



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Institutionen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik

A wide, horizontal, wavy band with a light gray, textured background, spanning the width of the page.

E

XAMENSARBETE / Dricksvatten

Lamellflotation

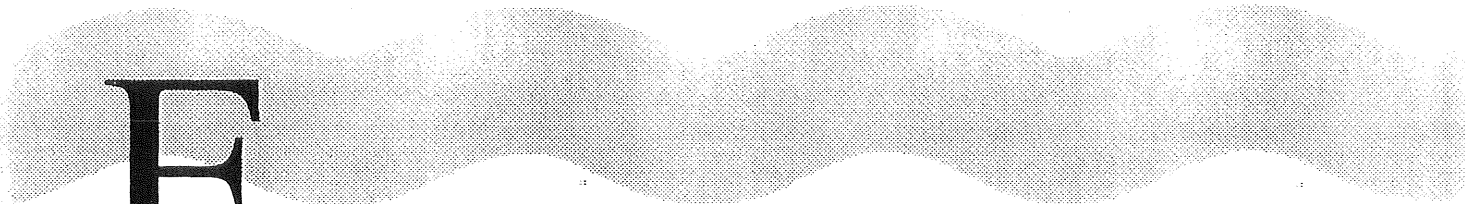
Examensarbete 1996:3

MATS KALL



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik
412 96 GÖTEBORG
Tel 031 - 772 10 00

Nyckelord: **vattenrening**
flotation
avskiljningssystem
flotationsfilter

A decorative graphic consisting of a horizontal, wavy band with a halftone dot pattern, positioned behind the title text.

EXAMENSARBETE / Dricksvatten

Lamellflotation

MATS KALL

Examensarbete 1996:3

Sammanfattning

I detta examensarbete visas hur belastningen i en flotationsanläggning kan ökas genom att ett lamellsystem placeras i flotationstanken. Försöken utfördes i pilotskala.

Försöken utfördes med samma råvatten som används vid Lackarebäckers vattenreningsverk, Göteborg, och kan karaktäriseras som ett vatten med låg turbiditet och alkanitet samt låg halt av naturligt organiskt material. Temperaturen varierade under försöksserien mellan 4° - 10°.

Aluminiumsulfat användes som koagulant och flockningstiden var totalt 3,5 minuter, vilket är en mycket kort tid. Flockningen utfördes i tre flockningstankar. I flotationsanläggningen undersöktes olika lamellsystem för att finna designkriterier för en lamellflotationsanläggning. De parametrar som undersöktes var : lamellernas längd, lutning samt avståndet mellan lamellerna. Försök gjordes också med sand/antracitfilter vid två olika belastningar på flotationsanläggningen.

De resultat som uppnåddes visade att man med hjälp av ett lamellsystem avsevärt kan öka belastningen på en flotationsanläggning. Dagens belastningar ligger mellan 5 -15 m³/m²h och i dessa försök uppnåddes belastningar på upp till 28 m³/m²h. Belastningarna har räknats ut för de flöden som gav turbiditeten 1 NTU efter flotationstanken. De filterförsök som gjordes visar hur viktigt det är att luften avlägsnas från vattnet innan detta når filtren. Luften sätter annars igen filtren som då måste backspolas ofta.

I en inledande litteraturstudie presenteras en konceptuell modell för partikel-bubbelsammanslagning samt en teori för hur bubblor bildas. Med dessa kan man teoretiskt beräkna vilken belastning en anläggning klarar av vid olika temperaturer under förutsättning att noggranna mätningar på partikel- och bubbelstorlekar görs. Man ser också i dessa teorier vilka parametrar som styr flotationsresultatet.

Systemet med lameller i flotationstanken är patentsökt av Purac AB.

Summary

This project shows how the overflow rate can be increased for a flotation unit when a lamellasystem is used for removal of the dispersed air.

The experiments were carried out in a pilot plant placed at the Lackarebäck Water Treatment Plant in Gothenburg, Sweden. The same raw water source was used for the experiments as at the Lackarebäck Water Treatment Plant. The water can be characterized as a water with low turbidity, low alkalinity and low in natural organic matter. The temperature varied between 4° and 10° during the experiments.

Aluminium was used as coagulant and the flocculation time was as short as 3,5 minutes. The flocculation was carried out in three chambers. In the flotation unit different lamella systems were examined. The parameters to be examined were: The length of the lamellas, the inclination and the distance between the lamellas. Two experiments were done with sand/antracitefilter.

The results clearly show that the overflow rate can be increased by a lamella system. The overflow rates today vary between 5-15 m³/m²h, and in these experiments overflow rates up to 28 m³/m²h were achieved. The overflow rates were calculated for the flow that gave a turbidity of 1 NTU after the flotation unit. The experiments that were performed show how important it is that the dispersed air used in the flotation process must be removed before the water reaches the filter. If not, the air will clog the filters which have to be backwashed frequently.

The literature study presents a conceptual model of how bubbles and particles are brought together. A theory how bubbles are formed is also presented. With these theories it is possible to calculate the overflow rate for a specific flotation unit if careful investigations are carried out regarding the amount and the size of the particles in the water. In these theories it is shown which parameters controls the results of a flotation unit.

An application for patent of the lamella flotation concept has been made by Purac AB.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Summary	ii
Förord	5
1. Inledning	6
1.1 Syfte	6
1.2 Omfattning	6
2. Teori för flotation	7
2.1 Konceptuell modell för bubbel-partikelsammanslagning	8
2.2 Bildande av bubblor	14
2.3 Bortförel av slam	17
2.4 Temperaturens inverkan	17
3. Tidigare försök vid Lackarebäck	19
4. Anläggningen, dess funktion samt mätmetoder	20
4.1 Beskrivning av anläggningen och råvatten	20
4.1.1 Koagulering	20
4.1.2 Flockning	22
4.1.3 Flotationsanläggningen	23
4.1.4 Avluftningssystem	24
4.1.5 Filter	25
4.2 Mätmetoder	26
4.2.1 Turbiditetsmätningar	26
4.2.2 pH-övervakning	27
4.2.3 Temperaturmätning	27
4.2.4 Flödesmätning	27
5. Resultat	28
5.1 Flotation	28
5.2 Filter	34
6. Slutsatser	38
Referenser	
Bilagor	
Bilaga A - Foto på flotationstank	
Bilaga B - Resultat flotation	
Bilaga C - Beräkning av volymer	
Bilaga D - Resultat filter	

Förord

Detta examensarbete är utfört på institutionen för VA-Teknik på Chalmers, Göteborg i samarbete med Purac AB, Lund.Handledare var professor Torsten Hedberg. Från VA-teknik deltog också Lars-Ove Sörman i praktiskt arbete. Purac höll med flotationsanläggningen och teknisk expertis genom Jan Dahlquist och från Purac deltog också Dick Karlsson som projektanställd. Jag vill här tacka samtliga inblandade för den hjälp och de råd jag fått.

1. Inledning

Konventionell löst luftflotation dimensioneras normalt med arealbelastningar mellan 5-15 m³/m²h (Edzwald och Wingler, 1990). Vid höga arealbelastningar har mätningar visat att avskiljningen av partiklar minskar successivt, men kan vara relativt effektiv ändå. Problem uppstår däremot med att avskilja luftbubblor från vattnet. De luftbubblor som följer med till efterföljande filtersteg ger problem i och med att luftbubblorna sätter sig i filtren och på så sätt snabbt ökar tryckförlusten över dessa som måste backspolas ofta. För att kunna öka arealbelastningen på en flotationsenhet är det mycket viktigt att avskilja luftbubblorna. Detta kan göras på ett par olika sätt:

1. Avskilja bubblorna i system som tillåter hög arealbelastning samtidigt med låg ytbelastning, vilket i praktiken innebär lamell- eller rörseparation. Luftbubblorna får i en sådan anläggning möjlighet att nå undersidan av lamellerna eller rören där de slås samman med andra luftbubblor och försvinner upp mot ytan.
2. Få luftbubblor att koalescera t.ex genom passage genom trånga håll, pumpning eller andra åtgärder som får luftbubblor att slå sig samman till större bubblor som snabbt lämnar flotationstanken.

1.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete var att finna designkriterier för avskiljning av luftbubblor med hjälp av lameller inbyggda i en flotationstank, samt att visa på betydelsen av att luftbubblor avskiljs från vattnet innan filtersteget.

1.2 Omfattning

Försöken genomfördes i en pilotanläggning för flockning, flotation och filtrering placerad vid Lackarebäcks vattenreningsverk.

Lamellenheten var så konstruerad att längden på lamellerna, lutning och avstånd mellan lamellerna kunde varieras. För att uppnå syftet med försöken användes följande inställningar:

Lamelllängd:	40 cm, 60 cm, 80 cm
Lutning mot horisontalplanet, vinkeln α :	40°, 60°, 120°, 140°
Horisontellt avstånd mellan lamellerna:	2 cm, 4 cm, 6 cm, 50 cm

Två försök med filter gjordes. I det ena var belastningen på flotationsanläggningen 24 m/h och i det andra 31 m/h. Vid båda försöken användes två likadana filter som belastades med 10 respektive 15 m/h.

2. Teori för flotation

Flotation används för att avskilja partiklar från en vätska genom att tillföra vätskan bubblor som fäster på partiklarna som därigenom får lägre densitet och stiger till ytan där de kan avskiljas. Flotationsprocessen kan delas in i tre steg (Hyde *et.al*, 1977): Bildande av bubblor, vidhäftning bubbla-partikel och avskiljning av det slam som bildas.

Flotation har använts i olika sammanhang, först användes det inom mineralindustrin och senare har tekniken också använts för att avskilja trycksvärta från returpapper, återvinning av fett, avskilja gluten från stärkelse, avskilja oljespill från industriavfall mm (Hyde *et.al* 1977). Från slutet av 60-talet och framåt har flotation blivit allt vanligare inom vattenrening (Arnold *et.al*, 1995).

Det finns olika sätt att generera bubblor för flotation, och processen benämns efter detta. Det finns elektroflotation, mikroflotation, dispergerad luftflotation (dispersed air flotation) och löst luftflotation (dissolved air flotation), (Edzwald och Wingler, 1990). Inom vattenrening är det löst luftflotation som är den mest använda. Bubblorna genereras här genom att en returvattenström av det renade vattnet trycksätts och luft tillsätts. Det tryck som används ligger vanligen mellan 350-550 kPa. Det trycksatta och med luft mättade vattnet släpps sedan ut genom ventiler och därmed sänks trycket till atmosfärstryck. Bubblor bildas vid denna trycksänkning, i storleksordningen 10 - 100 µm, med en medelstorlek på ca 40 µm (Edzwald och Wingler, 1990). Bubblorna stiger och slår sig samman med partiklar och bildar aggregat som avskiljs på ytan.

Flotation kan främst ses som ett alternativ till sedimentering. Till fördelarna hör att en flotationsanläggning är mycket mindre än en sedimenteringsanläggning, vilket gör den billigare att bygga. Arealbelastningen för flotationsanläggningarna anger (Edzwald och Wingler, 1990) till 5 - 15 m³/m²h och uppehållstiden i flotationstanken till 5 - 15 minuter. Flockningstiden kan också göras kortare när flotation används och man behöver inte dosera lika mycket flockningsmedel i koaguleringen eftersom man inte behöver producera lika stora flockar som vid sedimentering. Man erhåller dessutom en billigare slamhantering då slammängden vid flotation inte blir lika stor som vid sedimentering, eftersom slammets torrsubstanshalt blir högre vid flotation. Flotation förbättrar också smak och lukt genom att vattnet luftas i en flotationstank. En flotationsanläggning kräver dock mer energi än en sedimenteringsanläggning beroende den luft som komprimeras och den returvattenström som pumpas tillbaka.

Råvatten kan delas in i tre huvudgrupper (Heinänen *et.al*, 1995):

1. Humusrika eller färgade vatten
2. Vatten med hög turbiditet och hög koncentration av silt eller andra suspenderade ämnen
3. Eutrofa och algrika vatten

Enligt samma artikel lämpar sig vatten med hög turbiditet, över 100 NTU, dåligt för flotation och vatten med suspenderade ämnen som överstiger 50 mg/l passar bättre för sedimentering. Flotation passar däremot bra för vatten ur grupp 1 och 3.

2.1 Konceptuell modell för bubbel - partikelsammanslagning

Edzwald, *et al.*, 1991, presenterade en konceptuell modell för hur bubblor och partiklar slår sig samman och stiger upp till ytan. Modellen baseras på att partiklarna är av storleksordningen 0,001-10-tals μm och i en koncentration av 1 till 100 ppm räknat på volymbasis.

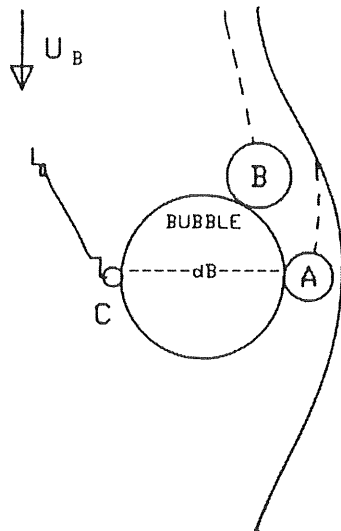
Luftbubblorna i modellen är av storleksordningen 10 -100 μm och i en koncentration av 1 ,000-10 000 ppm. Modellen beskriver hur partiklarna förs bort från vattnet med hjälp av bubblor i två steg. I det första steget förs partikeln till bubbelytan och i det andra fastnar partikeln på bubblan och ett bubbelpartikelaggregat bildas som stiger till ytan. Modellen gäller enbart under laminära förhållanden, vilket innebär att Reynolds tal är mindre än 1, och under förutsättning att bubblorna är runda och deras rörelse kan beskrivas med hjälp av Stokes lag. Vätskans densitet är mycket större än bubblans och Stokes ekvation för bubblans stighastighet blir då:

$$U_b = g \rho_v d_b^2 / 18 \mu \quad (1)$$

där

U_b är luftbubblans stighastighet, m/s
 g är tyngdkraftens acceleration, m/s^2
 ρ_v är vattnets densitet, kg/m^3
 d_b är bubblans diameter, m
 μ är vattnets viskositet, Ns/m^2

Själva modellen bygger på en bubblas kollisionseffektivitet. De mekanismer som verkar är Brownsk diffusion¹ (η_D), infångning, (interception) (η_I) och sedimentering på bubblan genom gravitation (η_G). Se figur 1.



Figur 1. Transportmekanismer för partikel till bubbla. (A: Sedimentering på bubblan genom gravitation, B: infångning, C: Brownsk diffusion)

¹ Brownsk rörelse upptäcktes av den Engelske botanisten Robert Brown 1827. Den innebär att små uppslammade partiklar i en vätska alltid synes vara i rörelse. De utsätts för ständiga stötar av vätskans molekyler, och om det tillfälligtvis sker fler stötar från en sida kan partikeln knuffas iväg, (Beckman *et al.*, 1991)

η är definierad som :

$$\eta = (\text{antalet partikel-bubbelkollisioner}) / (\text{antalet partikel-bubbel närmanden}) \quad (2)$$

Ekvationerna för de olika mekanismerna kan skrivas:

$$\eta_D = 0,9 (kT/\mu d_p d_b U_b)^{2/3} \quad (3)$$

$$\eta_I = 1,5(d_p/d_b)^2 \quad (4)$$

$$\eta_G = (\rho_p - \rho_v)g d_p^2 / 18 \mu U_b \quad (5)$$

där

k är Boltzmanns konstant, $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K

T är den absoluta temperaturen, K

d_p är partikelns diameter, m

ρ_p är partikelns densitet, kg/m^3

Den totala kollisionseffektiviteten för en bubbla blir således:

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_G \quad (6)$$

Om ekvation (1) sätts in i ekvation (3) och (5) fås:

$$\eta_D = 6,18 (kT/g \rho_v)^{2/3} (1/d_p)^{2/3} (1/d_b)^2 \quad (7)$$

$$\eta_G = ((\rho_p - \rho_v) / \rho_v) (d_p/d_b)^2 \quad (8)$$

En närmare titt på ekvationerna (4), (7) och (8) visar att η_T påverkas av partikelstorleken, av bubbelstorleken med $(1/d_b)^2$, partikeldensiteten och temperaturen. Utifrån dessa ekvationer och antagandet att : bubbeldiametern är $40 \mu\text{m}$, vattentemperaturen 25°C och partikeldensiteten 1.01 g/cm^3 beräknade författarna hur en bubblas kollisionseffektivitet påverkas av de olika faktorerna. Resultaten från dessa beräkningar redovisas i figur 2.

Ur figur 2a kan man läsa att η_T är som lägst för partiklar med en diameter runt $1 \mu\text{m}$ och att Brownsk diffusion dominerar processen för partiklar mindre än $1 \mu\text{m}$ samt att för partiklar större än $1 \mu\text{m}$ dominerar infångning. Sedimentering på bubblan genom gravitation saknar betydelse för de små partiklar som det här rör sig om. Ur figur 2b ser man att små bubblor ger mycket bättre resultat än stora. Från figur 2c och 2d ser man att varken partiklarnas densitet eller vattentemperaturen har någon större effekt på η_T enligt denna modell.

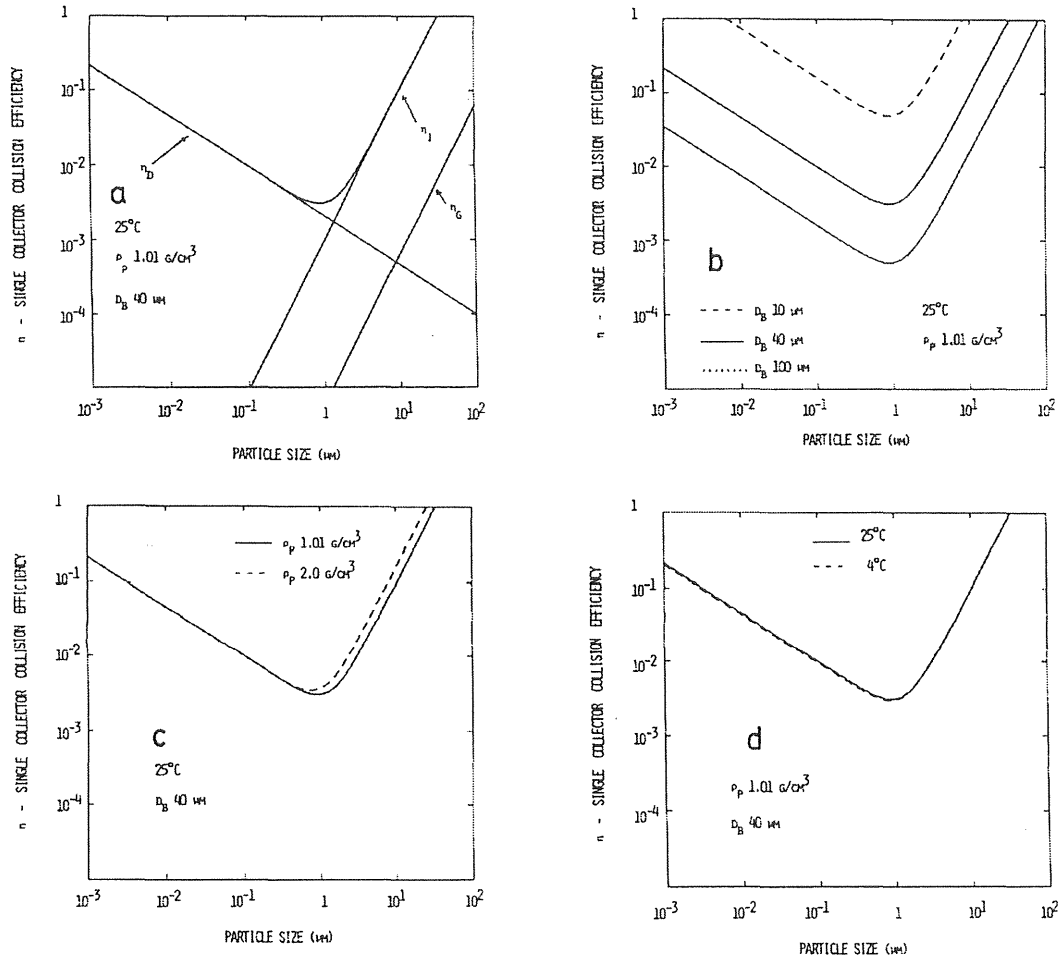
Hur pass effektivt en bubbla för bort partiklar kan uttryckas som :

$$R = \alpha_{pb} \eta_T \quad (\%) \quad (9)$$

där

R är bortförseffektiviteten, %

α_{pb} är andelen kollisioner som leder till sammanslagning, (-)



Figur 2. En bubblas kollisionseffektivitet mot partikelstorleken. (a: 25°, partikeldensitet 1.01 g/cm³, bubbeldiameter 40 μm; b: effekten av bubbeldiameter; c: effekt av partikeldensiteten; d: effekten av temperaturen)

Om koncentrationen av bubblor, N_b (antal/ml), förs in kan en ekvation för bortförslän av partiklar tecknas.

$$d N_p/dt = (\alpha_{pb} \eta_T) A_b U_b N_b N_p \quad (10)$$

där

A_b är den projicerade arean av bubblan, m²
 N_p är koncentrationen av partiklar, antal /ml

Om man i ekvation (10) sätter in uttrycket för $A_b = \pi d_b^2 / 4$ och använder sambandet mellan voymkoncentrationen av bubblor ϕ_b , och koncentrationen av antalet bubblor:

$$\phi_b = \pi d_b^3 N_b / 6 \quad (11)$$

får man följande ekvation:

$$d N_p/dt = (-3/2)(\alpha_{pb} \eta_T U_b \phi_b N_p) / d_b \quad (12)$$

slutligen får man vid konstanta förhållanden med djupet H i flotationstanken :

$$d N_p/dH = -(3/2)(\alpha_{pb} \eta_T \phi_b N_p)/d_b \quad (13)$$

För att underlätta förståelsen av ekvation (13) har de olika faktorerna och vad de beror på samlats i tabell 1.

Tabell 1. Parametrarnas beroende.

Parameter	Beror på	Kommentar
α_{pb} (vidhäftningseffektivitet vid partikel-bubbelkollisioner)	1. Laddningen mellan partikel och bubbla 2. Hur pass hydrofil partikeln är	α_{pb} förbättras genom att förbehandla vattnet med kemikalier
η_T (totala kollisionseffektiviteten för en bubbla)	1. Diffusion och infångning 2. Partikelstorleken, minimum för $d_p \cong 1 \mu\text{m}$	η_T förbättras genom att flockar i storleksordningen 10-tals μm tillverkas i flockningen
N_p (partikelkoncentrationen)	Råvattnet	
ϕ_b (bubbelvolymkoncentrationen)	1. Trycket i tryckkärlet 2. Returvattenflödet	Högt värde på ϕ_b ger goda möjligheter till kollisioner och ger en låg flockdensitet
d_b (bubbeldiameter)	Trycket i tryckkärlet	Små bubblor är önskvärda

Modellen har utvecklats av Edzwald, 1995, så att stighastigheten för partikel-bubbelaggregatet kan beräknas och därmed kan man beräkna vilken arealbelastning en anläggning kan belastas med.

För att beräkna stighastigheten för partikel-bubbelaggregatet behöver man veta dess densitet som kan beräknas enligt:

$$\rho_{pb} = [(\rho_p d_p^3 + B_n(\rho_b d_b^3))] / (d_p^3 + B_n d_b^3) \quad (14)$$

där

ρ_p är densiteten av enbart flocken, kg/m^3

ρ_b är densiteten hos luft, kg/m^3

B_n är antalet bubblor som sitter fast på flocken

Den ekvivalenta sfäriska diametern av bubbel-partikelaggregat kan beräknas som:

$$d_{pb} = (d_p^3 + B_n d_b^3)^{1/3} \quad (15)$$

Stighastigheten kan nu beräknas:

$$v_{pb} = g(\rho_v - \rho_{pb}) d_{pb}^2 / 18 \mu \quad (16)$$

I tabell 2 har stighastigheten för bubbel-partikelaggregat beräknats för olika diametrar på flockarna. Bublorna har förutsatts ha diametern 40 μm och densiteten för flockarna, ρ_p , har antagits vara 1,01 g/cm^3 .

Tabell 2. Stighastighet för olika partikeldiametrar och antal vidhäftade bubblor.

partikel diameter (μm)	En bubbla vidhäftad			Två bubblor vidhäftade			Tio bubblor vidhäftade		
	ρ_{pb} (g/cm^3)	d_{pb} (μm)	v_{pb} (m/h)	ρ_{pb} (g/cm^3)	d_{pb} (μm)	v_{pb} (m/h)	ρ_{pb} (g/cm^3)	d_{pb} (μm)	v_{pb} (m/h)
10	0,02	40	3,1	0,01	50,5	5,0	0,003	86	14,5
20	0,11	42	3,0	0,06	51	4,9	0,01	86,5	14,5
50	0,67	57	2,1	0,50	63	3,9	0,17	91,5	13,7
100	0,95	102	1,0	0,90	104	2,2	0,62	118	10,4
200	1,01	200,5	IF	0,99	201	0,3	0,94	205	5,2
500	1,01	500,1	IF	1,01	500,2	IF	1,01	501	IF

IF= Ingen Flotation, ty densiteten är för hög.

Från tabell 2 kan några intressanta slutsatser dras:

- Det behövs bara en bubbla för att flocka partiklar med en diameter upp till 100 μm .
- Det behövs två eller fler bubblor för att partiklar med en diameter av 200 μm ska stiga uppåt.
- Det räcker inte med 10 bubblor för att en partikel med diametern 500 μm ska stiga uppåt.
(24 st behövs)
- För att höga stighastigheter ska uppnås är det lämpligt att partiklarna inte är större än 100 μm .

För laminära flödesvillkor, Reynolds tal mindre än 1, gäller som tidigare beskrivits ekvation nr (16). I tabell 2 är Reynolds tal mindre än ett för alla fall där en eller två bubblor är vidhäftade på partikeln. När tio bubblor är vidhäftade är Reynolds tal runt 3, och ekvation (16) är därmed en bra approximation. För Reynolds tal $1 < \text{Re} < 50$ kan annars följande ekvation för stighastigheten användas:

$$v_{pb} = g^{0,8} [(\rho_v - \rho_{pb}) / \rho_v]^{0,8} d_{pb}^{1,4} / 10 v^{0,6} \quad (17)$$

där

v är den kinematiska viskositeten, m^2/s ($v = \mu/\rho$)

Under ideala förhållanden sker bortförsl av partikel-bubbelagglomeraten om:

$$v_{pb} \geq v_{ab} / (1 - m) \quad (18)$$

där

v_{ab} är arealbelastningen räknat på separationszonens area, $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$

m är andelen av volymen i separationszonen som inte deltar i processen. Sådana områden är vanliga i rektangulärt formade bassänger.

Denna ekvation gäller för de partiklar som kommer in i botten av separationszonen. Genom att montera in en lutande skiva i flotationstanken som tvingar vattnet upp mot ytan ökar den belastning som anläggningen klarar av enligt ekvation (18).

För att steg 2 i modellen ska fungera bra, vidhäftningen partikel-bubbla, krävs två saker:

- ytladdningen på partikeln ska vara låg eller ingen alls
- den vattenfilm som omger partikeln måste föras bort

Edzwald *et.al*, 1991, gjorde försök för att avgöra hur dessa två villkor kan uppfyllas. Försöken gjordes i väldigt liten skala, man använde flotationskärl med en volym på 1,4 l. Man undersökte hur flockning med aluminium vid olika pH-värden påverkade turbiditeten efter flotation. De kom fram till att bästa resultaten nåddes vid det pH som gav liten ytladdning på partiklarna, vilket visar att för lyckad flotation måste partiklarna avladdas. Den vattenfilm som omger partikeln är svårare att få bort om man använder en koagulant som ger hydrofila partiklar som aluminiumhydroxid. Vid lägre temperaturer är det svårare att få bort vattenfilmen som omger partikeln eftersom viskositeten då är högre.

Laddningen mäts som Z-potentialen, (mV), och Z-potentialen för bubblor är negativ och beror av pH-värdet och är i storleksordningen -50...-100 mV för de pH som normalt används i flotation (Heinänen *et.al*, 1995). Z-potentialen för flockar kan påverkas på två olika sätt enligt samma författare: man kan öka doseringen av koagulant eller minska pH. För att flotationen ska bli bra måste flockarna vara hydrofoba. Järn och aluminium är hydrofila, men de kan ändå ge flockar som lämpar sig väl för flotation. Denna motsägelse förklaras med att humussyrorna i vattnet fungerar som kollektorer, vilket gör flockarna hydrofobiska (Kitchener och Gochin, 1981). De har också funnit att många andra organiska substanser har denna effekt vilket gör dem lämpliga för flotation.

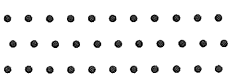
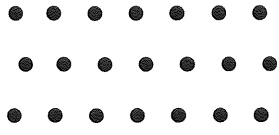
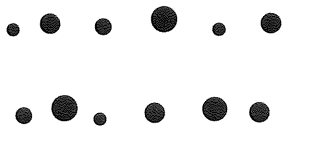
Den modell som presenterats ovan gäller för laminära förhållanden mellan partikel-bubbla, vilket innebär att Reynolds tal är mindre än 1. Fukushi *et.al*, 1995, har presenterat en konceptuell modell som gäller under turbulenta förhållanden. Här kommer enbart skillnaderna beröras, då ekvationerna i denna modell bygger på många olika konstanter och därför är svår att sammanfatta på ett enkelt sätt.

Att turbulenta förhållanden råder i reaktionszonen, det område som är efter utsläppspunkten av returvattnet, är det ingen tvekan om. Modellen bygger till skillnad från den förra på en hel population av bubblor som under lokalt turbulenta förhållanden kolliderar med varandra och på så sätt bildar partikel-bubbelaggregat. I denna modell används flockdensitetsfunktionen för att karaktärisera flockarna som man anser bör vara i samma storleksordning som vid sedimentering, 1-1000 μm , medan man i den förra modellen menar att flockar i storleksordningen 1-100 μm ska produceras och att flockar i storleksordningen 10-30 μm är allra bäst.

Det bör noteras att båda modellerna är avsedda för flotationsanläggningar i labbskala och är svåra att utveckla till att gälla en hel flotationsanläggning, men de ger ändå en bra inblick i vilka parametrar som påverkar resultatet.

2.2 Bildande av bubblor

Hur resultatet blir när man använder flotation för att avskilja flockarna från vattnet beror till stor del på storleken hos bubblorna. Bubblorna bildas när det trycksatta och med luft mättade returvattnet släpps ut genom en ventil och trycket sjunker. Hur denna ventil har utformats har betydelse för hur stora bubblorna blir. En tvåstegsmodell för hur bubblor bildas har presenterats, (Rykaart & Haarhoff, 1995). I det första steget växer bubblorna kring ett bestämt antal luftkärnor som fås när den i vattnet lösta luften släpps ut. När all löst luft har övergått i gasfas är det första steget slut. De experiment man gjorde gav att denna tid låg på ca 1,7 ms. I det andra steget är luftvolymen konstant men bubblorna växer till sig genom att kollidera. I figur 3 illustreras förloppet.

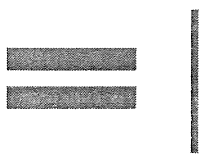
Principiellt utseende	Tidpunkt	Kommentar
	t_0	Detta är tidpunkten omedelbart efter trycksänkningen. Inga bubblor har ännu fällts ut men små kärnor finns ur vilka luftbubblor fälls ut
	t_1	Detta är tiden omedelbart efter att all löst luft fällts ut som luftbubblor. Under utfällningsfasen växer kärnorna till sig och ingen sammanslagning av bubblor har ännu skett.
	$> t_1$	Efter tiden t_1 fälls inga fler bubblor ut, de växer nu till sig genom att kollidera vilket minskar totala antalet bubblor.

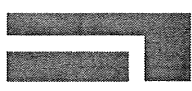
Figur 3. Modell över hur bubblor bildas och växer till inom löst luftflotation.

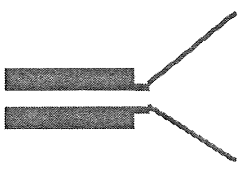
Utifrån denna modell kan några förutsägelser göras:

- Antalet kärnor som finns betyder mycket för storleken på bubblorna som bildas.
- Om vattnet befinner sig i turbulent tillstånd när första steget i modellen har avslutats kommer fler kollisioner att ske och färre, större bubblor att bildas.
- Om vattenströmmen som kommer ut ifrån ventilen leds mot en skärm eller annat hinder, är det troligt att bubblorna kommer att dela sig i mindre. Stora bubblor delar sig lättare än små, vilket beror på att ytspänningens roll som sammanhållande kraft blir mindre ju större bubblan är.

I de försök som gjordes användes tre olika ventiler som testades vid ett lågt tryck, (200 kPa), och ett högt, (500 kPa). Se figur 4.

- 

Diameter 2,5 mm
Längd 31 mm
Avstånd till plåt 5,10,15 och 20 mm
- 

Diameter 3 mm
Längd 21+12 mm
- 

Diameter 3 mm
Längd 33 mm
Konlängd 60 mm
Konöppning 4*40 mm

Figur 4. Utseende av de tre försöksventilerna.

Resultaten av dessa försök stöder ovanstående teori då man fann att när en krök på ventilen eller en kollisionssplåt var närvarande minskade medelbubbeldiametern. För fullständiga resultat, se (Rykaart och Haarhoff, 1995). Vid det högre trycket var skillnaden större än vid det lägre. Högre tryck ger också generellt mindre bubblor men andelen makrobubblor blir också större. Författarna har definierat makrobubblor som bubblor $>150 \mu\text{m}$. Samma gräns har använts av Cáceras och Contreras, 1995. Genom visuella undersökningar kom de fram till att bubblor överstigande $150 \mu\text{m}$ inte fastnar på flockarna. Man vill undvika stora bubblor av två skäl:

- En makrobubbla innehåller en väldigt stor volym. T.ex. motsvarar en bubbla på $200 \mu\text{m}$ 125 stycken bubblor med diametern $40 \mu\text{m}$. Det är alltså slöseri med luft att producera stora bubblor.
- Stora bubblor stiger snabbt vilket skapar turbulens och stör de mindre, mer långsamt stigande bubblorna. De har också svårt att fastna på flockarna. Stora bubblor kan dessutom skada slamlagret på ytan då de slår i detta med större kraft än vad små bubblor gör.

Luften som förs till flotationstanken kan karakteriseras på olika sätt (Edzwald *et.al* 1992): Returvattenflödet (R_r), masskoncentrationen av den utsläppta luften (C_r), luftbubbelvolymkoncentrationen (ϕ_b) och koncentrationen av antalet bubblor (N_b).

Returvattenflödet definieras som:

$$R_r = Q_r/Q_0 \quad (19)$$

där

Q_r är returvattenflödet, m³/h

Q_0 är flödet in till anläggningen, m³/h

Returvattenflödet är en användbar parameter i det praktiska arbetet med en anläggning, men säger lite om luften som släpps i flotationstanken. Genom att teckna en ekvation för massbalansen av luft vid utsläppspunkten för returvattnet får man följande ekvation:

$$C_r = [(C_s - C_a)R_r - k] / (1 + R_r) \quad (20)$$

där

C_r är masskoncentrationen av luft som släpps ut i tanken, mg/l

C_s är koncentrationen av luft i returvattnet, mg/l enl. ekv (21)

C_a är koncentrationen av luft som förblir i lösning vid atmosfärstryck, vilket är det tryck som råder hos den öppna tanken, mg/l

k är en faktor som ges av $(C_a - C_0)$, där C_0 är koncentrationen av luft i det inkommande vattnet, vilket ofta är mättat vilket gör att k blir 0

Henrys lag som säger att koncentrationen av en vätska löst i en gas är proportionell mot gasens partialtryck, kan användas för att beräkna koncentrationen av luft i returvattenflödet.

$$C_s = f(P_t + 101,3)/K_H \quad (21)$$

där

f är effektiviteten för tryckkärlet, (-)

P_t är trycket i tryckkärlet, kPa

K_H är Henrys konstant, kPa/mg/l

Det är nu möjligt att räkna ut bubbelvolymkoncentrationen:

$$\phi_b = C_r/\rho_{sat} \quad (22)$$

där

ρ_{sat} är densiteten av luften mättad med vatten, mg/ml

Mellan ϕ_b och koncentrationen av bubblor, N_b , råder sambandet:

$$N_b = 6\phi_b/\pi d_b^3 \quad (23)$$

C_r , N_b och ϕ_b beror på returvattenflödet och temperaturen. I tabell 3 ges en jämförelse mellan dessa vid olika returvattenflöden och två olika temperaturer. Det syns tydligt hur returvattenflödet och temperaturen påverkar C_r , N_b och ϕ_b i tabellen.

Tabell 3. Beräkningarna är gjorda med följande förutsättningar: tryckkärls effektivitet är 70 %, trycket är 483 kPa, d_b är 40 μm , vid 4° är ρ_{sat} och K_H 1,29 mg/ml resp. 2,72 kPa/mg/l och vid 20° är ρ_{sat} och K_H 1,19 mg/ml resp. 4,18 kPa/mg/l. (Edzwald, 1995)

Temperatur (°C)	Returflöde (%)	C_r (mg/l)	ϕ_b (ppm)	N_b (antal/ml)
4	2	1,99	1570	46800
	5	4,84	3810	114000
	8	7,53	5930	177000
	10	9,25	7280	217000
	15	13,30	10400	312000
20	2	1,44	1210	36000
	5	3,50	2930	87500
	8	5,45	4560	136000
	10	6,68	5600	167000
	15	9,59	8030	240000

2.3 Bortförel av slam och slammets torrsubstanshalt

Enligt Zabel, 1985, finns det två olika sätt att ta bort det slamlager som bildas på ytan av flotationstanken.

1. Man kan strypa utloppet för det rena vattnet och på sätt svämma över bassängen. Denna metod är billig då inga extra installationer behövs, och den påverkar inte det renade vattnets kvalitet när bortförel sker. Det går däremot åt mycket vatten vid bortföreln av slamm, upp till 2 % av det renade vattnet och torrsubstanshalten, TS-halten hos det bortförda slamm blir låg med denna metod. Enligt Zabel, 1985, blir TS-halten så låg som runt 0,2 %.

2. I den andra metoden använder man skrapor för att ta bort slamm. Dessa kan köras kontinuerligt eller vid behov. Skraporna kan antingen gå över hela bassängen och släpa med sig slamm till ena änden där det förs över en kant. En annan variant är att montera en rulle med skrapblad på i änden av bassängen. Slamm förs bort när detta system sätts i rotation. För att minimera störningarna vid bortförel används vid dessa mekaniska system en avrundad överfallskant. Dessa mekaniska system kostar en del att installera och kan ge störningar i slamlagret så att detta bryts upp och små partiklar faller ner i tanken. Till fördelarna hör att man uppnår en TS-halt på 1-3 % enligt Zabel, 1985. Arnold *et.al*, 1995, har funnit att man med denna metod uppnår TS-halter mellan 2-6 %.

2.4 Temperaturens inverkan

Enligt Edzwalds konceptuella modell som beskrivits ovan påverkas inte kollisionseffektiviteten av temperaturen, däremot påverkas partikel-bubbelaggregatens stighastigheten. Enligt ekvation (16) är stighastigheten omvänt proportionell mot viskositeten vilket innebär att stighastigheten ökar med temperaturen.

Temperaturen påverkar ρ_{sat} och K_{H} så att de minskar med temperaturen, vilket leder till att masskoncentrationen av luft ökar vilket i sin tur innebär att fler bubblor formas, se tabell 3.

Vid lägre temperaturer är den vattenfilm som omger partiklarna svårare att få bort vilket gör att flotationen blir något sämre

Heinänen *et.al*, 1995, har också funnit att när stighastigheten för partikel-bubbel aggregatet är som störst ger också flotationen bäst resultat. Samma författare har funnit att stighastigheten är som störst vid ett pH-värde runt 5,9. Stighastigheten kan som tidigare visats beräknas med ekvation (16) eller (17) vilken ger att stighastigheten är omvänt proportionell mot viskositeten och därmed temperaturen. Lägre temperatur ger sålunda sämre flotation. Erfarenheter från Finland (Heinänen, *et.al*, 1995) visar också på detta, men också att låg temperatur framförallt påverkar sjunkhastigheten på flockar vid sedimentering och inte i lika stor utsträckning stighastigheten vid flotation. Deras slutsats blir att flotation är en pålitligare process än sedimentering vid kalla förhållanden.

Även svenska försök visar att flotation fungerar sämre vid lägre temperaturer (Hedberg, 1973).

Sammanfattningsvis kan man säga att låg temperatur ger lägre stighastighet vilket i viss mån kompenseras av att antalet bubblor blir fler som kan fästa på partiklarna och därigenom öka stighastigheten.

3. Tidigare försök vid Lackarebäck

Från oktober 1994 till maj 1995 utfördes en mängd försök (Edzwald *et. al* 1995) med samma flotationsanläggning och samma råvattenkälla som användes i dessa försök. Försökens syfte var att förbättra flockningen som föregår själva flotationssteget. Detta gjordes genom att testa olika uppehållstider i flockningssteget (5 och 20 min), olika antal flockningstankar (2 eller 3), två olika energiindrivningar med G-värdena 30 och 70 sek^{-1} och genom att använda antingen propellrar eller grindar som omrörare. Man jämförde också två koagulanter mot varandra, aluminiumsulfat och järnsulfat vid det pH-värde som var optimalt för respektive koagulant. För att mäta resultaten använde man sig av en partikelmätare som mäter antalet partiklar samt storleken på dessa.

Som ett andra mål undersökte man vilken typ av filter som bäst passar till flotation. Man undersökte sandfilter, sand/antracitfilter och antracit/sand/granatfilter.

Man undersökte också vilken effekt höga belastningar på flotationsenheten fick med avseende på hur länge man kunde köra filtren, och vilken kvalitet filtratet hade. Vid några försök med hög belastning installerades en avluftare i form av en pump efter flotationen.

Utanför ramen för dessa försök gjordes ett experiment av institutionen för VA-teknik där man försökte få bort luften genom att installera lameller i flotationstanken.

De resultat som man fick var att vattenkvaliteten efter flotationstanken med användande av aluminiumsulfat som koagulant gav något bättre resultat än med järnsulfat. Flockning i 5 minuter gav partiklar som var runt 10 μm eller mindre. 20 minuters flockning gav partiklar som var något större men en stor andel var runt 10 μm . Flockning i 3 steg gav bättre resultat än flockning i bara 2 steg. Grindomrörare var bättre än propellrar när man använde järnsulfat medan det för aluminiumsulfat inte var någon signifikant skillnad. Den högre blandningsintensiteten med G-värdet 70 sek^{-1} gav något lägre turbiditet efter flotationsanläggningen.

Resultaten efter filtren visade att turbiditeten och antalet partiklar blev lägre vid 5 minuters flockningstid jämfört med 20 minuter samt då man använde aluminium som koagulant. De försök som gjordes med avluftare medförde att filtren inte satte igen lika snabbt.

Av detta skäl var det intressant att mer i detalj studera olika avluftningssystem, vilket resulterade i detta arbete.

4. Anläggningen, dess funktion samt mätmetoder

I detta kapitel beskrivs anläggningen med ord och bilder, hur den fungerar och vilka mätmetoder som använts.

4.1 Beskrivning av anläggningen och råvatten

Försöken utfördes på Lackarebäcks vattenreningsverk vilket försörjer halva Göteborg med vatten. Till försöken användes samma råvatten som på Lackarebäcksverket. Verket får sitt vatten från Göta Älv varifrån det pumpas upp till Lilla och Stora och Delsjöarna. Därifrån rinner det sedan med självfall ned till Lackarebäcks vattenreningsverk.

Vattnet från Delsjöarna kan karaktäriseras som ett vatten med låg turbiditet och alkanitet samt låg halt av naturligt organiskt material (NOM). Råvattenkvaliteten under försöksperioden som varade mellan april till juni kan ses i tabell 4.

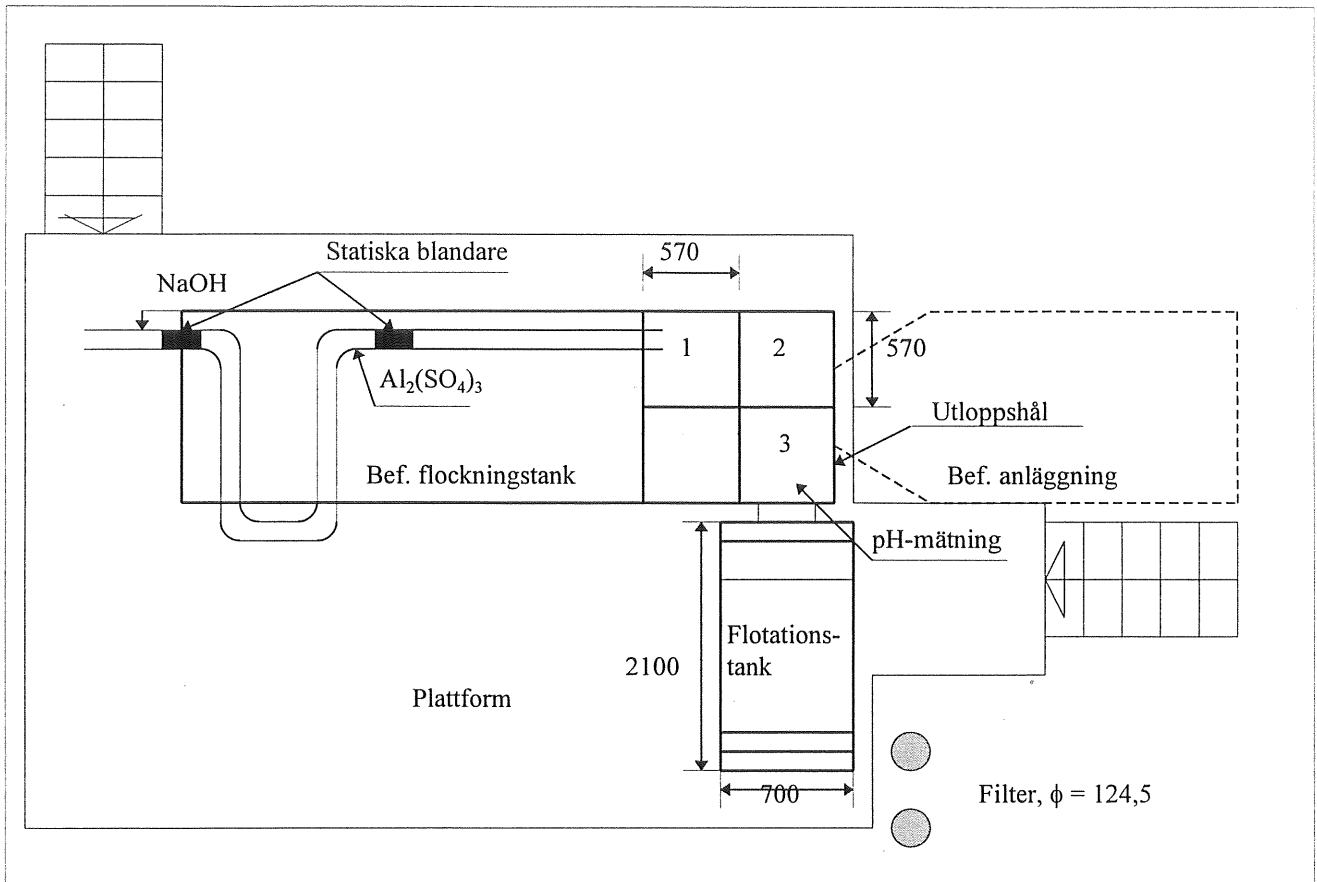
Tabell 4. Lackarebäcks råvattenkvalitet.

	Temperatur C	Turbiditet NTU
Min.	4,0	1,0
Medel	6,5	1,7
Max.	10,2	2,6

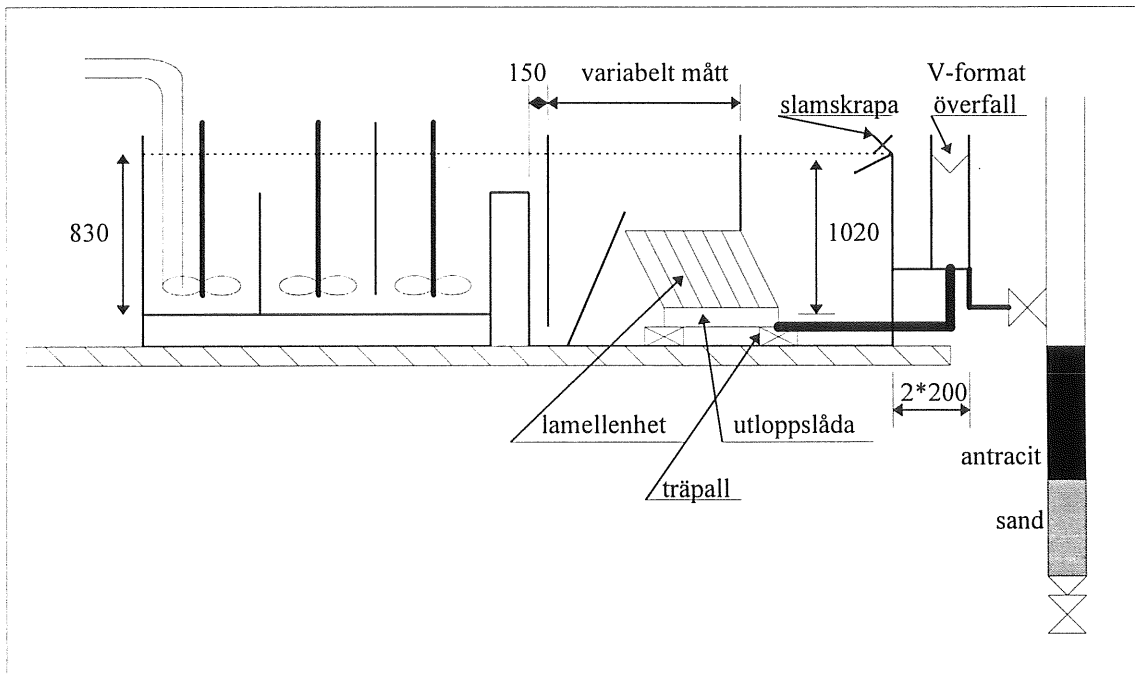
Försöksanläggningen byggdes till viss del in i en redan befintlig anläggning. Anläggningen stod på en plattform och de två filtren på golvet. Flotationstanken modifierades för dessa försök så att den anpassades efter de olika lamellsystemens längd och lutning. I figur 5 och 6 visas anläggningen i plan och vy.

4.1.1 Koagulering

Genom att tillsätta en koagulant, oftast aluminiumsulfat, ändrar man på de i vattnet upplösta partiklarnas egenskaper. Aluminiumsulfat neutraliserar ytladdningen på partiklarna så att de inte längre stöter bort varandra utan när de kolliderar slås de istället samman och bildar större partiklar, de koagulerar (Kavanaugh och Leckie 1980).



Figur 5. Anläggningen sedd ovanifrån



Figur 6. Snitt genom anläggning som följer vattnets väg.

Råvattenflödet till försöksanläggningen var ca 14,5 m³/h. Till flockningstankarna fördes vattnet genom plaströr i vilka två statiska blandare var placerade. Blandarna bestod av flera i röret kryssmonterade plåtar som skapar turbulens i vattnet och därmed blandas kemikalien effektivt in i vattnet. Före den första blandaren doserades natriumhydroxid, NaOH, för att erhålla ett pH-värde på 6,7, som var det optimala för systemet med flockning, flotation och filter enligt de tidigare försöken. Doseringen av natriumhydroxiden sköttes automatiskt genom att pH-värdet mättes kontinuerligt i den sista flockningstanken. Före den andra blandaren doserades aluminiumsulfat, Al₂(SO₄)₃ * 18H₂O, med en aluminiumkoncentration av 2,7 mg/l. Denna dosering var densamma som i de tidigare försöken, (Edzwald *et.al* 1995). Mellan de statiska blandarna lades rören i en u-sväng för att natriumhydroxiden skulle hinna reagera med vattnet innan aluminiumsulfaten tillsattes.

4.1.2 Flockning

I flockningssteget skapades förutsättningar för partiklarna att kollidera och slå sig samman till större aggregat genom att vattnet rördes om.

Flockningstankarna byggdes inuti en större, på platsen redan befintlig tank, genom att skiljeväggar och lösa bottenar monterades. Det kemikaliebehandlade råvattnet släpptes ut i botten av den första tanken, rann över till den andra och till den tredje leddes det via en öppning längst ner på skiljeväggen. Det flockade vattnet rann sedan över till flotationstanken.

Hela flödet på ca 14,5 m³/h gick hela tiden genom flockningsanläggningen vilket underlättade vid flödesändringar, då man annars skulle ha behövt anpassa kemikaliedoseringen efter varje nytt flöde vilket inte bara är omständligt, utan också tar lång tid. Det vatten som inte användes i flotationanläggningen shuntades av genom en öppning i den sista flockningstanken. Flödesmätare av rotametertyp var monterade på råvattenledningen och där shuntvattnet släpptes ut. Mellanskillnaden mellan dessa ger sålunda flödet genom flotationstanken.

I varje flockningstank fanns en propeller som blandade vattnet. Propellrarna hade diametern 350 mm och varje propeller bestod av tre blad. Propellrarna drevs av elmotorer vars hastighet var variabel och i enlighet med föregående experiments bästa resultat, (Edzwald *et.al* 1995), kördes dessa med en hastighet av 80 varv per minut, vilket motsvarar ett G-värde på 70 sek⁻¹ enligt de beräkningar som gjordes för de föregående försöken. G-värdet är ett mått på hur stor hastighetsgradienten i vattenmassan är. Tillväxthastigheten för flockarna är en funktion av G-värdet som vid mekanisk omrörning kan beräknas som, (Smethurst, 1988):

$$G = (P/\mu V)^{1/2}$$

där

G = hastighetsgradienten, sek⁻¹

P = effekttillförsel, W

μ = dynamiska viskositeten, Ns/m²

V = volym, m³

Olika flockningssystem testades i det förra försöket, (Edzwald *et.al* 1995). Försök med 5 minuters flockningstid i tre tankar, G = 70 sek⁻¹, propellrar och järnsulfat som koagulant blev flockarna i storleksordningen 5-20 μm, med ett medel på ca 10 μm.

I detta projekt användes tre tankar med en total flockningstid på 3,5 minuter vilket är en mycket kort flockningstid. Inga mätningar med avseende på partikelstorlekar gjordes, men flockarna var med all sannolikhet mindre än de som producerades i de föregående försöken.

4.1.3 Flotationsanläggningen

I flotationssteget tillsattes små luftbubblor i botten av tanken, som när de steg uppåt fastnade på flockarna som följde med upp till ytan där de kunde tas bort. För att skapa bubblorna togs en del av det renade vattnet i en returvattenström som trycksattes varefter luft tillsattes. När detta luftmättade, trycksatta vattnet släpptes ut genom ventiler in i flotationstanken minskade trycket och bubblor bildades.

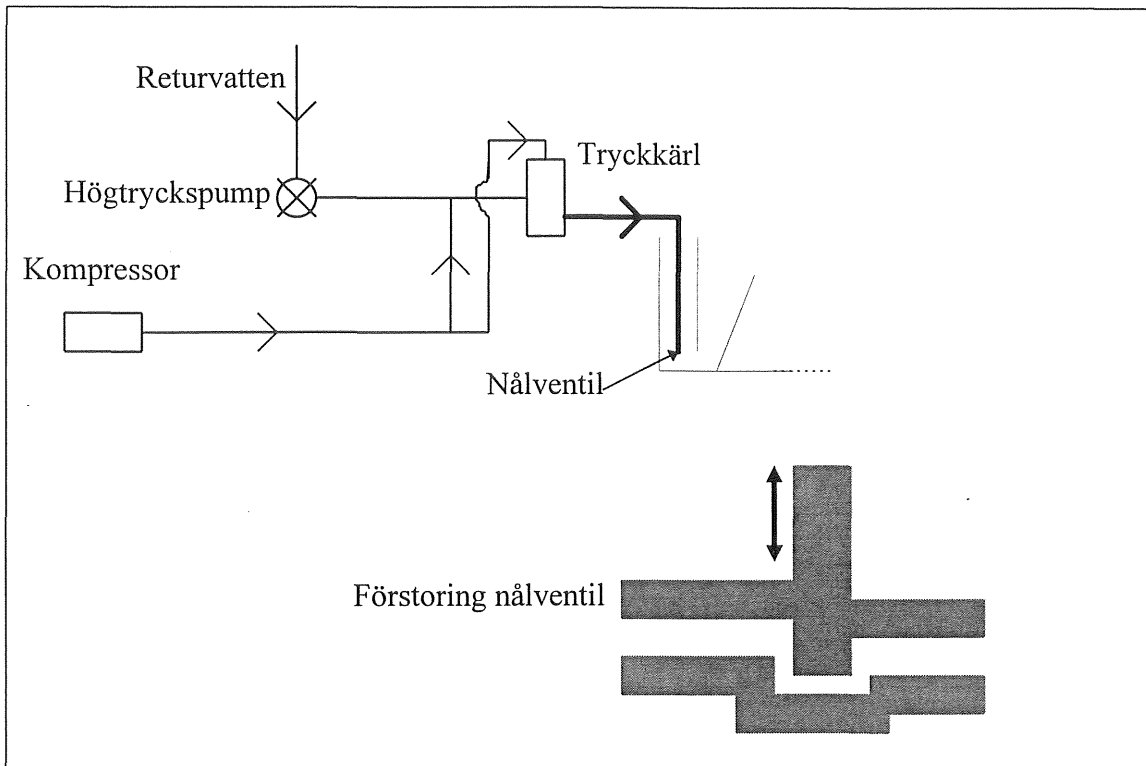
Flotationstanken med tillhörande utrustning tillhandahölls av Purac AB. I sitt ursprungliga skick var tankens invändiga mått 1,55 m lång, 0,7 m bred och 1,2 m djup vilket gav en flotationsyta på ca 1 m². Den ena långsidan var gjord av Plexiglas vilket gav en god insyn i hur flotationsprocessen fungerade. I bilaga A finns ett foto av flotationsanläggningen.

För dessa försök avdelades tanken genom att träskivor och gummidukar monterades in så att flotationstanken anpassades efter de olika lamellsystemens längd och lutning.

Det flockade vattnet leddes genom ett 0,15 m brett schakt ner till botten av flotationstanken där det kom i kontakt med det trycksatta och med luft mättade returflödet. Returflödet hölls konstant på 8 % av returvattenflödet och trycket på returvattnet hölls konstant på 500 kPa. En schematisk bild över tryckutrustning och nålventil finns i figur 7. Returvattnet släpptes ut genom tre nålventiler och det totala flödet leddes uppåt bakom en 91 cm lång skiva som hölls i en lutning av ca 83° grader. Mätningar gjorda på bubbelstorleken när nålventiler används har visat att bubblorna blir runt 40 µm (Bayens *et.al*, 1995). Vattnet togs ut i botten av flotationstanken genom den låda som lamellerna var monterade på. Nivån i flotationstanken hölls konstant genom att utloppsvattnet leddes genom en låda med justerbart, V-format överfall. Från denna låda togs också returvattnet, vatten till filtren och till den kontinuerliga turbiditetsmätningen.

Det slam som bildades på ytan av flotationstanken togs bort efter varje försöksserie eller efter 3-4 timmar genom att en roterande slamborttagare kördes några minuter i borte änden av flotationstanken.

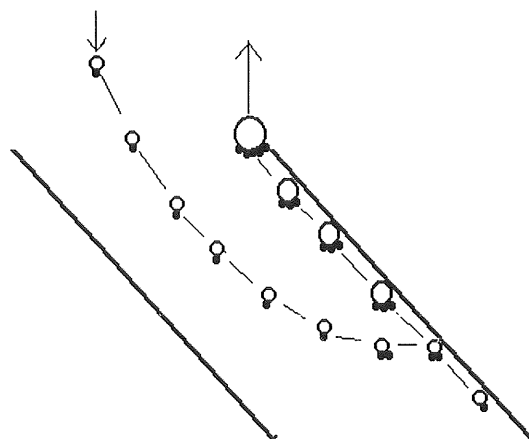
Genom att tillsätta rodamin, ett färgämne, på olika ställen i tanken kunde man bilda sig en bra uppfattning om hur vattnet rörde sig i tanken.



Figur 7. Schematisk bild över tryckutrustning och nålventil.

4.1.4 Avluftningssystem

För att avlägsna den luft som inte fastnade på partiklarna användes ett antal skivor av tunn plåt, lameller, som var monterade på en låda med avdragshål. Denna låda stod i sin tur på en träpall på botten av flotationstanken. Tanken med lamellsystemet var att luftbubblorna skulle stiga till undersidan av lamellerna, där de skulle slås ihop med andra bubblor och partiklar. Bubbel-partikelaggregaten steg sedan längs undersidan av lamellen och upp till ytan, se figur 8.



Figur 8. Principiell bild över hur bubbel-partikelaggregaten med hjälp av lameller bortförs från systemet.

Ett antal olika uppställningar prövades, dels för att förstå hur anläggningen fungerade men framförallt för att få fram ett så bra fungerande system som möjligt. I bilaga D finns ett foto över anläggningen med lameller monterade. De olika parametrarna varierades som följer:

Lamellängd:	40 cm, 60 cm, 80 cm
Lutning mot horisontalplanet, vinkeln α :	40°, 60°, 120°, 140°
Horisontellt avstånd mellan lamellerna:	2 cm, 4 cm, 6 cm, 50 cm

Lamellerna var samtliga 59 cm breda.

Vid tre försök användes vågformade plastskivor. Vid dessa tre försök användes lameller som var 60 cm långa och plastskivor som var 55 cm långa och 58 cm breda. Plastskivornas form beskrivs av figur 9.



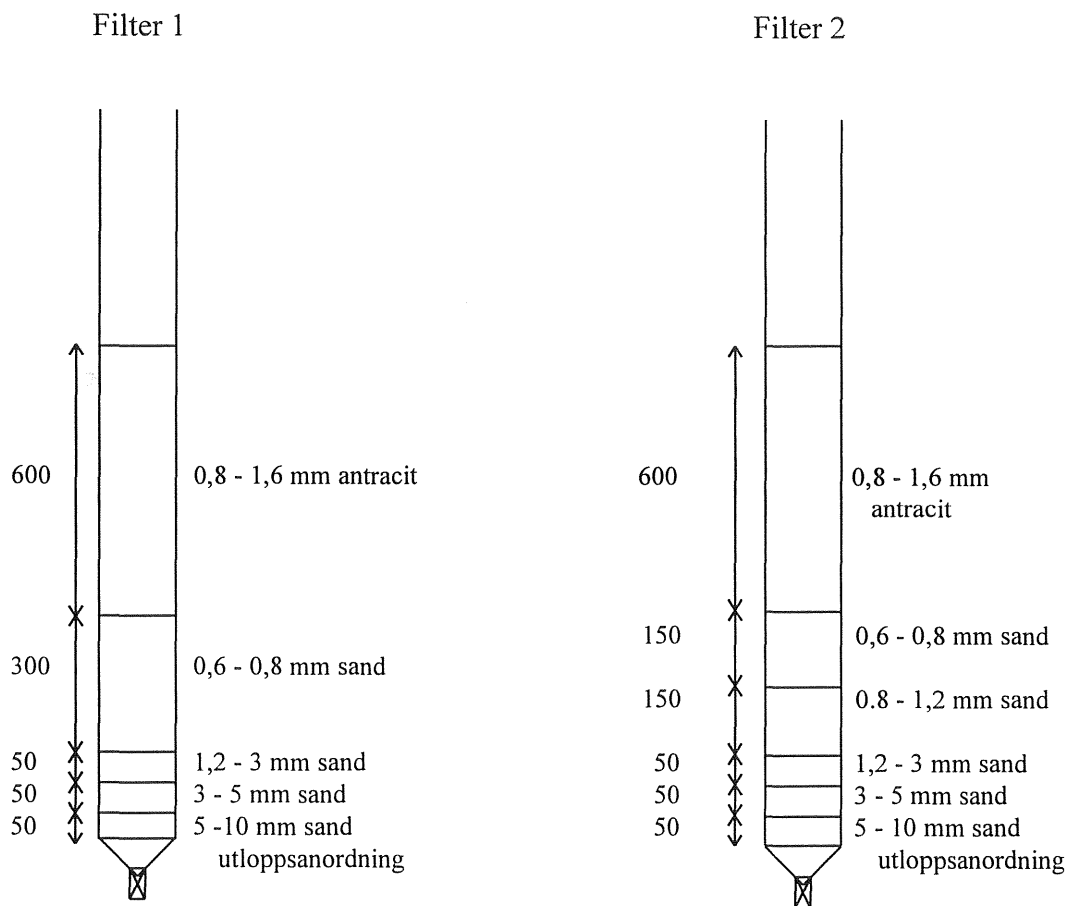
Figur 9. Utseende på de plastskivor som placerades mellan lamellerna. 12 mm avser höjden på plastskivorna.

Systemet med lameller i flotationstanken är patentsökt av PURAC AB. Denna patentansökan gäller även liknande system med t.ex. rör.

4.1.5 Filter

Vid några av försöken användes filter för att rena vattnet som passerat igenom flotationsanläggningen. Detta gjordes för att kontrollera hur bra vattnet är lämpat för filtrering. Filtren var så gott som identiska men kördes med olika belastningar, 10 respektive 15 m³/m²h. Filtermediet bestod av antracit och sand som placerats i en plexiglaskolumn med diametern 0,1245 m. Vattenflödet igenom filtret styrdes med en ventil i utloppet av filteranordningen. Hur filtren såg ut beskrivs av figur 10.

Inloppet för filter 1 låg ca 650 mm ovanför antracitytan och för filter 2 ca 150 mm ovanför antracitytan. Filter två hade ett lager med sand i storleken 0,6 - 0,8 mm och tjockleken 600 mm. Med samma tjocklek i filter 2 fanns två lager sand. Trots dessa två skillnader kan man betrakta de två filtrena som likvärdiga. För att mäta tryckfallet i och över de båda filtrena var sju stycken manometerrör monterade på varje filter. Från antracitytan räknat nedåt satt rören på nivåerna 100, 200, 300, 400, 500, 700 och 1100 mm. Med detta antal manometerrör var det möjligt att få en bild av hur tryckfallet i filtrena fördelade sig.



Figur 10. Filtrens uppbyggnad.

4.2 Mätmetoder

4.2.1 Turbiditetsmätningar

Turbiditeten orsakas av de ämnen som finns upplösta i vattnet. Turbiditet kan dock inte helt översättas med hur stor mängd upplösta ämnen det finns i vattnet. Mätningen bygger på hur en ljusstråle sprids när den passerar genom vattnet. Turbiditet mäts i enheten NTU. I litteraturen ser man ofta att turbiditeten har angetts i enheterna FTU, JTU eller APHA. I praktiken beskriver dessa enheter samma sak och de numeriska värdena är samma (Smethurst.G, 1988).

Turbiditeten mättes kontinuerligt på det utgående vattnet med en turbiditetsmätare av typen 95T, Great Lakes Instrument, vilken var kopplad till en skrivare som registrerade kontinuerligt. För varje flöde som kördes togs det prover för hand flera gånger. Dessa manuellt tagna prover analyserades två gånger i en Hach Ratio/XR turbidimeter. Den första

mätningen gjordes omedelbart, och den andra efter ca 10 minuter. Detta gjordes för att se om det fanns någon luft i utloppsvattnet. Det blev också en extra kontroll på att båda mätarna fungerade. Mätarna kalibrerades mot lösningar eller glasspektra med känd turbiditet.

4.2.2 pH-övervakning

Vatten från den tredje flockningstanken leddes till en pH-mätare som mätte kontinuerlig. Denna stod i kontakt med den pump som doserade natriumhydroxiden. Önskat pH-värde ställdes in på mätenheten och sedan sköttes allt automatiskt. pH-mätaren kalibrerades mot lösningar med känt pH.

4.2.3 Temperaturmätning

Vattnets temperatur mättes ett flertal gånger varje dag med en vanlig sprittermometer vars noggrannhet var tiondelar av en grad. Mätplatsen var i den tredje flockningstanken.

4.2.4 Flödesmätningar

Flödet in i anläggningen och det vatten som släpptes ut från den tredje flockningstanken mättes med flödesmätare av rotametertyp. Den praktiska avläsningsnoggrannheten kan uppskattas till + - 50 l/h.

Flödet genom den kontinuerliga turbiditetsmätaren och flödet genom filtren ställdes in genom flödesmätning med hjälp av klocka och mätkärl. Samma metod användes när flödet av aluminiumsulfatdoseringen ställdes in.

5. Resultat

I detta kapitel presenteras de resultat som uppnåddes för flotationsanläggningen och filtren.

5.1 Flotationsanläggningen

Försöksparametrarna för de olika försöken visas i tabell 5. För definitioner av systemet, se figur 11.

Tabell 5. Försöksparametrar.

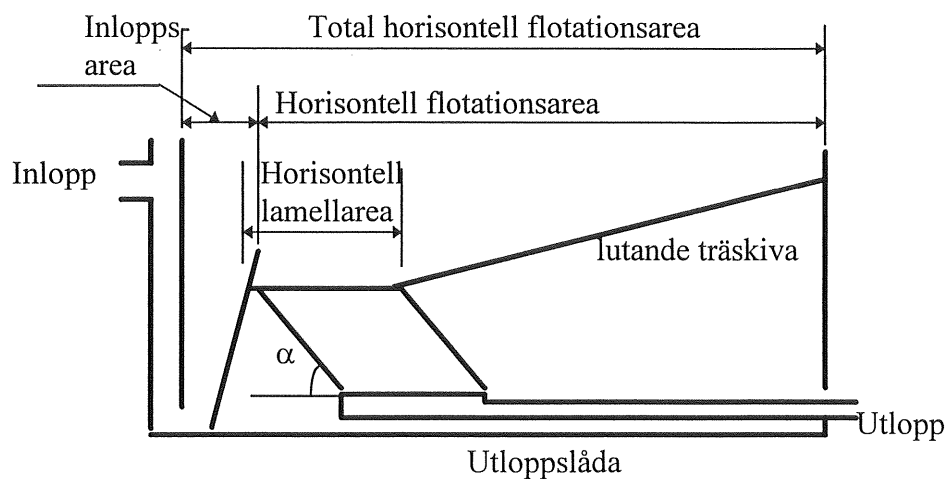
Försök nr	Vatten-temp. (C°)	Inlopps-area (m ²)	Horisontell flotations-area (m ²)	Total horisontell flotations-area (m ²)	Horisontell lamell-area (m ²)	Lamell-längd (m)	Avstånd mellan lameller (m)	Lutning (°)
1	4	0,24	0,76	1,00	----	----	----	----
2	4	0,24	0,76	1,00	0,30	0,80	0,50	140
3	4,5	0,24	0,76	1,00	0,30	0,40	0,02	120
4	4,5	0,24	0,76	1,00	0,30	0,40	0,04*	120
5	4,5	0,16	0,84	1,00	0,30	0,40	0,02	60
6	4,5	0,16	0,26	0,42	0,30	0,40	0,02	60
7	4,2	0,16	0,26	0,42	0,30	0,40	0,02	40
8	6	0,16	0,26	0,42	0,30	0,40	0,04*	60
9	5	0,16	0,26	0,42	0,30	0,40	0,04*	40
10	6,2	0,14	0,30	0,44	0,30	0,80	0,04*	40
11	6,7	0,15	0,29	0,44	0,30	0,60	0,04*	60
12	6,5	0,16	0,28	0,44	0,30	0,60	0,04*	40
13	7,3	0,16	0,28	0,44	0,29	0,60	0,02	40
14	10	0,14	0,29	0,43	0,29	0,60	0,06	40
15	10,2	0,15	0,30	0,45	0,29	0,60	0,50	40
16**	10	0,17	0,14	0,31	0,29	0,60	0,02	40
17***	9,5	0,14	0,29	0,43	0,29	0,60	0,02	40
18**	9,5	0,14	0,86	1,00	0,29	0,60	0,02	40

* Avstånd mellan de två första lamellerna var 0,02 m

** Vågformade plastbitar med samma storlek som lamellerna placerades mellan lamellerna

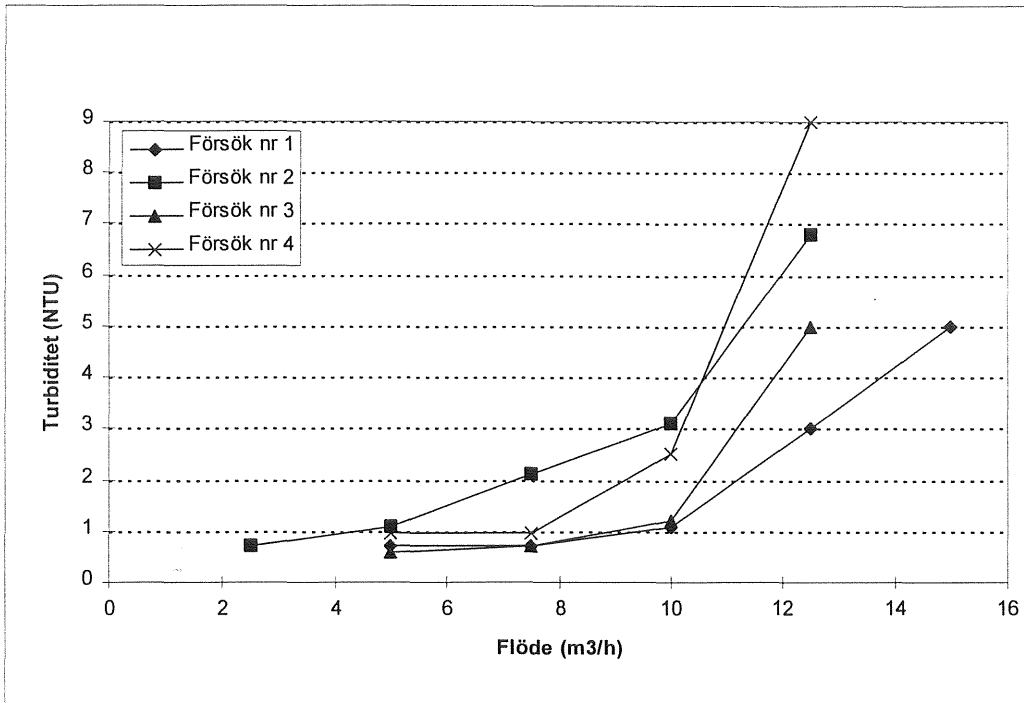
*** Denna uppställning användes även vid filterförsöken, även denna med plastbitar

I de försök där den horisontella flotationsarean var runt $0,30 \text{ m}^2$ var den lutande träskivan placerad vertikalt i höjd med den sista lamellen. Att inloppsarean minskade efter de första försöken berodde på att skivan som styr vattenflödet uppåt efter ventilerna ställdes brantare, varpå inloppsarean minskar. Vid de försök där den horisontella lamellarean var $0,29 \text{ m}^2$ var utloppshålen för den första lamellen igenpluggade.

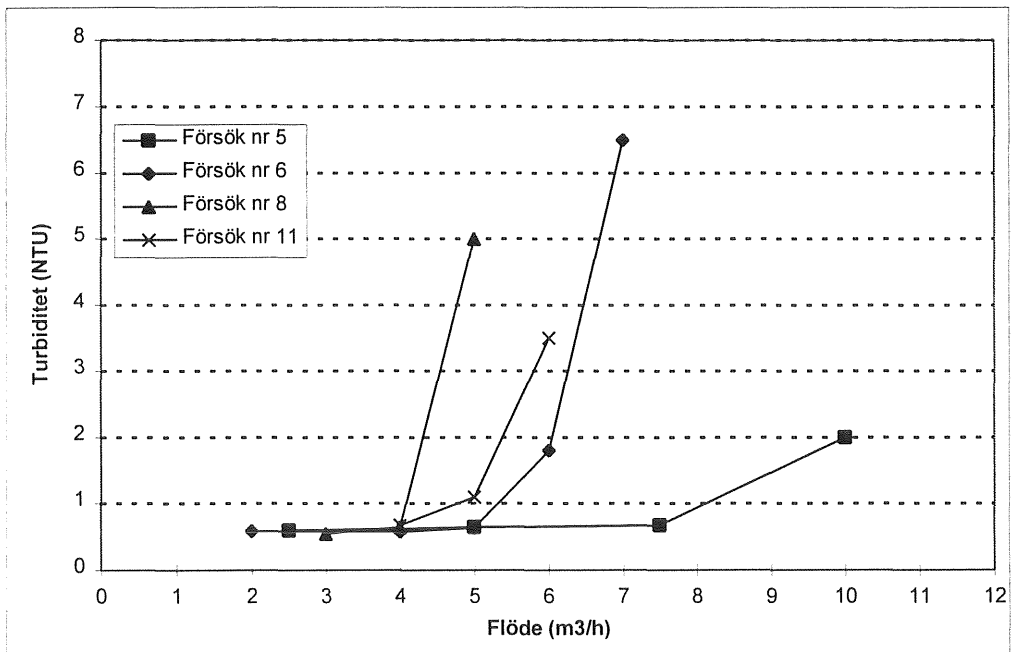


Figur 11. Definitioner av systemet.

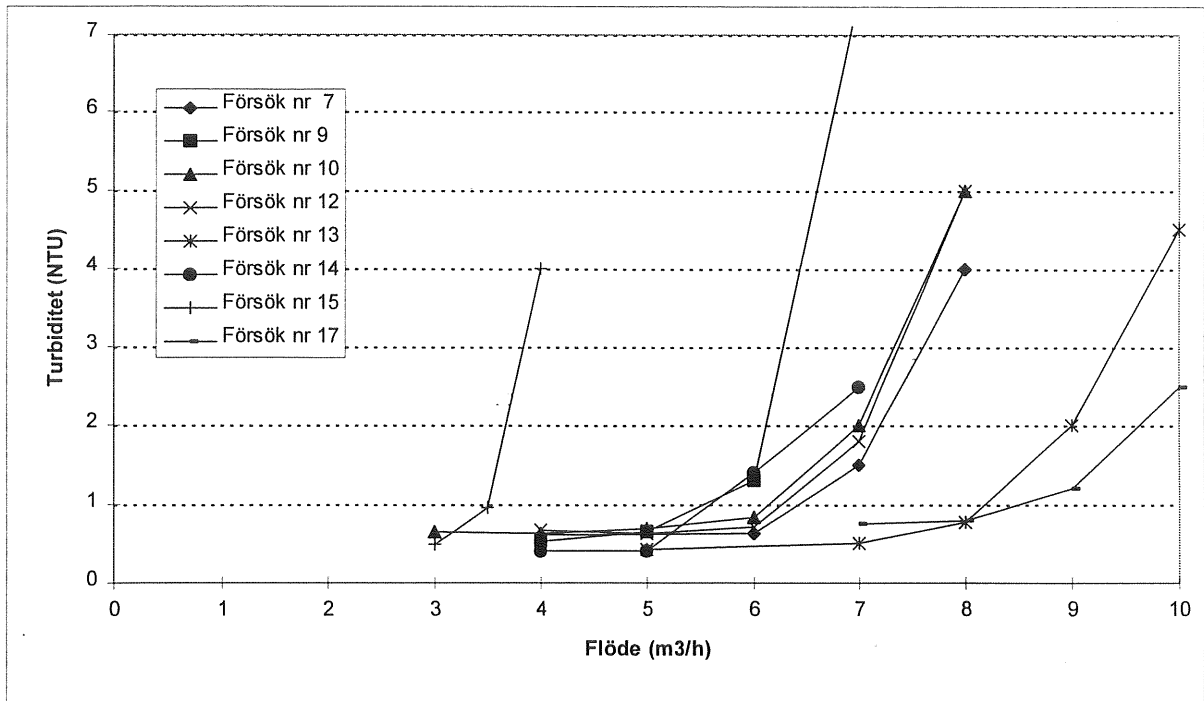
Resultaten baseras på den kontinuerliga turbiditetsmätningen. Resultaten redovisas i form av uppbrytningskurvor som visar turbiditeten för varje flöde som kördes. I figur 12 visas försöket med den tomma tanken och de med lutningen 120° och 140° , i figur 13 de med lutningen 60° och i figur 14 visas försöken med 40° lutning. De försök som gjordes för att utröna hur stor betydelse flotationsarean har finns i figur 15. Samtliga resultat från flotationen finns i bilaga B.



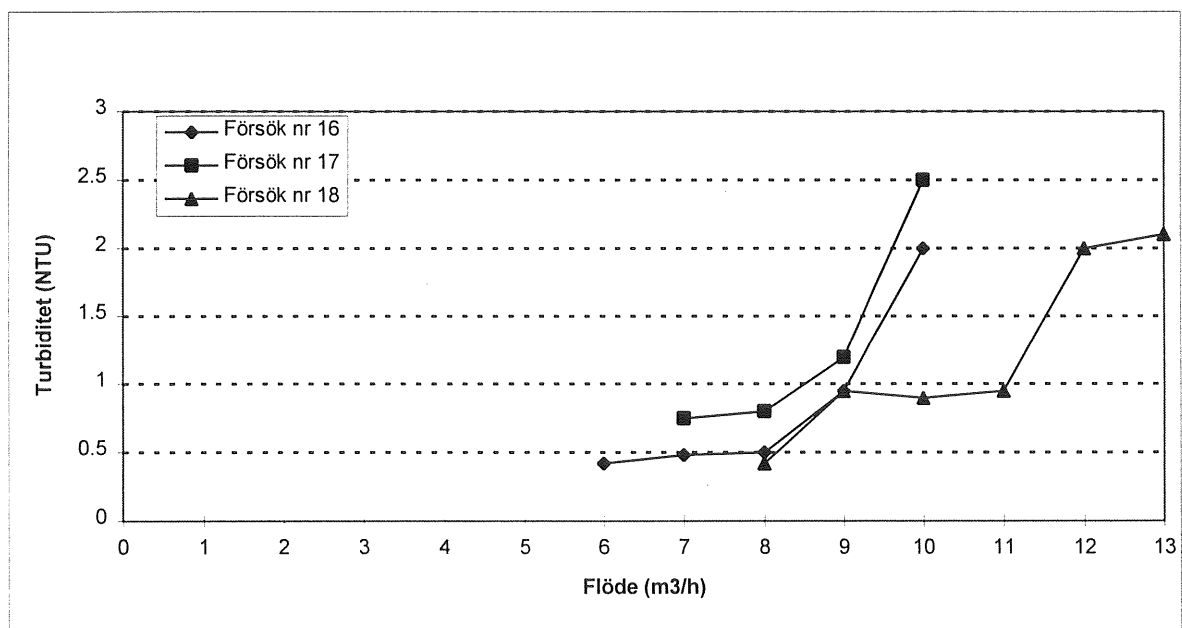
Figur 12. Försök med tom tank, 140° och 120° lutning.



Figur 13. Försök med 60° lutning.



Figur 14. Försök med 40° lutning.



Figur 15. Försök flotationsareans betydelse.

För att karakterisera ett lamellsystem kan man använda en lamellparameter, L_p . Lamellparametern är dimensionslös och beräknas som:

$$L_p = (L/s) \cos\alpha + 1 \quad (23)$$

där

L är längden av lamellen, m

s är horisontella avståndet mellan lamellerna, m

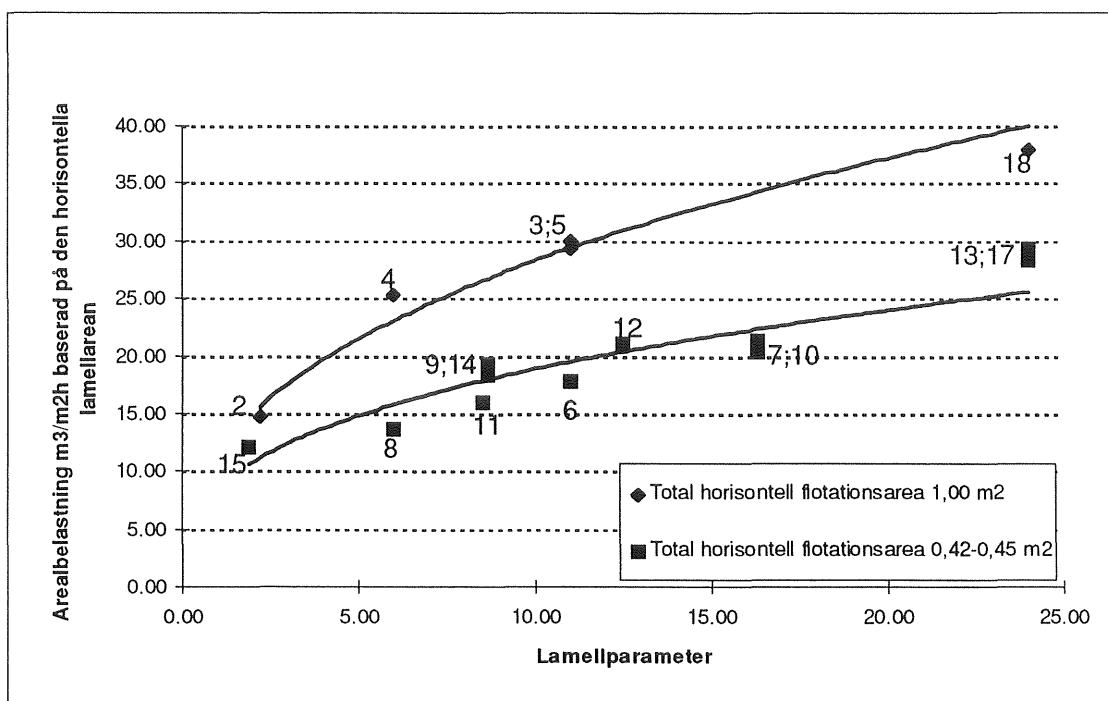
α är lutningen mot horisontalplanet, grader

I tabell 6 finns lamellparametern beräknad för de olika försöken tillsammans med den arealbelastning som varje försök klarade av vid 1 NTU i det utgående vattnet.

Tabell 6. Lamellparameter, arealbelastning och uppehållstid för de olika försöken.

Försök nr	Lamell längd (m)	Lutn. grader	avstånd (m)	lamell parameter L_p	Flöde vid 1 NTU	Areal belastn (m^3/m^2 h)	Volym (m^3)	Uppehållstid (min)
1	0	0	0	1,0	9,4	9,4	1,24	7,9
2	0,8	140	0,5	2,2	4,4	14,7	0,70	9,5
3	0,4	120	0,02	11,0	9,0	30,0	0,68	4,5
4	0,4	120	0,04	6,0	7,6	25,3	0,68	5,4
5	0,4	60	0,02	11,0	8,8	29,3	0,59	4,0
6	0,4	60	0,02	11,0	5,3	17,7	0,41	4,7
7	0,4	40	0,02	16,3	6,4	21,3	0,41	3,9
8	0,4	60	0,04	6,0	4,1	13,7	0,41	6,1
9	0,4	40	0,04	8,7	5,5	18,3	0,41	4,5
10	0,8	40	0,04	16,3	6,1	20,3	0,42	4,2
11	0,6	60	0,04	8,5	4,8	16,0	0,43	5,4
12	0,6	40	0,04	12,5	6,3	21,0	0,42	4,0
13	0,6	40	0,02	24,0	8,2	28,3	0,42	3,1
14	0,6	40	0,06	8,7	5,6	19,3	0,42	4,5
15	0,6	40	0,5	1,9	3,5	12,1	0,42	7,3
16	0,6	40	0,02	24,0	9,0	31,0	0,38	2,5
17	0,6	40	0,02	24,0	8,5	29,3	0,42	3,0
18	0,6	40	0,02	24,0	11,0	37,9	0,60	3,3

I figur 16 visas lamellparametern mot den arealbelastning som varje uppställning klarade av. Arealbelastningen har beräknats på den horisontella lamellarean i samtliga fall och för det flöde som gav turbiditeten 1 NTU. I detta flöde har inte returvattenflödet räknats in. Två kurvor har ritats, en för de uppställningar där den totala horisontella flotationsarean var 0,42-0,45 m^2 och en för de uppställningar där den totala horisontella flotationsarean var 1,00 m^2 .



Figur 16. Arealbelastning för varje försök vid 1 NTU. Siffrorna anger försöksnumret enligt tabell 6.

Den övre kurvan som visar uppställningarna med 1,00 m² total horisontell flotationsarea ger en högre arealbelastning än de uppställningar med 0,42-0,45 m². Anledningen till detta är troligtvis en kombination mellan att vattnet sprids ut över en större area, vilket leder till att inte så mycket luftbubblor följer med vattnet ner mellan lamellerna och att uppehållstiden för vattnet blir större i uppställningarna med 1,00 m². I tabell 6 finns uppehållstiderna beräknade och i bilaga C visas hur volymerna i flotationstanken är beräknade. En jämförelse mellan försök nr 3 och nr 5 mot försök nr 13 och nr 17 som alla har ungefär samma arealbelastning visar att uppehållstiden i flotationstanken är upp till 50 % längre (3 resp 4,5 min) för uppställningarna med 1,00 m² total horisontell flotationsarea.

Att undersöka vilken betydelse flotationsarean har var syftet med experiment 16-18. Flotationsarean minskades i försök nr 16 genom att träskivan vinklades framåt, i försök nr 17 var den monterad vertikalt och i nr 18 var den monterad mot avskraparordningen. Som man ser i figur 15 blev resultatet för försök nr 18 annorlunda än alla övriga i och med att kurvan formar ett trappsteg strax under 1 NTU. Detta var så oväntat att försöket gjordes om, men resultatet blev detsamma. Arealbelastningen blev som väntat störst för försök nr 18, och näst bäst blev försök nr 16 med den minsta flotationsytan. Detta var något oväntat och kan förklaras med att de hydrauliska villkoren blir bättre när vattnet inte slår i en helt vertikalt stående vägg, utan leds ner i tanken på ett lugnare sätt. Avsikten med plastskivorna var att se om de skapade bättre villkor för bortförsl av luft än om man enbart använder lameller.

De spårämnesförsök som gjordes visade att vid låga belastningar fanns en tendens till att vattnet inte spred ut sig jämt över lamellerna. Vid höga belastningar spred sig

vattnet mycket bättre över hela lamellsystemet vilket innebär att anläggningen inte hade så stor andel överksam volym vid de högre belastningarna.

Försök nr 14, 12 och 13 var alla lika förutom avståndet lamellerna emellan som var 6, 4 och 2 cm respektive. Uppställningarna klarade arealbelastningarna 19,3 ; 21,0 och 28,3 m³/m²h, vilket tyder på att ju kortare avståndet mellan lamellerna var, desto större belastning klarade anläggningen av. Försök nr 17 var identiskt med nr 13 förutom att plastskivor användes i nr 17. Arealbelastningen ökade marginellt till 29,3 m³/m²h, vilket tolkas som att en minskning av avståndet från 2 cm inte ger någon effekt på hur stor belastning anläggningen klarar av.

Försök nr 9, 12 och 10 skiljde sig åt på lamellernas längd. Längderna var 40, 60 respektive 80 cm och försöken klarade 18,3 ; 21,0 och 20,0 m³/m²h vardera. Detta tyder på att 80 cm var något för långt för denna pilotanläggning. Försök nr 7 och 13 hade lamelllängden 40 respektive 60 cm och var lika i övrigt. Belastningarna blev 21,3 mot 28,3 m³/m²h, vilket tyder på att 60 cm långa lameller var bäst för denna anläggning.

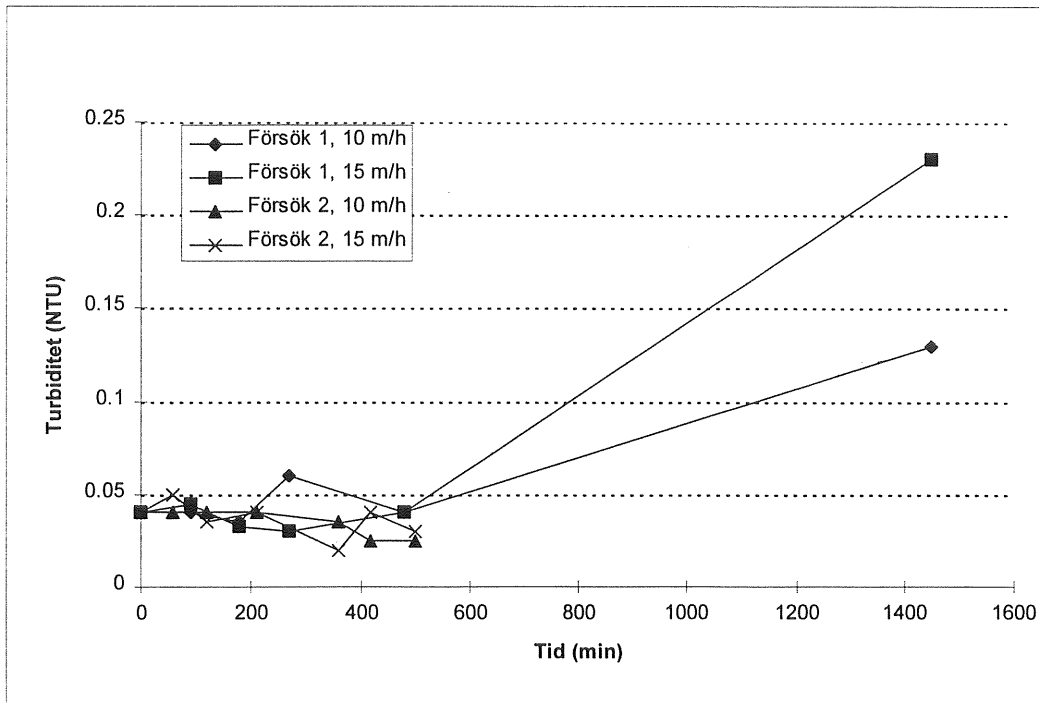
I försök nr 6 och 7 skiljde sig lutningen, 60° mot 40°. Försök nr 6 klarade 17,7 och nr 7 klarade 21,3 m³/m²h. Även för försök 11 och 12 var skillnaden 60° mot 40° och belastningarna blev 17,7 respektive 21,0 m³/m²h. Detta talar för att liten lutning ger högre belastning. Inga försök med mindre lutning än 40° gjordes, men kunde ha gett bättre resultat.

Temperaturen varierade mellan 4° och 10° under försöksserien. Effekten av detta är svår att kvantifiera och ingen hänsyn till denna variation har tagits i utvärderingen.

Med tanke på att man i en fullskaleanläggning vill bygga så enkelt som möjligt och utnyttja den byggda volymen på bästa sätt, är det försöken med 0,42-0,45 m² total horisontell flotationsarea som bäst efterliknar en fullskaleanläggning. Av dessa försök gav försök nr 13 det bästa resultatet vilket klarade en arealbelastning på 28,3 m³/m²h. Om man jämför detta med de 5-15 m³/m²h som Edzwald och Wingler, 1990 anger som normala belastningar så kan man med ett lamellsystem åtminstone fördubbla denna siffra men troligtvis ännu mer.

5.2 Filter

Två försök med filter gjordes. I det ena belastades flotationsanläggningen med arealbelastningen 24 m³/m²h och i det andra med 31 m³/m²h. Vid varje försök användes två filter som belastades med 10 respektive 15 m³/m²h. Resultatet med avseende på filtratets kvalitet finns i figur 17. I figur 18 finns tryckfallet igenom hela filtret för försök 1 för det filter som belastades med 10 m³/m²h. I figur 19 finns tryckfallet över hela filtret redovisat för båda försöken och båda filtren. De fullständiga resultaten finns i bilaga D.



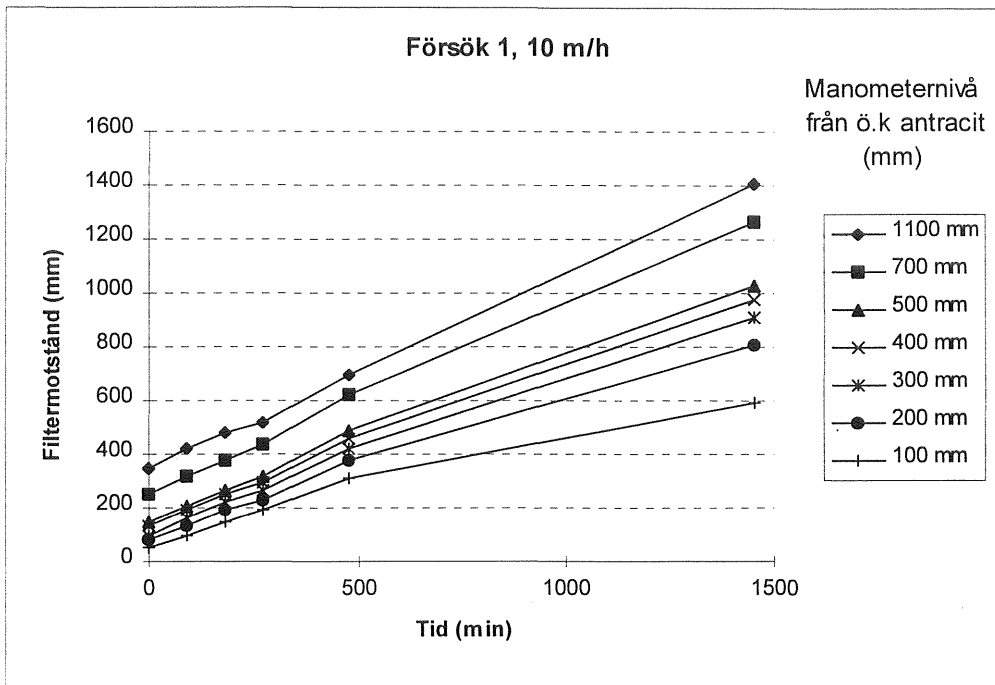
Figur 17. Turbiditet hos det filtrerade vattnet

När man avgör hur bra ett filter fungerar är det främst två saker som är av intresse: hur länge det kan köras och vilken turbiditet det utgående vattnet har. Hur länge ett filter kan köras bestäms av det tryckfall som anläggningen klarar av för att det bestämda flödet fortfarande ska kunna gå igenom. Det är alltså en fysisk begränsning. Hur länge det dröjer innan tryckfallet blir för stort beror på vilken kvalitet det inkommande vattnet har och hur stort flöde som filtret belastas med. För att kunna jämföra olika filter med varandra kan man använda den volym som varje kvadratmeter av filtret renat innan det måste backspolas som mått, m^3/m^2 och filtercykel.

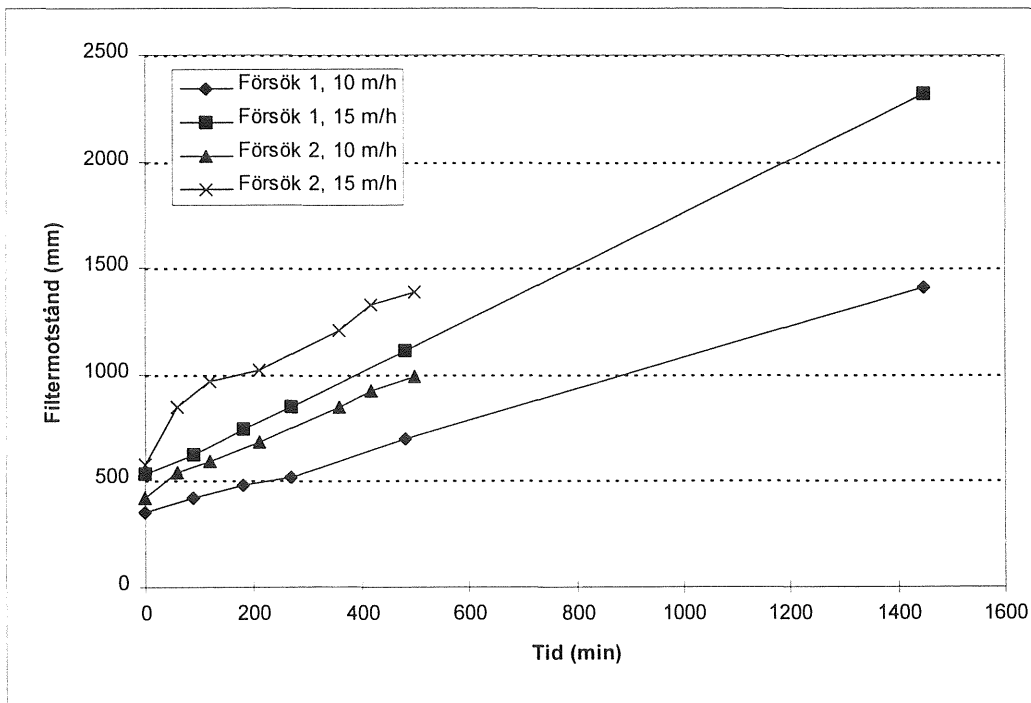
I de föregående försöken (Edzwald *et.al* 1995) testades olika filter, bl.a likadana filter som användes i dessa försök. Man karakteriserade filtrens produktionskapacitet med ovan beskrivna mått. För att avgöra när ett filter behövde backspolas användes ett av följande kriterier:

- När tryckfallet uppgick till 2,5 m
- När det filtrerade vattnets turbiditet överskred 0,20 NTU

I dessa försök karakteriserades filtren på samma sätt som i de föregående för att jämförelse dem emellan ska vara möjlig. Filtrena kördes aldrig så länge att 2,5 m tryckfall uppstod, men tidpunkten då ett tryckfall på 2,5 m skulle ha uppstått har beräknats genom extrapolation av de uppmätta värdena. I de fall som den utgående turbiditeten har varit avgörande har tidpunkten för 0,2 NTU interpolerats fram i ett fall och extrapolerats fram i det andra. Hur stor produktionen för de olika filtrena och försöken i m^3/m^2 och filtercykel blev finns i tabell 7.



Figur 18. Tryckfall genom hela filtret, försök 1, 10 m/h

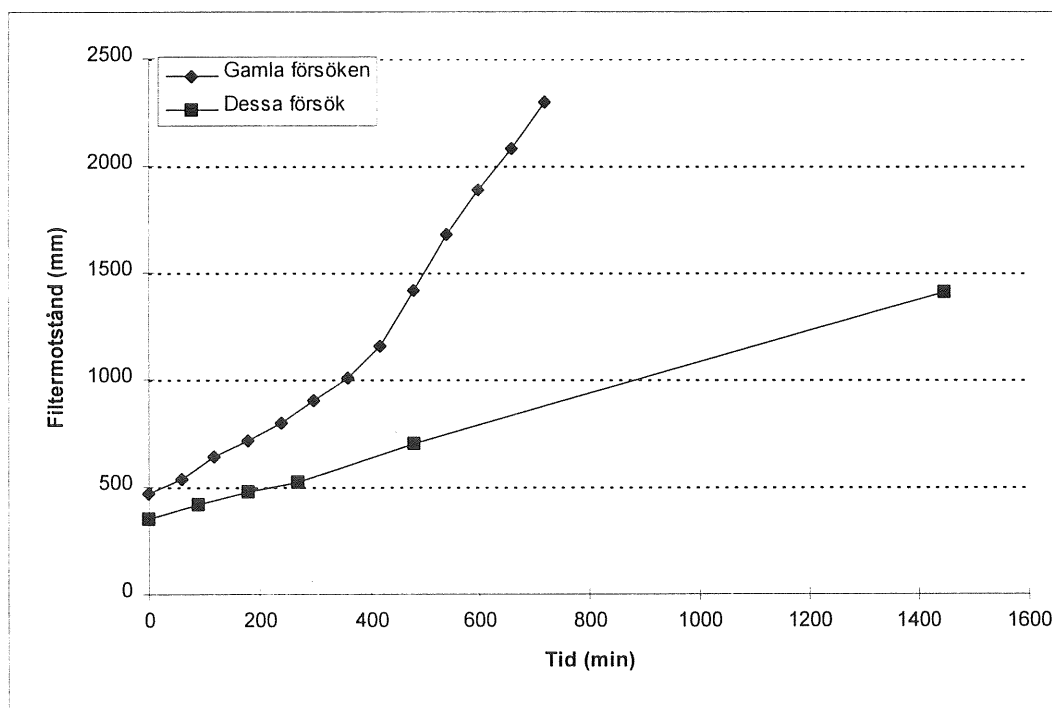


Figur 19. Tryckfall över hela filtret, båda försök, båda filter.

Tabell 7. Produktion, m^3/m^2 och filtercykel.

	Försök 1		Försök 2	
Belastning, m/h	10	15	10	15
Avgörande för produktionen	utg. turb.	utg. turb.	tryckfall	tryckfall
Produktion, m^3/m^2 och filtercykel	367	324	304	296

I figur 20 görs en jämförelse mellan hur filtermotståndet byggdes upp i de föregående försöken för ett likadant filter där flotationsenheten belastades med arealbelastningen 16 m/h och ingen ingen avluftning praktiserades. Detta var den högsta belastning som användes i de försöken. Det närmast jämförbara försök som nu gjordes var när flotationsenheten belastades med 24 m/h, vilket var den lägsta belastningen som kördes tillsammans med filter. Det syns mycket tydligt hur snabbt filtermotståndet ökade när ingen avluftning användes i jämförelse med de nu gjorda försöken med avluftningssystem. Belastningen på båda filtren var 10 m/h. I det filter där ingen avluftning användes uppsteg produktionen till $130 \text{ m}^3/\text{m}^2$ och filtercykel. I det jämförda filtret, där belastningen var 50 % större på flotationsenheten, blev produktionen $367 \text{ m}^3/\text{m}^2$ och filtercykel.



Figur 20. Jämförelse filtermotståndets uppbyggnad mellan förut gjorda försök utan avluftare och försök nu gjorda med lameller.

6. Slutsatser

Detta arbete har visat att belastningen på en flotationstank avsevärt kan höjas genom att ett lamellsystem placeras i tanken. Det har också visats hur viktigt det är att luften avlägsnas från vattnet innan detta når filtren.

Resultaten visar att lamellsystemet fungerar bäst om avståndet mellan lamellerna är 2 cm och lutningen på lamellerna är 40° . I denna flotationstank fungerade lameller med längden 60 cm bäst. Längre lameller kom för nära den fria vattenytan, och vattnet kunde därmed inte sprida ut sig över lamellerna. 60 cm långa lameller ger ett förhållande mellan djupet till lamellerna och den projicerade höjden av lamellerna till 1,5.

För en fullskaleanläggning ger dessa försök värdefull information med avseende på lutning och avstånd. Om längden kan man säga att lamellerna inte får vara längre än att sådana hydrauliska förhållanden skapas så att vattnet kan sprida sig jämt över lamellsystemet

Försöken har också visat att det är viktigt att vattnet leds under laminära förhållanden till lamellsystemet, och inte utsätts för den turbulens som uppstår då vattnet leds in i en vertikal vägg (försök nr 16 och 17).

Den teori som presenterats ger viss vägledning om temperaturens inverkan.

Referenser

- Arnold S.R, Grubb T.P, Harvey P.J; 1995; *Recent applications of dissolved air flotation: pilot studies and full scale design*; Water science and technology, vol. 31 ,nr 3-4, sid. 327-340
- Bayens J, Mochtar I.Y, Liers S, De Wit; 1995; *Plugflow dissolved air flotation*; Water environment research, vol. 67, nr 7, sid. 1027-1034
- Beckman O, Kjällerström B, Sundström T; 1991; *Termodynamik, grundläggande termodynamik för högskolestudier*; Almqvist och Wiksell, tredje upplagan
- Cáseres L, Contreras R; 1995; *Municipal wastewater treatment by lime/ferrous sulfate and dissolved air flotation*; Water science and technology, vol. 31 ,nr 3-4, sid. 285- 294
- Edzwald J.K, Wingler B.J; 1990; *Chemical and physical aspects of dissolved air flotation for the removal of algae*; Aqua, vol.39 nr.1 sid 24-35
- Edzwald J.K, Malley J.P, Yu C; 1991; *A conceptual model for dissolved air flotation in water treatment*; Water supply vol.9 nr. 4 sid. 141-150
- Edzwald J.K, Walsh J.P, Kaminski G.S, Dunn H.J; 1992; *Flocculation and air requirements for dissolved air flotation*; Journal of American Water Works Association, Mars 1992, sid 91 -100
- Edzwald J.K, Tobiason J.E, Hedberg T; 1995; *Dissolved air flotation; research on flocculation and filtration*; Amherst 1995
- Edzwald J.K; 1995; *Principles and applications of dissolved air flotation*; Water science and technology, vol. 31 ,nr 3-4, sid. 1-24
- Fukushi, Tambo, Matsui; 1995; *A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment*; Water science and technology, vol. 31 ,nr 3-4, sid. 37-47
- Hedberg T; 1973; *Kemisk rening av vatten från Bolmen*; Rapport från försöksverksamhet 1971-1973; Sydsvatten
- Heinänen J, Jokela P, Ala-Peijari T; 1995; *Use of dissolved air flotation in potable water treatment in Finland*; Water science and technology, vol. 31 ,nr 3-4, sid. 225-238
- Hyde R.A, Miller D.G, Packham R.F, Richards W.N; 1977; *Water clarification by floatation*; Journal of American Water Works Association Vol. 69 nr. 7 sid. 369-374

Kavanaugh M.C, Leckie J.O; 1980; *Particulates in water, characterisation, fate, effects and removal*; Washington D.C

Kitchener J.A, Gochin R.J; *The mechanism of dissolved air flotation for potable water: Basic analysis and proposal*. Water Research vol. 15 nr. 5 sid 585-590

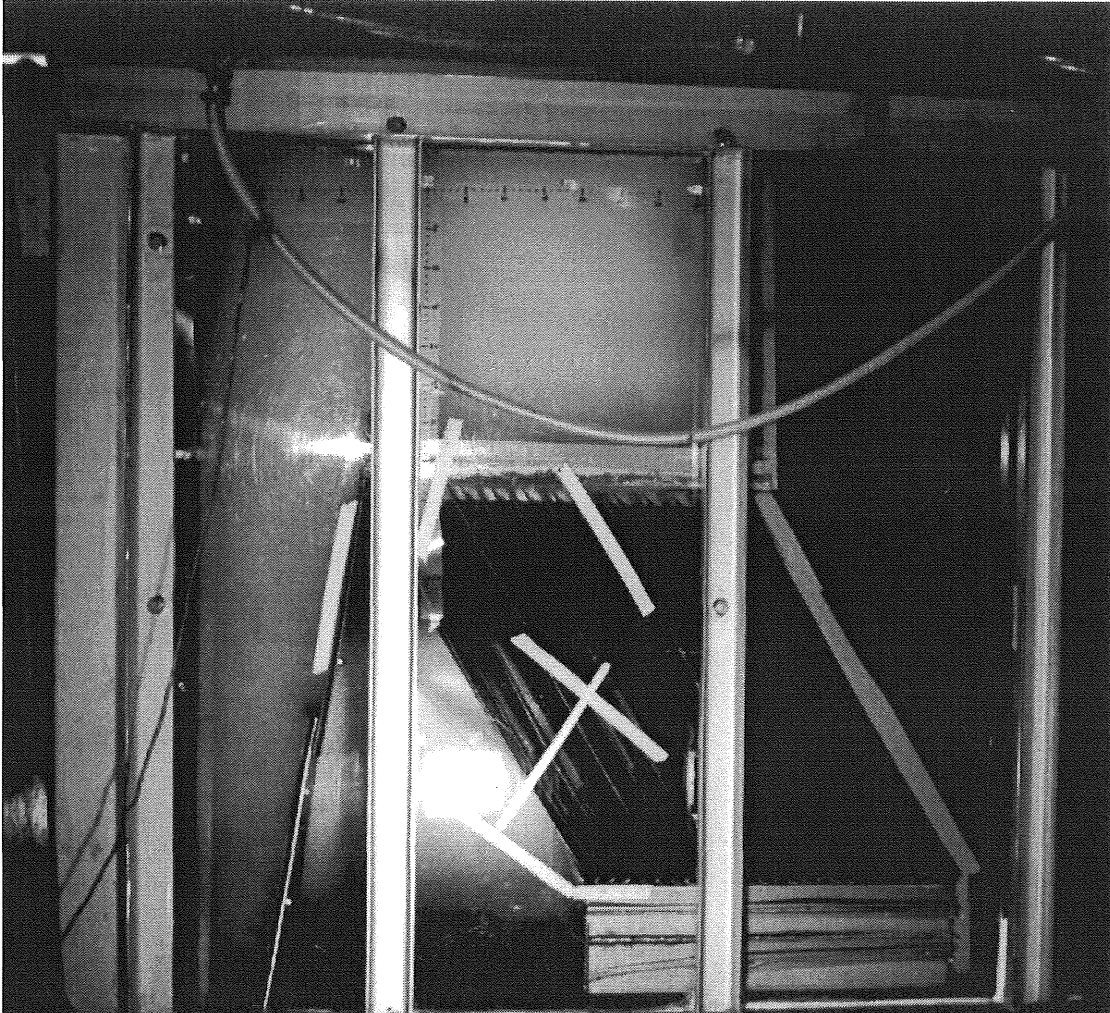
Smethurst G; 1988; *Basic water treatment*; second edition; Thomas Telford, London

Rykaart M.E, Haarhof J; 1995; *Behavior of air injection nozzles in dissolved air flotation*; Water science and technology, vol. 31 ,nr 3-4, sid. 25-35

Zabel T; 1985; *The advantages of Dissolved Air Flotation for Water Treatment*; Journal of American Water Works Association Vol. 77 nr. 5 sid. 42-46

Bilaga A

Foto på flotationstanken.



På bilden syns tydligt hur bubblorna färgar vattnet "mjölkigt". Lamellsystemet på bilden består av 60 cm långa lameller i 60° lutning med 4 cm avstånd.

BILAGA B

Resultat flotation

Försök 1

Tom flotationstank

Flotationsarea 1m²

Temperatur 4,0°

Ingående turbiditet 1,7 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
5.0	0.7	0.70
7.5	0.7	0.70
10.0	1.1	0.70
12.5	3.0	0.75
15.0	5.0	1.00

Försök 2

Längd cm

Avstånd cm

Lutning°

Flotationsarea m²

80

50

140

1.00

Temperatur 4,0°

Ingående turbiditet 1,65 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
2.5	0.7	0.85
5	1.1	0.85
7.5	2.1	0.95
10	3.1	0.95
12.5	6.8	1.05

Försök 3

Längd cm

Avstånd cm

Lutning°

Flotationsarea m²

40

2

120

1.00

Temperatur 4,5°

Ingående turbiditet 2,4 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
5	0.60	0.60
7.5	0.71	0.85
10	1.20	0.85
12.5	5	1.2

Försök 4

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
40	4	120	1.00

Temperatur 4,5°

Ingående turbiditet 2,6 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
5	0.95	0.80
7.5	0.95	0.80
10	2.5	0.95
12.5	9	1.35

Försök 5

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
40	2	60	1.00

Temperatur 4,5°

Turbiditet 2,4 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Ingående turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
2.5	0.60	0.85
5	0.65	0.80
7.5	0.67	0.80
10	2	0.85
12.5	60	1.00

Försök 6

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
40	2	60	0.42

Temperatur 4,5°

Ingående turbiditet 2,4 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
2.5	0.60	0.85
5	0.65	0.80
7.5	0.67	0.80
10	2	0.85
12.5	60	1.00

Försök 7

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
40	2	40	0.42

Temperatur 4,2°

Ingående turbiditet 1,9 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
4	0.60	0.80
6	0.63	0.70
7	1.5	0.85
8	4	0.80
9	13	0.95

Försök 8

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
40	4	60	0.42

Temperatur 6,0°

Ingående turbiditet 1,95 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
3	0.55	0.50
4	0.65	0.62
5	5	0.60

Försök 9

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
40	4	40	0.42

Temperatur 5,0°

Ingående turbiditet 1,9 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
4	0.53	0.55
5	0.65	0.60
6	1.3	0.60
7	7.5	0.60

Försök 10

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
80	4	40	0.44

Temperatur 6,2°

Ingående turbiditet 1,8 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
3	0.65	0.57
4	0.63	0.51
5	0.70	0.57
6	0.84	0.60
7	2	0.68
8	5	0.68
9	25	0.85

Försök 11

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	4	60	0.44

Temperatur 6,7°

Ingående turbiditet 1,7 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
4	0.67	0.70
5	1.1	0.67
6	3.5	0.57
7	30	0.65

Försök 12

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	4	40	0.44

Temperatur 6,5°

Ingående turbiditet 1,5 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
4	0.66	0.57
5	0.63	0.55
6	0.71	0.61
7	1.8	0.70
8	5	0.65

Försök 13

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	2	40	0.44

Temperatur 7,3°

Ingående turbiditet 1,4 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
5	0.42	0.48
7	0.50	0.50
8	0.78	0.55
9	2.0	0.53
10	4.5	0.60

Försök 14

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	6	40	0.43

Temperatur 10°

Ingående turbiditet 1,2 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
4	0.40	0.50
5	0.40	0.50
6	1.4	0.60
7	2.5	0.60

Försök 15

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	50	40	0.45

Temperatur 10,2°

Ingående turbiditet 1,0 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
3	0.48	0.45
3.5	0.95	0.50
4	4	0.50

Försök 16*

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	2	40	0.31

Temperatur 10° Ingående turbiditet 1,0 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
6	0.42	0.55
7	0.48	0.55
8	0.50	0.55
9	0.95	0.60
10	2	0.65

Försök 17*

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	2	40	0.43

Temperatur 9,5° Turbiditet 1,0 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Ingående turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
7	0.75	0.68
8	0.80	0.60
9	1.2	0.65
10	2.5	0.62

Försök 18*

<u>Längd cm</u>	<u>Avstånd cm</u>	<u>Lutning°</u>	<u>Flotationsarea m²</u>
60	2	40	1

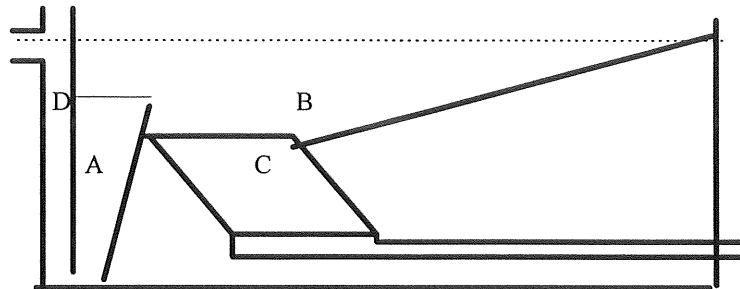
Temperatur 9,5° Ingående turbiditet 1,3 NTU

<u>Belastning m³/h</u>	<u>Turbiditet, kontinuerlig</u>	<u>Turbiditet efter 10 min</u>
8	0.42	0.55
9	0.95	0.60
10	0.90	0.65
11	0.95	0.55
12	2	0.65
13	2.1	0.65

* Vågformade plastbitar placerades mellan lamellerna. Bitarna hade samma mått som lamellerna.

Bilaga C

Beräkning av volym



I beräkningarna av volymen har volymerna för område A,B och C medtagits. Volymen av inloppsschaktet som uppgår till $0,126 \text{ m}^3$ har inte tagits med då returvattnet tillsätts i botten av tanken mellan A och D. Volymen av A är $0,09 \text{ m}^3$ i samtliga försök och volymen av B och C varierar med längden och lutningen av lamellerna samt träskivans läge.

Bilaga D

Resultat filter

Filterförsök 1

Arealbelastning på flotationstanken = 24 m³/m²h

Råvattentemperatur : 8,5°

Råvattenturbiditet 1,0 NTU

Tid (min)	Turbiditet (NTU)		Turbiditet före filter
	10 m/h	15 m/h	
0	0.04	0.04	0.6
90	0.04	0.045	0.6
180	0.035	0.033	0.55
270	0.06	0.3	0.55
480	0.04	0.04	0.65
1450	0.13	0.23	0.7

Manometer nivå (mm)	100		200		300		400	
	10	15	10	15	10	15	10	15
Belastning m/h	10		15		10		15	
Tid (min)	Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)	
0	50	80	80	110	100	140	130	170
90	100	140	130	190	160	220	190	250
180	150	210	190	270	220	310	250	350
270	190	230	230	300	270	360	300	400
480	310	340	380	460	420	530	460	600
1450	590	560	810	780	910	980	980	1110

Manometer nivå (mm)	500		700		1100	
	10	15	10	15	10	15
Belastning m/h	10		15		10	
Tid (min)	Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)	
0	150	200	250	350	350	530
90	210	290	320	440	420	620
180	270	380	380	560	480	740
270	320	440	440	650	520	850
480	490	640	620	900	700	1110
1450	1030	1190	1270	1770	1410	2320

Filterförsök 2

Arealbelastning på flotationstanken = 31 m³/m²h

Råvattentemperatur : 8,5°

Råvattenturbiditet 1,0 NTU

Tid (min)	Turbiditet (NTU)		Turbiditet före filter
	10 m/h	15 m/h	
0	0.04	0.04	2
60	0.04	0.05	1.2
120	0.04	0.035	1.8
210	0.04	0.04	1.3
360	0.035	0.02	1.4
420	0.025	0.04	1.4
500	0.025	0.03	1.5

Manometer nivå (mm)	100	100	200	200	300	300	400	400
Belastning m/h	10	15	10	15	10	15	10	15
Tid (min)	Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)	
0	10	20	90	50	120	90	150	120
60	30	70	150	140	190	190	230	250
120	80	90	220	190	260	260	300	320
210	130	130	280	230	330	300	370	360
360	230	180	390	330	450	420	500	500
420	240	190	450	360	510	470	560	550
500	280	210	480	380	560	500	610	590

Manometer nivå (mm)	500	500	700	700	1100	1100
Belastning m/h	10	15	10	15	10	15
Tid (min)	Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)		Filtermotstånd (mm)	
0	170	170	310	320	420	580
60	260	290	390	520	540	850
120	330	370	490	620	590	970
210	400	440	570	680	680	1020
360	540	560	730	860	850	1210
420	600	630	800	970	920	1330
500	650	660	870	1020	990	1390