

Rensning af Miljøfremmede stoffer i vandværksfiltre

Erik Arvin, Tanja Kagstrup, Rasmus Boe-Hansen,
Hans-Jørgen Albrechtsen, Bent Skov og Uwe Woter
Danmarks Tekniske Universitet , Institut for Miljø & Ressourcer

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

INDHOLD	3
FORORD	5
SAMMENFATNING	7
SUMMARY	9
1 INDLEDNING	11
1.1 BAGGRUND	11
1.2 FORMÅL	12
2 LITTERATUR	13
3 BESKRIVELSE AF ANLÆGGET	15
3.1 OPBYGNING AF FILTRE	15
3.2 FREMSTILLING AF RÅVAND OG DOSERING AF STOFFER	15
3.3 DRIFT AF FILTRE	19
3.4 ON-LINEMÅLING	19
3.5 RETURSKYL	19
3.6 MODELLERING	19
4 AUTOMATISK STYRING OG MONITERING	21
4.1 BASAL FUNKTIONALITET	21
4.2 GRAFISK BRUGERINTERFACE	21
4.3 AKTUATOR KONTROL	24
4.4 DATAOPSAMLING FRA ONLINE SENSORER	25
4.5 DATABEHANDLING	26
4.6 FEJLHÅNDBLING	26
4.7 FEJLRAPPORTERING	27
5 KARAKTERISERING AF FILTERMATERIALER	29
5.1 SPORSTOFFORSØG	29
5.2 MODELLERING	30
6 DRIFTSTEST	35
7 KONKLUSIONER	39
8 REFERENCER	41

Forord

Dette projekt "Rensning af miljøfremmede stoffer i vandværksfiltre" er udført i samarbejde mellem Miljøstyrelsen og Miljø & Ressourcer, DTU i perioden efterår 2003 til efterår 2004.

Projektet er udført af følgende projektgruppe fra Miljø & Ressourcer, DTU:

- Erik Arvin (Projektleder)
- Tanja Kagstrup
- Rasmus Boe-Hansen
- Hans-Jørgen Albrechtsen
- Bent Skov
- Uwe Wolter

Projektarbejdet er fulgt af en styregruppe med følgende medlemmer:

- Bente Villumsen, Miljøstyrelsen
- Susanne Rasmussen, Miljøstyrelsen
- Pia Jacobsen, Århus Kommunale Værker (rep. for DANVA)
- Jørn Leth-Espensen, Foreningen af Vandværker i Danmark

Sammenfatning

For at løse problemer omkring vandbehandling er der ofte behov for at kunne udføre forsøg under kontrollerede forhold og med tilsætning af stoffer, der ikke er acceptable at tilsætte under praktisk vandværksdrift. Dette gælder forsøg med tilsætning af miljøfremmede stoffer og uønskede naturstoffer, f.eks. benzinstoffer, pesticider og arsen. Formålet med dette projekt har været at opbygge et højt automatiseret pilot-vandværk, der egner sig til at stå på et vandværk i en længere periode og blive drevet med et minimum af overvågning. Det opbyggede pilot-vandværk kan i en senere fase blive anvendt til detailundersøgelser af fjernelsen af miljøfremmede stoffer og uønskede naturstoffer.

Der er i projektet opbygget et pilotanlæg bestående af to filtre, hvor filtermaterialet i det ene filter består af kvartssand og filtermaterialet i det andet filter består af Filtralite®, der er et ekspanderet lermateriale. Anlægget er overvåget og automatisk styret v.h.a. programmet LabView. Monitoringen og styringen er udformet meget fleksibelt således, at driften kan køres automatisk, semi-automatisk eller manuelt. Det er let for brugeren at ændre driftsformer og følge med i driftsresultaterne. Driften kan tillige overvåges via Internettet.

Denne rapport beskriver konstruktionen af pilot-anlægget og funktionen af monitorings- og kontrolsystemet baseret på LabView. Egenskaberne af filtermaterialerne er beskrevet på basis af tracerforsøg og modellering af de hydrauliske forhold ved hjælp af simuleringsprogrammet AQUASIM. Funktionen af monitoringssystemet er illustreret gennem målinger af temperatur, ledningsevne og iltkoncentration.

Summary

In order to solve problems related to water works treatment, it is often desirable to be able to conduct experiments under controlled conditions and at the same time be able to add compounds that cannot be added under normal water works practice. Examples are experiments where the removal of xenobiotic compounds and undesirable natural compounds is studied. Such compounds are gasoline compounds, pesticides, arsenic, etc.. The purpose of this project has been to build a highly automated water works pilot plant that in a later stage can be used to study the removal of xenobiotic compounds and unwanted natural compounds.

The pilot water works that has been built can relatively easily be placed within a real water works where it can be operated by its own for an extended period of time due to the automatic monitoring and control, which has been implemented by the programme LabView. The monitoring and control has been implemented in a flexible way which enables operation of the plant from being automatic, semi-automatic to manual. It is also easy for the operator to change the operational strategy and to follow the operational results. The pilot plant has two filters, one of them containing quartz sand as filter material and the other containing Filtralite®, which is an expanded clay material.

This report describes the construction of the pilot plant and the function of the monitoring and control system using LabView. The properties of the filter materials are described on the basis of tracer experiments and modelling of the hydraulic behaviour using the programme AQUASIM. The functioning of the monitoring system is illustrated by measurements of temperature, conductivity and oxygen concentration.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Produktion af dansk drikkevand er normalt baseret på uforurenede grundvand af så god en kvalitet, at der kun kræves en simpel behandling for at fjerne de naturligt forekommende uønskede stoffer, dvs. metan, svovlbrinte, jern, mangan og ammonium. Derudover kalkstabiliseres vandet visse steder. Såfremt der findes miljøfremmede stoffer i en vandværksboring, nedlægges denne som regel. Der er allerede nedlagt mange boringer pga. organiske mikroforureninger, især pga. pesticider og organiske chlorerede opløsningsmidler. I mange boringer finder man spor af benzinstofferne benzen, toluen, ethylbenzen, xylener og naphthalen (BTEXN). I fremtiden må det tillige forventes, at man en del steder vil finde benzinstoffet MTBE (methyl tertier butyl ether).

MTBE er et benzinstoff, der anvendes til at øge oktantalene. MTBE har været anvendt i Danmark siden 1985, og forbruget har været på op til 100.000 tons pr. år. I dag er forbruget begrænset, da MTBE kun tilsættes 98 oktanol (Arvin & Broholm, 2003). MTBE detekteres i 6 % af undersøgte drikkevandsboringer, og i 0,6 % af tilfældene (7 boringer) er grænseværdien overskredet (Grundvandsovervågning, 2003). Undersøgelser af fjernelsen af MTBE på Grubbemølleværket, Svendborg, har vist at 17-32 % af indløbskoncentrationen på 10-65 µg/l fjernes ved afstripping, mens hovedparten af det resterende MTBE fjernes ved nedbrydning i sandfiltrene (Nielsen, 2002).

Aromatiske kulbrinter (Benzen, toluen, ethylbenzen og xylener, BTEX) detekteres i 13 % af undersøgte drikkevandsboringer, og i 0,5 % af boringerne er grænseværdien overskredet. Kilderne til denne forurening kan være lossepladser, olie- og benzinanlæg, asfaltvirksomheder og gasværker (Grundvandsovervågning, 2002). Pilotforsøg med nedbrydning af BTEX ved lave koncentrationer (7-15 µg/l) har vist, at stofferne kan nedbrydes til under detektionsgrænsen (GC analyse) ved at anvende et vandbehandlingsanlæg bestående af et for- og efterfilter.

Pesticider detekteres i 25,5 % af undersøgte vandværksboringer, og i 7,3 % af tilfældene er grænseværdien på 0,1 µg/l overskredet (Grundvandsovervågning, 2002).

Såfremt det ikke er muligt at finde alternative vandressourcer af god kvalitet, kan det blive nødvendigt at rense vandet for organiske mikroforureninger i en periode. Hvis organiske mikroforureninger skal fjernes effektivt i traditionelle vandværker, skal stoffet enten være flygtigt og/eller let nedbrydeligt.

Såfremt man ønsker at bestemme et vandværks evne til at fjerne miljøfremmede stoffer kan man af sikkerhedsmæssige grunde ikke blot tilsætte stofferne til vandværkets råvand. Gennemførelse af forsøg kræver, at man opstiller et pilotanlæg på stedet og at man evt. også fjerner rester af de uønskede stoffer inden afledning af det rensede vand til kloak.

1.2 Formål

Projektets formål er at bestemme kapaciteten af vandværkfiltere til at fjerne en række bionedbrydelige mikroforureninger og andre uønskede stoffer som led i almindelig vandværksdrift, herunder fjernelsen af benzinstoffer, phenoler og pesticider. I dette forprojekt har det været formålet at opbygge to højt automatiserede filtre i pilotskala, der egner sig til at blive placeret på vandværker som led i optimeringen af disse evne til at fjerne de uønskede stoffer. I forprojektet har det endvidere været formålet at få indsigt i filternes funktion, herunder filtermaterialernes egenskaber. Ydermere gives en oversigt over viden i den internationale litteratur.

2 Litteratur

Der findes kun meget begrænset litteratur om nedbrydning i vandværksfiltre af BTEX, MTBE og pesticider. Tidligere undersøgelser med sandfiltre i pilotskala har vist at det er muligt at nedbryde BTEXN til under grænseværdierne på 1-10 µg/l (tabel 2.1).

Tabel 2.1. Resultater fra litteraturen af forskellige undersøgelser af nedbrydningen af BTEXN.

Reference	Stoffer	Indløbs-koncentrationer	Udløbs-koncentrationer	Nedbrydnings-konstanter ⁽¹⁾
Engelsen et al. (1997)	benzen toluen o-xylen p-xylen ethylbenzen naftalen	ca. 15 µg/l ca. 7 µg/l	 <0,1 µg/l	2,5-3,5 m/d
Nielsen & Arvin (1996)	benzen toluen trimethylbenzen klorbenzen o-xylen p-xylen	33,1 µg/l 37,3 µg/l 30,5 µg/l 48,9 µg/l 42,3 µg/l 36,7 µg/l	1,6 µg/l 3,3 µg/l 0,1 µg/l 10,3 µg/l 0,5 µg/l 0,1 µg/l	-
Carlson et al. (1994)	benzen toluene naftalen	12 µg/l 5,6 µg/l 4,4 µg/l	0,3 µg/l 0,3 µg/l 0,6 µg/l	0,65 m/d 0,55 m/d 0,35 m/d

(1) 1' ordens nedbrydningskonstant, hvor hastigheden er arealbaseret (µg/m²/d) .

Pilotundersøgelser af Carlson et al. (1994) viser, at nedbrydningen af BTN starter efter ca. 1 måned. Ifølge Nielsen og Arvin (1996) ses først optimal nedbrydning af BTEXN efter en opstartsperiode på over 2 måneder for nye filtre, der ikke har været udsat for mikroorganismer fra drikkevand.

Engelsen et al. (1997) har vist, at jernindholdet (0-4 mg/l) ikke har nogen væsentlig indflydelse på nedbrydningen af BTEXN eller på nitrifikationsprocessen.

På Grubbemølle vandværk, Svendborg var indløbsvandet forurenet med 10-65 µg/l MTBE, hvilket reduceres til 0-3 µg/l efter vandværkets sandfiltre. 17-32 % af indløbskoncentrationen blev fjernet ved stripping og hovedparten af den resterende MTBE blev fjernet ved biologisk nedbrydning i sandfiltrene (Nielsen et al., 2002).

Kolonneforsøg med simuleret grundvand har vist, at MTBE kan nedbrydes effektivt i filtre fra ca. 3 mg/l til under 0,1 mg/l, Arvin et al. (2003).

Der er ikke fundet forsøg med vandværksfiltres kapacitet til at nedbryde pesticider. Nedbrydningsforsøg tyder dog på at visse stoffer potentielt kan nedbrydes. Toräng et al. (2003) finder halveringstider for 2,4-D og MCPP til henholdsvis 500 og 1100 dage i batchforsøg med uforurenet akvifermateriale ved 10 °C ved initialkoncentrationer på 1 µg/l. Tuxen et al. (2000) finder ligeledes nedbrydning af MCPP og 2,4-D samt dichlorprop i kolonneforsøg med mættet akvifermateriale. Mallat & Barceló (1998) finder halveringstider for glyphosat i grundvand på 32 dage.

3 Beskrivelse af anlægget

3.1 Opbygning af filtre

Anlægget består af to pilotfiltre med hver sin type filtermateriale. På figur 3.1 ses en skitse af anlægget og på figur 3.2 er vist et foto. I det ene filter benyttes sand, der er et traditionelt filtermateriale i vandværksfiltre. I det andet filter benyttes Filtralite® (Optirock, Norge), der er fremstillet af ekspanderet ler. Filtralite har en høj porøsitet (ca. 60 %), hvilket gør, at biomasse nemmere fastholdes i filteret. I begge filtre anvendes en partikelstørrelse på 1-2 mm, hvilket betyder, at der opnås et forhold på mindst 50 mellem filterdiameter og partikeldiameter, så randeffekter undgås.

Selve filtrene består af 2,3 m høje PVC kolonner med en indre diameter på 10 cm. Filtret er bygget op af 30 cm bærelag i bunden af filteret efterfulgt af 1m filtermateriale (Sand eller Filtralite). Over filtermaterialet kan der opbygges en vandsøjle på 1 m når tryktabet øges i filteret pga. tilstopning med udfældninger af jern, mangan, kalk samt biomasse. Vandsøjlen omrøres, således at der er totalt opblandede forhold. Dette gøres for at lette modelleringen af hydraulikken i søjlen.

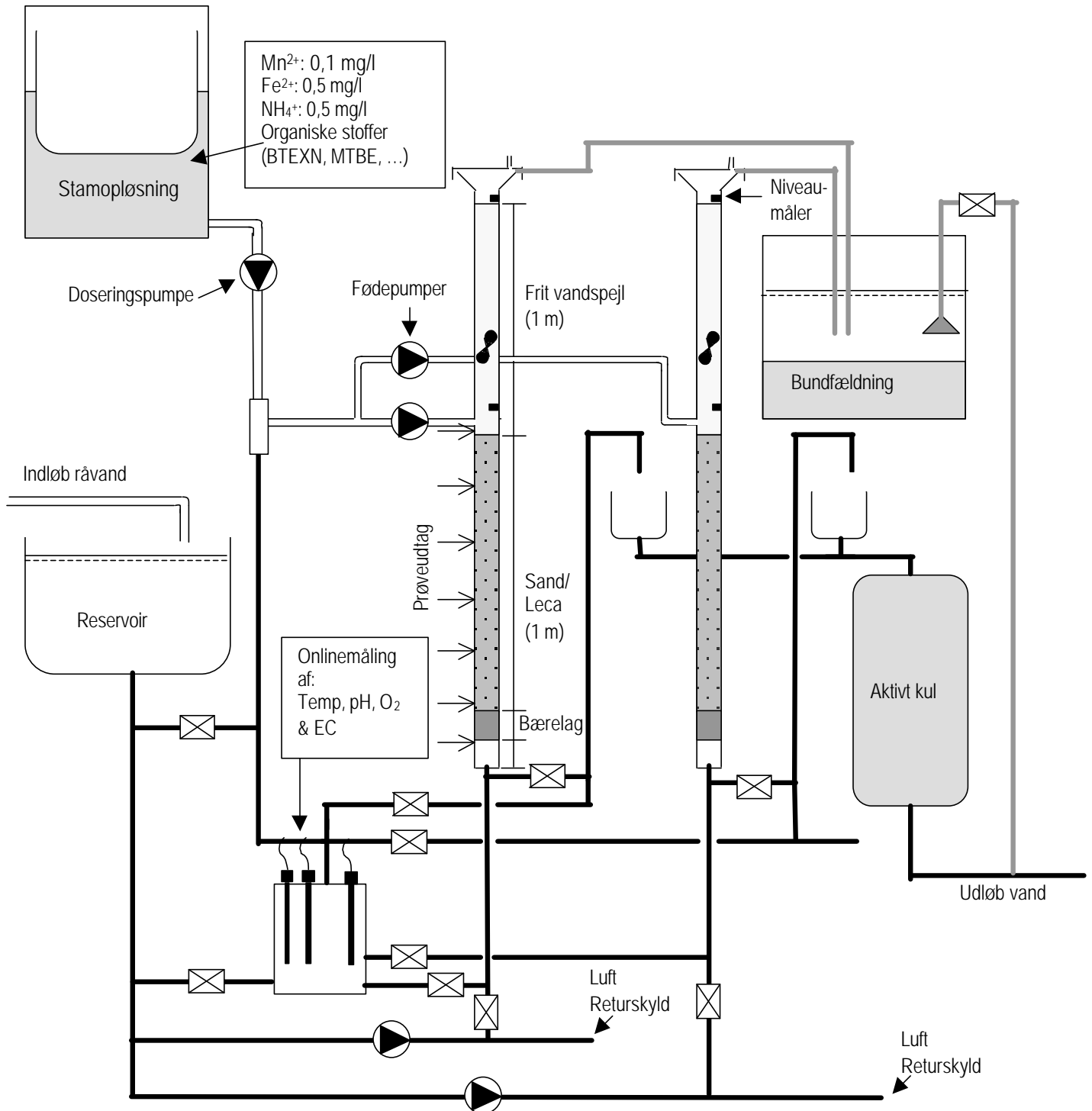
Der er placeret prøvetagningsporte i indløb og udløb fra filtrene og med 10 cm's mellemrum i filtermaterialet.

For at anlægget skal være mobilt og kunne placeres på fungerende vandværker, er alle anlæggets dele bygget således, at de kan passere en standard dør.

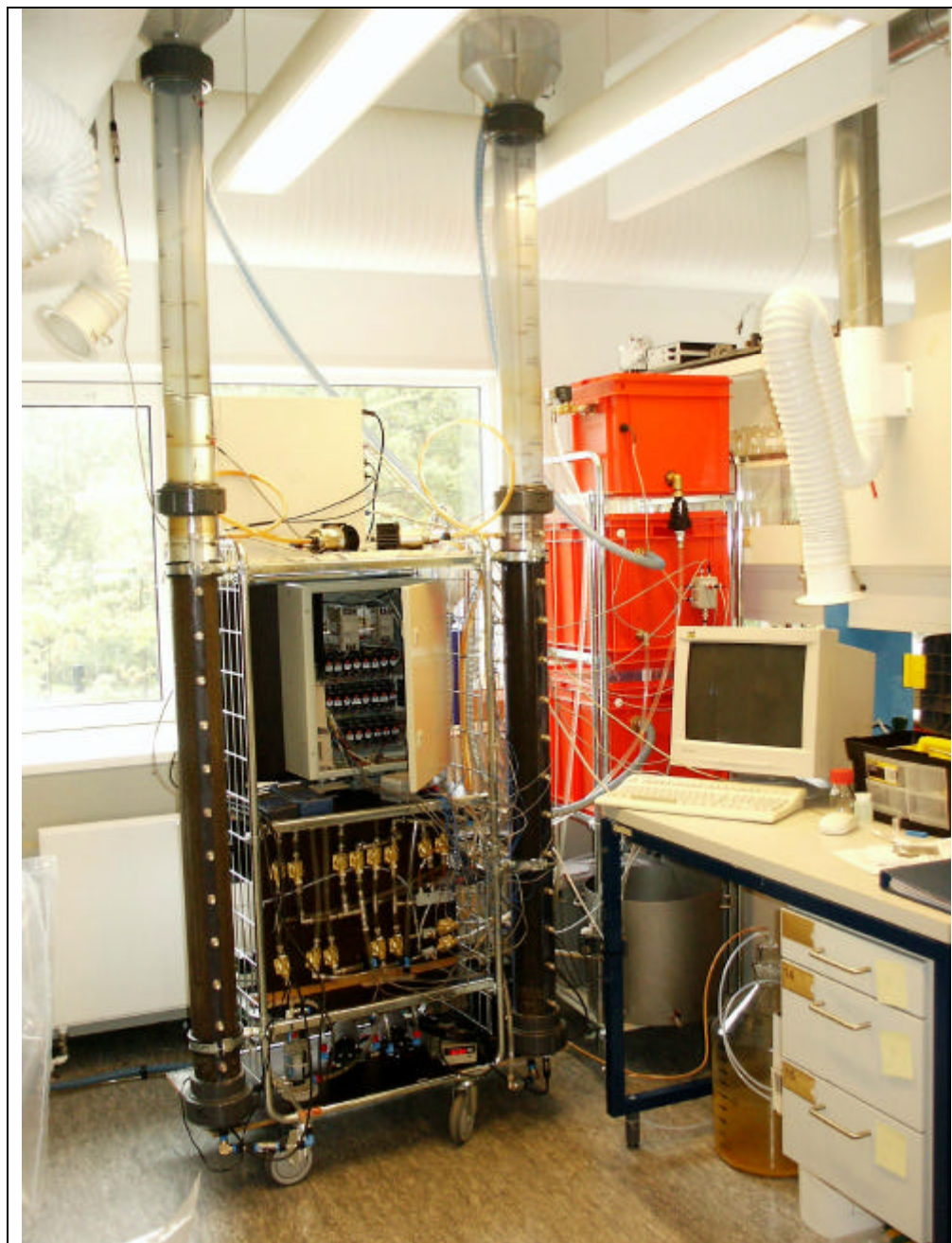
3.2 Fremstilling af råvand og dosering af stoffer

Filtrene er placeret i Miljø & Ressourcer, DTU's forsøgslaboratorium. Anlægget tilføres kunstigt råvand, der fremstilles ud fra DTU's drikkevand. I tabel 3.1 ses vandkvalitetsdata for DTU's drikkevand.

MODELVANDVÆRK



Figur 3.1. Skitse af modelvandværket.



Figur 3.2. Foto af pilotanlægget. Mellem de to filtre er anbragt el-skab (låge åben), herunder ventiler, og nederst måleudstyr. De firkantede beholdere til højre indeholder råvand (øverst) og nedenunder er placeret sedimentationskar for tilbageskylsvandet fra de to filtre. I den cylindriske stålbeholder under sedimentationsbeholderne opbevares koncentratet af forurenende stoffer, der iblandes DTU-postevandet (jern, mangan, ammonium, etc.). Over filtermaterialerne ses, at der er installeret omrørere, som fungerer under sporstoffsøg til at holde det "frie" vand opblandet.

Tabel 3.1. Vandkvalitetsdata fra Dybendal Vandværk (Rent vand).

Parameter	Enhed	Vandkvalitet
Temperatur	(°C)	9,5
Ledningsevne	(mS/m)	76,5
Hårdhed	(°dH)	18
pH		7,7
Bicarbonat	(mg HCO ₃ /l)	366
Permanganattal	(mg/l)	7,7
NVOC	(mg C/l)	2,5
Inddampningsrest	(mg/l)	478
Calcium	(mg Ca/l)	90
Magnesium	(mg Mg/l)	23
Kalium	(mg K/l)	4,2
Natrium	(mg Na/l)	31
Jern	(mg Fe/l)	0,02
Mangan	(mg Mn/l)	<0,001
Ammonium	(mg NH ₄ /l)	0,07
Nitrat	(mg NO ₃ /l)	2,5
Nitrit	(mg NO ₂ /l)	0,009
Chlorid	(mg Cl/l)	46
Sulfat	(mg SO ₄ /l)	31
Fosfor, total	(mg P/l)	0,005
Ilt	(mg O ₂ /l)	8,2

Kilde: Analyserapport, Sjælsø Vandværk, Milana - Miljølaboratoriet, 24.10.2001

Inden drikkevandet ledes til filtrene tilsættes jern (Fe²⁺), mangan (Mn²⁺) og ammonium (NH₄⁺). I tabel 3.2 ses koncentrationerne af jern, mangan og ammonium, der tilsættes i anlægget. Stamopløsningen med jern, mangan og ammonium holdes sur (pH 4,5), således at jern ikke oxideres og udfældes under længere tids opbevaring.

Vandet vil i en senere fase af projektet blive tilsat organiske mikroforureninger i form af MTBE og BTEXN. Koncentrationer af organiske mikroforureninger ses i tabel 3.2. Da stofferne er flygtige, konstrueres beholderen med stamopløsningen således, at et stempel reducerer beholderens volumen efterhånden som opløsningen bruges.

Tabel 3.2. Stoffer der tilsættes indløbsvandet til opstillingen.

Stof	Enhed	Koncentration	Grænseværdi
<i>Uorganiske stoffer:</i>			
Jern (Fe ²⁺)	(mg/l)	0,5	0,1
Mangan (Mn ²⁺)	(mg/l)	0,1	0,05
Ammonium (NH ₄ ⁺)	(mg/l)	0,5	0,05
<i>Organiske mikroforureninger:</i>			
MTBE	(µg/l)	15	5
Benzen	(µg/l)	10	1
Toluen	(µg/l)	10	10
Ethylbenzen	(µg/l)	10	10
o-Xylen	(µg/l)	10	10
m-Xylen	(µg/l)	10	10
p-Xylen	(µg/l)	10	10
Naphtalen	(µg/l)	10	2

3.3 Drift af filtre

De to filtre drives parallelt, men er bygget med mulighed for at kunne kobles i serie. På figur 3.1 ses en skitse af anlægget, hvor indløbsvandet ledes til en fødebeholder (20 L), der indeholder et flydersystem, som fylder beholderen. Indløbsvandet mikses i en blandebeholder med stamopløsningen med jern, mangan, ammonium og organiske stoffer inden det pumpes ind i de to filtre. Filtrene drives som downflow gravitationsfiltre og er dimensioneret til at operere ved en filterhastighed på 1-5 m/time, hvor de ved normal drift opereres ved 2,5 m/time. I tabel 3.3 ses de parametre anlægget er dimensioneret til at kunne opereres efter, samt de driftsparametre, der anvendes ved normal drift.

Tabel 3.3. Driftsparametre for et filter i anlægget. I tabellen er angivet driftsparametre for både det interval anlægget er dimensioneret til at operere i og normal drift.

Parameter		Dimensionering	Drift
Flow	(l/time)	8-39	19
Hydraulisk opholdstid (EBCT)	(time)	1-0,2	0,4
Filterhastighed (Darcy-hastighed)	(m/time)	1-5	2,5

Når vandet har passeret de to filtre, ledes det gennem et kulfilter, der adsorberer eventuelle organiske stoffer, som ikke er fjernet i filteret.

3.4 On-linemåling

I anlægget måles temperatur, pH, ledningsevne (EC) og iltkoncentrationen on-line i indløbet og udløbet på filtrene. Målingerne foretages ved at lede vandet gennem en flow-celle med måleelektroder fra WTW (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH & Co.). Der anvendes samme flow-celle til at måle i begge udløb fra filtrene og indløbet til anlægget. Dette gøres ved at der skiftevis ledes vand fra filtrenes udløb og indløbet til flow-cellen. Ved at anvende en flow-celle til alle tre målepunkter fungerer elektroderne mere stabilt. Elektroderne er følsomme for udfældninger af jern, mangan og kalk, og da elektroderne kun udsættes for det jernholdige vand i en tredjedel af måleperioden, vil de kunne fungere i længere tid uden vedligeholdelse. Desuden vil forskelle imellem ind- og udløbskoncentrationer måles nøjagtigt.

3.5 Returskyl

Under driften vil tryktabet i filtrene øges, og vandstanden over filtermaterialet vil stige. Filtrene er designet således, at de returskylles, når vandstanden over filtermaterialet når 1 m. Filtrene returskylles først med vand, dernæst med luft og vand, og til sidst med vand. Denne driftsform kan let ændres til andre strategier. Vandet ledes ud i toppen af filtrene og over i et bundfældningskar (et kar pr. kolonne). I karret bundfældes slam fra filteret, og vandet ledes herefter i afløbet. Toppen af filtrene er tragtformede for at sikre, at filtermaterialet tilbageholdes i filteret og ikke transporteres over i bundfældningstanken.

3.6 Modellering

Resultaterne fra sporstofforsøg er modelleret med simuleringsprogrammet AQUASIM. Ved at modellere sporstofforsøg er det muligt at bestemme hydrauliske parametre som dispersion og porøsitet for de to filtermaterialer.

Når disse parametre er bestemt, er det muligt at anvende dem i en model, der simulerer fjernelsen af de tilsatte uønskede stoffer.

4 Automatisk styring og monitorering

Med henblik på den almindelige drift af anlægget blev der udviklet software til at varetage styring, regulering og overvågning inklusiv dataopsamling. Softwaren "Waterworks control 2.01" blev programmeret i LabView 7.1 (National Instruments) og indeholdt følgende elementer:

- Grafisk brugerinterface
- Aktuator kontrol
- Niveauafbrydere
- Dataopsamling fra online sensorer
- Databehandling
- Fejlhåndtering
- Fejlrapportering

Programmet gør det muligt at styre og overvåge anlægget således, at normal drift, on-linemåling, returskyl af filtre og håndtering af fejlsituationer foregår automatisk.

4.1 Basal funktionalitet

Formålet med softwaren er at varetage den daglige drift af anlægget. Som tidligere nævnt er anlægget opbygget som to parallelle filtre. Styringen har to primære opgaver nemlig:

- Udførsel af returskyl og bundfældningssekvenser til fjernelse af jern og mangan udfældninger
- Multiplexing af flow-celle mellem indløb, udløb kolonne A og udløb kolonne B.

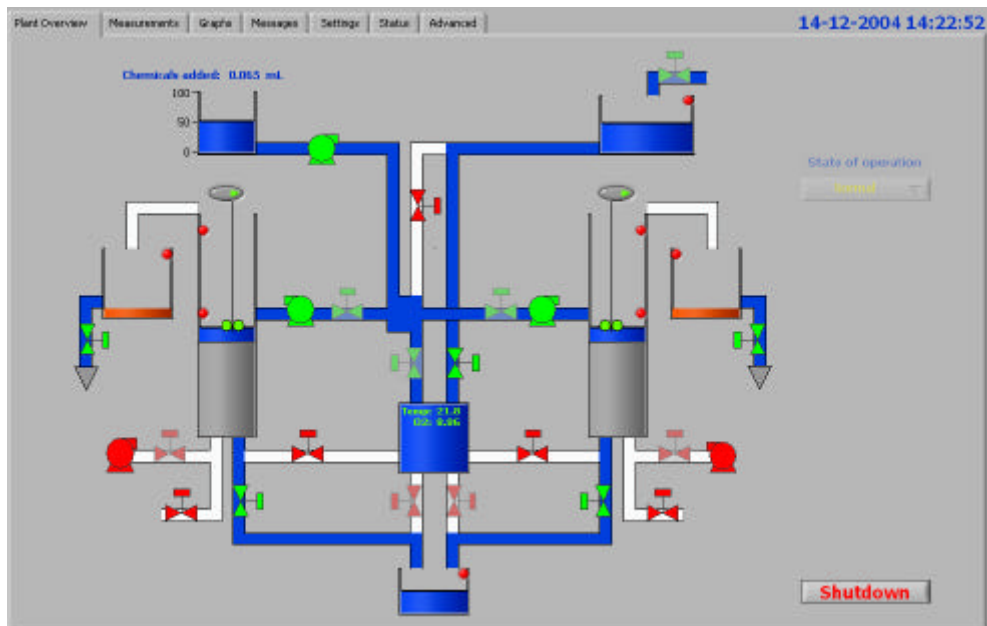
Returskylningerne kunne enten aktiveres manuelt eller automatisk (når vandspejlet i filteret nåede et vist niveau). Herefter blev skylningen udført i tre trin med hhv. vand alene, vand og luft og vand alene. Overløbet fra filtrene blev opsamlet i bundfældningstankene, hvor jern og manganudfældningerne blev bundfældet. Vandstanden i den aktive bundfældningstank overvåges løbende under returskylningen og returskylningen afbrydes, hvis tanken er fuld.

4.2 Grafisk brugerinterface

For at lette styringen af anlægget blev der udviklet et grafisk brugerinterface. Brugerinterfacet giver adgang til en række skærbilleder, der her kort gennemgås.

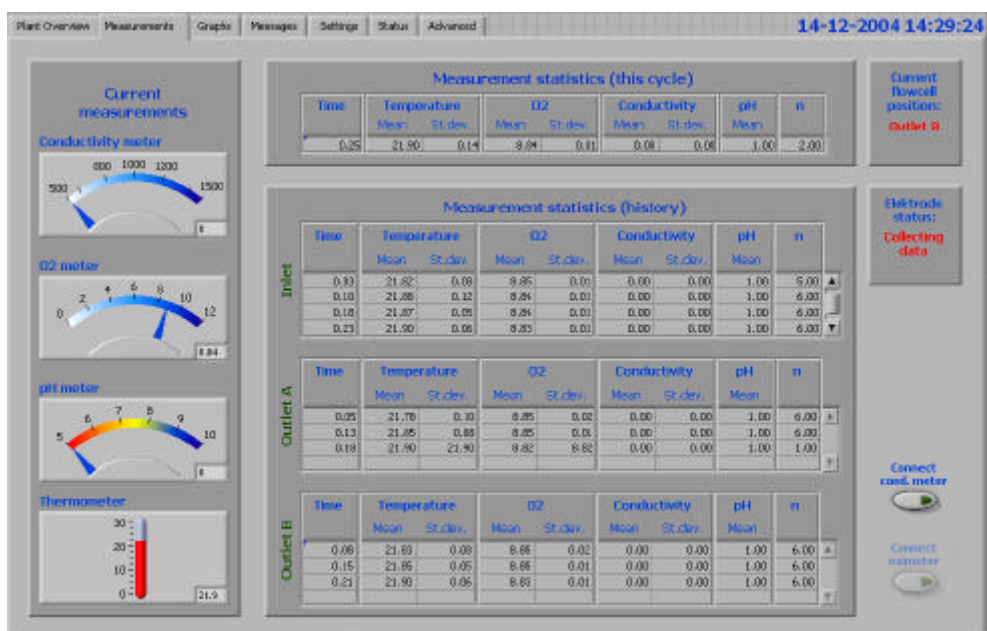
Skærbillede 1. Anlægsoverblik (se figur 4.1). Skærbilledet viser vandets strømning gennem anlægget samt tilstanden af de fleste relæer. Skærbilledet giver adgang til anlæggets styring af relæer. Den overordnede drift af anlægget kan foregå i 3 forskellige tilstande:

- Automatisk, hvor alle relæer styres af programmet f.eks. i gang sættes returskylninger automatisk når vandsøjlen er steget til et vist niveau.
- Semi-automatisk, hvor brugeren har en vis frihed til at manipulere grupper af relæer. Brugeren kan f.eks. aktivere returskylningssekvensen, der herefter udføres automatisk.
- Manuelt. Tilstanden af de enkelte relæer defineres manuelt af brugeren.



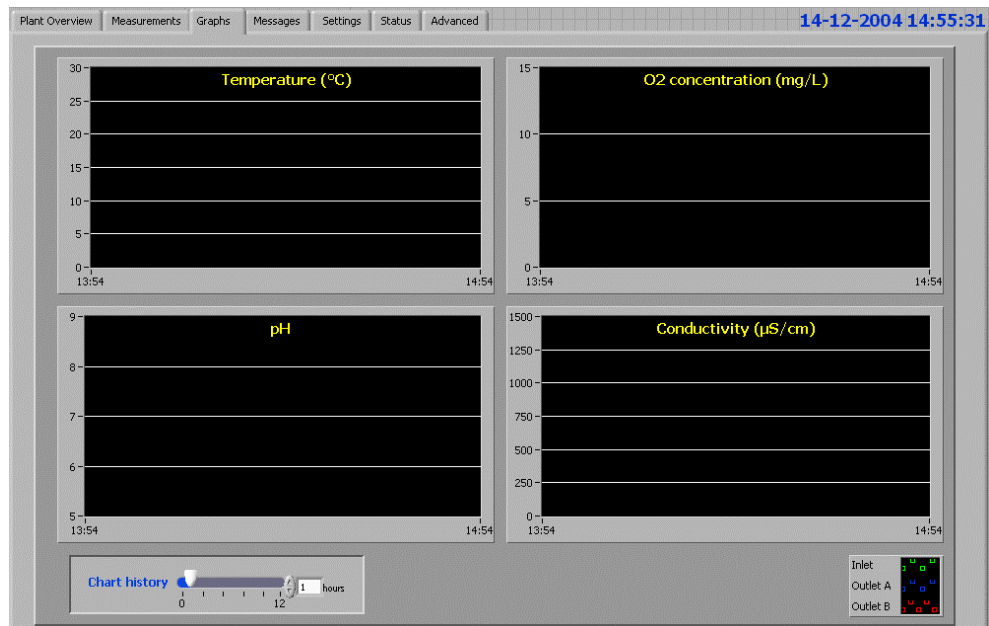
Figur 4.1. Skærbillede 1. Anlægsoverblik.

Skærbillede 2. Målinger (se figur 4.2). Skærbilledet giver et overblik over online målingerne. Udover at præsentere den aktuelle måleværdi præsenteres middelværdi og standardafvigelse for de tidligere målinger udregnet for hver flow-celle cyclus.



Figur 4.2. Skærbillede 2. Målinger.

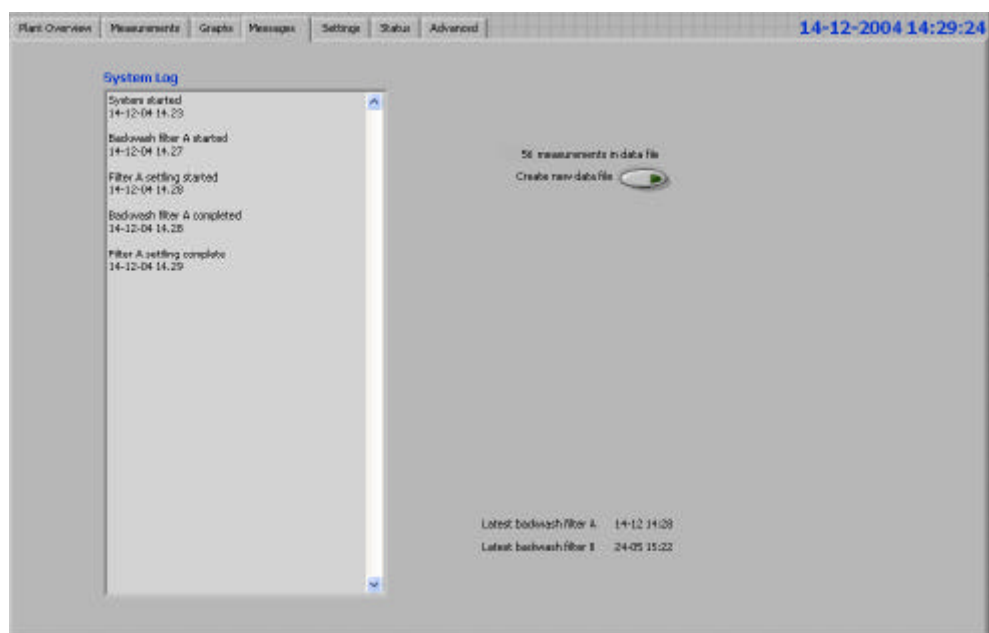
Skærbillede 3. Grafer Måleværdier fra on-line sensorerne præsenteres løbende grafisk i skærbilleder som vist i figur 4.3.



Figur 4.3. Skærbillede 3. Grafer.

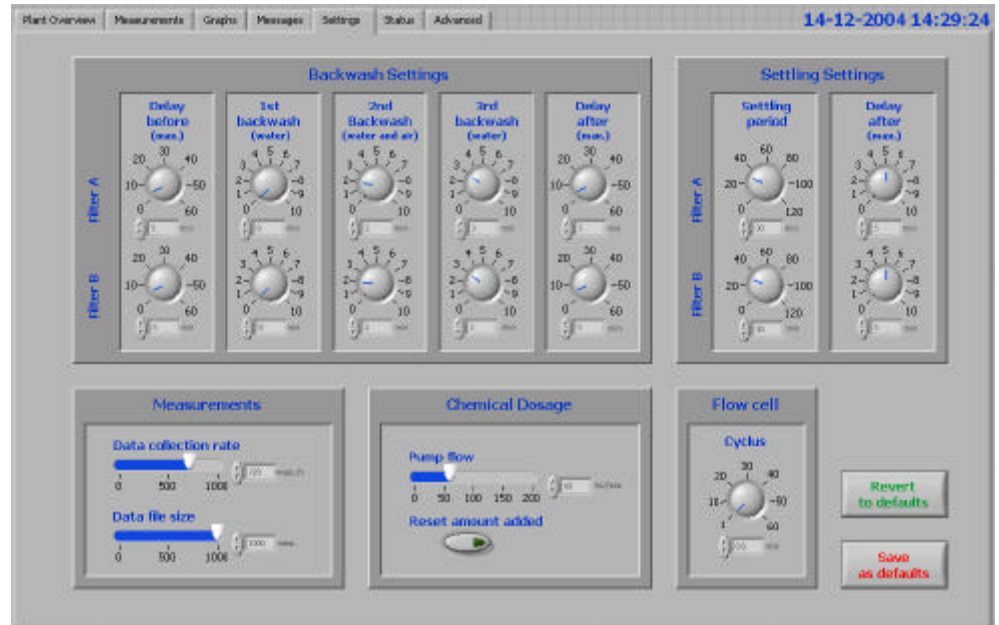
Skærmbillede 4. Beskeder

(se figur 4.4). Der genereres en løbende logfil med information omkring tidspunkter for start og stop af anlægget, returskylning og bundfældningsekvenser samt eventuelt opståede fejl undervejs.



Figur 4.4. Skærbillede 4. Beskeder.

Skærbillede 5. Indstillinger (se figur 4.5). Indstillinger omkring driften af anlægget kan kontrolleres fra dette skærbillede f.eks. længden af de enkelte faser i returskyllingerne og flow-cellens målecyclus.



Figur 4.5. Skærbillede 5. Indstillinger.

Skærbillede 6. Systemtilstand (se figur 4.6). Giver en oversigt over tilstanden af alle relæer. Derudover gives et indblik i de igangværende programrutiner.



Figur 4.6. Skærbillede 6. Systemtilstand.

Skærbillede 7. Avancerede indstillinger. Giver adgang til en række indstillinger, der primært er relevante i forbindelse med indkøring af anlægget.

4.3 Aktuator kontrol

Anlægget består af 18 magnetventiler, der styres af 15 relæer, 5 pumper (med separate relæer), 2 omrørere og et sikkerhedsrelæ. I tabel 4.1 ses en oversigt over de relæer, som anlægget er bygget op med.

Tabel 4.1. Aktuatorer i pilotanlægget.

Enhed	Navn	Dataoverførsel	ID
Pumper	Doseringspumpe	Diskret digital og analog	Pump SS
	Fødepumpe til filter A	Diskret digital	Pump AI
	Fødepumpe til filter B	Diskret digital	Pump BI
	Returskyllepumpe til filter A	Diskret digital	Pump AR
	Returskyllepumpe til filter B	Diskret digital	Pump BR
Magnetventiler	Indløb til anlæg	Diskret digital	V WT
	Indløb filter A	Diskret digital	V AI
	Indløb filter B	Diskret digital	V BI
	Flow-celle indløb, indløb	Diskret digital	V IFI
	Flow-celle indløb, udløb	Diskret digital	V IFU
	Fødebeholder, udløb	Diskret digital	V IN
	Flow-celle indløb, filter A	Diskret digital	V AFI
	Flow-celle indløb, filter B	Diskret digital	V BFI
	Flow-celle, udløb, filter A	Diskret digital	V AFU
	Flow-celle, udløb, filter B	Diskret digital	V BFU
	Filter A, udløb	Diskret digital	V AN
	Filter B, udløb	Diskret digital	V BN
	Filter A returskyl	Diskret digital	V AR
	Filter B returskyl	Diskret digital	V BR
	Bundfældningstank A, udløb	Diskret digital	V AJ
	Bundfældningstank B, udløb	Diskret digital	V BJ
Returskylleluft A	Diskret digital	V AL	
Returskylleluft B	Diskret digital	V BL	
Omrøring	Omrører filter A	Diskret digital	S A
	Omrører filter B	Diskret digital	S B
Sikkerhed	Sikkerhedstimer til automatisk frakobling ved fejl	Diskret digital	

Der er anvendt 2 stk. PMD-1208LS (Measurement Computing) til USB 1.1 diskret digital kommunikation mellem computer og relæer. Doseringssumpens flow (0-100 %) styres af softwaren med et analogt signal (0-5V). Sikkerhedsrelæet sikrer at anlægget automatisk bliver frakoblet, hvis kommunikationen mellem computer og anlæg bliver afbrudt. Sikkerhedsrelæets funktion er at afbryde strømmen til anlægget og fungerer ved at relæet er tilsluttet en timer, der frakobler relæet efter 6 min, medmindre timeren bliver nulstillet. Softwaren er programmeret til at nulstille timeren hver 5 min.

4.4 Dataopsamling fra online sensorer

Til brug for den automatiske styring af anlægget er 4 niveaufbrydere installeret med henblik på at overvåge vandstanden i filtrene (højt og lavt niveau). Derudover er der installeret 4 niveaufbrydere, der giver alarm ved hhv. høj vandstand i indløbs vandtanken, de to bundfældningstanke og i kulfiltret.

I flow-cellen er der installeret elektroder til måling af iltkoncentration, pH, ledningsevne og temperatur. Dataopsamlingen fra elektoderne er passiv og har altså ikke betydning for den automatiske drift af anlægget. En oversigt over anlæggets sensorer er vist i Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Sensorer i pilotanlægget.

Enhed	Navn	Dataoverførsel	ID
Niveaualfbydere	Filter A, høj	Diskret digital	LS AH
	Filter B, høj	Diskret digital	LS BH
	Filter A, lav	Diskret digital	LS AL
	Filter B, lav	Diskret digital	LS BL
	Fødebeholder, høj	Diskret digital	LS WTH
	Kulfilter, høj	Diskret digital	LS ACH
	Niveau bundfældningstank A, høj	Diskret digital	LS ASH
	Niveau bundfældningstank B, høj	Diskret digital	LS BSH
Onlinemåling	Ilt	RS238	O2
	pH	RS238	pH
	Ledningsevne	RS238	EC
	Temperatur	RS238	Temp

4.5 Databehandling

Data opsamlet fra online sensorerne bliver som tidligere nævnt præsenteret grafisk i softwaren. Derudover bliver måleværdierne løbende lagret som ASCII tekst filer.

Endelig bliver der udregnet middelværdi og standardafvigelse for måleserien op til at flow-cellen skifter position.

4.6 Fejl håndtering

Da anlægget er designet til at skulle kunne arbejde uden tilsyn i en periode op til en måned er det vigtigt at softwaren kan identificere og håndtere forskellige fejlsituationer, der kan opstå under den almindelige drift. Fejlsituationerne opdeles her i fire kategorier, nemlig:

- Kritiske fejl. Fejlen er for alvorlig til at anlægget (eller filteret) kan fortsætte driften. Fejlen skal afhjælpes af operatøren.
- Problematiske fejl. Anlægget drives uhensigtsmæssigt. Fejlen bør afhjælpes hurtigst muligt, men anlægget kan fortsætte driften.
- Advarsel. Kan opstå under den almindelige drift og afhjælpes automatisk af softwaren.

En oversigt over de fejl, der håndteres af anlægget, er vist i tabel 4.3.

Tabel 4.3. Fejltyper, der håndteres af softwaren.

Beskrivelse	Kategori	Aktion	ID
PMD board 0 og 2 fejl	Kritisk	Anlæg stoppes	E5010
PMD board 0 fejl	Kritisk	Anlæg stoppes	E5011
PMD board 1 fejl	Kritisk	Anlæg stoppes	E5012
Niveauafbryder funktionsfejl, LS AL	Kritisk	Kolonne A stoppes	E5020
Niveauafbryder funktionsfejl, LS BL	Kritisk	Kolonne B stoppes	E5021
Dræning af filter A for langsom	Kritisk	Kolonne A stoppes	E5030
Dræning af filter B for langsom	Kritisk	Kolonne B stoppes	E5031
Fyldning af kolonne A for langsom	Kritisk	Kolonne A stoppes	E5032
Fyldning af kolonne B for langsom	Kritisk	Kolonne B stoppes	E5033
Bundfældningstank A fuld	Problematisk	Returskyl stoppes	E5050
Bundfældningstank B fuld	Problematisk	Returskyl stoppes	E5051
For kort interval mellem returskylninger i kolonne A	Problematisk	Returskyl udskydes	E5054
For kort interval mellem returskylninger i kolonne B	Problematisk	Returskyl udskydes	E5055
Returskyller A, kan ikke starte returskyl i kolonne B	Advarsel	Returskyl udskydes	E5060
Returskyller B, kan ikke starte returskyl i kolonne A	Advarsel	Returskyl udskydes	E5061
Bundfælder A, kan ikke starte returskyl	Problematisk	Returskyl udskydes	E5062
Bundfælder B, kan ikke starte returskyl	Problematisk	Returskyl udskydes	E5063
Oximeter kan ikke detekteres	Advarsel	Ingen	E5070
Ledningsevne måler kan ikke detekteres	Advarsel	Ingen	E5071
Begge filtre er stoppet	Kritisk	Anlæg stoppes	E5080
Uforudset hændelse opstået	Kritisk	Anlæg stoppes	E5090- E5094

Anlægget er designet således, at alle anlæggets ventiler bliver lukket og pumperne stoppet, hvis forsyningsstrømmen bliver afbrudt. I det tilfælde at styresoftwarens svigter, vil strømmen til anlægget blive afbrudt indenfor 6 minutter.

4.7 Fejlrapportering

Software genererer løbende en log over de fejl der er opstået, samt forskellige systemmeddelelser f.eks. tidspunkt for opstart og afslutning af returskylninger. Derudover kan anlægget rapportere fejl direkte til operatøren via E-mail.

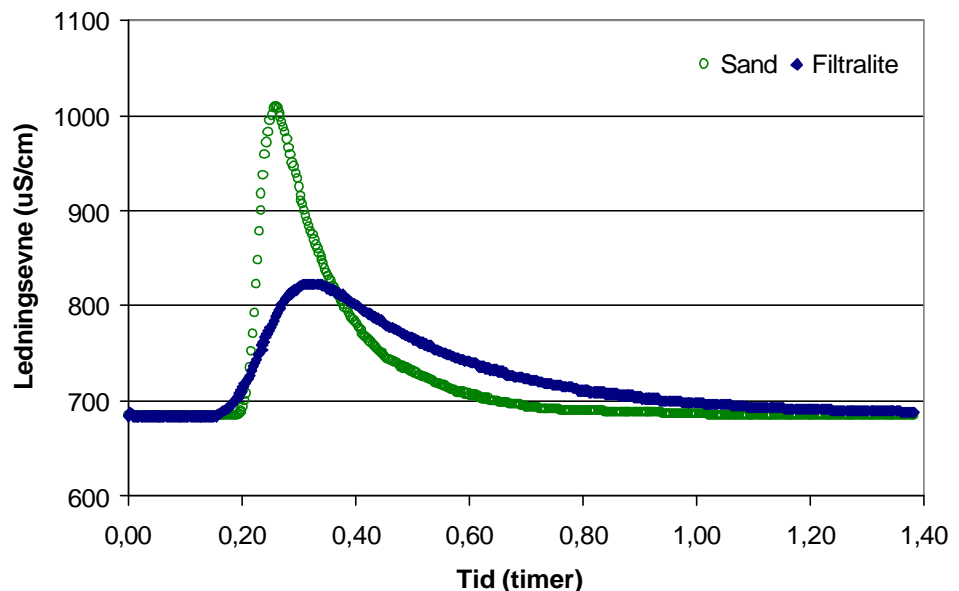
5 Karakterisering af filtermaterialer

Ved gennemførelse af forsøg med fjernelse af forureninger i vandværksfiltre er det vigtigt løbende at kunne karakterisere filtrenes hydrauliske tilstand, således, at forureningernes reelle opholdstid i filtrene er kendt. Under feltforhold bestemmes opholdstiden i filtrene normalt ikke. Filtrenes hydrauliske tilstand kan karakteriseres ved en kombination af sporstofforsøg og datatolkning ved hjælp af en hydraulisk model.

5.1 Sporstofforsøg

Sporstofforsøgene er udført ved at injicere 50 ml NaCl opløsning (12 g/l) i den øverste prøvetagningsport (ca. 10 cm over filtermaterialet), hvorefter ledningsevnen er målt i udløbet fra filteret. Under forsøget holdes det frie vand over filtermaterialet omrørt. Der er udført et sporstofforsøg på hvert af filtrene, inden de blev taget i drift, hvor genfindingen af den tilsatte NaCl for begge forsøg var tæt på 100% (beregnet til 102 %).

De to filtermaterialer, sand og Filtralite, giver meget forskellige kurveforløb (figur 5.1). Sporstoffet afgives langsomt fra den indre porøsitet i Filtralite, og derfor har kurveforløbet en stor spredning og en lang "hale" i modsætning til kurven for sandfilteret, der har en lille spredning og en kort "hale". Opholdstiden, beregnet på baggrund af sporstofforsøgene, er derfor også større for Filtralite filteret end for sandfilteret (tabel 5.1).



Figur 5.1. Sporstofforsøg udført 1.7.2004 på materialerne sand og Filtralite.

Tabel 5.1. Parametre for sporstofforsøg udført 1.7.2004.

Parameter	Enhed	Sand	Filtralite
Flow	(ml/min)	313	300
EBCT ⁽¹⁾	(min)	39	43
Opholdstid ⁽²⁾	(min)	18	26

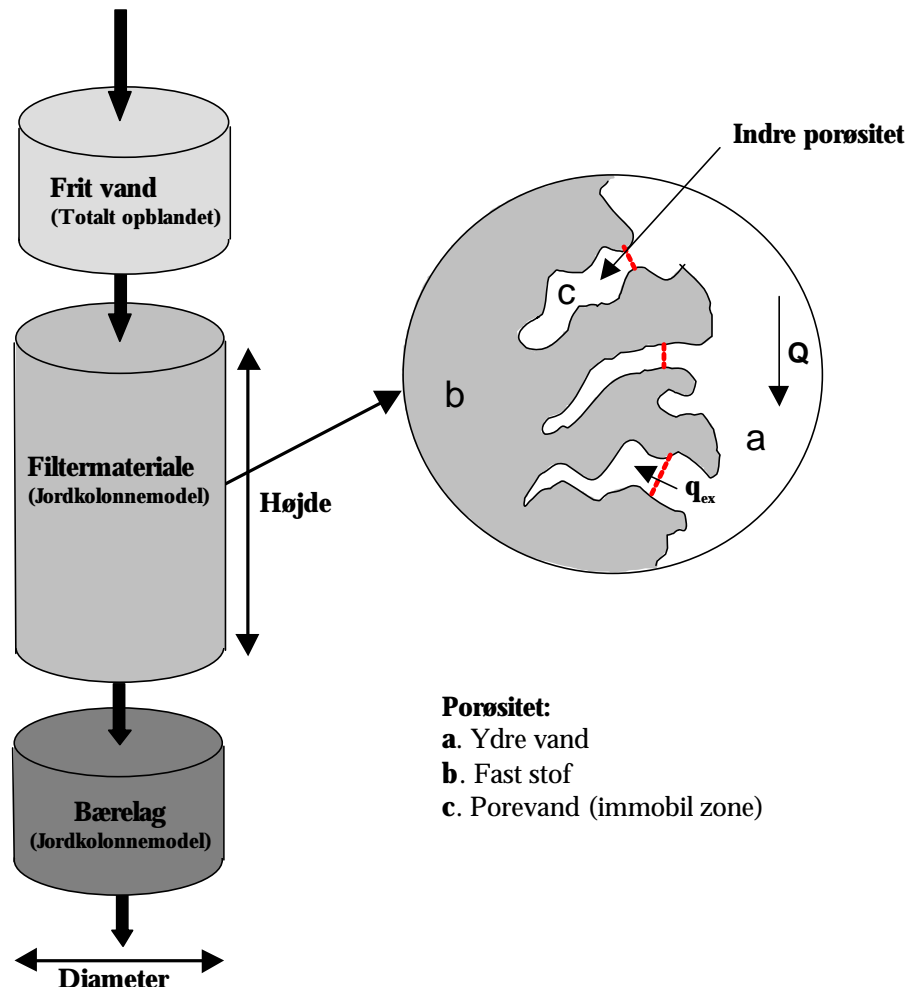
(1) Empty bed contact time.

(2) Opholdstid beregnet ud fra sporstofforsøgene.

5.2 Modellering

Modellering af sporstofforsøgene er et vigtigt værktøj til at bestemme parametre som: porøsitet, dispersion og massetransport med henblik på at benytte dem som input til modellering af fjernelsen af forurenende stoffer.

Modellering af sporstofforsøgene er foretaget i simuleringsprogrammet AQUASIM (Reichert, 1998). Modellen for sandfilteret er bygget op af to reaktorer, der repræsenterer det frie vand i filteret over filtermaterialerne og filtermaterialet. Til modellering af det frie vand er anvendt en totalt opblandet reaktor, og til modellering af filtermaterialet er anvendt en jordkolonnemodell til beskrivelse af stoftransport i en mættet jordsøjle. Modellen for Filtralite er derimod bygget op af 3 reaktorer (figur 5.2). Bærelaget og filtermaterialet er modelleret hver for sig, da Filtralite har en indre porøsitet hvilket bærelaget ikke har. I jordkolonnemodellen er det muligt at inkludere immobile zoner, dvs. zoner uden vandtransport, der repræsenterer den indre porøsitet, som findes i Filtralite. I modellen defineres udvekslingen af stof mellem vandfasen uden for partiklerne og den indre porøsitet ved hjælp af exchangekoefficienter, q_{ex} , der bl.a. afspejler sporstoffets diffusionskoefficient. Modellen inkluderer yderligere processerne: advektion og dispersion.

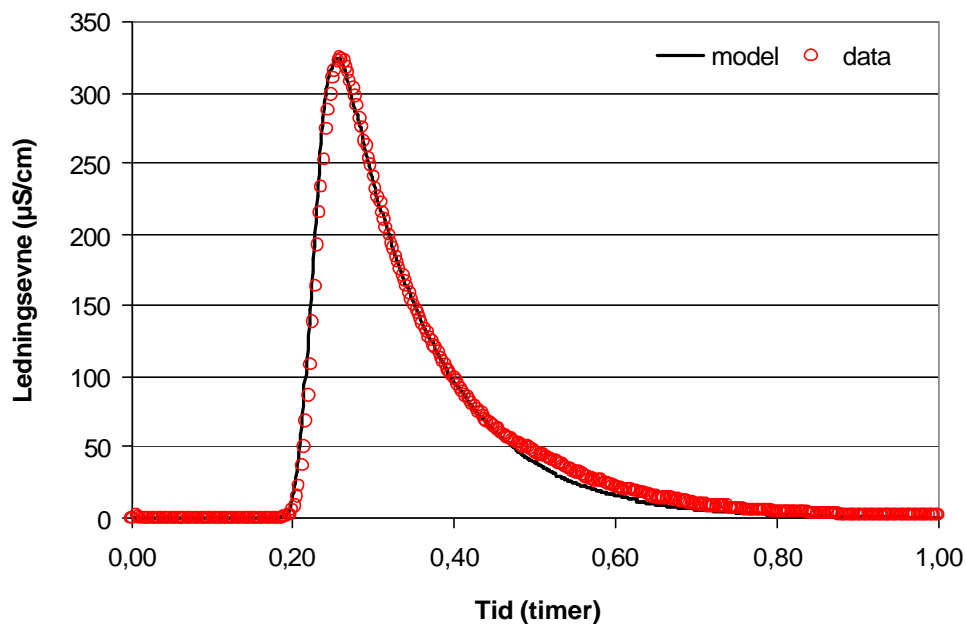


Figur 5.2. Skitse af opbygningen af modellen for Filtralite filteret i simuleringsprogrammet AQUASIM. I modellen for sandfilteret er bærelaget og filtermaterialet modelleret i samme reaktor.

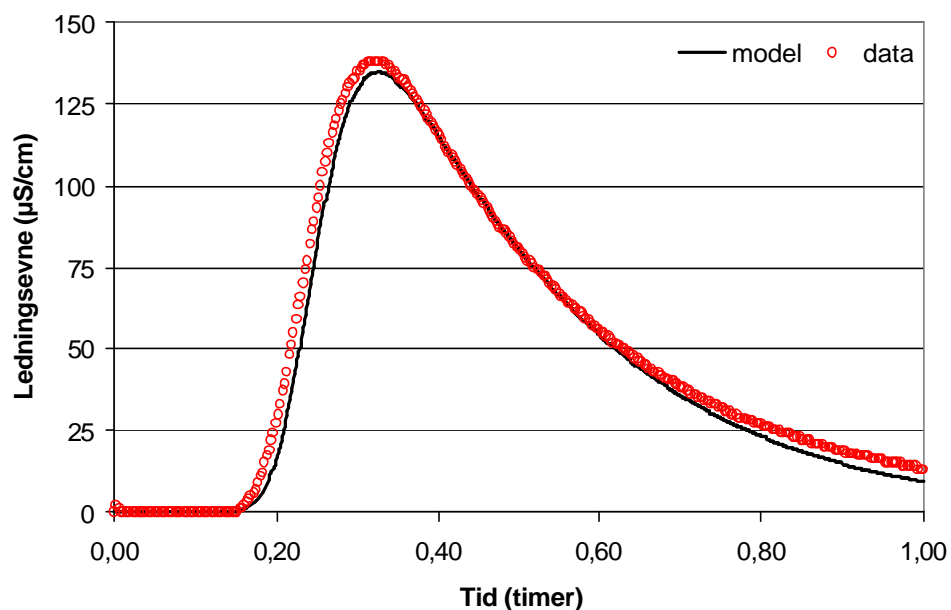
I modellen for sandfilteret er dispersionen og porøsiteten estimeret, og i modellen for Filtralite er den indre porøsitet og massetransporten (exchangekoefficienten) estimeret foruden dispersion og porøsitet. Modellen

er ikke nødvendigvis en "sand" model, men er en mulig model til at beskrive data.

Modelleringen af sporstofforsøgene (figur 5.3 og 5.4) viser, at det er muligt at modellere data fra de to sporstofforsøg tilfredsstillende med den beskrevne model. Den modellerede porøsitet for Filtralite filteret er næsten dobbelt så stor som den modellerede porøsitet for sandfilteret (tabel 5.1), og den estimerede dispersion er også langt højere i Filtralite-filteret.



Figur 5.3. Modellering af sporstofforsøg på sandfilteret.



Figur 5.4. Modellering af sporstofforsøg på Filtralite-filteret.

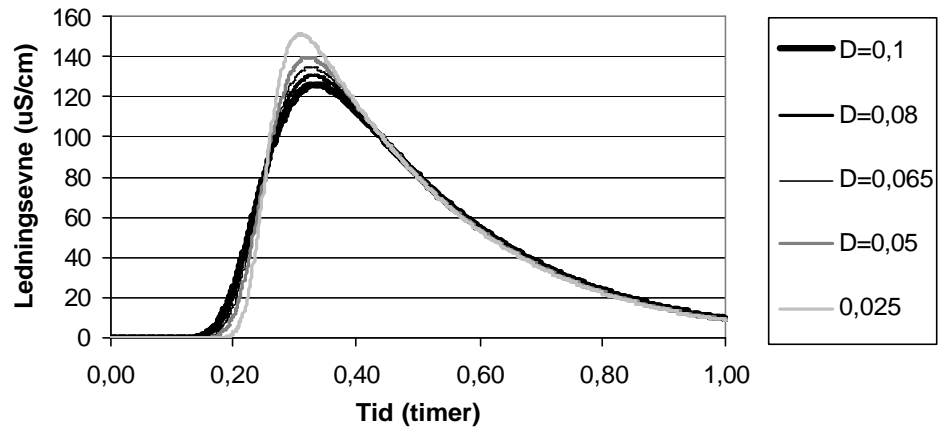
Tabel 5.1. Data estimeret i modelleringen af sporstofforsøgene.

	Parameter	Enhed	
Sand	Dispersionskoefficient, D	(m ² /time)	0,02
	Porøsitet		0,41
Filtralite	Dispersionskoefficient, D	(m ² /time)	0,065
	q _{ex}	(m ² /time)	0,01
	Ydre porøsitet		0,58
	Indre porøsitet		0,20

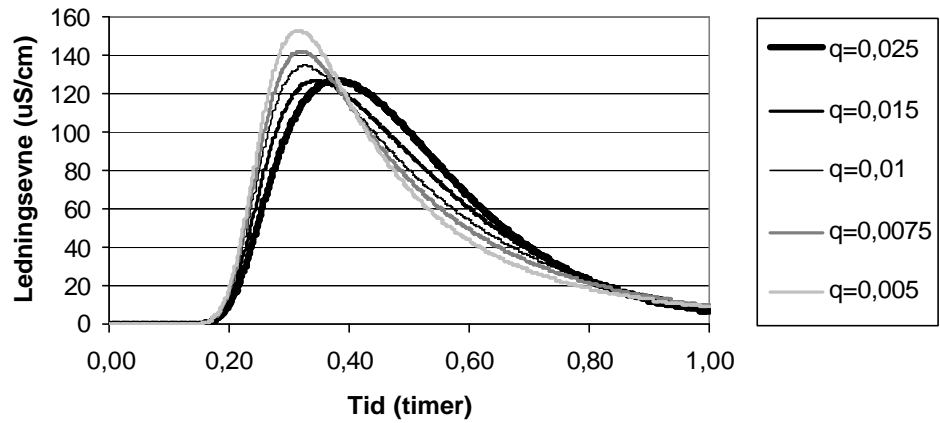
Følsomhedsanalyse

Følsomheden af modelleringen er undersøgt med modellen for Filtralite-filteret som udgangspunkt. Følsomheden for dispersionen, exchangekoefficienten, den indre og ydre porøsitet er undersøgt ved at variere én parameter, mens de andre holdes konstante.

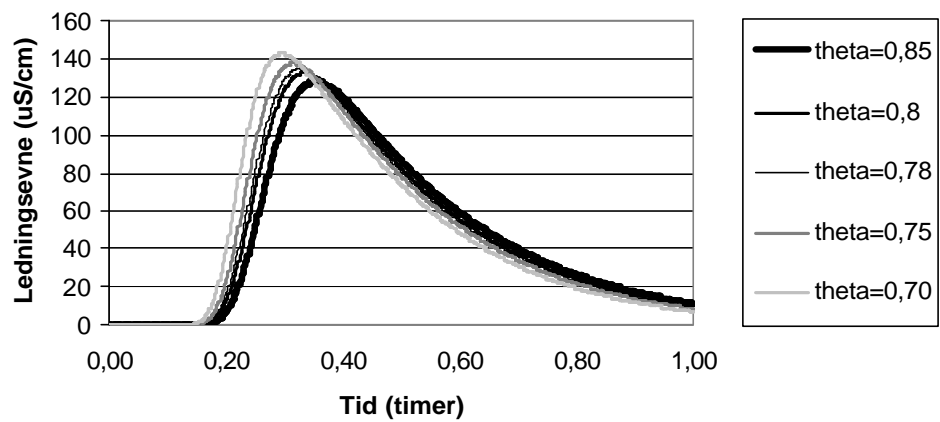
Når dispersionskoefficienten øges, ses et tidligere gennembrud og en lavere kurve (figur 5.5). En stigning i exchangekoefficienten ændrer derimod ved "halens" udseende (figur 5.6), foruden at kurven bliver lavere. En lavere total porøsitet (indre + ydre porøsitet) resulterer i at starten af kurven bliver mere stejl (figur 5.7). Hvis den indre porøsitet øges, vil det ligeledes gøre kurven mere stejl (5.8). De fire parametre har forskellig indflydelse på, hvordan kurvens form ændres. Det er muligt, at en anden kombination af parametrene også vil give en tilfredsstillende modellering af data.



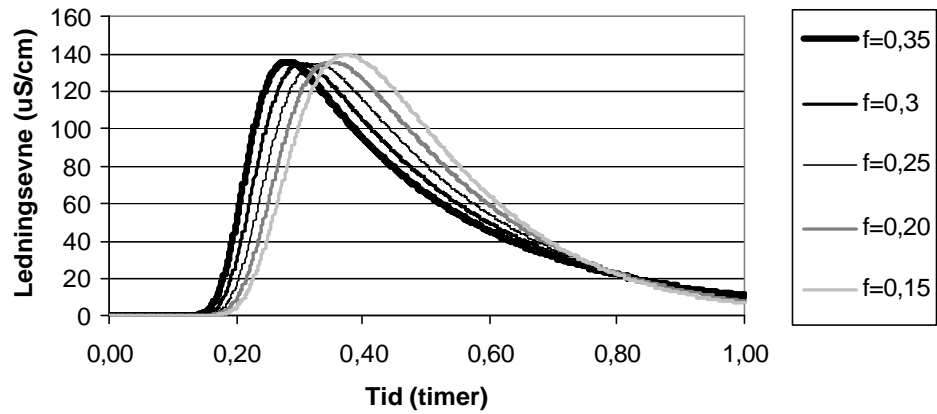
Figur 5.5. Følsomhedsanalyse af estimeringen af dispersionen D i modellen for Filtralite filteret. $q_{ex} = 0,01 \text{ m}^2/\text{time}$, total porøsitet = $0,78$, Fraktion af total porøsitet i immobil zone = $0,25$.



Figur 5.6. Følsomhedsanalyse af estimeringen af exchangekoefficienten q i modellen for Filtralite filteret. $D = 0,065 \text{ m}^2/\text{time}$, total porøsitet = $0,78$, Fraktion af total porøsitet i immobil zone = $0,25$.



Figur 5.7. Følsomhedsanalyse af estimeringen af den totale porøsitet θ i modellen for filtralite filteret. $q_{ex} = 0,01 \text{ m}^2/\text{time}$, $D = 0,065 \text{ m}^2/\text{time}$, Fraktion af total porøsitet i immobil zone = $0,25$.



Figur 5.8. Følsomhedsanalyse af estimeringen af fraktion f af porøsitet i den immobile zone i modellen for Filtralite filteret. $q_{ex} = 0,01 \text{ m}^2/\text{time}$, $D = 0,065 \text{ m}^2/\text{time}$, total porøsitet $\theta = 0,78$.

Resultaterne af de udførte sporstofforsøg og den efterfølgende modellering viser, at der er stor forskel på de to filtermaterialer grundet den indre porøsitet i Filtralite. Filtralite materialet giver både højere opholdstid, modelleret porøsitet og modelleret dispersion end sand.

Udførelse af sporstofforsøg og efterfølgende datatolkning v.h.a. AQUASIM vil kunne implementeres i den løbende drift styret af LabView.

6 Driftstest

Anlægget blev afprøvet gennem en periode på tre måneder. I løbet af denne periode blev stabiliteten af anlægget afprøvet i forbindelse med almindelig drift. Der blev løbende foretaget justeringer af anlægget med henblik på at rette fejl, der opstod, samt at forbedre driften.

I det følgende vises resultaterne af en driftsperiode på anlægget på 9 dage fra d. 23-7 til d. 1-8 2004, hvor anlægget kørte stabilt. I perioden blev der doseret organiske stoffer, jern, mangan og ammonium, som beskrevet i afsnit 3.2.

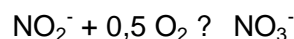
Figur 6.1 viser temperaturen i anlægget gennem driftstesten. Temperaturen svinger mellem 21 og 27°C i perioden.

I perioden er der doseret NaCl for at sikre, at der sker en korrekt og ens dosering af kemikalier til de to filtre. Ved at måle ledningsevnen i udløbene, kan det kontrolleres at doseringen af NaCl, og dermed resten af stamopløsningen, er ens for de to filtre. På figur 6.2 ses resultatet af onlinemåling af ledningsevnen. Det ses, at kurverne for udløbene fra filtrene er sammenfaldende og ligger ca. 50 µS/cm højere end kurven for indløbet. Doseringen er dermed ens i de to filtre.

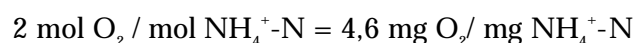
Inden tilsætning af jern, mangan og ammonium var der et basis iltforbrug i anlægget på 0,5 mg O₂/l. Basis iltforbruget stammer fra nedbrydningen af tilgængeligt organisk materiale i indløbsvandet. På figur 6.3 ses resultatet af online målingen af ilt i driftsperioden. Sammenlignes indløbskoncentrationen med udløbskoncentrationerne fra de to filtre, ses det, at iltforbruget er 2,2 mg O₂/l i starten af perioden og stiger til 2,8 ved periodens afslutning. Der forbruges dermed 2,3 mg O₂/l foruden basis iltforbruget, hvilket svarer til det forventede iltforbrug ved nitrifikation af de 0,5 mg NH₄⁺-N/l, der doseres i anlægget (se boks 6.1). Der er ikke foretaget målinger af ammonium, men det er sandsynligt, at nitrifikationen er startet, da der er doseret ammonium i anlægget i 36 dage ved driftstestens start.

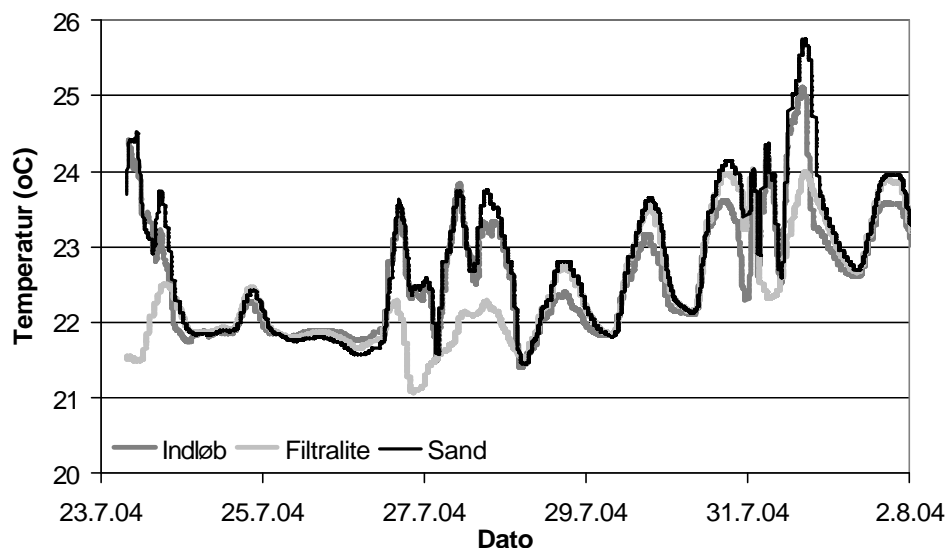
Boks. 6.1. Iltforbrug ved nitrifikation af ammonium.

Nitrifikationsproces:

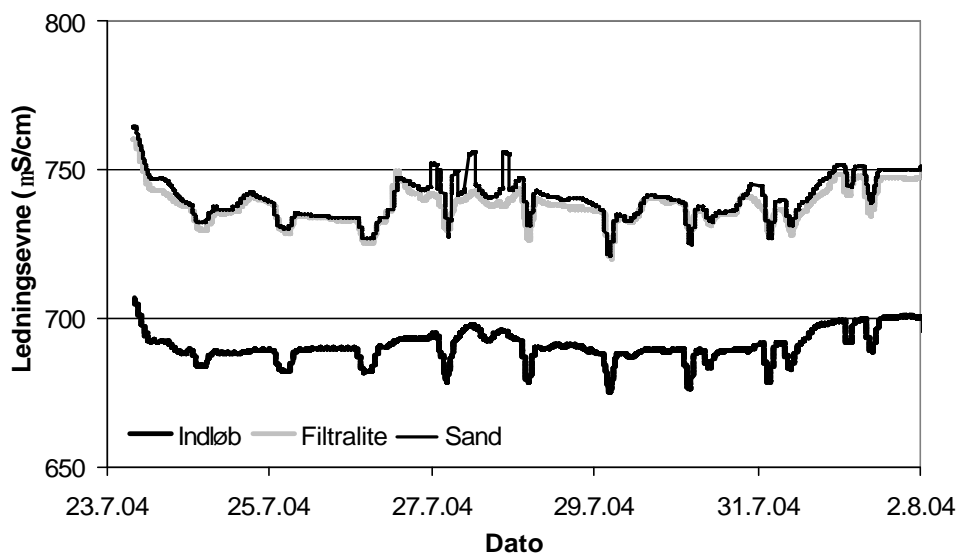


Iltforbrug:

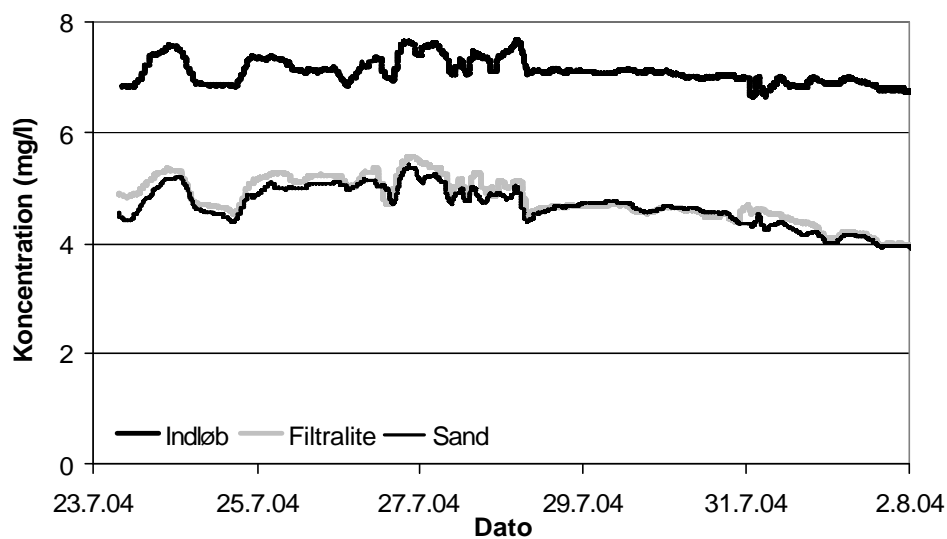




Figur 6.1. Onlinemåling af temperatur under driftstest 23.7.2004-1.8.2004. (Gennemsnit af 100 målinger).

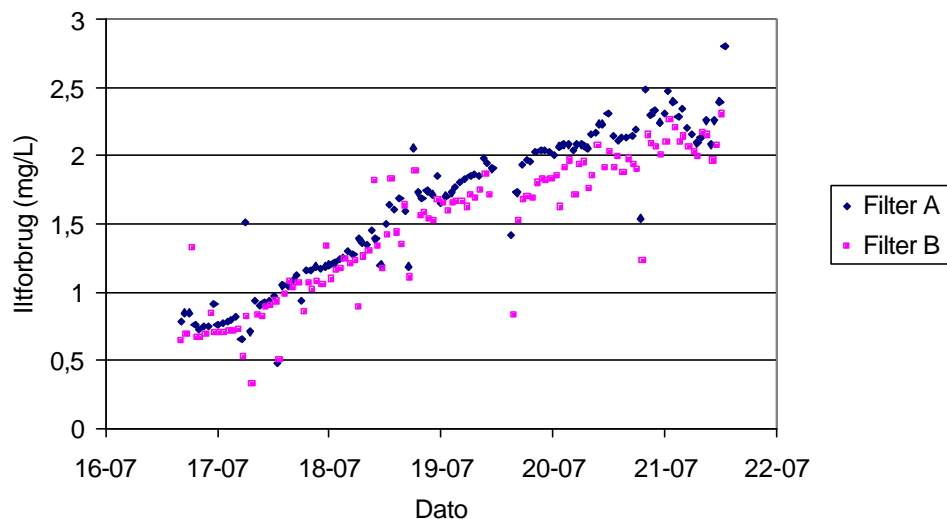


Figur 6.2. Onlinemåling af ledningsevne under driftstest 23.7.2004-1.8.2004. (Gennemsnit af 100 målinger).



Figur 6.3. Onlinemåling af iltkoncentrationen under driftstest 23.7.2004-1.8.2004. (Gennemsnit af 100 målinger).

Udviklingen i iltforbruget som funktion af tiden som følge af væksten af den nitrificerende biomasse er vist i figur 6.4. Den observerede stigning i iltforbrug svarer til en vækstrate for de nitrificerende bakterier på $0,25 \text{ d}^{-1}$. Da temperaturen i disse forsøg har været relativt høj, $21\text{-}27^\circ\text{C}$, vil vækstraten under normale vandværksforhold, dvs. ca. 10°C , være væsentlig lavere, formentlig $0,1 \text{ d}^{-1}$ eller lavere.



Figur 6.4. Iltforbruget i filtrene som følge af nitrifikationen.

Målingerne af jern og mangan rapporteres ikke i denne rapport p.g.a. de korte måleserier, der var forårsaget af ustabil dosering af stofferne.

Samlet vurderes anlægget klar til brug på et vandværk efter begrænsede justeringer af anlægsopbygningen, herunder pumpevalg, der skal sikre mere stabil drift.

7 Konklusioner

Der er gennem projektet opbygget et transportabelt pilotvandværk bestående af to filtre, det ene med kvartssand og det andet med Filtralite®, der er ekspanderet ler med stor indre porøsitet. Der er udviklet et program ved hjælp af programsystemet LabView, der muliggør automatisk monitoring og kontrol af anlæggets funktioner. Programmet er opbygget fleksibelt, så anlægget kan drives automatisk, semi-automatisk og manuelt. Brugeren kan let ændre driftsstrategi og overvåge driftsresultaterne. Anlægget kan også overvåges via Internettet.

Til karakterisering af filtermaterialerne er der udført sporstofforsøg og filtermaterialernes hydrauliske karakteristika er bestemt på basis af hydrauliske modeller for hvert af filtermaterialerne. Modellerne er udviklet ved hjælp af simuleringsprogrammet AQUASIM. Filtralite besidder en meget stor porøsitet i forhold til kvartssandet, ca. 0,8 vs. 0,4, hvilket ikke mindst skyldes den store indre porøsitet i Filtralite-materialet (fremstillet af ekspanderet ler). Forskellen i porøsitet afspejler sig i totalt forskellige sporstofkurver. Det forventes at der i Filtralite-materialet derfor nemmere fastholdes biomasse.

Der er udført driftstest med elektrodemålinger, hvorunder det er vist, at fordelingen af kemikalier til de to filtre er ensartet. Driftstesten har endvidere vist, at den sekventielle elektrodemåling af indløb og udløb fra de to filtre (multiplexing) fungerer som planlagt.

Samlet vurderes anlægget klar til brug på et vandværk efter begrænsede justeringer af anlægsopbygningen, herunder pumpevalg, der skal sikre mere stabil drift.

8 Referencer

Arvin, E., Krag, R. & Karlson, U. (2003): Development of the MTBE degradation rate in a biofilter. In: First European Conference on MTBE, Conference Proceedings, September 8-9, 2003, pp. 88-94. Dresden University of Technology, Dresden.

Carlson, Bertil B., Morten A. Olander & Erik Arvin. 1994. Nedbrydning af oliekomponenter i vandværksfilter. ATV møde 13. oktober 1994.

Engelsen, Peter, Ulrick Sebber & Erik Arvin. 1997. Biologisk nedbrydning af benzinstoffer i et vandværksfilter. Vandteknik nr. 10.

Grundvandsovervågning 2003. Rapport udarbejdet af Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse samt Miljø og Energiministeriet.

MacKay, D., W. Y. Shiu, K. C. Ma. 1992. Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate of organic chemicals. Vol. I-IV, Lewis Publisher, London.

Mallat, E & D. Barceló. 1998. Analysis and degradation study of glyphosate and of aminomethylphosphonic acid in natural waters by means of polymeric and ion-exchange solid-phase extraction columns followed by ion exchange solid-phase extraction columns followed by ion chromatography-post-column derivatization with fluorescence detection. Journal of Chromatography A, 823, pp 129-136.

Nielsen, Lotte Kjær, Anne Gry Tully, Hans-Jørgen Albrechtsen, Hans Mosbæk & Erik Arvin. 2002. Fjernelse af MTBE i danske vandværker. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 17 2002.

Nielsen, Peter Borch & Erik Arvin. 1996. Biologisk nedbrydning af oliekomponenter i sandfiltre. Vandteknik nr. 2.

Tuxen, Nina, Peter L. Tüchsen, Kirsten Rügge, Hans-Jørgen Albrechtsen & Poul Bjerg. 2000. Fate of seven pesticides in an aerobic aquifer studied in column experiments. Chemosphere, 41, pp 1485-1494.