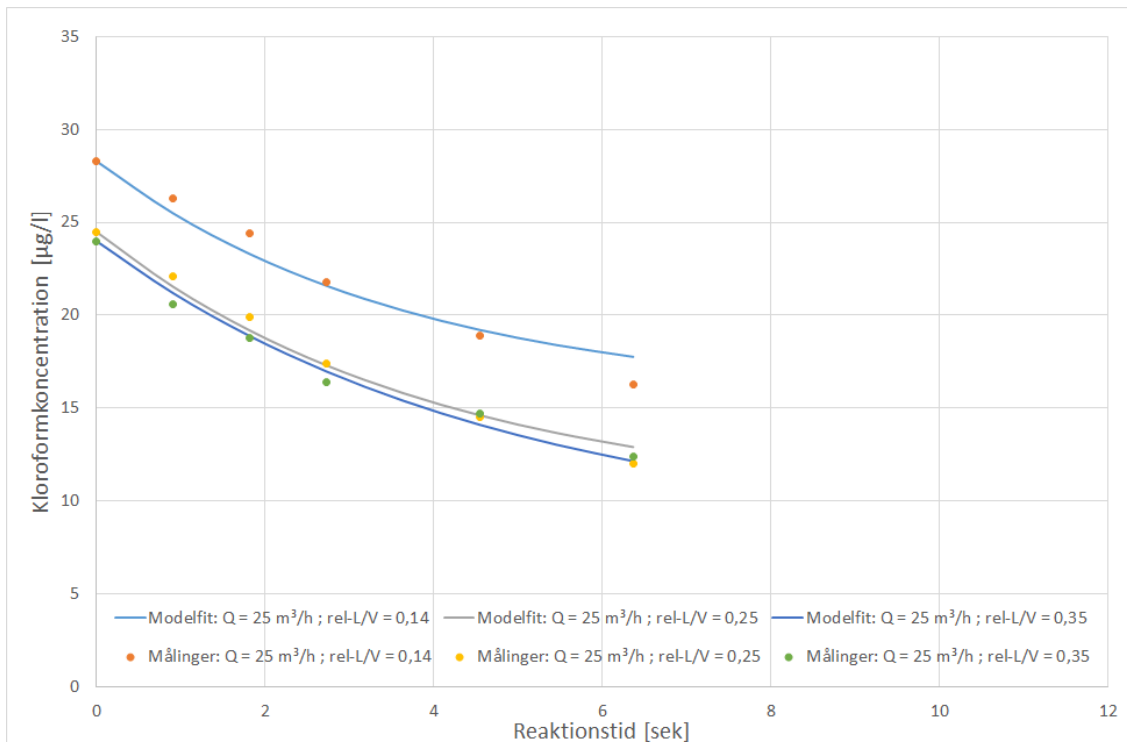
Som det fremgår af samtlige kloroformkoncentrationsprofiler, er kloroformkoncentrationen aftagende fra indløbet og ned igennem reaktoren til udløbet, hvilket understreger effekten af stripningsprocessen. Det er endvidere tydeligt, at springet i koncentration er større, hvor målepunkterne springer over en ekstra mellembund som ved springet fra mellembund 3 til mellembund 5. Det ses endvidere, at det automatiske ventilskifte fra et målepunkt til et andet bevirker en top og nogle gange et dyk på koncentrationskurven,

hvilket skyldes, at der ved ventilskiftet introduceres en luftlomme i tilløbsslangen til MIMS'en. Efter passage af luftlommen ses målesignalet imidlertid relativt hurtigt at indstille sig til det nye koncentrationsniveau ved den aktuelle mellembund og være stabilt under den efterfølgende måletid.

Koncentrationsniveauet ved hver mellembund svarer i praksis til koncentrationen efter en vis strippingreaktionstid eller opholdstid i reaktoren. Reaktionstiden som funktion af placeringen af mellembunde i reaktoren er estimeret ved at beregne den gennemsnitlige flowhastighed ud fra flowet og det samlede hulareal i hver mellembund og relatere denne til højden af hvert kammer. Med baggrund i kloroformmålingerne ved hver mellembund og estimeret på opholdstiden til hver måling kan der ud fra koncentrationsprofilerne udtrækkes en luftstrippingstidsserie. Denne tidsserie kan anvendes til modellering af reaktoren og strippingprocessen ved hjælp af den i afsnit 3.2.1 opstillede luftstrippingmodel og de aktuelle forsøgsbetingelser. Eksempler på modelfit til udtrukne tidsserier ved de forskellige forsøgsbetingelser fremgår af nedenstående figurer.



Figur 3.26 Eksempel på modelfit til eksperimentelt målt kloroformstripping i luftstrippingsteknologi ved 15 m³/h.



Figur 3.27 Eksempel på modelfit til eksperimentelt målt kloroformstripping i reaktoren ved 25 m³/h.

Som det fremgår, er det muligt at opnå endda meget gode modelfit til de målte data. Modellen er fittet til de målte data ved ændring af K_{La} , indtil fejlen mellem de målte og simulerede data er minimeret. Parameteren K_{La} er den eneste ubekendte størrelse i den matematiske model, og som nævnt tidligere er denne en reaktorspecifik størrelse, der i én parameter beskriver de fysiske forhold som reaktorens udformning resulterer i, i forhold til masseoverførselshastigheden af gas til/fra væske. Det er således muligt ud fra de estimerede K_{La} værdier at vurdere, hvilke driftsparametre der har størst betydning for kloroform-masseoverførselshastigheden i reaktoren. En statistisk sammenfatning af de estimerede K_{La} værdier for strippingreaktoren under de afprøvede forsøgsbetingelser er sammenfattet i Tabel 3.1. For de samme data er der i Tabel 3.2 lavet en tilsvarende sammenfatning af massejernelsesdata samt en sammenligning med teoretisk opnåelige massejernelser under samme indløbskoncentrationer

Tabel 3.3 Statistisk bearbejdning af modelfittede K_{La} -værdier for kloroform fra det samlede forsøgsmateriale.

Forsøgsbetingelser	Q=15m ³ /h Rel-L/V= 0,14	Q=15m ³ /h Rel-L/V= 0,21	Q=15m ³ /h Rel-L/V= 0,3	Q=15m ³ /h Rel-L/V= 0,44
Modelbestemt gennemsnitlig K_{La}-værdi [s⁻¹]	0,097 (N=31)	0,122 (N=29)	0,116 (N=29)	0,12 (N=3)
Konfidensinterval for K_{La} [± s⁻¹]	0,005	0,007	0,005	0,019
Procentuel afvigelse for K_{La} [%]	4,9	6,0	4,3	16
Forsøgsbetingelser	Q=25m ³ /h Rel-L/V= 0,14	Q=25m ³ /h Rel-L/V= 0,25	Q=25m ³ /h Rel-L/V= 0,35	
Modelbestemt gennemsnitlig K_{La}-værdi [s⁻¹]	0,142 (N=17)	0,146 (N=25)	0,171 (N=42)	
Konfidensinterval for K_{La} [± s⁻¹]	0,012	0,009	0,009	
Procentuel afvigelse for K_{La} [%]	8,6	6,4	5,3	

Tabel 3.4 Oversigt over massejernelser af kloroform under varierende forsøgsbetingelser og initialkoncentrationer samt teoretisk opnåelige massejernelser ved samme betingelser.

Forsøgsbetingelser	Q=15m ³ /h	Q=15m ³ /h	Q=15m ³ /h	Q=15m ³ /h
	Rel-L/V= 0,14	Rel-L/V= 0,21	Rel-L/V= 0,3	Rel-L/V= 0,44
Initialkoncentration [µg/l]	33±1,4	31±3,1	25±1,5	12±1,1
Gennemsnitlig kloroform-massejernelserate [mg/h]	210 (N=31)	244 (N=29)	211 (N=29)	124 (N=3)
Konfidensinterval [± mg/h]	10	24	12	6
Teoretisk opnåelig massejernelse [mg/h]	224	257	238	129
Forsøgsbetingelser	Q=25m ³ /h	Q=25m ³ /h	Q=25m ³ /h	
	Rel-L/V= 0,14	Rel-L/V= 0,25	Rel-L/V= 0,35	
Initialkoncentration [µg/l]	24±1,6	21±1,7	19±1,4	
Gennemsnitlig kloroform-massejernelserate [mg/h]	266 (N=17)	257 (N=25)	250 (N=42)	
Konfidensinterval [± mg/h]	18	19	17	
Teoretisk opnåelig massejernelse [mg/h]	272	312	317	

Som det fremgår af Tabel 3.1, er K_{La} værdierne for reaktoren ved de forskellige betingelser bestemt med endog meget god statistisk sikkerhed med en procentuel afvigelse, der inden for de enkelte forsøgsbetingelser - bortset fra forsøget med 15 m³/h og relativt luft/vandforhold på 0,44 - ligger under 10%. Det er således muligt at vurdere de opnåede data og fænomener på et solidt grundlag.

Der ses altså en tendens til, at masseoverførselshastigheden forøges svagt med et øget relativt luft/vandforhold, hvilket indikerer, at tykkelsen af det laminare grænselag på gassiden af grænsefladen reduceres med øget lufthastighed op til en vis grænse. En relativt større forøgelse i masseoverførselshastigheden ses imidlertid med øget vandflow, hvilket viser, at den største modstand mod masseransport ligger i det laminare grænselag på væskesiden af grænseflaget. Den øgede turbulens, der fremkommer ved det øgede vandflow igennem reaktoren, bevirker en markant reduktion i tykkelsen af grænseflaget resulterende i en højere masseoverførselshastighed. En anden effekt af det øgede vandflow og turbulens, der ligeledes kan medvirke til en øget masseoverførselshastighed, er, at der skabes et øget overflade-volumenforhold (kontaktareal) mellem gas og væske.

Den øgede masseoverførselshastighed ved det øgede vandflow giver imidlertid ikke mulighed for at optimere det fysiske design af stripningsreaktoren i form af lavere reaktorhøjde, idet det øgede vandflow ligeledes giver anledning til en reduceret opholdstid for vandet igennem reaktoren. Således bidrager den øgede masseoverførselshastighed ved flowet på 25 m³/h alene til, at stripningsprocessen forløber tilnærmelsesvist til ligevægt ved udløbet af reaktoren. Dette fremgår også tydeligt ved sammenligning af de opnåede kloroform-massejernelsesrater med de teoretisk opnåelige massejernelser ved de undersøgte forsøgsbetingelser (Tabel 3.2). Her ses det, at de opnåede massejernelsesrater ved det lave flow (15 m³/h) er relativt set tættere på det teoretisk opnåelige sammenlignet med det høje vandflow. Konklusionen er derfor, at den øgede masseoverførselshastighed med stigende flow ikke kan kompensere for den reducerede opholdstid. En optimering af reaktorstørrelsen kan derfor alene ske ved at optimere reaktorudformingen således, at der kan opnås en højere masseoverførselshastighed, der er uafhængig af opholdstiden.

4. Konklusioner

Nærværende projekt har omhandlet afprøvning og dokumentation af to vandbehandlingsteknologier til mere energieffektiv forbedring af vandkvaliteten i svømmebade, end der kan opnås med konventionelle vandbehandlingsteknologier.

Den ene teknologi er et energieffektivt tromlefilter til hurtig og løbende fjernelse af partikler fra svømmebadsvandsystemet i modsætning til den konventionelle sandfilterløsning, hvor partiklerne fjernes fra vandet, men akkumuleres i filtrene til næste returskyl. I denne periode bidrager det partikulære materiale til klorforbrug samt til dannelse af biprodukter, der frigives til svømmebadsvandet. Tromlefilterløsningen drives endvidere uden tryk og med et begrænset vandforbrug til de løbende returskyl, hvilket gør den langt mere energi- og vandeffektiv end den konventionelle sandfilterløsning.

På baggrund af de eksperimentelle undersøgelser kan det konkluderes, at der med den tromlefiltertype, der i dag markedsføres af Ultraaqua til filtrering af svømmebadsvand - monteret med en InBlue Sub 5 filterdug - kan opnås en samlet partikelseparationseffektivitet på omkring 93% af den tilførte partikelmasse og omkring 65% af det tilførte partikelantal.

Såvel antallet som den tilsvarende masse af partikler større end 10 μ m reduceres ved filtreringen med en effektivitet, der er større end 90%. For partikler mindre end 10 μ m ses en separationseffektivitet på omkring 80% for partikler i størrelsesområdet 5-10 μ m og omkring 60% for partikler i området 1-5 μ m. Den samlede massefjernelseskapacitet er på niveau med tidligere målte massefjernelseskapaciteter for traditionelle tryksandfiltre, mens den tilsvarende reduktion i partikelantalskoncentrationen er lavere end tidligere målt for tryksandfiltre. Dette skyldes, at de virkningsmekanismer, der giver anledning til partikelseparation i tryksandfiltre, bevirker en bedre separation af de helt små partikler, hvor den store forskel i forhold til tromlefilteret er en forbedret reduktion i antalskoncentrationen af partikler mindre end 5 μ m. Det er således også Ultraaqua's erfaring, at anlæg, der bygges med tromlefilterteknologi som hovedfiltreringsteknologi, bør suppleres med et delstrømssandfilter for at undgå akkumulering af helt små partikler i bassin vandet. Imidlertid kan der ved anvendelse af tromlefiltre til filtrering af hovedstrømmen opnås en separation af mere end 90% af den via de badende tilførte organiske partikelmasse med et energiforbrug, der er op til 75% mindre end for konventionelle anlæg. Ydermere vil den løbende fjernelse af den separerede partikelmasse fra hele svømmebadsvandsystemet bevirke, at denne kilde til klorforbrug og dannelse af klorbiprodukter elimineres i forhold til de konventionelle vandbehandlingssystemer, hvor denne partikelmasse opbevares i sandfiltrene og reagerer med klor i sandfiltrene frem til næste returskyl.

Ud over tromlefilteret er der i undersøgelsen indgået afprøvning af en luftstrippingsteknologi til fjernelse af flygtige klorbiprodukter som eksempelvis THM (trihalometaner) og trikloraminer. Ved anvendelse af denne teknologi fjernes disse uønskede biprodukter kontrolleret og løbende fra svømmebadsvandet, hvorved vandkvaliteten forbedres. Samtidig opnås et forbedret indeklima i svømmehallen, da frigivelsen af de uønskede flygtige biprodukter til luften over svømmebadsvandet reduceres betydeligt.

Som grundlag for forsøgsdesign og tolkning af de opnåede måledata ved undersøgelsen af luftstrippingsteknologien blev der udviklet en matematisk model til simulering af processen og indflydelsen af de vigtigste driftsparametre - herunder vandflow samt luft/vandforholdet. På baggrund heraf blev der gennemført teoretiske undersøgelser med henblik på at fastlægge relevante forsøgsbetingelser, og efterfølgende blev der gennemført en omfattende forsøgskampagne i form af i alt 176 gennemførte forsøg under varierende driftsbetingelser. Ved bearbejdning af de opnåede data kan det

konkluderes, at det er muligt at opnå endda meget gode modelfit til de målte data ved ændring af reaktorspecifikke parametre. Der er således opnået betydelig forståelse for, hvilke driftsparametre der har størst betydning for kloroformudluftningen i reaktoren – en forståelse, der efterfølgende kan anvendes til at optimere design og drift af reaktoren. Med det nuværende reaktordesign kan det konkluderes, at der kan opnås en særdeles effektiv udluftning af kloroform med en udløbskoncentration, der svarer til den teoretisk beregnede ligevægtskoncentration under de undersøgte driftsbetingelser. Den matematiske model er således i stand til præcist at simulere processen i reaktoren, hvorved det er muligt at forudsige kloroformfjernelsen ved forskellige scenarier. Herunder kan modellen endvidere anvendes til at beregne den opnåelige massefjernelse af kloroform, der er den afgørende parameter ved anvendelse af teknologien i en given svømmehal.

5. Litteratur

- /1/ Srinivasan, A., Chowdhury, P. & Viraraghavan, T. (2009): Air stripping in industrial wastewater treatment - Water and Wastewater treatment technologies. Encyclopedia of Life Support Systems, EOLSS Publishers/UNESCO, ISBN- 978-1-84826-188-4.
- /2/ Chao, A. C., Liu, Y., & Rasdorf, W. J. (1988): Spreadsheet approach for the design of air stripping of volatile organic contaminants (VOCs) from water. In Computing in civil engineering: Microcomputers to supercomputers: Proceedings of the fifth conference, Radisson Mark Plaza Hotel, Alexandria, Virginia (pp. 731-741).
- /3/ Dzombak, D. A., Fang, H.-J., & Roy, S. B. (1993): ASDC: A Microcomputer-Based Program for Air Stripper Design and Costing. Revision. Ft. Belvoir, Defense Technical Information Center.
- /4/ El-Behlil, M.A., El-Gezawi, S. M. & Adma, S.A. (2012): Volatile Organic Chemicals Removal from Contaminated Water using Air Stripping Low Profile Sieve Tray Towers. Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC 16 2012, Istanbul, Turkey.
- /5/ Evuti, A.M., Abu Hassan, M.A., Noor, Z.Z. & Ibrahim, R.K.R. (2013): Simulation of the Effect of Process Variables on Packed Column Air Stripper Performance. World Applied Sciences Journal, 25 (7), pp. 1100-1106.
- /6/ Sander, R. (2015): Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. Atmos. Chem. Phys., 15, pp. 4399-4981.
- /7/ Kibbey, T.C.G., Pennell, K.D. & Hayes, K.F. (2001): Application of Sieve-Tray Air Strippers to the Treatment of Surfactant-Containing Wastewaters. AIChE Journal, Vol. 47, No. 6, pp. 1461-1470.
- /8/ Krishna, R., van Baten, J.M., Ellenberger, J., Higler, A.P. & Taylor, R. (1999): CFD simulations of sieve tray hydrodynamics. Trans IChemE, Vol 77, Part A, pp. 639-646.
- /9/ Zareei, F. & Ghoreyshi, A.A. (2011): Modeling air stripping-vapor permeation hybrid process for removal of VOCs from wastewater and VOCs recovery. World Applied Sciences Journal, 13(9), pp. 2067-2074.

Udvikling og afprøvning af svømmebadsvandteknologi til energieffektiv reduktion af THM og partikulært organisk stof

Miljø- og Fødevareministeriet

Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning

Haraldsgade 53

DK - 2100 København Ø

Tlf.: (+45) 72 54 30 00

www.svana.dk