

Adress: Institutionen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik Chalmers Tekniska Högskola

412 96 GOTEBORG

Se villes

Institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik

ISSN 0280-4026

Nyckelord: Materieöverföring, oxygenöverföring, avloppsledningar

MATERIEÖVERFÖRING GAS-VÄTSKA I AVLOPPSLEDNINGAR



Madjid Taghizadeh-Nasser

PUBLIKATION 3:86

LICENTIATUPPSATS

FORORD

Föreliggande rapport har utarbetats vid Institutionen för VA-teknik på Chalmers tekniska högskola. Byggforskningsrådet, BFR, har delvis finansierat arbetet.

Många tack riktas till professor Peter Balmér för handledning och i övrigt värdefulla bidrag, till Börje Sjölander för hjälp vid anläggningens uppbyggnad samt till Doug Lumley för hjälp vid databearbetningen. Dessutom tackas Ann-Marie Hellgren och Inger Hessel som skrivit ut rapporten och Alicja Janiszewska som ritat figurerna.

Göteborg i mars 1986

Madjid Taghizadeh-Nasser



SAMMANFATTNING

Det är flera förlopp i avloppsledningar där materieöverföring mellan gas och vätska är av betydelse, exempelvis

- överföring av oxygen från luft till vatten
- överföring av H₂S från vatten till luft
- överföring av flyktiga ämnen (t ex lösningsmedel) från vatten till luft.

De ovannämnda exemplen på materieöverföring mellan gas och vätska är också av stor praktisk betydelse.

- Oxygenöverföringens storlek kan bestämma i vilken grad organiskt material bryts ned i avloppsvatten.
- Oxygenöverföringen till vatten och svavelväteöverföringen till luft bestämmer om svavelväte bildas och hur mycket svavelväte som överförs till luft och därmed risken för förgiftning, korrosion och dålig lukt.
- Överföringen av flyktiga ämnen bestämmer hur mycket flyktiga ämnen som överförs till luft och därmed risken för förgiftningar och explosion.

Om man skall kunna göra kvantitativa beräkningar för t ex riskbedömningar så måste materieöverföringstalen mellan gas och vätska vara kända. Erhålls ett generellt giltigt samband för ett ämne t ex oxygen bör sambandet kunna utsträckas till att gälla även andra ämnen.

Materieöverföring mellan gas och vätska är en diffusionsprocess. Centrala begrepp i diffusionsteorin är Ficks första och andra lag. Utifrån Ficks båda lagar och den s k tvåfilmsteorin kan en generell ekvation för materieöverföringen härledas till:

$$\frac{dc}{dt} = K_{La} (c_m - c_L)$$

där dc/dt = koncentrationsändringen per tidsenhet

K₁ a = volymetrisk materieöverföringskoefficient

c_m = gasens mättnadskoncentration

c₁ = gasens koncentration i vätskefasen

Olika begreppsmodeller som tvåfilms-, penetrations-, ytförnyelseoch filmpenetrationsmodellerna beskriver materieöverföringskoefficienten som funktion av parametrar som filmtjocklek och ytförnyelsehastighet. Dessa storheter är dock svåra att uppskatta. Därför har många författare försökt utveckla ett antal mer eller mindre empiriska samband där materieöverföringen relateras till förhållanden i strömmande vatten som relativt lätt kan mätas såsom djup, vattenhastighet och lutning. Praktiskt taget allt erfarenhetsmaterial av materieöverföringskofficienter i strömmande vatten härrör från naturliga floder eller laboratorierännor.

Utvärderingar av empiriska samband visar att inget publicerat samband för prediktering av materieöverföring är allmänt tillämpbart. Även med de "bästa" sambanden kan predikterat och observerat värde lätt skilja på en halv tiopotens. Utvärderingen visar också att det är olämpligt att tillämpa ekvationer erhållna från mätningar i floder på rännor. Det torde vara lika olämpligt att tillämpa sambanden på materieöverföring i självfallsledningar.

Laboratorieförsök har utförts i en 24 m lång betongledning med inre diametern 225 mm med recirkulation.

Totalt utfördes 50 försök vid fyra olika lutningar på betongledningen och vid relativa fyllnadshöjder mellan 10% och 60%.

De enskilda försöken utfördes som satsvis återluftning av deoxygenerat vatten. Som deoxygeneringsmedel användes natriumsulfit med koboltklorid som katalysator.

Undersökningens resultat visar att materieöverföringskoefficienten kan uttryckas som funktion av vattenhastighet eller friktionshastighet. Den kan också uttryckas som funktion av Reynolds tal eller energiförlust.

Även andra faktorer påverkar materieöverföringen som t ex djup eller hydraulisk radie. Ett exempel på ett samband mellan materieöverföringskoefficient och lätt mätbara parametrar är:

$$K_{\rm L} = 0.4 \ U \ (\frac{d_{\rm m}}{r_{\rm h}})^{0.613}$$

där K_{L} = den samlade materieöverföringskoefficienten, m/h

- U = vattenhastighet, m/s
- d_m = hydrauliskt medeldjup, m
- r_h = hydraulisk radie, m

med en korrelationskoefficient på 0.97 mellan observerade och predikterade K_L-värden.

De funna sambanden beskriver försöksresultaten väl. Vid tillämpningen på avloppsvatten bör man hålla i minnet att undersökningarna utförts med rent vatten.

Försöken har utförts vid en ledningsdiameter. Intill dess försöksresultatens allmängiltighet konfirmerats, tillråds försiktighet vid applicering på andra rördiametrar.



SUMMARY

Gas-liquid mass transfer is an important unit process in sewers.

- The degree of oxygen transfer from air to wastewater determines the extent to which organic matter can be degraded during sewage transport.
- The degree of oxygen transfer from air to wastewater in relation to the oxygen consumption determines whether hydrogen sulphide is formed.
- The transfer of hydrogen sulphide from wastewater to air is of importance for the formation of odours, corrosion and for the risk of poisoning.
- The transfer of illegally discharged volatile substances from wastewater to air is of importance in the evaluation of explosion and poisoning risks.

In a quantitative assessment of any of the processes outlined above, the mass transfer coefficient between the gas and liquid needs to be known. The ratio of mass transfer coefficients between different gases appears to be constant. Thus if the factors determining the mass transfer coefficient of one gas e.g. oxygen can be determined it should be possible to extend such a relationship to other gasous components.

Conceptual models for gas transfer are reviewed. These models express the mass transfer coefficient as a function of parameters such as film thickness and surface renewal rate. Such parameters are very difficult to measure. Many empirical relationships relate the mass transfer coefficient to easily determined flowing water parameters such as depth, velocity and slope. Most empirical relationships are derived from rivers and laboratory flumes. Different evaluations of the predictive capability of empirical relationships are reviewed. There are strong indications that equations derived from river data cannot be applied to flumes and vice versa. Even the "best" relationships can give estimates with errors of half an order of magnitude. Therefore it is questionable whether existing empirical relationships can be used for predicting oxygen transfer in sewers.

In order to establish a relationship between the oxygen mass transfer coefficient and different flow conditions in sewers, a laboratory investigation was carried out.

The experimental unit consisted of a 24 m long, 225 mm internal diameter, concrete sewer. The flow was recirculated in a closed system. In the experiments, tap water was first deoxygenated with sodium sulphite using cobalt chloride as a catalyst. The oxygen concentration increase was measured as a function of time while the water in the rig was circulated.

Fifty experiments were performed with slopes between 0.005 and 0.03 and relative depths between 10% and 60%. The experiments show that the mass transfer coefficient for the test sewer can be expressed as a function of hydraulic parameters which are easy to determine, such as water velocity, friction velocity, turbulent condition and power per unit mass. An example of such a relationship is

$$K_{L} = 0.4 \text{ U} \left(\frac{d_{m}}{r_{h}}\right)^{-0.613}$$

where

K_L = the mass transfer coefficient for oxygen, m/h U = average velocity of water, m/s d_m = mean hydraulic depth, m r_h = hydraulic radius, m

and a correlation coefficient of 0.97 between the observed and predicted mass transfer coefficients.

INNEHALLSFÖRTECKNING

	Sid			
FÖRORD				
SAMMANFATTNING				
SUMMARY				
INNEHÅLLSFÖRTECKNING				
1 INLEDNING	1			
2 GRUNDBEGREPP OCH BEGREPPSMODELLER	7			
2.1 Materieöverföring	7			
2.2 Diffusionsteori	7			
2.3 Diffusionsprocesser vid luft-vattensystem	11			
2.3.1 Härledning av den generella grundekvationen				
för materieöverföring	12			
2.3.2 Begreppsmodeller för materieöverföring luft-vatten				
2.3.2.1 Stillastående luft-vattensystem				
2.3.2.2 Luft-vattensystem med omblandning i vattenfasen				
2.3.2.2.1 Tvåfilmsmodellen				
2.3.2.2.2 Penetrationsmodellen				
2.3.2.2.3 Ytförnyelsemodellen				
2.3.2.2.4 Filmpenetrationsmodellen				
2.4 Sammanfattning av teorier för materieöverföring	22			
3 MODELLER FÖR PREDIKTERING AV MATERIEÖVERFÖRING				
GAS – VATSKA	25			
3.1 O'Connor-Dobbins ekvation (1956)	25			
3.2 Churchill-Elmore-Buckinghams ekvation (1962)	27			
3.3 Krenkel-Orlobs ekvation (1963)	28			
3.4 Dobbins ekvation (1964)	29			
3.5 Uwens, Edward och Gibbs ekvation (1964)	32			
3.0 Isaacs-Gaudys exvation (1968)	33			
3./ Inackston-Krenkels ekvation (1969)	33			
3.8 Negulescu-kojanskis ekvation (1969)	34			
3.9 Parknurst-Pomeroys ekvation (1972)	პხ			

IΧ

3.10	Tsivoglou-Wallace ekvation (1972)	37
3.11	Bennet-Rathbuns ekvation (1972)	37
3.12	Sammanfattning av ekvationer för prediktering av	
	materieöverföring	38
4	UTVÄRDERING AV PREDIKTIVA EKVATIONER	41
4.1	Bennet och Rathbuns utvärdering (1972)	41
4.2	Wilson-Macleods utvärdering (1974)	45
4.3	Rathbuns utvärdering (1977)	56
4.4	Sammanfattning	58
5	METODER FÖR BERÄKNING OCH MÄTNING AV K ₁ a-VÄRDE	59
5.1	Principiella metoder för bestämning av K _l a-värde i	
	avloppsledningar	59
5.1.1	Icke-stationär luftning av rent vatten	59
5.1.2	Icke-stationär luftning av oxygenförbrukande	
	vatten	62
5.1.3	Relationen mellan oxygenöverföringen i rent	
	respektive förorenat vatten	62
5.2	Mätteknik	63
5.2.1	Metoder baserade på oxygenkoncentrations-	
	mätning i vattenfasen	64
5.2.2	Gasometriska metoder	65
5.2.3	Indirekta metoder	65
5.2.4	Sulfitoxidationsmetoden	66
6	UNDERSÖKNINGAR	69
6.1	Syfte	69
6.2	Försöksutrustning	69
6.3	Försöksutförande	73
6.4	Utförda försök	77
6.5	Mätvärdesbearbetning	78
6.5.1	Beräkning av preliminärt K.a-värde	78
6.5.2	Korrektion för koncentrationsskillnad	78
6.5.3	Korrektion för oxvaenöverförina i	
	cirkulationssystemet	79
6.5.4	Temperaturkorrektion	79
6.5.5	Volvmkorrektion	79
6.6	Resultat	80

Х

7	DISKUSSION		
8	SLUTSATSER		
REFE	RENS	ER	105
BILA	GOR		
	А	Utbyggnad av försöksanläggning	111
	В	Datorprogram för beräkning av koncentrations-	
		skillnad	117
	С	Redovisning av hydrualiska data vid försöken	119
TECKENFÜRKLARING			121

1 INLEDNING

En avloppslednings huvudfunktion är att avleda avloppsvattnet utan att hygieniska olägenheter uppstår eller att ledningsnätet skadas.

Allmänheten upplever ofta avloppsledningar och nedstigningsbrunnar som en hälsofarlig miljö där det luktar dåligt. En nyligen publicerad studie tar upp dessa förhållanden (VAV 1984).

I publikationen beskrivs några olyckshändelser orsakade av hälsofarliga gaser i ledningsnät. Även själva ledningsmaterialet "mår" dåligt. Dess tekniska livslängd förkortas på grund av korrosionsskador. Inre korrosion som utgör en stor del av de totala korrosionsskadorna på avloppsledningar orsakas av korrosiva gaser i ledningar.

Närvaro av farliga gaser i avloppsledningar beror antingen på yttre tillförsel eller på kemiska och biologiska förlopp i ledningen. Industriutsläpp är ett exempel på yttre tillförsel. De flyktiga ämnena i avloppsvattnet överförs då till luften under vattnets väg till reningsverket. Förekomsten av flyktiga ämnen (t.ex. petroleumprodukter) i luften innebär risker för förgiftningar och explosion (VAV 1984).

Farliga gaser kan bildas i ledningar genom kemiska reaktioner. Exempel på kemiska reaktioner är:

- Nedbrytning av organiska svavelföreningar så att svavelväte och merkaptaner bildas.
- Surgörning av avloppsvattnet så att sulfider och vätesulfider överförs till svavelväte. I den ovan nämnda VAV-publikationen finns flera andra exempel på kemiska reaktioner angivna.

Vid biologiska reaktioner bildas gaser i samband med nedbrytning av organisk substans i avloppsvattnet. Avloppsvatten innehåller nedbrytbara organiska ämnen och bakterier. Bakterierna finns dels suspenderade i vattnet men de växer också i den slamhud som bildas på väggarna i avloppsledningar. Bakterierna i vattnet och slamhuden utnyttjar organiska ämnen för sin tillväxt. Den biologiska oxidationen av organiska ämnen förutsätter närvaro av en elektronacceptor. Vid oxidation av organiska ämnen försöker bakterierna att utvinna så mycket energi som möjligt. Detta innebär att vid samtidig närvaro av flera elektronacceptorer föredrar bakterierna i ordning oxygen, nitrat, sulfat och koldioxid. Närvaro av oxygen och nitrat i avloppsvattnet hämmar således bildningen av svavelväte som bildas när sulfat utnyttjas som elektronacceptor vid den biologiska oxidationen av organiska ämnen. I fig. 1.1 framgår de approximativa områdena för olika bakteriella reaktioner.



Figur 1.1 Existensområde för olika bakteriella reaktioner med hänsyn till redoxpotential och pH-värde (VAV, 1984).

Om oxygen ej tillförs kommer redoxpotentialen att sjunka allteftersom avloppsvattnets uppehållstid ökar i ledningen, figur 1.2.





Reaktioner i avloppsvatten vid olika oxygenhalter och redoxpotentialer (VAV, 1984).

De olika reaktioner som kan ske i slamhuden i avloppsledningar illustreras i figur 1.3 resp. 1.4.

Vid god oxygenöverföring från luften till avloppsvattnet (figur 1.3) kommer det att finnas löst oxygen i avloppsvattnet. I slamhuden utbildas då en redoxpotentialprofil där redoxpotentialen sjunker in mot ledningens vägg. I slamhudsskiktet närmast avloppsvattnet förbrukas oxygenet (och eventuellt närvarande nitrat) vid oxidation av organiska ämnen så att syrehalten går mot noll. I det underliggande skiktet där oxygen och nitrat ej finns närvarande sker en reduktion av organiska svavelföreningar och sulfat till svavelväte. Intill rörväggen finns ett inert skikt med låg redoxpotential. Det svavelväte som bildas i det svavelväteproducerande skiktet måste diffundera ut genom det aeroba skiktet närmast avloppsvattnet. Vid transporten härigenom oxideras det helt eller delvis till tiosulfat och sulfat.



Figur 1.3 Reaktioner i ledningar vid höga oxygenhalter i avloppsvattnet (VAV, 1984).

Vid dålig oxygenöverföring från luft till avloppsvatten och hög avloppstemperatur och hög halt av organiska ämnen kan syrehalten i avloppsvattnet sjunka ned mot noll (figur 1.4). Därvid kommer (i frånvaro av nitrat) sulfat att reduceras till sulfid direkt i det slamhudskikt som befinner sig närmast avloppsvattnet. Bildade sulfider och svavelväte oxideras ej om syrehalten är låg i avloppsvattnet och svavelväte kan därför tillföras ovanförliggande luft.



Förutom svavelväte kan andra illaluktande och farliga svavelhaltiga gaser bildas vid mikrobiella reaktioner i anaerob miljö. Sådana är merkaptaner och andra organiska svavelföreningar.

Det svavelväte som avges till gasfasen absorberas i den vätskefilm som finns på rörväggen ovan vattnet. Under förutsättning att oxygen finns i gasfasen så är denna vätskefilm aerob och svavelvätet oxideras då till svavelsyra med korrosion som följd.

När sulfat ej längre finns närvarande kan organiska ämnen oxideras med koldioxid som elektronacceptor. Metangas som då bildas är mycket brännbar och explosiv.

Det finns några faktorer som tyder på att problemen med gaser i avloppsledningar kan komma att öka i framtiden. De är:

- Centralisering av reningsverk som medför allt längre ledningar med ökad uppehållstid för avloppsvattnet.
- Överdimensionerade ledningar vilket ger långa uppehållstider.
- Tätare ledningar som ökar avloppsvattnets halt av organiska ämnen och sulfat.

4

 - Övergång till separerade system som minskar spolintensiteten i ledningar

De ovan beskrivna förloppen innebär transport av ämnen lösta i vatten till gasfas eller transport av gaser till vatten där i bägge fallen materieöverföringsprocesser mellan gas och vätska har en nyckelroll. (Figur 1.5)



Figur 1.5 Nyckelprocesser i avloppsledningar.

Om man skall kunna göra kvantitativa beräkningar för t.ex. riskbedömningar så måste materieöverföringstalen mellan gas och vätska vara kända.

Om ett generellt giltigt samband för ett ämne t.ex. oxygen erhålls så bör sambandet kunna utsträckas till att gälla även andra ämnen t.ex. svavelväte och metan. Bättre kunskap om de faktorer som påverkar materieöverföringen i avloppsledningar är därigenom en nyckelfaktor för att förstå vilka processer som kan ske i avloppsledningar.



2 GRUNDBEGREPP OCH BEGREPPSMODELLER

2.1 Materieöverföring

Materialförflyttning är av vikt i så gott som alla tekniska system. Detta gäller inte minst inom va-tekniken. Beroende på överföringens nivå talar Crank m.fl. i "Diffusion processes in environmental systems" (1981) om överföring vid "bulk"material nivå och överföring vid molekylär nivå där överföringen sker genom diffusionsprocess. Materieöverföring mellan gas och vätska är en diffusionsprocess.

2.2 <u>Diffusionsteori</u>

Utgående från resonemanget i 2.1 definierar Crank, m fl, (1981) diffusionsbegreppet:

"Med diffusion menas molekylernas nettorörelse från en plats med hög koncentration till en annan med lägre koncentration under givna betingelser och utan användning av en externkraft."

Centrala begrepp i diffusionsteorin är Ficks första och andra lag.

Ficks första lag

Om en koncentrationsgradient (dc/dx) föreligger, sker en diffusion i gradientens riktning som kan uttryckas genom ekvationen:

 $F(x) = -D \frac{dc}{dx}$ (2.1) F(x) är materieöverföring per ytenhetD är diffusionskoefficienten dc/dx är koncentrationsgradienten

Det framgår av ekvationen att man förutsätter stationärt tillstånd eftersom koncentrationsgradienten ej ändras med tiden. Situationen är illustrerad i figur 2.1. Det lösta ämnet överförs från medium E till medium G tills koncentrationen blir lika.



Figur 2.1 Diffusion vid stationärt tillstånd.

Överföringshastigheten bestäms av diffusionskoefficienten i medium F. Materieöverföringen blir då

$$F = \frac{M}{A^*t} = \frac{D(c_1 - c_2)}{\ell}$$

Där (M) är överförd massa, (A), fasgränsarea och (t) överföringstiden. Det faktum att koncentrationen är beroende av både avstånd (x) och tid (t) gör att Fick's lag bör skrivas som en partiell differentialekvation.

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$
(2.2)

Diffusionskoefficienten (D) beror på diffusionsmediets temperatur och viskositet och de diffunderande molekylernas storlek. Dess värde minskar kraftigt vid övergång från gasfas till vätskefas och vidare till fast fas. Diffusionskoefficienten (D) bestäms experimentellt för varje enskilt diffunderande material och medium genom vilket diffusionen sker.

8

Ficks andra lag

Massflödet (F) normalt till en yta beror på ytan och på koncentrationsgradienten. Om vi begränsar oss till ett flöde i en riktning, säg x-riktningen, blir massflödet genom en yta med sidorna y_0 och z_0 vinkelrät mot x-riktningen proportionell mot produkten $y_0 z_0$ och koncentrationsgradienten i x-riktningen.

Massflödet \mathring{F} in genom sektion $y_0 z_0$ vid punkten x blir enligt figur 2.2:

$$\ddot{F}_{x} = -Dy_{0}z_{0}\frac{\partial C}{\partial x}$$
(2.3)

där D som tidigare är diffusionskoefficienten och $\partial c/\partial x$ koncentrationsgradienten.

Flödet ut från en annan sektion belägen parallell med avståndet δx från den första betecknas med $\dot{F}_{x+\delta x}$.





Varje skillnad mellan inflödet \mathring{F}_{χ} och utflödet $\mathring{F}_{\chi+\delta\chi}$ kommer då att resultera i en massförändring inom den volym som begränsas av de två sektionerna.

Ett medelvärde för massflödesförändringen kan betecknas som

$$\frac{\ddot{F}_{X+\delta X} - \ddot{F}_{X}}{\delta X} = \frac{\partial \ddot{F}}{\partial X}$$
$$\ddot{F}_{X} - \ddot{F}_{X+\delta X} = -\frac{\partial \ddot{F}}{\partial X} \delta X$$

Massförändringen kan också beskrivas som:

volym x koncentrationsförändring dvs

$$y_{0}z_{0}\delta x \frac{\partial c}{\partial t}$$

då gäller att
$$y_{0}z_{0}\delta x \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial \ddot{F}}{\partial x} \delta x \qquad (2.4)$$

Insättning av F-värdet från (2.3) ger:

$$y_{0}z_{0}\delta x \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (-Dy_{0}z_{0}\frac{\partial c}{\partial x})\delta x$$
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial c}{\partial x})$$
(2.5)

Om D är oberoende av x och c:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$
(2.6)

Ekvationen ovan är Ficks andra lag som allmänt kallas för diffusionsekvationen.

2.3 Diffusionsprocesser vid luft-vattensystem

De för oss intressanta medierna för gasdiffusion är luft respektive vatten. Vid ett luft-vattensystem där luften inte innehåller några gaser som reagerar kemiskt med vatten gäller Henrys lag. Av gaserna i atmosfären kan oxygen, nitrogen och ädelgaserna anses vara av detta slag. Enligt Henrys lag är koncentrationen av en löst gas i vatten direkt proportionell mot partialtrycket av gasen i ångmättad gasfas, dvs

$$p = h c_{L}$$
 (2.7)
där

cL = koncentrationen av gasen i vatten
p = partialtrycket av gasen i gasfasen
h = Henrys konstant

Ekvationen 2.7 gäller vid jämvikt. Intill dess jämvikt har uppnåtts sker ett materieflöde i någon riktning. Materieflödet från gasfas till vätskefas kallas absorption och från vätskefas till gasfas kallas för desorption.

Hur sker transporten?

När en gas löses i vatten kan detta ses som att materieöverföringen sker i fyra skilda steg. Figur 2.3 visar detta.



Figur 2.3 Principiell skiss över oxygenöverföring från gasfas till vätskefas. (Weber, 1972).

Första steget involverar passagen genom gasfasen till kontaktytan gas-vätska. I andra steget passerar gasen genom en "gasfilm" på

11

gassidan av kontaktytan och i tredje steget genom en vätskefilm på vätskesidan av kontaktytan gas-vätska. Slutligen måste den lösta gasen spridas i vätskemassan. Varje transportsteg tar en viss tid. Om transporthastigheten för ett enskilt steg är låg relativt de andra, kommer de resterande stegen att påverka hela processen obetydligt. Det steg som under givna förhållanden har den lägsta hastigheten kallas för "det begränsande steget" och den totala gasöverföringsberäkningen kan då baseras bara på detta steg. Det är sällan som passagen genom gasfas till gas-vätskekontaktytan påverkar gasöverföringen. Under fullständigt stillastående tillstånd är gasdiffusion genom vätskevolymen det långsammaste steget.

Om vätskevolymen är omblandad genom naturlig turbulens eller mekanisk omrörning upphör diffusionsprocessen i vätskevolymen att vara begränsande moment och i stället blir överföringen genom gas-vätskekontaktytan kontrollerande faktor. Överföringen av en gas till och från en vätskefas sammanfaller då med överföringsförmågan hos de två "filmerna" på gas-vätskekontaktytan och därav den s k "tvåfilmsteorin". Det är dessa förhållanden som illustreras i figur 2.3.

2.3.1 Härledning av den generella grundekvationen för materieöverföring

Enligt tvåfilmsteorin existerar i fasgränsytan mellan gas och vätska (vatten) en tunn gasfilm närmast vatten och en tunn vattenfilm närmast gasen. Se figur 2.3. Vid fasgränsytan är gasens partialtryck (p_{g}) i jämvikt med koncentrationen (c_{g}).

 $c_{g} = k_{H} p_{g}$ (2.8)

Ekv (2.8) är en omformning av Henrys lag, ekv (2.7).

Gasens partialtryck i gasfasen är (p) och och dess koncentration i vatten är (c_L .) Gasens transport genom gasfilmen sker genom diffusion och enligt diffusionsteorin är massflödet proportionellt mot differensen i partialtryck. Genom vätskefilmen diffunderar på motsvarande sätt ett flöde proportionellt mot koncentrationsdifferensen. F

$$= k_{G}(p - p_{g}) = k_{L} (c_{g} - c_{L})$$
(2.9)

13

- F = massflöde per ytenhet
- k_G = materieöverföringskoefficienten för transport genom
 gasfilmen

Filmkoefficienterna k_{G} och k_{L} är beroende på gasens och vätskans egenskaper men oberoende av gaskoncentrationen i vätskan. Om mättnadsvärdet för gasen i vatten vid partialtrycket p är c_{m} :

$$c_m = k_H p$$

Ekv (2.9) kan då skrivas

$$F = k_{G} \left(\frac{c_{m}}{k_{H}} - \frac{c_{g}}{k_{H}} \right) = k_{L} \left(c_{g} - c_{L} \right)$$

$$\frac{k_{G}}{k_{H}} \left(c_{m} - c_{L} + c_{L} - c_{g} \right) = k_{L} \left(c_{g} - c_{L} \right)$$

$$\frac{k_{G}}{k_{H}} \left(c_{m} - c_{L} \right) = \left(k_{L} + \frac{k_{G}}{k_{H}} \right) \left(c_{g} - c_{L} \right)$$

$$c_{g} - c_{L} = \frac{k_{G}}{k_{L} k_{H} + k_{G}} \left(c_{m} - c_{L} \right)$$

$$F = k_{L} \left(\frac{k_{G}}{k_{L} k_{H} + k_{G}} \left(c_{m} - c_{L} \right) \right) = \frac{1}{\frac{k_{H}}{k_{G}} + \frac{1}{k_{L}}} \left(c_{m} - c_{L} \right)$$

Information om båda filmkoefficienterna k_{G} och k_{L} är mycket svårt att erhålla så att koefficienttermen får skrivas i form av den samlade materieöverföringskoefficienten K_{L} , dvs:

$$\frac{1}{K_{L}} = \frac{1}{K_{L}} + \frac{K_{H}}{K_{G}}$$

och

$$F = K_{L} (c_{m} - c_{L})$$
 (2.10)

där

 K_{I} = den samlade materieöverföringskoefficienten.

För varje gas-vätske-system där Henrys lag gäller är den samlade materieöverföringskoefficienten (K_L) oberoende av gaskoncentrationen i vätskan.

För en tröglöslig gas som ej reagerar kemiskt med vatten (t ex oxygen) är (k_H) låg och då k_L << k_G så kan man skriva:

$$K_{L} = \frac{1}{\frac{k_{H}}{k_{G}} + \frac{1}{k_{L}}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{L}}}$$

$$K_{L} \cong k_{L}$$
(2.11)

Perrys (1963) experimentella försök indikerar att det dominerande motståndet mot materieöverföring i ett luft-vatten-system ligger i vätskefasens materieöverföringsmotstånd. Dvs vätskefilmkoefficienten (k_L) är densamma som den samlade materiöverföringskoefficienten (K_L).

Betraktar vi en vattenvolym (V) med fasgränsytan (A) där en gas överförs till vattnet och där det ej sker någon in- eller utströmning av vatten, måste den överförda gasmassan medföra en ökning av koncentrationen av gasen i vattnet, dvs

$$F \cdot A = V \frac{dc}{dt}$$

Insättning i ekv (2.10) ger

$$\frac{dc}{dt} = K_{L} \frac{A}{V} (c_{m} - c_{L})$$

$$\frac{dc}{dt} = K_{L} a (c_{m} - c_{L}) \qquad (2.12)$$

där

a = kontaktytan per volymsenhet.

Ekv (2.12) är den generella grundekvationen för materieöverföring.

2.3.2.1 Stillastående luft-vatten-system

Om vi behandlar diffusionsprocessen för ett stillastående luftvatten-system med ursprungliga oxygenkoncentrationen c_L i vatten (figur 2.4) kan randvillkoren skrivas som:

ĺ

$$c = c_{L} \qquad t \le 0$$

$$c = c_{m} \qquad y = 0, t > 0$$

$$c \Rightarrow c_{1} \qquad y \Rightarrow \infty$$



Figur 2.4 Stillastående luft-vatten system.

Enligt Ficks andra lag, ekv. 2.6:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial v^2}$$

Observera att x bytes mot y för att visa lodrätt-koordinaten. En lösning som satisfierar ekvationen ovan är enligt Hildebrand (1976):

där u är en godtycklig beroende funktion.

Om I antas vara en funktion av u, då kan lösningen för alla positiva värden på u skrivas:

$$c(y,t) = \int_{0}^{\infty} I(u)e^{-u^2D t} \sin uy \, du \quad (y>0)$$

Efter vidare lösning med hjälp av Fourier-transformation får vi ut:

$$c_{m} - c = (c_{m} - c_{L}) \frac{2}{(\pi)^{0.5}} \int_{0}^{\frac{y}{2(Dt)^{0.5}}} e^{-u^{2}} du$$

Med hjälp av s k felfunktion fås

$$c_{m} - c = (c_{m} - c_{L}) \operatorname{erf} \frac{y}{2(Dt)^{0.5}}$$
 (2.13)

och

$$c = c_m - (c_m - c_L) \text{ erf } \frac{y}{2(Dt)^{0.5}}$$
 (2.14)

dvs

erf y =
$$\frac{2}{(\pi)^{0.5}} \int_{0}^{y} e^{-u^2} du$$
 (2.15)

Det finns tabellvärden över felfunktionen (Crank m fl, 1981). Absorptionen till ytan blir enligt Ficks första lag, ekv. 2.2:

F = -D•($\frac{\partial c}{\partial y}$) Deriveras ekv (2.14) erhålls

$$\frac{\partial c}{\partial y} = (c_{\rm m} - c_{\rm L}) \frac{1}{(D\pi t)} 0.5 \qquad (2.16)$$

Insättning i Ficks första lag ger:

$$F = \left(\frac{D}{\pi t}\right)^{0.5} (c_{\rm m} - c_{\rm L})$$
 (2.17)

Jämförelse med ekv (2.10) ger

$$K_{L} = \left(\frac{D}{\pi t}\right)^{0.5}$$
 (2.18)

2.3.2.2 Luft-vatten-system med omblandning i vattenfasen

Gemensamt för praktiskt taget alla förekommande tillämpningar på luft-vatten-system är att vattenrörelser orsakar omblandning i vattenfasen. Omblandningen gör att materieöverföringen ej sker enbart genom molekylär diffusion, vilket var fallet vid stillastående luft-vatten-system, avsnitt 2.3.2.1. Man antar att det i ytan mellan gas och vätska existerar en gasfilm och en vätskefilm och att gasen passerar gas- och vätskefilmen genom molekylär diffusion och sprids i vätskekroppen genom omblandning. Då materietransporten genom omblandning normalt är mycket större än den molekylära diffusionen kan koncentrationsgradienten i vätskekroppen antas bli noll. Materieöverföringsmotståndet i gasfilmen är enligt 2.3.1 litet jämfört med motståndet i vätskefilmen och därför kan koncentrationen vid ytan av vätskefilmen antas vara lika med mättnadskoncentrationen (c_m).

Materieöverföringen genom vätskefilmen bestämmer således hela systemets materieöverföring. När man skall bygga upp en modell för materieöverföring genom vätskefilmen så blir modellen beroende av vilken föreställning man har om vätskefilmen. Beroende på vilken föreställning man haft om vätskefilmen har olika forskare lagt fram olika modeller för materieöverföring. De viktigaste är:

- 1. Tvåfilmsmodellen
- 2. Penetrationsmodellen
- 3. Ytförnyelsemodellen
- 4. Filmpenetrationsmodellen

2.3.2.2.1 Tvåfilmsmodellen, Lewis & Whitman (1924)

Tvåfilmsmodellen bygger på tvåfilmsteorin (2.3.1), där man antar att materieöverföringen sker genom en laminär gas- och vätskefilm. Vätskefilmen är stabil och så tunn att koncentrationen antas variera linjärt genom den (figur 2.5).



Figur 2.5 Schematisk framställning av tvåfilmsmodellen. Gradienten genom gasfilmen förutsätts vara försumbar.

Därför, enligt Ficks första lag:

$$F = -D \cdot (\frac{\partial c}{\partial y}) = D \cdot \frac{c_m - c_L}{\delta}$$

där δ är tjockleken på vätskefilmen. Jämföres ekvationen ovan med ekv (2.10)

$$F = K_{L} \cdot (c_{m} - c_{L})$$

så blir

$$K_{L} = \frac{D}{\delta}$$
(2.19)

Det bör påpekas att en stabil laminär vätskefilm enbart kan existera vid mycket låga Reynolds tal, vilket är sällsynt i va-tekniska sammanhang.

2.3.2.2.2 Penetrationsmodellen, Higbie (1935)

Higbie föreslog en modell enligt vilken vätskeelementen i fasgränsytan omplaceras från underliggande lager så att en icke-stationär molekulär diffusion hela tiden sker på ytan. Hans argument mot tvåfilmsteorin var att innan gasen skulle hinna penetrera vätskefilmen och bilda en linjär koncentrationsgradient så skulle ytvätskeelementen redan blivit omplacerade av underliggande vätskeelement.

Vi kan belysa detta med ett exempel. Antar man att vattenmassan har koncentrationen 0.1 c $_{\rm m}$ och att vätskefilmen är 0.5 mm tjock så kan den tid som krävs för molekylär diffusion så att koncentrationen ökas till 0.15 c $_{\rm m}$ beräknas ur ekv. (2.13)

$$c_{m} - c = (c_{m} - c_{L}) \operatorname{erf} \frac{y}{2(D \cdot t)^{0.5}}$$

 $\frac{c_{m} - c}{c_{m} - c_{L}} = \operatorname{erf} \frac{y}{2(D \cdot t)^{0.5}}$

där c = $0.15 c_m$

och $c_L = 0.1 c_m$

erf
$$\frac{y}{2(Dt)^{0.5}} = \frac{0.85 c_m}{0.9 c_m} = 0.944$$

Tabellen över felfunktionen ger:

$$\frac{y}{2(D \cdot t)^{0.5}} = 1.35$$

$$y = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{m och } D = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{s}^{-1} \text{ erhålls}$$

$$\frac{0.5 \cdot 10^{-3}}{2(2 \cdot 10^{-9} \cdot t)^{0.5}} = 1.35$$

$$t \approx 17 \text{ sekunder}$$

Det är rimligt att förvänta att ytelementen omplaceras innan tiden 17 s förlupit.

Higbies modell förutsätter att molekylär diffusion sker under en tidsperiod t, efter vilken ytelementen blandas fullständigt med huvudmassan av vätskan och en fräsch ny yta exponeras varefter diffusionsprocessen repeteras. Därför kan en medelabsorptionsgrad beräknas från ekvationen för stillastående luft-vatten-system:

$$F_{medel} = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} \left(\frac{D}{\pi t}\right)^{0.5} (c_{m} - c_{L}) dt$$

$$F_{medel} = 2 \left(\frac{D}{\pi t}\right)^{0.5} (c_{m} - c_{L})$$

$$K_{L} = 2 \left(\frac{D}{\pi t}\right)^{0.5} (2.20)$$

2.3.2.2.3 Ytförnyelsemodellen

Ytförnyelsemodellen framlades av P v Danckwerts 1951. Han frångick tvåfilmsteorin och hävdade att någon stillastående vätskefilm på vattnets ytskikt ej kan existera, utan vätskefilmen förnyas fortlöpande. Han införde en ny variabel, vätskefilmens förnyelsehastighet (r) (T^{-1}) , som antogs vara konstant för varje bestämt system. Han antog vidare att ändringen av varje ytelement genom omplacering är oberoende av dess "ålder" (exponeringstiden). Den delarea (ϕ) som har åldern mellan t och t+dt är lika med den delarea som tidigare hade åldern mellan t och t-dt, minus den del som har omplacerats under intervallet dt, och betecknas med $\phi(t)$. Då blir

$$\frac{d\phi}{dt} = -r\phi(t)$$

Då den totala kontaktarean antas vara en enhet kan man skriva:

$$0^{\int_{\phi}^{\infty}}\phi(t) dt = 1$$

och vi får
 $\phi(t) = r \cdot e^{-rt}$ (2.21)

Utgår vi från ekvationen för stillastående luft-vatten-system, ekv 2.17:

$$F = (\frac{D}{\pi t})^{0.5} (c_m - c_L)$$

Insättning av ekv (2.21) ger

$$F = \int_{0}^{\infty} \left(\frac{D}{\pi t} \right)^{0.5} (c_{m} - c_{L}) \phi dt$$

$$F = (c_{m} - c_{L}) (D r)^{0.5}$$

vilket ger

$$K_{L} = (D \cdot r)^{0.5}$$
 (2.22)

2.3.2.2.4 Filmpenetrationsmodellen, Dobbins (1956)

Filmpenetrationsmodellen utvecklades av Dobbins (1956). Han betraktade existensen av en laminär tunn film med tjockleken δ , vilken kontinuerligt omplaceras och absorberar gas genom molekylär diffusion innan omplaceringen. Se figur 2.6.



Fig 2.6 Materieöverföring enligt filmpenetrationsmodellen.

Ficks andra lag:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial v^2}$$

Randvillkor:

$$0 < y < \delta \qquad t = 0 \qquad c = c_L$$
$$y = 0 \qquad t > 0 \qquad c = c_m$$
$$y = \delta \qquad t > 0 \qquad c = c_1$$

Lösningen blev:

$$c - c_{L} = (c_{m} - c_{L}) \sum_{n=0}^{\infty} (erf \frac{(2n+2)_{\delta} - y}{2 (D \cdot t)^{0.5}} - erf \frac{2n_{\delta} + y}{2(D \cdot t)^{0.5}})$$

Dobbin använde ekvationen ovan och ytåldersdistributionsekvationen ($\phi(t) = r e^{-rt}$) erhållen av Dankwerts för att härleda:

$$F = \int_{0}^{\infty} -D \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right) \cdot \phi(t) dt$$

$$F = (c_{m} - c_{L}) (D \cdot r)^{0.5} \cdot \coth\left(\frac{r\delta^{2}}{D}\right)^{0.5}$$

som ger

$$K_{\rm L} = (D \cdot r)^{0.5} \text{coth} \left(\frac{r\delta^2}{D}\right)^{0.5}$$
 (2.23)

Vid stor förnyelsegrad (r) närmar sig coth-termen värdet 1 och ekvationen ger samma resultat som ytförnyelseteorin, dvs

$$K_L \approx (D \cdot r)^{0.5}$$

Men vid liten ytförnyelsegrad

$$\operatorname{coth} \left(\frac{r\delta^2}{D}\right)^{0.5} \xrightarrow{\delta} \left(\frac{1}{\frac{r}{D}}\right)^{0.5}$$

ty coth (x) $\rightarrow 1/x$ vid små x, och vi får:

$$K_{L} \cong \frac{\left(\frac{D}{\rho} + r\right)^{0.5}}{\delta\left(\frac{r}{D}\right)}$$
$$K_{L} = \frac{D}{\delta}$$

vilket är identiskt med tvåfilmsteorin.

2.4 Sammanfattning av teorier för materieöverföring

De olika modellerna förutsätter att huvudmotståndet mot gasabsorption är samlad i en liten region nära fasgränsytan. Där spelar molekylär diffusion en avgörande roll. Ytskiktet som är i
kontakt med gasen kan antas vara mättat hela tiden. Löst gas blandas mycket fortare med vätskekroppen än vad den kan diffundera genom ytskiktet. Därför blir vätskefilmen vid fasgränsytan en flaskhals för materietransporten mellan gas och vätska.

Alla presenterade teorier utgår från en diffusionsekvation med införande av lämpliga randvillkor. Den ögonblickliga absorptionshastigheten $-D(\partial c/\partial y)_{y=0}$ antas gälla under den tid som ytelementen är i kontakt med gasen. Av de teorier som här presenterats är enligt Lau (1972) Dobbins film-penetrationsmodell mer allmängiltig än de andra modellerna.

Begreppsmodeller över mekanismer vid gasabsorption är i allmänhet ej användbara för att prediktera materieöverföring, främst beroende på problemen att uppskatta parametrar som filmtjocklek (δ) och ytförnyelsegrad (r).

Aven andra forskare, än de som presenterats, har försökt att utveckla modeller för materieöverföringsprocessen. T ex "Surface renewal damped eddy viscosity model" av King (1966) och "Large eddy model" av Fortescue och Pearson (1967).



MODELLER FÖR PREDIKTERING AV MATERIEÖVERFÖRING GAS-VÄTSKA

Av föregående kapitel om teoretiska betraktelsesätt framgår att det är svårt att prediktera materieöverföring, främst beroende på problem med att mäta eller uppskatta variabler som filmtjocklek och filmförnyelsehastighet.

Därför har många författare försökt utveckla ett antal mer eller mindre empiriska modeller där materieöverföringen relateras till sådana förhållandena i strömmande vatten som relativt lätt kan mätas, såsom djup, vattenhastighet och lutning.

En del modeller är ej utvecklade med utgångspunkt från de grundläggande materieöverföringsteorier som redovisats i kapitel 2. De har i huvudsak framkommit genom regressions- och korrelationsanalyser av experimentella mätningar av materieöverföring och de hydrauliska parametrar, vilka ansetts vara relevanta.

Andra modeller tar utgångspunkt i de faktorer som påverkar materieöverföringen enligt föregående kapitel. Dessa modeller inkluderar energiförlusttermer eller längddispersionskoefficienten. I följande redovisning har de aktuella ekvationerna justerats så att de gäller vid 20⁰C och har enheten h⁻¹. Temperaturjusteringar har skett enligt ekv 6.2 avsnitt 6.5.4.

3.1 <u>O'Connor-Dobbins ekvation (1956)</u>

O'Connor och Dobbins (1956) har försökt att relatera Dobbins filmpenetrationsmodell till hydrauliska förhållanden i strömmande vatten. Materieöverföringskoefficienten enligt denna modell (ekv 2.23) är:

$$K_{L} = (D \cdot r)^{0.5} \operatorname{coth} (\frac{r\delta^{2}}{D})^{0.5}$$

3

Författarna antog ett medelvärde för (D) på $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ och ett representativt värde för (r) på 0.10 s^{-1} . Filmtjockleken (δ) varierades från 0.4 mm till 0.8 mm. Värdet av coth-termen blir då ett eller nära ett. De föreslog därför att man kan bortse från coth-termen och att materieöverföringskoefficienten enbart beror av ytförnyelsegraden (r), dvs

 $K_{L} = (D \cdot r)^{0.5}$

som överensstämmer med ekv 2.22.

För att uppskatta ytförnyelsegraden betraktade O'Connor och Dobbins två fall, isotrop och icke-isotrop turbulens. (Med isotrop turbulens menas att turbulensen har samma egenskaper i alla riktningar).

För flöde med icke-isotrop turbulens härledde författarna följande ekvation för ytförnyelsegraden genom att använda Prandtls längdblandningsteori:

$$r = \frac{(Hgs)^{0.5}}{\kappa \cdot H}$$
(3.1)

där

- H = medeldjupet
- g = gravitationskonstanten,
- s = kanallutning, dim.lös
- κ = 0.4, von Karmans konstant, dim.lös

Insättning av (r) i ekv (2.22) ger:

$$K_{L} = \frac{D^{0.50} s^{0.25} g^{0.25}}{\kappa^{0.5} H^{0.25}}$$
(3.2)

och

$$K_{La} = \frac{K_{L}}{H} = \frac{D^{0.50} s^{0.25} g^{0.25}}{\kappa^{0.5} H^{1.25}} = 10,08 \cdot 10^{3} \frac{D^{0.5} s^{0.25}}{H^{1.25}}$$
(3.3)

För fallet med isotrop turbulens använde de mätningar gjorda av Kalinske (1943) på Mississippifloden för att visa:

$$r = U/H \tag{3.4}$$

där

U = hastigheten

Insättning i ekv (2.22) ger:

$$K_{L} = 3.6 \cdot 10^{3} \left(\frac{D \cdot U}{H}\right)^{0.5}$$
 (3.5)

$$K_{La} = 3.6 \cdot 10^3 \cdot \frac{(D \cdot U)^{0.5}}{H^{1.5}}$$
 (3.6)

O'Connor och Dobbins förutsättningar innebär att vid övergång mellan turbulenstyperna så gäller:

$$r = \frac{U}{H} = \frac{(Hgs)^{0.5}}{\kappa H}$$

$$U = \frac{g^{0.5}}{\kappa} (Hs)^{0.5} = C \cdot (Hs)^{0.5}$$

$$(3.7)$$

$$C = U(Hs)^{-0.5}$$

$$(3.8)$$

Ekvation (3.8) är samma som Chezys formel för flödet i öppna kanaler. Med antagande av ett κ -värde mellan 0.3 och 0.4 så ligger Chezys koefficient mellan 8 och 10 vid övergång mellan icke isotrop och isotrop turbulens. O'Connor och Dobbins antog icke-isotrop turbulens vid C<9 isotrop turbulens vid C>9 m^{0.5}s⁻¹.

Senare visade O'Connor-Dobbins (1958) att materiöverföringskoefficienten beräknad för icke-isotrop resp isotrop turbulens i flera fall uppvisade små skillnader. Därför rekommenderade han ekv (3.6).

3.2 <u>Churchill-Elmore-Buckinghams ekvation (1962)</u>

Churchill et al publicerade 1962 en mycket noggrann fältundersökning över oxygenöverföring i floder. Deras experiment utfördes i flodsträckor efter dammar där BOD i vattnet var nära noll och där oxygenkoncentrationen var mycket låg på grund av att vattnet i dammen haft lång uppehållstid under skiktade förhållanden. Churchill et al undersökte 16 olika sträckor i 5 floder. Djupet varierade från ca 0.5 m till 3.5 m och hastigheten från 0.55 till 1.50 m/s.

Försöksdata korrelerades med olika kombinationer av variabler som antogs kunna beskriva vattendragen, men ingen av dessa kombinationer kunde korrelera data betydligt bättre än de andra. Men författarna rekommenderade en ekvation främst på grund av dess enkla form.

Ekvationen är:

$$K_{La} = 0.210 \cdot \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$$
 (3.9)

Ekvationen hade en multipel korrelationskoefficient på 0.822. En enklare form blev:

$$K_{La} = 0.210 \cdot \frac{U}{H^{1.667}}$$
 (3.10)

Författarna hade förutsatt att även lutning, friktionsfaktorn och Reynolds tal var påverkande parametrar, vilket dock ej kunde visas. Men, påpekade de hastigheten (U) och vattendjupet (H) är två hydrauliska grundvariabler, till vilka man kan korrelera lutnings- och friktionstermen.

3.3 Krenkel - Orlobs ekvation (1963)

Krenkel och Orlob (1963) mätte oxygenöverföringen i en 0.3 m djup och 18.3 m lång recirkulationsränna. Vatten deoxygenererades först med natriumsulfit och sedan mätte man dess oxygenökning i två punkter längs rännan med en tidsförskjutning motsvarande transporttiden mellan de två punkterna. Längddispersionskoefficienten (D_L) bestämdes genom injektion av spårämne och mätning av koncentrationsändringen över tiden i en punkt nedströms injektionspunkten. Mätta värden på K_L a korrelerades med längddisperisonskoefficienten D₁ och flödesdjupet (H), vilket gav ekvationen:

$$K_{La} = 1 \cdot 10^{-3} \frac{D_{L}}{H^{2.32}}$$
 (3.11)

Enligt Lau (1972) som har granskat Krenkel och Orlobs mätningar är det mycket tveksamt om rännan var lång nog för att spårämnet skulle blandas väl över hela tvärsnittet. Beräkningar enligt Fischers (1967) kriterier visar att sträckan från tillsatspunkten till den punkt där fullständig omblandning över tvärsnittet kan antas råda blir 27.5 m. Därför påpekar Lau (1972) att de värden på D_L som Krenkel och Orlob beräknat är förmodligen inte korrekta och ekvation (3.11) kan ej förväntas vara applicerbar på andra data.

Krenkel och Orlob antog att även oxygenöverföringen är relaterad till energiförlust per massenhet:

$$E = U s g \tag{3.12}$$

(Med (E) som energiförlust per massenhet får högra sidan dimensionen L^2T^{-3} och vänstra sidan dimensionen L^2T^{-2} . Det förefaller därför som om författarna måste ha menat effekt per massenhet som har dimensionen L^2T^{-3} .) En regressionsanalys utfördes som visade att

$$K_{La} = 7.235 \frac{(Us)^{0.408}}{H^{0.66}}$$
 (3.13)

3.4 Dobbins ekvation (1964)

I nya försök fortsatte Dobbins sitt och O'Connors tidigare arbete med att relatera parametrarna i filmpenetrationsmodellen till lätt mätbara hydrauliska variabler. Han antog att turbulensen består av virvlar med varierande storlek. Virvlarna genereras från botten som senare dras till huvudströmmen och slås sönder där av tröghetskrafter till mindre virvlar. Övre gränsen för virvlarnas storlek är bestämd huvudsakligen av flödets djup och undre gränsen för virvlarnas storlek bestäms av effekten per massenhet (E) och viskositeten (v). Enligt Kolmogoroff är turbulensskalans undre gräns proportionell till $(v^3/E)^{0.25}$ och oberoende av ursprunglig virvelstorlek. Filmtjockleken (δ) relateras till minsta virvelstorleken:

$$\delta \sim (\frac{v^3}{F})^{0.25}$$

Vidare blir virvelhastigheten proportionell mot $(\nu E)^{0.25}$ och dess frekvens blir proportionell mot $(E/\nu)^{0.5}$.

Den effekt per massenhet som behövs för att övervinna ytspänningen som vill hålla samman ytskikten blir proportionell mot produkten av frekvensen (r) ytspänningen (σ) och kvadraten på filmtjockleken (δ).

Effektbehov $\sim \frac{r\sigma\delta^2}{\rho\delta^3} = \frac{r\sigma}{\rho\delta}$

Effektbehovet (E) antas vara proportionell mot den turbulenta effekten per massenhet i närheten av ytan (E_{surf}).

$$E_{surf} = C_2 E \tag{3.14}$$

där

C₂ = proportionalitetskonstant

Därur erhålls:

$$r = C_1 \frac{\rho \delta E_{surf}}{\sigma}$$

och att:

$$\delta = C_3 \left(\frac{v^3}{E_{surf}} \right)^{0.25}$$
(3.15)

där

C₃ = proportionalitetskonstant

Ekv 3.14 och 3.15 ger:

$$\delta = \frac{C_3}{(C_2)^{0.25}} \left(\frac{\nu^3}{E}\right)^{0.25} = C_4 \left(\frac{\nu^3}{E}\right)^{0.25}$$
(3.16)

där

 C_4 = proportionalitetskonstant.

Insättning i ekv (3.14) ger:

$$r = C_1 (C_2)^{0.75} C_3 \frac{\rho v^{0.75} E^{0.75}}{\sigma}$$
(3.17)

Ytförnyelsegraden ges av:

$$r = \frac{c_5}{c_4^3} \frac{\rho v^{0.75} e^{0.75}}{\sigma}$$
(3.18)

där

C₅ = konstant som beror av gasens och vätskans egenskaper

 C_4 är en konstant som varierar med de hydrauliska betingelserna

Genom bearbetning av experimentella undersökningsresultatet fick han:

$$C_4 = 0.65 + 15000 \left(\frac{(v^3/E)^{0.25}}{H}\right)^2$$
 (3.19)

För konstanten C₅ fick Dobbins ett värde på 14.3 genom experimentella försök med helium och kväve. Insättning i O'Connor och Dobbins ekvation för K_1 (ekv 2.23) ger:

$$K_{L} = (D \cdot r)^{0.5} \operatorname{coth} (\frac{r\delta^{2}}{D})^{0.5}$$

$$K_{L} = \left(\frac{C_{5} D \rho v^{0.75} E^{0.75}}{C_{4}^{3} \sigma}\right)^{0.5} \operatorname{coth} \left(\frac{C_{5} \rho v^{2.25} E^{0.25}}{C_{4} D \sigma}\right)^{0.5} (3.20)$$

Värdet på $\rm C_4$ varierar mellan 0.3 och 1.2 men antogs som konstant 0.65.

Senare bearbetade Dobbins (1965) sin ekvation (ekv 3.20). Han föreslog en s k C_A -faktor som visar förhållandet mellan verkliga och projicerade luft-vattenkontaktarean, dvs

$$A_s = C_A A_o$$

och antog att:

$$C_{A} = 1 + F_{r}^{2}$$

där

 A_s = aktuella luft-vattenytan A_o = horisontellt projicerade arean F_r = Froudes tal = U (gH)^{-0.5}, dim.lös

Värdet på diffusionskoefficienten satte han till

 $D = 2.037 (1.037)^{T-20} 10^{-9} m^2/s$

För C₄ fick han värdet C₄ = 0.9 + F_r och påstod att ekvationen är relativt okänslig för olika värden på C₅ förutsatt att de använda värdena för C₄ är förenliga med C₅.

Ekvationen blev slutligen

$$K_{La} = 2.308 \frac{1.0 + F_{r}^{2}}{(0.9 + F_{r})^{1.5}} \frac{(U_{s})^{0.375}}{H} \operatorname{coth} \left(\frac{4.75(U_{s})^{0.125}}{(0.9 + F_{r})^{0.5}}\right) (3.21)$$

3.5 Owens, Edwards och Gibbs ekvation (1964)

Owens m fl bestämde materieöverföringskoefficienten för olika flodsträckor och försökte korrelera de observerade värdena med hydrauliska förhållande. Genom regressionsanalys av egna data samt data från Churchill (1962) och Gameson (1955) fick de ekvationen:

$$K_{La} = 0.222 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$$
 (3.22)

När data från rännförsök vid Water Pollution Research Laboratory (WPRL) användes erhölls följande samband:

$$K_{La} = 0.300 \frac{U^{0.73}}{H^{1.75}}$$
 (3.23)

3.6 Isaacs - Gaudys ekvation (1968)

Isaacs och Gaudy mätte luftningen i en cirkulär ränna i vilken inre och yttre väggar kunde drivas med olika hastigheter för att simulera olika flödesförhållandena.

De antog att materieöverföringskoefficienten kan skrivas som:

$$K_{l}a = b U^{m} H^{n}$$
(3.24)

Multipel regressionsanalys på experimentella data ger ett värde på 1.0027 och -1.4859 för m respektive n. Efter avrundning till 1 resp -1.5 blir ekvationen:

$$K_{La} = 0.168 \frac{U}{H^{1.5}}$$
 (3.25)

Isaacs och Gaudy (1968) applicerade samma regressionsanalys till publicerade data av Churchill m fl (1962) och Krenkel och Orlob (1963). Konstanttermen blev 0.198 respektive 0.129.

$$K_{La} = 0.198 - \frac{U}{H^{1.5}}$$
 (3.26)

$$K_{La} = 0.129 \frac{U}{H^{1.5}}$$
 (3.27)

3.7 <u>Thackston - Krenkels ekvation (1969)</u>

Thackston och Krenkel (1969) antog att K_La är proportionell mot ytförnyelsegraden som antogs bero på virveldiffusionskoefficienten i ytskiktet ε_{vo} och djupet H. Därför föreslog de att

$$K_{La} \sim \frac{\varepsilon_{yo}}{H^2}$$

Thackston och Krenkel hävdar att enligt Al-Saffar (1964) är $\epsilon_{y0} \sim k_y \sim U_*H$, där k_y är virveldiffusionskoefficient och U_* är friktionshastigheten. ($U_* = (\tau_0/\rho)^{0.5}$ där τ_0 är tangentialspänningen nära väggen och ρ är densiteten.)

Insättning i ekvationen ovan gav:

$$K_{La} \sim \frac{U_{\star}}{H}$$

Materieöverföringsexperiment utfördes i en 0.6 m bred och 18 m lång lutande ränna med recirkulation. Spårämnesförsök utfördes även för att mäta den longitudinella dispersionskoefficienten (D_{I}) . Uppmätta värden på K_{I} a korrelerades med D_{I} /H och med U_{\star} /H.

Ekvationerna blev:

$$K_{La} = 0.124 \frac{D_{L}}{H^2}$$
 (3.28)

och

$$K_{La} = 1.783 \frac{U_{\star}}{H}$$
 (3.29)

För att ta med det faktum att gränsarean luft-vatten kan bli större än den projicerade arean ansatte författarna värdet på $(K_{L}a H)/U_{*}$ mot Froudes tal U/ $\sqrt{g}H$. Spridningen var ganska stor men ett svagt samband fanns och Thackston och Krenkel modifierade därför ekv. 3.29 till:

$$K_{La} = 1.040 \quad (1 + F_{r}^{0.5}) \frac{U_{\star}}{H}$$
 (3.30)

3.8 <u>Negulescu-Rojanskis ekvation (1969)</u>

Negulescu och Rojanski studerade de tidigare ekvationerna av O'Connor och Dobbins (1956), Churchill et al (1962) och Owens et al (1964) och antog att oxygenöverföringskoefficienten (K_La) ökar med ökande flödeshastighet och minskar med ökande vattendjup. Experimentellt arbete utfördes i en 20 m lång och 0.2 m bred ränna med cirkulation. Genom likformighetsanalys försökte författarna att uppnå ett korrekt återgivande av strömningsförhållandena i floder.

Oxygenöverföringskoefficienten bestämdes vid försöken genom återluftning av deoxygenerat vatten. Dispersionskoefficienten, D_L, bestämdes genom spårämnesförsök med natriumklorid.

Resultaten av 18 experimentella försök med efterföljande regressionsanalys visade att:

$$K_{La} = 0.454 \left(\frac{U}{H}\right)^{0.85}$$
 (3.31)

med en korrelationskoefficient på 0.80.

3.9 <u>Parkhurst - Pomeroys ekvation (1972)</u>

En intressant studie är försöken av Parkhurst och Pomeroy (1972). Författarna utförde experimentella undersökningar av oxygenöverföringen i 12 befintliga avloppsledningssträckor i Los Angeles. Ledningarna, som hade en lutning mellan 0.7 ^O/oo till 70 ^O/oo, rengjordes med kaustiksoda dagen innan försöket. Hypoklorit tillfördes, i höga doser under en halvtimme omedelbart innan försöken och i lägre dosering med syfte att minimera respirationen, under försöken. Hastigheten bestämdes med färgtillsättning och flödet mättes med hjälp av en Palmer-Bowlusränna. Mätning av löst oxygen utfördes med oxygenelektrod som var monterad i en behållare tillsammans med termometer och omrörare. Apparaturen doppades i vattenströmmen där vattenhöjden tillät detta, annars mätte man bara med elektroden på ledningens botten. Totalt utfördes 74 mätningar.

Efter en teoretisk betraktelse över oxygenöverföringen i naturliga vatten och i rännor kom Parkhurst och Pomeroy (1972) till slutsatsen att materieöverföringen kan beskrivas genom följande samband:

$$K_{L} = \delta C_{f} C_{A} \alpha \beta \gamma (Us)^{m} r^{n}_{h}$$
(3.32)

där termen (å) är en koefficient som beror av vilka sorter de olika variablerna är uttryckta i och som är ett om (K_L) är presenterad i m/h och (U) i m/s. (C_f) är en konstant oberoende av värdet på (m) och (n). Faktorn (C_A) är ursprungligen föreslagen av Dobbins och utgör förhållandet mellan den verkliga luft-vattenarean och den projicerade arean. Faktorn (α) är förhållandet mellan materieöverföringskoefficienten för förorenat vatten och rent vatten. Faktorn ($\dot{\beta}$) är en funktion av kanalens geometri som påverkar energiförlustgraden vid ytans närliggande område. Faktorn (γ) relaterar materieöverföringsvärdet vid temperaturen T till värdet vid 20^oC. Slutligen är s lutning, U hastighet och r_h den hydrauliska radien.

Författarna diskuterar fram att exponenten (m) är lika med 0.375 och (n) är mycket nära noll, dvs:

$$K_{L} = \delta C_{f} C_{A} \alpha \beta \gamma (Us)^{0.375}$$
 (3.33)

Termen (C_A) som är en funktion av Froudes tal och antogs kunna uttryckas som

$$C_{A} = 1 + pF_{r}^{2}$$

Genom att förutsätta att m = 0.375 och anpassa mätta värden till ekv 3.33 erhöll p ett värde på 0.17. C_A blev således

$$C_{A} = 1 + 0.17 F_{r}^{2}$$
 (3.34)

Uppmätta data gav för den kombinerade koefficienten áC $_{f}\alpha\beta$ värdet 0.96 och ekvationen blev till sist:

$$K_1 = 0.96 (1 + 0.17 F_r^2) (Us)^{0.375}$$
 (3.35)

Ovanstående uttryck är den enda ekvation för prediktering av materieöverföring som baseras på mätningar i avloppsledningar.

3.10 <u>Tsivoglou - Wallacs ekvation (1972)</u>

Tsivoglou och Wallac publicerade 1972 de första omfattande materieöverföringsdata för naturliga vattendrag som hade erhållits med spårämnesteknik.

Författarna som hade stor erfarenhet av radioaktiv spårämnesteknik applicerade metoden till fem olika floder i USA. Totalt 605 observerade värden på K_L a korrelerades med effekt per massenhet (E) enligt ekv (3.12). Resultatet blev:

$$K_{La} = 566 \text{ Us}$$
 (3.36)

3.11 Bennett-Rathbuns ekvation (1972)

 I ett omfattande arbete som publicerades 1972 undersökte Bennet och Rathbun de tillgängliga ekvationerna för oxygenöverföring mot publicerade experimentella data och i fält uppmätta data för oxygenöverföring. En multipel linjär regressionsanalys applicerades på båda datagrupperna.

För data från naturliga vatten erhölls bästa anpassning med en ekvation på formen:

$$K_{La} = 1.356 \frac{U^{0.413} 0.273}{H^{1.408}}$$
 (3.37)

För ränndata erhölls:

$$K_{La} = 3.62 \frac{U^{0.132} s^{0.496}}{r_h^{0.586} B^{0.746}}$$
 (3.38)

där

B = bredden i vattenlinjen r_h = hydraulisk radie En enklare ekvation erhölls genom bearbetning av 121 observervationer ur båda grupperna.

$$K_{La} = 0.232 \frac{U^{0.607}}{H^{1.689}}$$
 (3.39)

3.12 <u>Sammanfattning av ekvationer för prediktering av materie-</u> överföring

De prediktiva ekvationer som beskrivits tidigare sammanfattas i tabell 3.1, där förutom själva ekvationerna även är sammanställt information om det datamaterial från vilket uttryckena framkommit.

Ekv.nr	Författare	Utförande	Experimentella Antal data-	data K _L a(h ⁻¹)		U(ms ⁻¹)		H(m)		s 10 ³	
			sprungl. ekv.	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
3.3	O'Connor-Dobbins (1956) (icke isotrop turbulens)	$K_{L^a} = 10.08 \cdot 10^3 \frac{D^{0.5} s^{0.25}}{\mu^{1.25}}$	13	0.013	0.249	0.058	0,223	0.98	2,623	0.095	0.14
3.6	O'Connor-Dobbins (1956) (isotrop turbulens)	$K_{L^a} = 3.6 \cdot 10^3 \frac{D^{0.5} U^{0.5}}{H^{1.50}}$	22	0.013	0.461	0.162	1.281	0.275	7.381	0.027	3.60
3.9	Churchill m fl (1962)	$K_{L^a} = 0.210 \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$	30	0.021	0.535	0.564	1.525	0.647	3.480	0.126	2.35
3.11	Krenkel-Orlob (1963)	$K_{La} = 0.001 \frac{D_{L}^{1.321}}{H^{2.32}}$	58	1,020	11.064	0.040	0.653	0.024	0.061	0.75	24.0
3.13	_11_	$K_{La} = 7.235 \frac{(Us)}{H^{0.66}}$	58	1.020	11.064	0.040	0.653	0.024	0.061	0.75	24.0
3.21	Dobbins (1964)	$K_{La} = 2.308 \frac{1.0 + F_{r}^{2}}{(0.9 + F_{r})^{1.5}}$									
		$\frac{(U_{s})^{0.375}}{H} \operatorname{coth} \frac{4.75(U_{s})^{0.125}}{(0.9+F)^{0.5}}$	33	0.013	11.064	0.040	1.525	0.024	7.381	0.027	24.0
3.22	Owens m fl (1964)	$K_{La} = 0.222 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$	68	0.021	5.537	0.040	1,525	0.104	3.480	0.015	1.06
3,23	_ 17_	$K_{La} = 0.300 \frac{U^{0.73}}{H^{1.75}}$	32	0.030	4.718	0.040	0,558	0.119	0.744	0.015	1.06
3.25	lsaacs-Gaudy (1968)	$K_{La} = 0.168 \frac{U}{H^{1.5}}$	52	0.005	0.053	0.168	0,50	0.152	0.457		
3.26	_ ''_	$K_{La} = 0.198 \frac{U}{H^{1.5}}$	30	0.021	0.535	0.564	1,525	0.647	3.480		
3.27	_0 <u>~</u>	$K_{La} = 0.129 \frac{U}{.1.5}$	58	0.011	11.054	0.040	0.653	0.024	0.061		
3.28	Thackston-Krenkel (1969)	$K_{La} = 0.124 \frac{D_{L}}{H^2}$	40	0.735	3,159	0.111	0.708	0.012	0.07	0.65	20.4
3.29	_11_	K _L a = 1.783 <mark>H</mark>	40	0.735	3.159	0.111	0.708	0.012	0.07	0.65	20.4

Tabell 3.1 Ekvationer för prediktering av materieöverföringskoefficienten K.a.

Ekv.nr	Författare	Utförande	Experimentella data Antal data~ K _L a(h ⁻¹)		U(ms ⁻¹)		H(m)		s 10 ³	
			sprungl. ekv.	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min Max
3.30	Thackston-Krenkel (1969)	$K_{L^a} = 1.040(1+F_r^{0.5}) \frac{U_*}{H}$	105	0.013	3.159	0.058	1,525	0.012	7.381	0.027 20.4
3.31	Negulescu-Rojanski (1969)	$K_{L^{a}} = 0.454 \left(\frac{U}{H}\right)^{0.85}$	23	0.062	1.794	6.088	0.580	0.049	0.949	
3,35	Parkhurst-Pomeroy (1972)	$K_{L^a} = \frac{0.96}{H} (1+0.17F_r^2) (sU)^{0.375}$	74	0.142	42.773	0.445	3.60	0.054	0.485	0.70 70.0
3,36	Tsivoglou-Wallacs (1972)	K _L a = 566 Us								
3.37	Bennett-Rathbuns (1972)	K _L a = 1.356 <u>U^{0.413} s^{0.273}</u> H ^{1.408}	62	0.021	5.537	0.040	1.525	0.104	3.480	0.015 2.35
3.38	Bennett-Rathbuns (1972)	$K_{L^{a}} = 3.62 \frac{U^{0.132} s^{0.496}}{R_{u}^{0.586} B^{0.746}}$	110	0.735	11.064	0.040	1,525	0,012	0.070	0.65 24.0
3.39	Bennett-Rathbuns (1972)	$K_{La} = 0.232 \qquad \frac{0.607}{H^{1.689}}$	121	0.021	11.064	0.040	1,525	0,012	3.480	0.015 24.0

4 UTVARDERING AV PREDIKTIVA EKVATIONER

Flera författare har analyserat och utvärderat de olika ekvationerna för prediktering av materieöverföring. De mest omfattande utvärderingarna har gjorts av Bennet och Rathbun (1972), Wilson och Macleods (1974) samt av Bennet (1977).

4.1 <u>Bennet och Rathbuns utvärdering (1972)</u>

Bennet och Rathbun har försökt beskriva hur väl olika ekvationer predikterar materieöverföring, dels från de ursprungliga dataserierna från vilka ekvationerna utvecklats, dels från övriga publicerade data som de bedömde vara tillämpliga.

För de dataserier där alla fyra variablerna djup, hastighet, bredd och lutning var tillgängliga tog Bennet och Rathbun genom regressionsanalys fram ett "eget" samband för materieöverföringen beroende av dessa variabler, vilket redovisats i kap. 3.11.

Bennet och Rathbun använde två mätetal för jämförelse av de olika ekvationerna. Det ena mätetalet är uppskattningens standardav-vikelse, E_{c} , vilken definieras som

$$E_{s} = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\left(K_{L}a\right)_{p} - \left(K_{L}a\right)_{0}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(4.1)

där

 $(K_{L}a)_{p}$ = predikterat $K_{L}a$ -värde $(K_{L}a)_{0}$ = observerat $K_{L}a$ -värde N = antalet värdepar

För att avvikelsen vid låga K_La-värden skall få samma betydelse som avvikelsen vid högre K_La-värden definierar författarna ett mätetal som de benämner "the percent standard error of the estimate", E_n , där

$$E_p = 100 (1-10^{-E} s1)$$
 (4.2)

och där

$$E_{s1} = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\log\left(\left(K_{L}a\right)_{p} - \log\left(K_{L}a\right)_{0}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(4.3)

I tabell 4.1 återges de av författarna beräknade värdena på E_s och E_p för de ekvationer som diskuterats i kapitel 3. För varje ekvation återges E_s och E_p beräknade för såväl de dataserier som använts i originalpublikationer som för alla tillgängliga dataserier.

Tabell 4.1 Fel vid prediktion av K_La-värden enligt Bennet och Rathbun (1972).

Ekv.nr.	Författare	Egna	data	Tot	. data	
		E _s (h ⁻¹)	E _p (%)	Antal pkt.	E _s (h ⁻¹)	E _p (%)
3.3	O'Connor-Dobbins (1956)	0.033	45	38	3.234	46
3.6	_ ^B _	0.040	44	169	11.035	71
3.9	Churchill et al (1962)	0.159	28	239	13.463	73
3.13	Krenkel-Orlob (1963)	0.725	15	207	1.574	51
3.21	Dobbins (1964)	0.743	33	207	2.015	43
3.22	Owens et al (1964)	0.480	32	239	45.571	85
3.23	-"-	0.523	35	239	40.283	84
3.26	Isaacs-Gaudy (1968)	0.053	30	239	5.306	63
3.29	Thackston-Krenkel (1969)	0.956	25	207	1.977	45
3.30	_ ¹¹ _	0.566	37	207	1.919	45
3.31	Negulescu-Rojanski (1969)) 0.156	29	239	2.034	61

De samhörande ekvationer och dataserier som uppvisar de lägsta E_p -värdena är Krenkels ekvation (ekv. 3.13) med ett E_p -värde på 15% och Thackstons ekvation (ekv. 3.29) med ett E_p -värde på 25%. Bennet och Rathbun hävdar att detta ej är förvånande eftersom dessa ekvationer framtagits vid laboratorieundersökningar vid vilka hydrauliska variabler kan kontrolleras och störande faktorer till stor del elimineras. Detta är ej fallet vid undersökningar i naturliga vattendrag.

De ekvationer som passar bäst till alla tillgängliga dataserier är Dobbins ekvation (ekv. 3.21), Thackstons ekvationer (ekv. 3.29-30) och O'Connor och Dobbins ekvation (ekv. 3.3). De har samtliga ett E_p -värde omkring 45%.

De ekvationer som ger den största standardavvikelsen när alla data utnyttjas är de som framkommit genom fältundersökningar. När uttryck för materieöverföring i naturliga vattendrag appliceras på rännor med mindre vattendjup är det en allmän erfarenhet att de predikterade K_{L} a-värden blir högre än de observerade. Författarna varnar därför för användning av dessa ekvationer i de fall där de hydrauliska förhållandena skiljer sig från dem för vilka ekvationen har framtagits.

I figur 4.1 har för alla ekvationerna i tabell 4.1 predikterat K_La -värde avsatts mot djupet med antagen lutning på $0.1^{\circ}/\circ o$ och medelhastighet på 0.305 m/s (1 fot/s). Figuren är kompletterad med Parkhurst och Pomeroys ekvation (ekv. 3.35). Kvadraten i figuren avgränsar använda experimentella data. Heldragna linjer visar aktuella djup vid vilka respektive ekvation framtagits. För grunda djup på vänster kant av figuren är differenserna mellan de olika ekvationerna klart större än differenserna vid medeldjupa och djupa flöden. Detta tyder på att applicering av de prediktiva ekvationerna vid små djup kan innebära stora fel.

Vidare visar figuren två olika grupperingar av ekvationer. Ekvationerna (3.13), (3.29), (3.30) och (3.31) bildar en ekvationsgrupp som har relativt låg lutning, och ekvationerna, (3.3), (3.6), (3.9), (3.22), (3.23) och (3.26) bildar en annan grupp med högre lutning. Förra gruppen har erhållits från ränndata och andra gruppen är från fältdata.

Det ovanstående tyder på att grundläggande skillnader föreligger mellan olika ekvationer på grund av de olika situationer varifrån dataserien har erhållits. Därför, påpekar författarna, är det tvivelaktigt att använda ekvationer erhållna från ränndata för prediktering av materieöverföringskoefficienter i naturliga vattendrag och vice versa.



Figur 4.1 Materieöverföringskoefficient som funktion av djup, från ekvationer i tab. 4.1. I huvudsak enligt Bennet och Rathbun (1972).

4.2 <u>Wilson-Macleods</u> utvärdering (1974)

Wilson och Macleod publicerade 1974 en omfattande utvärdering av publicerade uttryck för oxygenöverföring i strömmande vatten. Wilson och Macleod utnyttjade ett ännu större datamaterial än Bennet och Rathbun (1972).

I stället för att klassificera ekvationerna beroende på varifrån de är erhållna, från fältundersökning eller från laboratorierännförsök, delar författarna ekvationerna i två kategorier beroende på om de är en enkel funktion av strömvariablerna hastighet och djup eller om de tar hänsyn till energiförlust och/eller ytförnyelsegraden.

De olika ekvationer som granskats framgår av tabell 4.2. De data som användes för utvärdering av ekvationerna spänner över ett mycket brett intervall vad gäller hydrauliska variabler såsom framgår av tabell 4.3. Där ingår, förutom publicerade dataserier, två fristående dataserier från W.P.R.L. (Water Pollution Research Laboratory).

Enkla ekvationer	<u></u>	
O'Connor-Dobbins (1956)	Ekvation	(3.6)
Churchill et al (1962)	Ekvation	(3.9)
Isaacs-Gaudy (1968)	Ekvation	(3.26)
_"-	Ekvation	(3.27)
_"-	Ekvation	(3.25)
Negulescu-Rojanski (1969)	Ekvation	(3.31)
Bennet-Rathbun (1972)	Ekvation	(3.39)
Energi-ytförnyelseekvationer		
Dobbins (1964)	Ekvation	(3.21)
Krenkel-Orlob (1963)	Ekvation	(3.13)
Thackston-Krenkel (1969)	Ekvation	(3.28)
_ ¹¹ _	Ekvation	(3.29)
Parkhurst-Pomeroy (1972)	Ekvation	(3.35)
Bennet-Rathbun (1972)	Ekvation	(3.37)

Tabell 4.2	Studerade	samband	vid	Wilson	och	Macleods	(1974)
	utvärderir	ng.					

Datakälla	Från	Antal	Ant. data an	vändb. för:
			enkla ekv	energiekv.
W.P.R.L.	Ränna	101	101	101
_ ¹¹ _	Flod	54	54	32
O'Connor-Dobbins (1964)	Flod	41	38	35
Churchill et al (1962)	Flod	30	30	30
Isaacs-Gaudy (1968)	Ränna	52	52	-
Thackston-Krenkel (1969)	Ränna	69	52	52
Parkhurst-Pomeroy (1972)	Ledning	74	74	74
Tsivoglou et al (1972)	Flod	15	15	-
Negulescu-Rojanski (1969)	Ränna	8	8	-
Krenkel-Orlob (1963)	Ränna	58	58	58
Totalt		502	482	382

Tabell 4.3 Datakällor använda vid Wilson och Macleods utvärdering.

Författarna beräknade materieöverföringskoefficienten för varje ekvation och jämförde detta med observerade värden. Liksom Bennet och Rathbun försökte författarna använda statistiska metoder för att kvantifiera de olika ekvationernas prestanda. De beräknade standardavvikelse på samma sätt som Bennet och Rathbun (ekv. 4.1).

Författarna understryker att standardavvikelsen (E_s) kan användas för att jämföra olika ekvationer enbart om man använder samma dataserie. Om t ex en dataserie domineras av låga värden på en parameter då kommer standardavvikelsen att bli mindre jämfört med en annan serie som domineras av höga värden på parametern även om den senare har mindre spridning.

En annan nackdel med standardavvikelse som författarna pekar på är det förhållandet att om man har en mycket god överensstämmelse för huvuddelen av datamängden, men ett fåtal punkter avviker mycket, så kan detta ge större standardavvikelse än i det fall då hela datamängden visar relativt dålig överensstämmelse. För att undvika denna situation använde författarna ett mått som de kallade "normalized mean error":

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{(K_{L}a)_{p} - (K_{L}a)_{0}}{(K_{L}a)_{0}} 100\%$$
(4.4)

Resultatet framgår av tab 4.4.

Tabell 4.4 Fel vid prediktion av K_La-värden enligt Wilson och Macleods (1974).

Ekvation nr	Antalet data- punkter	Figur nr	Standardfel (dygn ⁻¹)	Norm.mean error (%)
Enkla ekvationer				
O'Connor & Dobbins 3.6	482	4.2	114.43	196.1
Churcill et al 3.9	482	4.3	104.31	194.9
Isaacs-Gaudy 3.26	482	4.4	71.27	75.1
-"- 3.27	482	4.5	81.88	14.2
-"- 3.25	482	4.6	75.91	42.9
Negulescu-Rojanski 3.3	1 482	4.7	99.15	54.4
Bennet-Rathbun 3.39	482	4.8	207.31	470.4
Energiekvationer				
Dobbins 3.21	382	4.9	73.43	34.5
Krenkel-Orlob 3.13	382	4.10	116.63	-34.5
Thackston-Krenkel 3.28	382	4.11	112.36	-15.0
-"- 3.29	382	4.12	115.62	-27.60
Parkhurs-Pomeroy 3.35	382	4.13	33.25	31.4
Bennet-Rathbun 3.37	382	4.14	157.84	298.9

Författarna understryker att alla statistiska mätetal har brister och att det visuella intrycket vid en grafisk jämförelse mellan predikterade och observerade värden är att föredra. Resultat

(1) Enkla ekvationer.

Av figur 4.2-4.8 framgår klart att de ekvationer som innehåller enkla hydrauliska parametrar som hastighet och djup har en genomgående tendens att överskatta oxygenöverföringen. Wilson och Macleod konstaterade också att om samband mellan materieöverföring och hydrauliska parametrar, som framtagits genom mätningar i naturliga vattendag, tillämpas på rännor, så predikteras alltför höga värden. Detta är i överensstämmelse med Bennet och Rathbuns (1972) konklusioner.

Ekvationerna av O'Connor och Dobbins (1956), ekv. (3.6), och av Churchill et al (1962), ekv. (3.9), som visas i figur 4.2 respektive 4.3 ger enligt Wilson och Macleod ungefär samma resultat.

Isaacs och Gaudys ekvation med Churchills data (1968), ekv. (3.26), som visas i figur 4.4 ger lite bättre passning men fortfarande med betydande spridning. Ekvation (3.27) av samma författare med Krenkel och Orlobs data och författarnas egen ekvation, ekv. (3.25), illustrerade figur 4.5 respektive 4.6, passar bättre än förra ekvationerna.

Negulescu och Rojanskis (1969) ekvation, ekv. (3.31), presenteras i figur 4.7. Av denna framgår att diagonalen ej är den bästa linjen genom punkterna. Detta indikerar att exponenten 0.85 för (U/H) enbart gäller för det begränsade antal mätdata som presenterats av författarna.

Figur 4.8 visar att avvikelsen mellan predikterades och observerade värden med Bennet och Rathbuns ekvation, ekv. (3.37), är betydande. Wilson och Macleods utvärdering bekräftar Bennet och Rathbuns slutsats att skilja mellan flod- och ränndata. Ingen av de föreslagna ekvationerna, som innehåller enbart de enkla hydrauliska parametrarna hastighet och djup, ger en tillfredställande uppskattning av materieöverföringskoefficienten för alla förekommande fall.



Figur 4.2 Jämförelse av observerade K_La med K_La-värden predikterade enligt O'Connor-Dobbins (1956).



Figur 4.3

Jämförelse av observerade K_L a med K_L a-värden predikterade enligt Churchill et al. (1962).

49













51

Figur 4.6





predikterade enligt Negulescu-Rojanski (1969).

1)



Figur 4.8 Jämförelse av observerade K_{La} med K_{La} -värden predikterade enligt Bennett-Rathbun (1972).

Energiekvationer

I figur 4.9 visas Dobbins (1964) modell, ekv. (3.21). Överensstämmelsen mellan predikterad och observerade värden är relativt god men en tendens till att den predikterar alltför höga värden syns.

Krenkel och Orlobs ekvation, ekv. (3.13), är illustrerad i figur 4.10. Deras data tenderar att ligga långt ifrån diagonalen i figuren. De predikterade värdena är genomgående för låga.

Thackston och Krenkels (1969) ekvation, ekv. (3.28-29), i figur 4.11-12 har en lutning, som är mindre än ett, vilket tyder på att bättre resultat kunde ha erhållits om man valt andra exponenter i ekvationerna.

Den ekvation som utvecklats av Parkhurst och Pomeroy (1972), ekv. (3.35), är illustrerad i figur 4.13. Ekvationen hade de minsta standardfelen jämfört med alla andra ekvationer. Även Bennett och Rathbuns ekvation, ekv. (3.37), i figur 4.14 visar bra anpassning.

52











Figur 4.11 Jämförelse av observerade K_La med K_La-värden predikterade enligt Thackson-Krenkel (1969).



Figur 4.12 Jämförelse av observerade K_La med K_La-värden predikterade enligt Thackson-Krenkel (1969).



Figur 4.13 Jämförelse av observerade K_La med K_La-värden predikterade enligt Parkhurst-Pomeroy (1972).



Predikterade enligt Bennet-Rathbun (1972).

Undersökningen visar att prediktiva ekvationer, innehållande bara de elementära hydrauliska parametrarna hastighet och djup ej kan användas för prediktering av oxygenöverföring i både naturliga vatten och rännor. Ekvationer erhållna från floddata predikterar för hög oxygenöverföring vid tillämpning på kanaler och ekvationer erhållna från rännförsök predikterar för låga värden när de appliceras på floder. Av energiekvationerna är Dobbins (1964), ekv. (3.21), och Parkhurst-Pomeroys (1972) ekvation, ekv. (3.35) de mest tillförlitliga för både rännor och naturliga vattendrag.

Rathbun (1977) kritiserar Wilson och Macleods utvärdering främst beroende på nackdelarna med deras "normalized mean error". Han framhåller att positiva och negativa fel eliminerar varandra och detta resulterar i att det redovisade felet kan bli litet trots att det i verkligheten finns stora positiva och negativa fel. Detta kan vara förklaringen till de mycket låga normaliserade medelfelen i tabell 4.4 för vissa ekvationer.

4.3 Rathbuns utvärdering (1977)

Tsivoglou och Wallac publicerade 1972 omfattande data för materieöverföringskoefficienter för naturliga vattendrag som hade erhållits med spårämnesteknik. De var samlade från floderna Flint, Chattahoochee, South, Jackson och Patuxent i USA.

Omfattande hydrauliska data hade också insamlats för varje flod, vilket gjorde dataserien idealisk för utvärdering av ekvationer för prediktering av K_La-värden. Rathbun (1977) använde dataserien i en sådan utvärdering av olika ekvationer. Materieöverföringskoefficienten beräknades med varje ekvation för varje experimentell dataserie. Efteråt beräknade han uppskattningens standardfel och "normalized mean error" (trots att han tidigare har kritiserat Wilson och Macleod för användning av detta mätetal) för predikterade värden för varje enskild flod såväl som för alla fem floderna.

Uppskattningens standardfel (E_s) och "normalized mean error" för prediktiva ekvationer framgår av tabell 4.5. Felen definieras enligt ekvationerna (4.1) respektive (4.4).

Författare	Ekv.nr	Chattah	nooche	Jac	kson	Fl	int	So	puth	Pate	uxent	Alla	floder
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
O'Connor-Dobbins (1956)	3,6	0.049	120	0.0708	-12.2	0,176	81.9	0.186	90.2	0.171	120	0.138	61.0
Churchill et al (1962)	3.9	0.048	114	0.101	-49.8	0,131	8.98	0.186	75,4	0.056	20.5	0.123	19,3
Krenkel-Orlob (1963)	3.11	0.109	298	0.214	153	0.342	267	0.350	198	0.312	236	0.279	209
Dobbins (1964)	3.21	0.0270	64.2	0.075	41.9	0.182	140	0.122	62.8	0,196	147	0.126	78.3
Owens et al (1964)	3.22	0,067	160	0.075	5,20	0.038	156	0.402	198	0.308	216	0.275	122
(1964)	3.23	0.094	233	0.077	15.5	0.388	162	0.462	234	0.308	218	0.300	145
lsaacs-Gaudys (1969)	3.27	0,045	109	0.110	-58.7	0.103	-17.1	0.127	40.0	0.443	-12.7	0.101	-1.49
Thackson-Krenkel (1969)	3.30	0.0212	48.7	0,095	64.4	0.166	160	0.075	37.5	0.158	121	0.110	76,9
Negulescu-Rojanski (1969)	3.31	0.199	533	0.056	-4,42	0104	45.8	0.227	129	0.056	37.1	0.117	108
Parkhurst-Pomeroy (1972)	3,35	0,027	-35	0.097	-48.7	0.083	-13.2	0,092	-32,9	0.043	-12.3	0.082	-33,1
Tsivoglou≁Wallace (1972)	3.36	0.032	69.6	0.0376	0,06	0.045	1.63	0.076	24.2	0.055	-33.9	0.053	17.1
Bennet-Rathbun (1972)	3.37	0.039	92.7	0.099	54.0	0.369	208	0.302	153	0.343	252	0,248	132
Bennet-Rathbun (1972)	3.39	0.0781	194	0,075	15.8	0.347	158	0.379	194	0.307	219	0.261	130

Tabell 4.5 Standardfel i uppskattning (h⁻¹), (1), och "normalized mean error" (%), (2), enligt Rathbun (1977) för prediktiva ekvationer.

Av tabell 4.5 framgår klart att inget av de studerade sambanden förmår prediktera oxygenöverföringen väl för samtliga floder.

4.4 Sammanfattning

Utgående från Bennet-Rathbun (1972) och Wilson-Macleod (1974) samt Rathbun (1977) kan vi sammanfatta att:

- * Inget publicerat samband för prediktering av oxygenöverföring är allmänt tillämpbart. Även med de "bästa" sambanden kan predikterat och observerat värde lätt skilja på en halv tiopotens.
- * Resultaten från alla tre utvärderingarna tyder på att det är högst tvivelaktigt att tillämpa ekvationer erhållna från floder på rännor. An mer tveksamt torde det vara att tillämpa dem på ledningar.
METODER FOR BERAKNING OCH MATNING AV K, a-VARDE

Grundmodellen för oxygenöverföring i ett luft-vattensystem definieras enligt ekvation (2.12) som

$$\frac{dc}{dt} = K_{L}a (c_{m} - c_{L})$$

Följande principiella metoder finns för bestämning av K₁a-värde:

- a) Stationärt test (dc/dt = 0)
 - utan förbrukning av överfört oxygen
 - med förbrukning av överfört oxygen
- b) Icke-stationärt test $(dc/dt \neq 0)$
 - utan förbrukning av överfört oxygen
 - med förbrukning av överfört oxygen

I en avloppledning råder för det enskilda vätskeelementet icke stationära förhållanden.

- 5.1 <u>Principiella metoder för bestämning av K_La-värde i av-</u> loppsledningar
- 5.1.1 Icke-stationär luftning av rent vatten

En avloppsledning kan betraktas som en tubreaktor, se fig 5.1.



Figur 5.1 Oxygenöverföring i en avloppsledning där ledningen betraktas som en tubreaktor, (Harremoës m fl, 1976).

5

Det förutsätts att vattendjupet är litet i förhållande till ledningens längd. Om man förutsätter samma oxygenkoncentration i ett tvärsnitt men icke någon uppblandning i längdriktningen så gäller för ett längdelement vid stationär strömning att

$$H \cup c + F dx = H \cup (c + \frac{\partial c}{\partial x}) dx + H dx \frac{\partial c}{\partial t}$$
 (5.1)

$$\frac{F}{H} = \frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x}$$

Enligt ekv. (2.10):

 $F = K_L (c_m - c_L)$

$$\frac{F}{H} = \frac{K_L}{H} (c_m - c_L) = K_L a (c_m - c_L)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{dc}{dt} = K_L a (c_m - c_L)$$
(5.2)

Om elementet har koncentrationen (c $_0$) vid t=0 och koncentrationen c $_L$ på en punkt nedströms till vilken flyttiden är t, gäller:

$$\frac{dc}{c_{m} - c_{L}} = K_{L}a t$$

$$\int_{c_{0}}^{c_{L}} \frac{1}{c_{m} - c_{L}} dc = \int_{0}^{t} K_{L}a dt$$

$$-\ln \frac{c_{m} - c_{L}}{c_{m} - c_{0}} = K_{L}a t$$

och

$$K_{L}a = \frac{\ln(\frac{c_{m} - c_{L}}{c_{m} - c_{0}})}{t}$$
(5.3)

Uttrycket 5.3 kan användas om det är fullt klart att det enbart är oxygenöverföring mellan gas- och vätskefas som påverkar oxygenkoncentrationen i ledningen. Om oxygenkoncentrationen kan mätas på minst två punkter i ledningen och om transporttiden mellan punkterna 1 och 2 är känd så kan K_1 a-värdet beräkans ur:

$$K_{L}a = \frac{\ln d_1 - \ln d_2}{\Delta t}$$
(5.4)

där

d₁ = oxygendeficit i punkt 1 d₂ = oxygendeficit i punkt 2 som ligger nedströms punkt 1 ∆t = transporttiden från punkt 1 till punkt 2

Tekniken kallas ofta oxygendeficitmetoden och villkoren för användning av metoden är:

- a) att ett oxygendeficit existerar
- b) att oxygenförändringen är så stor att koncentrationsskillnaden mellan de två provpunkterna kan mätas med acceptabel noggrannhet
- c) att oxygenförbrukningen är försumbar
- d) att blandning över tvärsnittet är fullständig
- e) att i det fall oxygenkoncentrationen i övre mätpunkten varierar måste samma "vattenkropp" mätas vid bägge provpunkterna.

Om oxygendeficitet inte är tillräckligt kan man artificiellt sänka nivån genom injektering av natriumsulfit och en koboltkatalysator. All tillsatt natriumsulfit måste då vara oxiderad innan vattnet når den första provtagningspunkten.

Metoden för naturliga vatten har utvecklats av Gameson et al (1955) och modifierades senare av Gameson-Truesdale (1959). Krenkel och Orlob (1963) har utvecklat den för användning i rännor med recirkulation. 5.1.2 Icke-stationär luftning av oxygenförbrukande vatten Ekvation (5.1) förutsätter att ingen oxygenförbrukning sker. Då man har förorenat vatten i en avloppsledning gäller ej denna förutsättning. Ekvation (5.1) måste då kompletteras med en term för respiration inom elementet:

H U c + F dx = H U (c + $\frac{\partial c}{\partial x}$)dx + H dx $\frac{\partial c}{\partial t}$ + r' H dx som efter utveckling på samma sätt som i avsnitt 5.1.1 och insättning av α och β faktor (se 5.1.3) resulterar i:

$$\frac{dc}{dt} = \alpha K_{L} \alpha (\beta c_{m} - c_{L}) - r' \qquad (5.5)$$

Integreras med t=0, $c=c_0$ och t=t, $c=c_1$:

$$-\ln \frac{\beta c_m - c_L}{\beta c_m - c_0} = \alpha K_L at - \frac{r' t}{\beta c_m - c_L}$$

och att

$$\alpha K_{La} = \frac{-\ln \frac{\beta c_{m} - c_{L}}{\beta c_{m} - c_{0}} + \frac{r' t}{\beta c_{m} - c_{L}}}{t}$$
(5.6)

där

$$\alpha = \frac{(K_L a) \text{ vid förorenat vatten}}{(K_L a) \text{ vid rent vatten}}$$

$$\beta = \frac{(c_m) \text{ vid förorenat vatten}}{(c_m) \text{ vid rent vatten}}$$

r' = respiration

5.1.3 Relationen mellan oxygenöverföringen i rent respektive förorenat vatten

Vattnets förmåga att lösa oxygen är beroende på närvaron av andra lösta ämnen i vatten. Relationen mellan oxygens mättnadsvärde i förorenat vatten och mättnadvärdet vid renvatten brukar benämnas β-faktorn. β-faktorn är svår att mäta noggrant genom experiment men ligger normalt nära 1 och sällan under 0.9 (A.P.H.A., 1975, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater).

Förekomsten av föroreningar i vatten påverkar även K_La-värdet. Ytaktiva ämnen i vatten samt suspenderat material i höga koncentrationer minskar ytspänningen, ger stabilare vätskefilm och reducerar turbulensen vid ytan med minskad oxygenöverföring som följd. Relationen mellan rent och förorenat vattens oxygenöverföring skrivs som

 $K_{L}a$ (förorenat vatten) = $\alpha \cdot K_{L}a$ (rent vatten)

Värdet på α är normalt mindre än 1. Damhaug och Balmérs (1979) experimentella försök tyder på värden mellan 0.4 och 1.1 beroende på luftningsmetod och oxygenöverföringskapacitet. Det är vanligt att använda värden på 0.8-0.9.

5.2 <u>Mätteknik</u>

De aktuella metoderna för bestämning av oxygenöverföringskoefficienten i avloppsledningar som omtalas i avsnitt 5.1 kräver mätningar av oxygenkoncentration och respiration.

Mätmetoderna kan principiellt indelas i följande grupper:

- Metoder baserade för oxygenkoncentrationsmätning i vattenfasen
 - Winklermetodik eller
 Polarografiskt med membranelektrod
- 2. Metoder för oxygenkoncentrationsmätning i gasfasen
- Indirekta metoder. Istället för att mäta oxygenkoncentrationen i vattenfasen mäts koncentrationen av något annat ämne vars materieöverföringsförhållande till oxygen är känt.
- 4. Sulfitoxidationsmetoden.

5.2.1 Metoder baserade på oxygenkoncentrationsmätning i vattenfasen

Winklerproceduren är en grundläggande metod för bestämning av oxygen i vatten. Metoden publicerades redan 1888, men är fortfarande är den den mest använda för oxygenkoncentrationsbestämning.

Vid analysen fylls en flaska från botten med vatten så att all luft förträngs och så att flaskans volym omsätts flera gånger.

En alkalisk jodhaltig mangan(II)-lösning tillsätts. Oxygenet i vattnet oxideras härvid kvantitativt mangan(II)-jonerna. Vid upplösning sker en ny red-ox reaktion varvid de oxiderande manganjonerna reduceras och jodidjonerna oxideras. Bildad jod bestäms genom titrering med tiosulfat.

Vid den polarografiska metoden sker mätningen med en s k oxygenelektrod. Oxygengivaren är ett polarografiskt system, där ett tunt membran täcker två elektroder. Innanför membranen finns också en elektrolyt. Membranet är permeabelt för gaser och tillåter således dessa att passera in i cellen. Då en lämplig spänning påläggs mellan cellens elektroder, reduceras oxygen vid katoden vilket ger upphov till en ström genom cellen. Strömmen är proportionell mot den per tidsenhet genom membranet transporterade oxygenmängden. Membranet släpper igenom oxygen med en hastighet som är proportionell mot differensen i O₂-koncentration utanför och innanför membranet. Då oxygen snabbt konsumeras vid katoden kan man sätta 0_2 -koncentrationen innanför membranet = 0. Därigenom blir den hastighet med vilken membranet släpper igenom oxygen proportionell mot oxygenkoncentrationen utanför membranet. Då oxygenkoncentrationen ökar diffunderar oxygen hastigare genom membranet och ger upphov till en starkare ström i cellen. En lägre koncentration orsakar däremot en svagare ström. Eftersom transporten genom membranet är en diffusion så är temperaturkänsligheten stor. Strömmen från givaren kompenseras därför för temperaturförändringar genom en kompensationstermistor och matas sedan till en förstärkare. Utsignalen från förstärkaren avläses på ett visarinstrument.

5.2.2 Gasometriska metoder

Gasometriska metoder för bestämning av K_La-värde utvecklades enligt Zogorski et al (1973) av Copeland-Duffer (1964) som använde en plastkupol för att innesluta en del av luft-vattenfasgränsytan. Genom kontroll av volym, sammansättning, temperatur och lufttrycksändringen inom kupolen under ett tidsintervall kan oxygenöverföringen genom luft-vattenfasgränsytan bestämmas. Fasgränsytans area under kupolen och oxygendeficitet måste även vara kända.

5.2.3 Indirekta metoder

Användning av spårämne för mätning av oxygenöverföringskoefficient rapporterades första gången av Tsivoglou (1964).

Spårämnestekniken går ut på att mäta överföringen av ett inert spårämne mellan två provpunkter. Spårämnet består ofta av krypton-85 (Kr) eller radon-222 (Rn). På senare år har även methylklorid CH₃Cl och olika kolväten kommit till användning. (Wilcock 1984).

För mätning av oxygenöverföringen måste man först bestämma en relation mellan spårämnets materieöverföringskoefficient och materieöverföringskoefficienten för oxygen. Tsivglou fann en sådan relation som ej påverkades markant av föroreningar, temperatur och turbulens och den var:

$$\frac{K_{L}}{K_{L}}_{0_{2}} = 0.83$$
(5.7)
$$\frac{K_{L}}{K_{L}}_{0_{2}} = 0.70$$
(5.8)

För methylklorid är relationen temperaturavhängig (Wilcock, 1984).

$$\frac{K_{L}CH C1_{3}}{K_{L}O_{2}} = 4.323 e^{-\frac{530.97}{T}}$$
(5.9)

där

T = absolut temperatur (K)

Vid fältmätning av oxygenöverföringskoefficienten injekterar man samtidigt tre spårämnen och mäter deras koncentrationer i två punkter nedströms i vattendraget. De tre spårämnen som användes av Tsivoglou var: ett fluorescent färgämne, Rhodamine WT, tritium och krypton-85. Fluorescensfärgen ger information om transporttiden. Tritium ger information om den longitudinella dispersionen som sker mellan de två punkterna i vattendraget. Det tredje spårämnet, krypton-85 undergår samma dispersion som tritium plus att en del av gasen övergår till atmosfären beroende på materieöverföringen. Uppströms- och nedströms-koncentrationerna av krypton och tritium mäts. Skillnaden indikerar den mängd krypton som har övergått till atmosfären och användes för att beräkna $K_L a_k rypton$. Vet man $K_L a$ -värdet för krypton kan man beräkna $K_L a$ för oxygen genom relationen 5.10.

De förutsättningar som den indirekta metodiken bygger på är:

- 1. Tritium undergår enbart dispersion i flödet och förloras ej genom absorption, adsorption eller desorption.
- Löst krypton-85 undergår samma dispersion som tritium och förloras enbart genom desorption till atmosfären.
- 3. Relationen för gasöverföringskoefficienten för löst krypton-85 och oxygen är 0.83. Relationen påverkas ej nämnvärt av temperatur, turbulens och föroreningar.

Fördelen med spårämnestekniken är att metoden lätt kan appliceras i både rena och förorenade vatten eftersom den ej påverkas av respiration eller fotosyntes. En nackdel med metoden är bestämmelserna kring hantering av radioaktivt material samt att speciell apparatur krävs för att mäta radioaktivitet.

5.2.4 Sulfitoxidationsmetoden

Sulfitoxidationsmetoden för bestämning av K_La -värde föreslogs första gången av Cooper et al (1944). Metoden har använts för att

studera oxygenöverföring i tankreaktorer. Metoden är baserad på oxygenabsorption i en sulfitlösning. Om kobolt(II)-joner till-sätts som katalysator blir oxygenets reaktion med sulfit snabb och 0_2 -koncentrationen i lösningen nära 0.

Från nedgången av sulfitkoncentrationen på en sträcka med flyttiden t och med hjälp av nedanstående stökiometriska förhållanden kan överförd oxygenmängd beräknas.

$$2 \text{ so}_3^{2-} + 0_2 \neq 2 \text{ so}_4^{2-}$$

Med kännedom om dc/dt kan $K_{L}a$ -värdet sedan beräknas enligt:

$$K_{La} = \frac{\frac{dc}{dt}}{c_{m}}$$
(5.10)

Metodiken kan endast rekommenderas för jämförande studier. Absolutvärden på K_La , bestämda med sulfitoxidationsmetoden, blir för höga såsom visats av Balmér och Damhaug (1979).



6 UNDERSÖKNINGAR

6.1 Syfte

Syftet med undersökningarna var att kunna relatera oxygenöverföringen i rent vatten till grundläggande hydrauliska förhållanden i en ledning.

6.2 Försöksutrustning

Försöksanläggningen består av en 24 m lång betongledning med diametern 225 millimeter. Ledningen är byggd av 1 meters gummiringsfogade standard betongrör. En nedstigningsbrunn är placerad 15 meter nedströms inloppet. Brunnen är vallad upp till halva rördiametern. Vattengången genom brunnen har samma lutning som ledningen.

För att möjliggöra studier vid olika ledningslutningar är avloppsledningen lagd på en balkkonstruktion där stödens höjdläge kan varieras. Lutningen ställs in genom att höja/sänka stödbenen, med vattenståndsrören som indikator. Från tidigare feluppskattning med hjälp av avvägningsinstrument framgår att förfarandet kan ha ett största fel på ±2 mm vid varje nivåändring (Bäckman – Svensson, 1983), vilket innebär att genomsnittslutningen kan avvika från önskat värde med högst 0.08 o/oo.

Inkommande flöde mäts med vattenmätare, typ Woltman. Noggrannheten för denna är bättre än ±2% ner till 8 l/s. Mellan 1 l/s och 8 l/s är noggrannheten bättre än 5% (Bäckman - Svensson, 1983).

Utmed ledningen finns på varannan meter uttag för vattenståndsrör med vilka vattendjupet inne i ledningen kan observeras. I nedstigningsbrunnen kan vattennivån bestämmas med spetsmätare. Bäckman – Svensson (1983) har redovisat vattenytans variation i brunnen som funktion av lutning och fyllnadshöjd. Från dessa data kan felet i nivåmätningen under de betingelser som rått vid försöken uppskattas till max 2%.

Vattnet tillförs ledningen från en ståltank med basen 1000x1000 mm och höjden 2000 mm. Den effektiva volymen är 1.80 m³. I nedströmsändan finns en rektangulär tank av stål som har basstorleken 2000x1400 mm och höjden 750 mm. Både uppströms- och nedströmstankarna är rostskyddsbehandlade.

Preliminära försök visade att differensen i oxygenkoncentration mellan ledningens in- och utlopp var alltför liten för att möjliggöra en säker bestämning av oxygenöverföringen. Ett cirkulationssystem måste därför anordnas, vilket efter många problem (närmare skildrade i bilaga A) fick sin slutliga utformning (figur 6.1).



Figur 6.1 Försöksanläggning med recirkulationssystem.

Cirkulationssystemet består i huvudsak av ett krökt rör från betongledningens utlopp till nedströmstanken, en dränkbar pump placerad i nedströmstanken och en armerad gummislang, med diametern 100 mm som leder vattnet tillbaka till uppströmstanken.

För att minska luftflödet som dras med in i det krökta röret med vattenflödet konstruerades en luftspärr, en s k slöjventil som placerades i utloppsändan av betongledningen.

Förbindelseröret mellan utloppsledning och nedströmstank utformades för att minska turbulensen som uppstår vid vattnets fall från utloppet till tanken. Vidare infördes en gummislang i röret som av egen vikt föll ned mot vattenytan och därigenom minskade kontaktytan luft-vatten i röret. Vid hjässan av röret placerades en oxygenelektrod (Yellow Springs Instrument typ 54) med vilken partialtrycket av oxygen i gasfas i röret kunde mätas. En anslutning

70

för tillförsel av inert gas till det krökta röret installerades också. Genom tillförsel av inert gas, t ex kväve (N₂), kunde partialtrycket av oxygen i röret hela tiden anpassas till den aktuella oxygenkoncentrationen i vatten så att oxygenöverföringen i det krökta röret kunde elimineras.

För att minska turbulensen i nedströmstanken placeras en dämpningsanordning av metallnät framför det krökta rörets utlopp.

Oxygenöverföringen i båda tankarna eliminerades så långt möjligt genom att vattenytan täcktes med cellplastskivor. En viss exponerad vattenyta kunde dock ej undvikas. Denna utgjorde totalt ca 0.05 m^2 . Fasgränsytan luft-vatten i ledningen är $2.5-5 \text{ m}^2$ beroende på fyllnadshöjd. Den utanför ledningen mot luft exponerade ytan utgör således 1-2% av kontaktytan i ledningen. Vattnets oxygenhalt mäts med en givare (Yellow Springs Instrument typ 58) placerad i nedstigningsbrunnen (figur 6.2).



Figur 6.2 Placering av oxygengivaren och spetsmätaren.

Apparaturen för mätning av oxygenhalterna i vatten- och i gasfasen inne i det krökta röret kopplades till var sin skrivare av fabrikat Servogor, figur 6.3.



Figur 6.3 Oxygenmätarna och skrivarna.

6.3 <u>Försöksutförande</u>

Cirkulationsanordningen och tillgänglig pumpkapacitet begränsade ledningens största lutning till 30 promille och flödet till 30 l/s.

Vid försöken bestämdes oxygenöverföringen vid lutningarna 5, 10, 20 och 30 promille och vid flöden motsvarande fyllnadshöjder mellan 10 och 60 procent.

hink (bara vid försök med nytt vatten)

- öppna strypventilen så att pumpen får maximal kapacitet
- dosera lösningarna vid numpen

- 4. Flödesreglering:
 - vänta en tid motsvarande (2m³/Q) efter det att vattensyremätaren YSI58 börjat visa noll, så att kemikalierna blir fullständigt inblandade i hela vattenvolymen
 - stryp pumpen med ventilen så att fyllnadshöjden i ledningen blir den önskade
 - mät flödet med vattenmätaren
- 5. Tillförsel av inert gas
 - så snart vattnets oxygenhalt börjat stiga påbörjas nitrogengastillförsel till det krökta röret. Nitrogengasflödet justeras fortlöpande så att partialtrycket av oxygen i krökröret är i jämvikt med aktuella oxygenkoncentrationen i vattnet, se figur 6.5.
- 6. Fortlöpande kontroll
 - vattnets temperatur registreras var 10:e minut
 - flödet och fyllnadsgraden kontrolleras var 5:e minut
- 7. Försöken avbröts när en oxygenhalt på 60-70 % av mättnadsvärdet uppnåtts. I de fall oxygenöverföringen var långsam avbröts försöken tidigare. Dock drevs försöken alltid så lång tid att en oxygenhalt på minst ca 4 mg 0₂/l uppnåddes.

Normalt byttes vatten vid vart 4:e försök eller efter det att vattnet var mer än 2 dygn gammalt



Figur 6.5 Exempel på förändring av vattnets och luftens oxygenhalt i det krökta röret under ett försök.

6.4 <u>Utförda försök</u>

Totalt utfördes 50 försök vid 4 olika ledningslutningar. Två försök vid varje lutning utfördes under identiska förhållanden för att testa försökens reproducerbarhet. Utförda försök framgår av tabell 6.1.

Tabell 6.1	Ledningslutning,	flöde	och	relativ	fyllnadshöjd	vid
	utförda försök.					

Försök nr	Lutning	Relativ fyllnadshöjd	Flöde (l/s)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	0.005	0.20 0.30 0.35 0.35 0.38 0.40 0.43 0.44 0.49 0.55 0.57 0.60	2.8 5.5 8.0 10.0 11.2 12.8 13.6 16.1 20.0 22.5 25.0
13	0.01	0.10	1.3
14		0.20	4.2
15		0.20	4.1
16		0.24	5.6
17		0.27	7.0
18		0.30	8.3
19		0.33	10.6
20		0.35	13.1
21		0.37	14.3
22		0.40	16.7
23		0.43	19.0
24		0.47	22.0
25		0.50	25.0
26	0.02	0.10	1.8
27		0.15	3.6
28		0.17	5.0
29		0.20	7.9
30		0.23	10.0
31		0.25	12.5
32		0.27	14.0
33		0.27	13.6
34		0.29	15.6
35		0.32	18.5
36		0.35	20.0
37		0.36	22.5
38		0.38	25.0
39	0.03	0.10	2.5
40		0.13	4.0
41		0.15	5.0
42		0.20	8.8
43		0.22	10.2
44		0.24	13.2
45		0.25	14.6
46		0.27	17.2
47		0.30	20.0
48		0.32	22.5
49		0.35	26.3
50		0.35	26.0

6.5 Mätvärdesbearbetning

6.5.1 Beräkning av preliminärt K₁ a-värde

Utgående från oxygenkoncentrationsändringen som mäts kontinuerligt genom oxygengivaren i nedstigningsbrunnen bestäms oxygenöverföringen enligt metoden för icke-stationär luftning av rent vatten (kapitel 5.1.3).

Materieöverföringskoefficienten (K₁ a) beräknas enligt ekv (5.7):

$$(K_{La})_{system} = (-\ln \frac{c_{m} - c_{L}}{c_{m} - c_{o}})/t$$
 (6.1)

Detta sker genom att $\ln \frac{c_m - c_L}{c_m - c_0}$ avsätts mot t. Lutningen på regressionslinjen är lika med - K_La.

Det enligt ekvation (6.1) erhållna preliminära K_La-värdet korrigeras för följande faktorer:

- koncentrationsskillnader i systemet
- oxygenöverföring i cirkulationssystemet
- temperaturvariationer
- volym vatten i systemet

6.5.2 Korrektion för koncentrationsskillnad

Då oxygenöverföringen sker enbart i betongledningen så kommer oxygenkoncentrationen att variera både med tiden och avståndet från oxygengivaren. Detta är särskilt påtagligt vid låga flöden. Om man antar att uppströms och nedströms tankarna är totalomblandade kan man med hjälp av det preliminära $K_{L}a$ -värdet beräkna O_2 -halten på olika punkter i systemet och därmed också en genomsnittlig O_2 -koncentration. (Beräkningsprogrammet återfinns i bilaga B.) Med de sålunda funna genomsnittliga O_2 -koncentrationerna beräknas K_La på nytt så som beskrivit under punkt 6.5.1. Preliminärt beräknade och på ovanstående sätt korrigerade K_1a -värden skiljde med maximalt 15%.

6.5.3 Korrektion för oxygenöverföring i cirkulationssystemet

Den exponerade vattenytan i cirkulationssystemet är ca 0.05 m^2 vilket utgör 1-2% av den totala fria vattenytan vid de olika försöken. Det har antagits att 0_2 -överföringen över dessa ytor är densamma som i rörledningen och K_La-värdet har minskats med en faktor exponerad yta i cirkulationssystemet/vattenyta i rörledningen.

6.5.4 Temperaturkorrektion

Försöken är utförda vid en temperatur av 14-22 0 C. Alla K_La-värdena har omräknats till en temperatur av 20 0 C genom relationen

$$K_{La} (20^{\circ}C) = \frac{K_{La}(T^{\circ}C)}{1.024^{(T-20)}}$$
 (6.2)

I de fall där temperaturen varierar under försöken har först en medeltemperatur beräknats. Temperaturstegringen under ett försök var maximalt 3 $^{\rm O}$ C, i flertalet försök ej mer än 1 $^{\rm O}$ C.

6.5.5 Volymkorrektion

De erhålla K_La-värdena är systemets materieöverföringstal. I cirkulationssystemet är den totala vattenvolymen större än vattenvolymen i ledningen. Överfört oxygen blir alltså fördelat på en större vattenvolym än den som finns i ledningen. För att erhålla K_La-värdet för själva ledningen måste därför det erhållna K_Lavärdet multipliceras med en faktor som definieras som:

Då blir ledningens materieöverföringstal:

$$|K_{La}|_{1edning} = |K_{La}|_{system} \cdot \frac{1}{f}$$
 (6.4)

6.6 <u>Resultat</u>

Vid försöken har K_La -värden erhållits. Då det primärt är K_L som är av intresse har K_La -värden omvandlats till K_L genom multiplikation med respektive hydrauliskt medeldjup (d_m) .

Materieöverföringstalen vid de olika försöken redovisas i tabell 6.2. Värdena har korrigerats enligt kapitel 6.5.

Försök nr	Lutning	Relativ fyllnadshöjd	Flöde (1/s)	Ka-värde Lh	K -värde Lm.h
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	0.005	0.20 0.30 0.35 0.35 0.38 0.40 0.43 0.44 0.49 0.55 0.55 0.57 0.60	2.8 5.5 8.0 8.5 10.0 11.2 12.8 13.6 16.1 20.0 22.5 25.0	8.18 6.45 6.03 6.13 6.30 5.10 5.01 5.16 4.76 4.28 4.94 4.65	0.273 0.313 0.353 0.358 0.399 0.336 0.360 0.392 0.402 0.402 0.434 0.523 0.529
13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25	0.01	0.10 0.20 0.20 0.24 0.27 0.30 0.33 0.35 0.37 0.40 0.43 0.47 0.50	1.3 4.2 4.1 5.6 7.0 8.3 10.6 13.1 14.3 16.7 19.0 22.0 25.0	16.80 9.95 9.32 9.01 8.94 8.31 8.58 8.56 8.78 8.22 8.43 8.49 8.29	0.249 0.332 0.311 0.342 0.385 0.403 0.466 0.494 0.542 0.551 0.612 0.694 0.694
26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38	0.02	0.10 0.15 0.17 0.20 0.23 0.25 0.27 0.27 0.29 0.32 0.35 0.36 0.38	1.8 3.6 5.0 7.9 10.0 12.5 14.0 13.6 15.6 18.5 20.0 22.5 25.0	20.82 19.46 18.97 17.00 15.80 17.08 18.00 17.25 17.07 15.54 13.93 13.96 13.26	0.308 0.490 0.502 0.548 0.582 0.683 0.773 0.741 0.741 0.741 0.803 0.807 0.834 0.852
39 40 41 42 43 44 45 46 47 448 49 50	0.03	0.10 0.13 0.15 0.20 0.22 0.24 0.25 0.27 0.30 0.32 0.35 0.35	2.5 4.0 5.0 8.8 10.2 13.2 14.6 17.2 20.0 22.5 26.3 26.0	29.71 22.26 22.24 18.26 18.48 20.02 20.21 19.05 16.96 16.14 15.55 15.01	0.440 0.439 0.514 0.608 0.675 0.771 0.809 0.819 0.823 0.845 0.845 0.897 0.866

Tabell 6.2 Resultat

DISKUSSION

7

Vid försöken gjordes fyra replikat. Försök 3-4, 14-15, 32-33 och 49-50. Med undantag av försöksparet 49-50 så hade ledningens lutning förändrats och ställts in på nytt innan replikatet.

Som framgår av tab 7.1 så är reproducerbarheten mycket god, vilket indikerar att de tillfälliga felen vid undersökningarna varit små. (Vad beträffar systematiska fel har dessa diskuterats i kap 6.)

Försök nr	Lutning	Fyllnadshöjd	Flöde	K _L -värde
	m/m		1/s	m/h
3	0.005	0.35	8.00	0.352
4	0.005	0.35	8.50	0.358
14	0.01	0.20	4.20	0.332
15	0.01	0.20	4.15	0.310
32	0.02	0.27	14.00	0.742
33	0.02	0.27	13.60	0.800
49	0.03	0.35	26.30	0.897
50	0.03	0.35	26.00	0.866

Tabell 7.1 Resultat från replikattest.

En annan indikation på att mätdata är av god kvalitet får man genom att jämföra hur pass väl försöksdata kan anpassas till olika samband och jämföra med andra laboratorieundersökningar.

81

Flera författare har med utgångspunkt från dimensionsanalys konstaterat att K_L bör vara en funktion av vattenhastighet och djup. Många empiriska samband uttrycker också K_L som funktion av vattenhastighet och djup (se kap 3).

Av fig 7.1 och 7.2 framgår att K_L i huvudsak kan beskrivas som en funktion av vattenhastighet.



Fig 7.1 Sambandet mellan K_L-värde och vattenhastighet.

En regressionanalys ger sambandet:

$$K_{L} = 0.47 \cdot U^{0.87}$$
 (7.1)



Fig 7.2 Relationen mellan observerat K_L -värde och med ekvationen $K_L = 0.47 \cdot U^{0.87}$ predikterat K_L -värde vid olika lutningar.

Om man också tar med medeldjupet eller den hydrauliska radien i regressionsanalyser så erhålls bättre samband (fig 7.3 och fig 7.4).

Regressionsanalysen ger sambanden:

$$K_{L} = 0.82 \cdot U^{0.87} \cdot d_{m}^{0.18}$$
 (7.2)

respektive

$$K_{\rm L} = 1.025 \cdot U^{0.87} \cdot r_{\rm h}^{0.235}$$
 (7.3)







Fig 7.4 Relationen mellan observerat $K_L - v$ ärde och med ekvationen $K_L = 1.025 \cdot U^{0.87} \cdot r_h^{0.235}$ predikterat $K_L - v$ ärde vid olika lutningar.

I flertalet samband mellan K_L och vattenhastighet och djup relaterade i kapitel 3 så ingår djupet med en exponent <0 medan sambanden 7.2 och 7.3 visar en exponent >0. Förhållandena i ett cirkulärt rör skiljer sig emellertid från förhållandena i en ränna eller i en flod. Djupet i de flesta studerade floder är stort jämfört med de studerade djupen i rörledningen.

I ett par rännstudier (Krenkel och Orlov, 1963, Thackston och Krenkel, 1969) har man arbetat vid små djup, men i en ränna är bottenarean oberoende av djupet, vilket ej är fallet i en cirkulär rörledning. Vid små djup är det inte orimligt att anta att turbulensen vid vattenytan genereras vid botten. Då borde förhållandet bottenytan till fasgränsyta vara av betydelse. Den våta periferin i förhållande till bredden vid vattenytan är lika med

En regressionsananlys med avseende på U och $\frac{d_m}{r_h}$ visar följande samband:

$$K_{L} = 0.395 \cdot U^{0.902} \cdot (\frac{d_{m}}{r_{h}})^{0.680}$$
 (7.4)

I ekvation 7.4 är exponenten för U = 0.902. Om exponenten sätts till 1 blir uttrycket dimensionskorrekt. En ny regressionsanalys ger följande ekvation:

$$K_{L} = 0.40 \cdot U \cdot (\frac{d_{m}}{r_{h}})^{0.613}$$
 (7.5)

Figur 7.5 visar att ekvation 7.5 predikterar försöksdatan väl (korrelationskoeff = 0.969). Det goda sambandet indikerar att resonemanget ovan kan vara relevant.



Turbulenta förhållanden i ett strömmande vatten uttrycks enligt Krenkel och Orlob (1963) bäst med längd-dispersionskoefficienten. Denna har ej mätts vid försöken. Turbulensförhållande kan också beskrivas med Reynolds tal. I figur 7.6 visas hur K_L beror av Reynolds tal.





Ett samband mellan K_L och R_e föreligger uppenbart men det förefaller som också lutningen har betydelse. En regressionsanalys med avseende på R_e och s ger sambandet:

$$K_{\rm L} = 2.280 \cdot 10^{-5} \cdot R_{\rm e}^{0.90} \cdot {\rm s}^{0.15}$$
 (7.6)

Relationen mellan observerat K_L -värde och predikterat enligt ekv 7.6 visas i fig 7.7.

87



Fig 7.7 Relationen mellan observerat K_L -värde och med ekvation $K_L = 2.280 \cdot 10^{-5} \cdot R_e^{0.90} \cdot s^{0.15}$ predikterat K_L -värde vid olika lutningar.

Man bör notera att både R $_{\rm e}$ och s i ekvation 7.6 är dimensionslösa tal.

Laus⁻ (1972) dimensionsanalys gav:

$$\frac{K_{L}a \cdot r_{h}}{U} = f(R_{e}, \frac{U_{\star}}{U}, \frac{D \cdot \rho}{\mu}, \frac{B}{r_{h}})$$
(7.7)

En regressionsanalys av KL/U beroende av R $_{\rm e}$, U $_{\star}$ /U, och B/r $_{\rm h}$ ger följande samband:

$$\frac{K_{L}}{U} = 1.695 \cdot R_{e}^{0.003} \cdot \left(\frac{U_{\star}}{U}\right)^{0.305} \cdot \left(\frac{B}{r_{h}}\right)^{-0.290} (7.8)$$

Exponenten för R_e i ekvation 7.8 är mycket låg, vilket betyder att Reynoldstal har ej någon väsentlig påverkan i ekvation 7.8. En regressionsanalys av K_I/U beroende av bara U_{*}/U och B/r_h ger:

$$\frac{K_{L}}{U} = 1.675 \cdot \left(\frac{U_{\star}}{U}\right)^{0.333} \cdot \left(\frac{B}{r_{h}}\right)^{-0.213}$$
(7.9)
$$K_{L} = 1.675 \cdot U^{0.667} \cdot U_{\star}^{0.333} \cdot \left(\frac{B}{r_{h}}\right)^{-0.213}$$
(7.10)



Fig 7.8 Illustration av tillpassningen av ekvation 7.9 till försöksdata.

Utifrån teoretiska överväganden har Dobbins (1964) visat att K_L bör vara proportionell mot E^{0.375} där E är effekt per massenhet. Krenkel och Orlob (1963) har vid försök i rännor funnit att K_L är proportionell mot E^{0.408} och Parkhurst och Pomeroy (1972) har efter vissa något tveksamma operationer lyckats anpassa sina data från avloppsledningar till E^{0.375}. Om K_L från dessa försök avsätts mot E^{0.375} erhålls en bild såsom framgår av fig 7.9.



Fig 7.9 Sambandet mellan observerat K_L-värde och E^{0.375} vid olika lutningar.

Av figuren ser man direkt att andra faktorer också måste ha bety-delse. En regressionsanalys av K_L beroende på E^{0.375} och d_m ger följande samband:

$$K_{L} = 3.82 \cdot E^{0.375} \cdot d_{m}^{0.40}$$
 (7.11)

En bättre passning åtstadkommes om E har exponenten 0.345 istället för 0.375;

$$K_{\rm L} = 3.64 \cdot E^{0.345} \cdot d_{\rm m}^{0.420}$$
 (7.12)

Sambandet visas i fig 7.10.



Då förhållandet mellan den våta periferin och bredden vid vattenytan tros ha stor betydelse för materieöverföring (se sid 82) kan en regressionsanalys med avseende på E^{m} och $(d_{m}/r_{h})^{n}$ göras. Denna ger följande samband:

$$K_{\rm L} = 0.702 \cdot E^{0.374} \cdot \left(\frac{d_{\rm m}}{r_{\rm h}}\right)^{1.7}$$
 (7.13)

Potensen för E blir 0.374, vilket är mycket nära det teoretiska värdet. Dock är korrelationskoefficienten något lägre (R = 0.953) än för andra här presenterade samband. Sambandet visas i figur 7.11.



En regressionsanalys med avseende på U, s och ${\rm d}_{\rm m}$ ger sambandet:

$$K_{L} = 0.85 \cdot U^{0.80} \cdot d_{m}^{0.23} \cdot s^{0.0002}$$
 (7.14)

Detta samband överensstämmer nära med sambandet 7.2.

Thackston och Krenkel (1969) diskuterar hur ytturbulensen kan uttryckas och hävdar att den är proportionell mot friktionshastigheten, U_{*}, och visar med experimentella försök i en ränna att ett samband föreligger mellan K_Loch U_{*}.

Om de i denna undersökning uppmätta K_L-värdena ansätts mot U_{*} erålls följande samband:

$$K_{L} = 10.37 \cdot U_{\star}^{1.10}$$
 (7.15)

Om exponenten för U_{*}sätts till 1 ändras ekvation 7.14 till

$$K_1 = 8.8 \cdot U_*$$
 (7.16a)

som är dimensionskorrekt.

Ekvation 7.16a kan också skrivas som:

$$K_{\rm L} = 27.56 (r_{\rm h} \cdot s)^{0.5}$$
 (7.16b)

Sambandet mellan ekv 7.16 och observerade K_L-värden framgår av fig 7.12.



Fig 7.12 Relationer mellan observerat K_L -värde och med ekv K_L = 8.8 · U_{*} predikterat K_L -värde vid olika lutningar.

Överensstämmelsen vid dessa försök är bättre än vid Thackston och Krenkels. Dock framgår det tydligt av figuren att också andra faktorer har betydelse. Om hänsyn tas till vattendjupet i form av d_m eller r_h eller till förhållandet bottenytan till fasgränsyta d v s d_m/r_h så erhålls sambanden:

$$K_{L} = 23 \cdot U_{\star}^{1.1} \cdot r_{h}^{0.30}$$
 (7.17)

samt sambandet:

$$K_{L} = 4.65 \cdot U_{\star}^{0.95} \cdot (\frac{d_{m}}{r_{h}})^{1.05}$$
 (7.18)

Sambanden 7.17 och 7.18 beskriver båda försöksdata bra (korr.koeff 0.966 mot 0.964 för samband 7.18). Sambandet 7.18 har dock den positiva egenskapen att det är i det närmaste dimensionskorrekt.

En regressionsanalys med avseende på U_{*} och $(d_m/r_h)^m$ ger:

$$K_{L} = 6.55 \cdot U_{\star} \cdot (\frac{d_{m}}{r_{h}})^{0.66}$$
 (7.19)

med en korrelation koefficienten på 0.963.

Sambandet (7.19) framgår av figur 7.13.



lutningar.

Den enda undersökning av oxygenöverföring i avloppsledningar som tidigare publicerats är Parkhurst och Pomeroys arbete från 1972.

NDD

94

Det har tidigare visats att man inte kan beskriva oxygenöverföringen enbart som en funktion av $\mathrm{E}^{0.375}$ som Parkhurst och Pomeroy gjorde.

Granskar man Parkhurst och Pomeroys data finner man att de dels uppvisar mycket stor spridning – detta är i och för sig naturligt då det var fältmätningar – dels inte är proportionella mot $E^{0.375}$. Parkhurst och Pomeroy har istället förutsatt att detta samband gäller och sedan korrigerat med en faktor C_A, vilken valts så att det förutsatta sambandet med $E^{0.375}$ uppfylls.

I figur 7.14 passas ekvation 7.11 till Parkhurst och Pomeroys försöksdata (förutom en ledning med mycket brant lutning). Tillpassningen är nästan lika god som Parkhurst och Pomeroys egen ekvation (fig 7.15) Korrelationskoefficienten är 0.89 för ekv 7.11 mot 0.91 för Parkhurst och Pomeroys ekvation. Detta tyder på att även ett samband utan korrigering med C_A -faktorn (som ekv 7.11) skulle ha passat lika bra till Parkhurst och Pomeroys data.








Av fig 7.14 framgår att ekvation 7.11 tämligen väl beskriver Parkhurst och Pomeroys data. Dock är vid några låga $K_{L_{-}}$ värden de uppmätta värdena klart lägre än de predikterade. Parkhurst och Pomeroy gjorde sina mätningar på avloppsledningar i fält. Visserligen spolades ledningarna noga före försöken och hypoklorit doserades under försöken men man kan inte utesluta att biologisk oxygenförbrukning förekom i ledningarna under försöken.

Om så vore fallet så borde detta märkas mest i de ledningar där uppehållstiden var längst. I figur 7.16 är kvoten K mellan observerat och predikterat K_L-värde avsatt mot uppehållstiden. Även om inga entydiga samband föreligger så indikerar figuren att biologisk oxygenförbrukning under försöket kan ha medfört fel.

96





Flera författare, Dobbins (1964), Thackston och Krenkel (1969) och Parkhurst och Pomeroy (1972) tar hänsyn till den ytförstoring som kan ske t ex genom krusning av vattenytan. De har förutsatt att ytförstoringen är relaterad till Froudes tal. De enda som försökt visa ett samband med ytförstoringen är Thackston och Krenkel (1969). Men deras samband mellan ytförstoring och Froudes tal är så svagt att det närmast kan betraktas som obefintligt.

Thackston och Krenkel (1969) beskriver ytförstoringen C_A som:

$$C_{A} = 1 + F_{r}^{0.5}$$
 (7.20)

Dobbins (1965) beskrev den som

$$C_{A} = 1 + F_{r}^{2}$$
 (7.21)

medan Parkhurst och Pomeroy beskrev den som

$$C_{A} = 1 + 0.17 F_{r}^{2}$$
 (7.22)

I figur 7.17, 7.18 och 7.19 är det undersökt om något systematiskt samband föreligger mellan samband 7.20, 7.21 och 7.22 och kvoten K mellan observerade och predikterade K_L-värden enligt ekv. 7.11. Som framgår av figurerna finns ingen sådant samband.





Som det framgår av det ovanstående kan oxygenöverföringen i den undersökta självfallsledningen beskrivas väl med lätt mätbara parametrar. Alla mätningar har dock utförts i en 225 mm:s ledning. Då oxygenöverföringen också kunnat uttryckas som funktion av dimensionslösa tal framtagna genom betraktelse av vilka faktorer som påverkar oxygenöverföringen i strömmande vatten, ligger det nära till hands att också anta att de funna sambanden gäller för ledningar med andra diametrar. Försiktighet är dock att rekommendera intill dess experimentell bekräftelse finns då Krenkel och Orlob (1963) och Thackston och Krenkel (1969) gjorde försök med den enda skillnaden att Thackston och Krenkels ränna var dubbelt så bred som Krenkel och Orlobs. I den smala rännan var oxygenöverföringen ca 2 gånger större än i den bredare.

De funna sambanden summeras i tab 7.2.

Ekv nr Samband	Stand- avvik m.h	Korr koeff (R)
7.1 $K_{L} = 0.47 \cdot U^{0.87}$	0.064	0.946
7.2 $K_{\rm L} = 0.82 \cdot U^{0.87} \cdot d_{\rm m}^{0.18}$	0.042	0.976
7.3 $K_{L} = 1.025 \cdot U^{0.87} \cdot r_{h}^{0.235}$	0.042	0.977
7.4 $K_{L} = 0.395 \cdot U^{0.902} \cdot (\frac{d_{m}}{r_{h}})^{0.680}$	0.047	0.971
7.5 $K_{L} = 0.40 \cdot U \cdot (\frac{d_{m}}{r_{h}})^{0.613}$	0.048	0.969
7.6 $K_{L} = 2.280 \cdot 10^{-5} \cdot R_{e}^{0.90} \cdot s^{0.15}$	0.062	0.949
-0.213		
7.10 K _L = 1.675 · $U_{\star}^{0.667}$ · $U_{\star}^{0.333}$ · $(\frac{B}{r_h})$	0.048	0.969
7.11 K _L = 3.82 · $E^{0.375}$ · $d_m^{0.40}$	0.050	0.966
7.12 K _L = 3.64 · E ^{0.345} · d _m ^{0.420}	0.046	0.972
7.13 K _L = 0.702 · $E^{0.374} \cdot \left(\frac{d_m}{r_h}\right)^{1.7}$	0.059	0.953
7.14 K _L = 0.85 · U ^{0.80} · d _m ^{0.23} · s ^{0.0002}	0.044	0.975
7.15 K _L = 10.37 · U _* ^{1.10}	0.068	0.938
7.16 K _L = 27.56 $(r_h \cdot s)^{0.5}$	0.070	0.935
7.17 K _L = 23 · U _* ^{1.1} · $r_h^{0.30}$	0.050	0.966
7.18 K _L = 4.65 · $U_{\star}^{0.95}$ · $(\frac{d_m}{r_h})^{1.05}$	0.051	0.964
7.19 K _L = 6.55 · U _* · $(\frac{d_m}{r_h})^{0.66}$	0.053	0.963

Tabell 7.2 Uppsummering av samband med respektive standardavvikelser och korrelationskoefficienter. Av ekvationerna i tab 7.2 är ekv 7.5, 7.10, 7.16 och 7.19 dimensionskorrekta. Ekv 7.12 är mycket nära dimensionskorrekt. Då alla nämnda ekvationer utom ekv 7.16 har mycket god överensstämmelse med försöksdata (R>0.96), rekommenderas dessa ekvationer. Fast ekvation 7.16 innebär något sämre korrelation (R = 0.93), gör dess mycket enkla form den lätt användbar vid prediktering av materieöverföring.



8 SLUTSATSER

- Teoretiska modeller baserade på mekanismer för gasabsorption är i allmänhet ej användbara för att prediktera materieöverföring, främst beroende på svårigheter att uppskatta parametrar som filmtjocklek och filmförnyelsehastighet.
- 2. Huvuddelen av erfarenhetsmaterialet för oxygenöverföring i strömmande vatten är framtaget för naturliga vattendrag. I ett fåtal fall har rännor undersökts. Det är inte tillrådligt att använda empiriska samband framtagna på detta sätt för att prediktera oxygenöverföringen i självfallsledningar.
- 3. Undersökningar i laboratorium med oxygenöverföring till rent vatten i en 225 mm ledning visar att oxygenöverföringen kan relateras till lätt mätbara parametrar.



REFERENSER

- American Public Health Association (1975): Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC.
- Balmér, P och Damhaug, T (1975): An evaluation of four methods for the determination of oxygenation capacity. Vatten <u>31</u>, 16-26.
- Bennett, J P, Rathbun (1972): Reaeration in open-channel flow. US Geological Survey Professional Paper 737. United States Government Printing Office. Washington.
- Bäckman, H och Svensson, G (1983): Flödesmätning i avloppsnät med portabla utrustningar. Meddelande 69, Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Churchill, M A, Elmore, H L, Buckingham, R A (1962): The prediction of stream reaeration rates. Journal of the Sanitary Eng. Division, ASCE, <u>88</u>, 1-46.
- Cooper, C M, Fernstrom, G A, Miller, S A (1944): Performance of agitated gas-liquid contactors. Ind. Eng. Chem. <u>36</u>, 504-509.
- Crank, J, McFarlane, N R, Newby, J C, Paterson, G D, Pedley, J B (1981): Diffusion Processes in Environmental Systems. The MacMillan Press Ltd, London.
- Damhaug, T och Balmér, P (1975): On the determation of the α -value, Vatten 31, 27-32.
- Danckwerts, PV (1951): Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. Ind. Eng. Chem. 43, 1460-1467.
- Dobbins, W E (1956): The nature of the oxygen transfer coefficient in aeration systems in Biological treatment of sewage and industrial wastes, Reinhold Book Corp, New York, 141-148.
- Dobbins, W E (1964): BOD and oxygen relationships in streams. Journal of the Sanitary Eng. Division ASCE, 90, 53-78.

- Dobbins, W E (1965): Discussion of BOD and oxygen relationships in streams. Journal of the Sanitary Eng. Div. ASCE, <u>91</u>, 49-55.
- Fortescue, G E, Pearson, J R A (1967): On gas absorption into a turbulent liquid. Chem. Eng. Sci, <u>22</u>, 1163-1176.
- Gameson, A L H, Truesdale, G A, Downing, A L (1955): Reaeration studies in a lakeland beck. Inst. Water Eng. Jour., <u>9</u>, 571-597.
- Gameson, A L H, Truesdale, G A (1959): Some oxygen studies in streams. Inst. Water Eng. Jour., <u>13</u>, 175-187.
- Harremoës, P, Christensen, M H, Jörgensen, I P och Dahi, E (1976): Teoretisk vandhygiejne. Polyteknisk förlag, Köpenhamn.
- Higbie, R (1935): The rate of absorption of pure gas into a still liquid during short periods of exposure. Transactions, American Institute of Chemical Engineering, <u>31</u>, 365-390.
- Hildebrand, F B (1976): Advanced calculus for applications. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hultman, B, Nyberg F, Pettersson, A och Sporre, S (1978): Slamhudsbildning och biologiska reaktionsförlopp i avloppsledningsnät. Avdelningen för vattenvårdsteknik, TRITA-VAT-1783. Kungl. tekniska högskolan, Stockholm.
- Isaacs, W P, Gaudy, A F (1968): Atmospehric oxygenation in a simulated stream. Journal of the Sanitary Eng. Division, ASCE, 94, 319-344.
- King, C J (1966): Turbulent liquid phase mass transfer at a free gas-liquid interface. Ind. and Eng. Chem. Fund., <u>5</u>, No. 1, 1-8.
- Krenkel, P A, Orlob, G T (1963): Turbulent diffusion and the reaeration coefficient. Journal of the Sanitary Eng. Division, 128, 293-334.

- Lau, Y L (1972): Prediction equation for reaeration in openchannel flow. Journal of the Sanitary Engineering Division, 98, 1063-1068.
- Lau, Y L (1972): A review of conceptual models and prediction equations for reaeration in open-channel flow. Technical Bulletin No. 61, Inland Waters Branch, Department of the Environment, Ottawa, Canada.
- Lewis, W, Whitman, W G (1924): Principles of gas absorption. Ind. and Eng. Chem., 16, No 12, 1215-1220.
- Negulescu, M, Rojanski, V (1969): Recent research to determine reaeration coefficient. Water Research, 3, 189-202.
- O'Connor, D J, Dobbins, W E (1956): Mechanism of reaeration in natural streams. Journal of the Sanitary Eng. Division, ASCE, <u>82</u>, 1-30.
- O'Connor, D J, Dobbins, W E (1958): Mechanism of reaeration in natural streams. Am. Soc. Civil Eng. Trans., 123, 641-684.
- Owens, M, Edwards, R W och Gibbs, J W (1964): Some reaeration studies in streams. Int. J. Air Wat. Pollut., <u>8</u>, 469-486.
- Parkhurst, J D, Pomeroy, R D (1972): Oxygen absorption in streams. Journal of the Sanitary Eng. Division, ASCE, <u>98</u>, 101-124.
- Perry, J H (1963): Chemical Engineer's Handbook, 4th Ed. McGraw-Hill, New York.
- Rathbun, R E (1977): Reaeration coefficients of streams state of the art. Journal of the Hydraulics Engineering Division, ASCE, 103, 409-424.
- Roberts, P V (1984): Dependence of oxygen transfer rate on energy dissipation during surface aeration and in stream flow. Brutsaert, W and Jirka, G H D (ed) Gas Transfer at Water Surface. Reidel Publishing Co, 347-355.

- Stenstrom, M K, Brown, L C och Hwang, H I (1981): Oxygen transfer parameter estimation. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 107, 379-397.
- Thackston, E L, Krenkel, P A (1969): Reaeration prediction in natural streams. Journal of the Sanitary Eng. Division, ASCE, <u>95</u>, 65-94.
- Thackston, E L, Krenkel, P A (1969): Discussion of atmospheric oxygenation in a simulated stream. Journal of the Sanitary Eng. Division, ASCE, 95, 354-356.
- Tsivoglou, E C, O'Connell, R L, Walter, C M, Godsil, P J och Logsdon, G S (1964): Tracer measurements of atmospheric reaeration - 1 Laboratory studies. Journal of Water Pollution Control Federation, <u>37</u>, 1343-1362.
- Tsivoglou, E C, Cohen, J B, och Godsil, C M (1967): Tracer measurement of stream reaeration. Journal of Water Pollution Control Federation, 40, 285-305.
- Tsivoglou, E C, Neal, L A (1976): Tracer measurement of reaeration capacity of inland streams. Journal of Water Pollution Control Federation, 48, 2669-2688.
- Tsivoglou, E C, Wallace, J R (1972): Characterization of stream reaeration capacity. Report No. EPA-R3-72-012, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- VAV (1984): Hälsofarliga gaser i avloppsnät. VAV M44, Stockholm.
- Weber, W J (1972): Physicochemical processes for water quality control. Wiley-Interscience, New York.
- Wilcock, R J (1984): Methyl chloride as a gas-tracer for measuring stream reaeration coefficients - I Laboratory studies. Water Research, <u>18</u>, 47-52.

- Wilson, G T, MacLeod, N (1974): A critical appraisal of empirical equations and models for the prediction of the coefficient of reareation of deoxygenated water. Water Research, <u>8</u>, 341-366.
- Zogorski, J S, Faust, S D (1973): Atmospheric reaeration capacity of streams - Part I. Environmental Letters, <u>4</u>, 35-59.



Bilaga A UTBYGGNAD AV FÖRSÖKSANLÄGGNING

Den försöksanläggning som byggts upp i laboratoriet för projektet "Funktionskontroll av avloppsledningar" har använts för genomförandet av detta projekt. Den ursprungliga anläggningen framgår av figur A.1.



Figur A.1 Den ursprungliga försöksanläggningen.

Under ett förförsök fylldes ledningen med oxygengas och oxygenkoncentrationen i vatten mättes vid in- och utloppet. Vid ett flöde på 2.50 $1s^{-1}$ och $20^{\circ}/oo$ lutning fick vi en differens i oxygenhalt på ca 2 mgl⁻¹.

Det bedömdes att vid mindre lutningar och med luft i ledningar så skulle differensen i oxygenhalt kunna bli alltför liten för att den skall kunna mätas med önskad noggrannhet. Därför kompletterades ledningen med ett cirkulationssystem.

Cirkulationssystemet består av ett aluminiumrör från ledningen till en rektangulär tank av stål med måtten 2000x1400x750 mm. I tanken är en dränkbar pump (Weda L600) placerad. Pumpens kapacitet är 30 ls⁻¹ vid den aktuella manometriska uppfodringshöjden.

Från pumpen leds vattnet i en slang av armerad gummi med diametern 100 mm till en tank uppströms ledningen. Denna tank har måtten 1000x1000x2000 mm. Oxygenöverföringen i tankarna har eliminerats så långt som möjligt genom att vattenytan täckts med cellplastskivor. Förbindelsröret mellan utloppsledning och nedströmstank utformades för att minska turbulensen som uppstår vid vattnets fall från utloppet till tanken (Figur A.2).



Figur A.2. Försöksanläggning med cirkulationssystem.

Vidare placerades en luftspärr typ "slöjventil" strax innan förbindelseröret för att hindra luften som dras genom vattnets flöde till röret. (Figur A.3)

Dessa åtgärder gav ej tillräcklig reduktion av oxygenöverföringen i cirkulationssystemet och osäkerheten i försöksresultaten skulle bli alldeles för stor. Försök att minska kontaktytan genom att sätta övertryck i utrymmet mellan röret och gummislangen medförde Efter åtskilligt experimentarbete var det klart att det skulle bli mycket svårt att i tillräcklig grad minska oxygenöverföringen i cirkulationssystemet. En förutsättning för att oxygenöverföring skall ske är dock att det finns en differens mellan aktuell koncentration av oxygen i vatten och det mot aktuellt partialtryck svarande mättnadsvärdet. Om partialtrycket av oxygen i förbindelseröret hela tiden anpassades så att mättnadsvärdet för oxygen blev lika med aktuella oxygenkoncentrationen så skulle också oxygenöverföringen elimineras. Partialtrycket av oxygen kan lätt ändras genom att luften i förbindelseröret blandas med en inert gas i lämpliga proportioner.

För att praktiskt åstadkomma detta kompletterades anläggningen med en ledning för inert gas med tillhörande tub och en oxygengivare för kontroll av luftens oxygenhalt som installerades vid hjässan inne i förbindelseröret (Figur A.4).



Figur A.4 Utrustning för tillförsel av inert gas till cirkulationssystemet.

Efterföljande försök visade dock att det var mycket svårt att sänka partialtrycket av oxygen under ett värde motsvarande 1 mg/l (se figur 6.5). På grund av det ständiga luftflödet till det krökta röret behövdes mycket större mängder inert gas för att nedbringa oxygenhalten till noll.

116

nedstigningsbrunnen. Oxygenmätarna som var av typ YS1 var kopplade till var sin skrivare av typ Srvogor. Bilaga B DATORPROGRAM FOR BERÄKNING AV KONCENTRATIONSSKILLNAD

```
5
    REM **Datorprogram för beräkning av koncentrationsskillnad**
    PRINT "Ange flödet"
10
20
    INPUT Q
30
    PRINT "Ange K<sub>l</sub>a-värde"
40
    INPUT K
50
    PRINT "Ange sektionsarean"
60
    INPUT A
70
    PRINT "Ange mättnadskoncentration"
80
    INPUT c6
90
    PRINT "Ange startkoncentration"
100 INPUT c0
110 PRINT "Ange försökstid"
120 INPUT M
130 c1=c0
140 c2=c0
150 c3=c0
155 REM **Beräkning av cirkulationstid**
160 t = ((A*24+2.92)*1000)/(Q*60)
165 REM **Beräkning av antalet cirkulationer**
170 N = (M/t) + 1
180 PRINT Q,K,c6,t,N
190 FOR I=1 TO N
195 REM **Beräkning av koncentrationsökning**
200 c4=K*(c6-c0-c3)*t60
205 REM **Beräkning av koncentrationen i betongledningen**
210 c1=c3+c4
215 REM **Beräkning av koncentrationen i nedströmstanken**
220 c2=(Q*t*60*c1+(1120-Q*T*60)*c2)/1120
225 REM **Beräkning av koncentrationen i uppströmstanken**
230 c3=(Q*t*60*c2+(1800-Q*T*60)*c3)/1800
235 REM **Beräkning av medelkoncentration**
240 c5=(c1*A*24*c2*1.12+c3*1.8)/(A*24+2.92)
250 PRINT I*t,c4,c1,c2,c3,c5
260 PRINT "Medelkoncentration", c5
270 NEXT I
280 END
```



Figur B1 Principiell skiss över försöksanläggningen.

Försök nr	Lutning (s)	Fyllnadshöjd	Flöde m ³ s ⁻¹	Sektionsarea m ²	Bredd (B) m	Hastighet (U) m s ⁻¹	Hydr. medel djup (d _m) m	Hydr.radie (r _h) m
1234567890123456789012345678 111111111111222222222222393333333333333	0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.010 0.020 0	$\begin{array}{c} 0.20\\ 0.30\\ 0.35\\ 0.35\\ 0.35\\ 0.444\\ 0.449\\ 0.444\\ 0.449\\ 0.557\\ 0.443\\ 0.4220\\ 0.2220\\ 0.2220\\ 0.2220\\ 0.2220\\ 0.223\\ 0.335\\ 0.335\\ 0.443\\ 0.443\\ 0.443\\ 0.447\\ 0.443\\ 0.433\\ 0.$	2:85 8:50 8:50 8:01 8:01 8:01 8:01 8:01 8:01 8:01 8:0	$\begin{array}{c} 0.0060\\ 0.0100\\ 0.0124\\ 0.0124\\ 0.0124\\ 0.0135\\ 0.0145\\ 0.0145\\ 0.0170\\ 0.02236\\ 0.0220\\ 0.0220\\ 0.0220\\ 0.00260\\ 0.00260\\ 0.00260\\ 0.00260\\ 0.00260\\ 0.00260\\ 0.0115\\ 0.0124\\ 0.01483\\ 0.02207\\ 0.00460\\ 0.00237\\ 0.00460\\ 0.00237\\ 0.00460\\ 0.00237\\ 0.00460\\ 0.00237\\ 0.00460\\ 0.00237\\ 0.00460\\ 0.00237\\ 0.00460\\ 0.00237\\ 0.00460\\ 0.00270\\ 0.00286\\ 0$	00000000000000000000000000000000000000	$\begin{array}{c} 0.145505\\ 0.16625220\\ 0.166622700\\ 0.166622700\\ 0.166622700\\ 0.16662270\\ 0.16662270\\ 0.16662270\\ 0.16662270\\ 0.16662273\\ 0.16662273\\ 0.1662273\\ 0.1662223\\ 0.1662233\\ 0.1662233\\ 0.1662233\\ 0.1662233\\ 0.1662233\\ 0.1662233\\ 0.1662233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.166233\\ 0.1663333\\ 0.166333\\ 0.166333\\ 0.166333\\ 0.166333\\ 0.166333\\ 0.1663$	0.033 0.049 0.058 0.058 0.066 0.072 0.076 0.076 0.076 0.076 0.076 0.076 0.076 0.076 0.084 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.049 0.054 0.054 0.054 0.0552 0.067 0.089 0.052 0.089 0.052 0.023 0.037 0.023 0.037 0.037 0.023 0.037 0.037 0.023 0.037 0.023 0.037 0.023 0.037 0.023 0.037 0.052 0.052 0.052 0.052 0.052 0.052 0.052 0.052 0.0552	0.029 0.038 0.044 0.046 0.046 0.046 0.050 0.052 0.052 0.054 0.061 0.063 0.014 0.029 0.035 0.048 0.046 0.048 0.050 0.051 0.051 0.051 0.051 0.021 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.038 0.044 0.044 0.045 0.049

Försök nr	Lutning (s)	Fyllnadshöjd	Flöde m ³ s ⁻¹	Sektionsarea m ²	Bredd (B) m	Hastighet (U) m s ⁻¹	Hydr. medel djup (d _m) m	Hydr.radie (r _h) m
39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50	$\begin{array}{c} 0.030\\ 0.00\\$	$\begin{array}{c} 0 & -10 \\ 0 & -13 \\ 0 & -15 \\ 0 & -22 \\ 0 & -22 \\ 0 & -22 \\ 0 & -24 \\ 0 & -25 \\ 0 & -27 \\ 0 & -27 \\ 0 & -30 \\ 0 & -35 \\ 0 & -35 \\ 0 & -35 \\ 0 & -35 \\ 0 & -35 \end{array}$	2 * 5 4 • 0 5 • 0 8 * 8 10 * 2 13 • 2 13 • 2 14 • 6 17 * 2 20 * 0 22 • 5 26 • 3 26 • 0	$\begin{array}{c} 0.0020\\ 0.0030\\ 0.0037\\ 0.0060\\ 0.0068\\ 0.0074\\ 0.0078\\ 0.0078\\ 0.0078\\ 0.0078\\ 0.0078\\ 0.0074\\ 0.0078\\ 0.0074\\ 0.0078\\ 0.0078\\ 0.0074\\ 0.0078\\$	0 * 135 0 * 152 0 * 160 0 * 180 0 * 186 0 * 186 0 * 195 0 * 200 0 * 206 0 * 215 0 * 215 0 * 215	1 • 250 1 • 333 1 • 351 1 • 467 1 • 500 1 • 778 1 • 870 2 • 000 2 • 045 2 • 097	0.015 0.020 0.023 0.033 0.037 0.039 0.040 0.040 0.043 0.049 0.052 0.058	$\begin{array}{c} 0.014\\ 0.018\\ 0.021\\ 0.029\\ 0.031\\ 0.032\\ 0.035\\ 0.035\\ 0.038\\ 0.038\\ 0.041\\ 0.044\\ 0.044\\ 0.044\\ \end{array}$

К _L	Den samlade materieöverförings- koefficienten	LT ⁻¹
K _L a	Volymetrisk materieöverförings- koefficient	T-1
k _G	Materieöverföringskoefficient för transport genom gasfilm	L ⁻¹ T
k _H	1/h	L ⁻² T ²
к _L	Materieöverföringskoefficient för transport genom vätskefilm	LT ⁻¹
Μ	Massa	
m	Konstant	
N	Antalet datapunkter	
n	Konstant	
р	Partialtrycket	ML ⁻¹ T ⁻²
R	Korrelationskoefficient	
Re	Reynolds tal	dim.lös
r _h	Hydraulisk radie	L
r	Ytförnyelsehastighet	T ⁻¹
r'	Respiration	_{ML} -3 _T -1
S	Lutning	
1	Temperatur	
t	Tiden	T
U	Hastighet	LT ⁻¹
U*	Friktionshastighet	LT-1
۷	Vattenvolym	L ³
x,y,Z	Koordinatsystem	
α	Relationen mellan rent och förorenat vatte oxygenöverföring	ns
β	Relationen mellan oxygens mättnadsvärde i förorenat vatten och mättnadsvärdet vid renvatten	
ß	En faktor enligt ekvation 3.32-3.33	
к	Von Karmans konstant	LT-2

TECKENFÖRKLARING

А	Kontaktarean luft-vatten	L ²
a	Kontaktarean per volymsenhet, A/V	L ⁻¹
ā	Koefficient i ekv 3.32-3.33	
В	Vattenytans bredd	L
С	Chezys koefficient	L ^{0.5} T ⁻¹
C _A	En faktor som visar förhållandet mellan verkliga och projicerade luft-vattenkontak	tytan
С	Koncentration	ML ⁻³
с _L	Oxygenkoncentration i vatten	ML ⁻³
с _о	Startkoncentration	ML ⁻³
с _т	Mättnadskoncentration	ML ⁻³
C ₁ ,C ₂ ,C ₃ ,	C ₄ ,C ₅ Parametrar enligt ekv 3.14-3.19	
D	Diffusionskoefficient	$L^{2}T^{-1}$
DL	Dispersionskoefficient	$L^{2}T^{-1}$
d	Oxygendeficit	ML ⁻³
d _m	Hydrauliskt medeldjup	L
E	Usg – effekt per massenhet	L ² L ⁻³
Es	Standardavvikelse	⊤ ⁻¹
Ep	"The percent standard error of the estimate" enligt ekv 4.2	
erf	Error function	
F	Massflöde	${\rm MT}^{-1}$
f	En faktor enligt ekv. 6.3	
F	Massflöde per ytenhet	ML ⁻² T ⁻¹
Fr	Froudes tal	dimlös
g	Gravitationskonstant	LT ⁻²
Н	Höjden	L
h	Henrys konstant	_ ² ⊤ ⁻²
К	Koefficient	

δ	Tjockleken på vätskefilmen	L
ν	Viskositeten	MT ⁻²
ρ	Densiteten	ML ⁻³
φ	Funktionell relation	
σ	Ytspänning	_{MT} -2
ε	Virveldiffusionskoefficient	l ² T

INSTITUTIONENS NYA PUBLIKATIONS- OCH INTERNSKRIFTSSERIE

Publikationsserien

- 1:82 Årsrapport 1981.
- 2:82 Hedberg, T., Liljenzin, J.O., Fridemo, L., Sjölander,B. Sätt att minska radonhalten i dricksvatten. Forskningsrapport
- 3:82 Andersson, Ö., Hanaeus, J., Hedberg,T. Karläggning av vattenkvalitetsförändringar i distributionsnät, Stockholm 1981. Forskningsrapport
- 4:82 Sjölander, B., Hanaeus, J., Hedberg, T. Kartläggning av vattenkvalitetsförändringar i distributionsnät, Malmö 1980. Forskningsrapport
- 1:83 Arsrapport 1982
- 2:83 Hedberg, T. <u>Referat</u>. Hårdhetshöjning av mjuka vatten.
- 3:83 Lumley, D och Balmér, P Analysis of Operational Data Collected at the Eskilstuna Wastewater Treatment Plant
- 4:83 Kaffehr, B. Naturliga organiska ämnen i integrerade vattensystem. En litteraturstudie.

5:83 Jonasson, S. Förstudie – Ledningsgravar

6:83 Hedberg, T Undersökning av alkaliska filtermassor

- 7:83 Hedberg, T., Nilsson, U. Rörnätsundersökning i samband med hårdhetshöjning vid Arvika vattenverk. 8:83 Horkeby, G. Utprovning av metoder för bestämning av adenosintrifosfat (ATP) i aktivt slam. 1:84 Arsrapport 1983 2:84 Morrison, G.M.P. Heavy Metal Speciation Studies of Natural Waters: A review 3:84 Balmér, P. Erfarenheter med fällning av kommunalt avloppsvatten med kalk. 4:84 Hedberg, T. Om alkaliska filter för sura brunnsvatten. 5:84 Berg, P., Hultin, T. och Segerberg, B. Avfallsgruppen rapport 4. Atervinning av hushållsavfall genom sortering vid källan. Del IV Slutresultat. 6:84 Arehag, M., Berg, P., Hultin, T. och Segerberg, B. Avfallsgruppen rapport 5. Atervinning av hushållsavfall. Källsortering i Nårabregionen. 1:85 Arsrapport 1984 Kaffehr, Bela. 2:85
 - Karakterisering av organisk substans i utgående vatten från reningsverk.

3:85	Berg, Per EO. Source grouping technology - An introduction to a way of recycling household waste.
4:85	Lumley, Douglas. Eftersedimentering vid Ryaverket. – En analys av eftersedimenteringsbassängernas funktion.
5:85	Balmér, Peter. Försök med kvävereduktion.
6:85	Lumley, Douglas. Settling of activated sludge A study of limiting factors and dynamic response.
7:85	Berg, Per EO, Nilsson, Ragnar Glas, värt att återvinna
1:86	Årsrapport 1985
1:86e	Annual Report 1985
2:86	Balmér, Peter (red) Slam på odlad mark. Hot eller resurs. Referat av seminarium på Chalmers 4 dec 1985.
3:86	Taghizadeh-Nasser, Madjid Materieöverföring gas-vätska i avloppsledningar

Internskriftserien

1/82	Lund, A. och Ström, R. <u>Examensarbete</u> . Urtvättning och transport av partikulära föroreningar från hårdgjorda ytor i samband med regn. "Modellförsök".
2/82	Nygren, Sven-Olof B. <u>Examensarbete</u> . Betydelse av löst och partikulärt substrat för slam- produktionen vid aktivslamprocessen.
3/82	Nilsson, L. och Nord, L. <u>Examensarbete</u> . Reduktion av organisk substans med makroporös jonbytare vid renvattenframställning.
4/82	Hedberg, Torsten. <u>Förstudie</u> Dricksvatten från försurade sjöar. Ett försök i pilotskala att reducera aluminiumhalten.
5/82	Hedberg, Torsten. <u>Föredrag</u> Förändring av vattenkvalitet i distributionsnät.
6/82	Hedberg, Torsten. IWSA 82 Water Quality in the Distribution Network.
7/82	Hedberg, T. och Andersson, Ö. <u>Redovising</u> Funktionsbesiktning av Marstrands vattenverk.
8/82	Bäckström, L., Zetterberg, M. <u>Examensarbete</u> . Privata avloppsserviser – en intervjuundersökning i 16 kommuner.
9/82	Bolinder, Lena och Ernbrink, Gudrun. <u>Examensarbete</u> . Renvattenförbrukningens variationer.
10/82	Johansson, B., Jonsson, S., Rahm, I., Stening, B., Teiland, T. <u>Examensarbete</u> . Föroreningsbelastning av dagvatten. Metodstudie tillämpad på Gullmarsfjorden.

- 11/82 Johansson, Thomas. <u>Examensarbete</u>. Teknisk-ekonomisk uppföljning av vatten- och avloppsinfodringar.
- 12/82 Andersson, G. och Einarsson, F. <u>Examensarbete</u>. Undersökning av vattenkvalitetsproblem i ett bostadsområde, Våglängdsgatorna, Västra Frölunda.
- 1/83 Johnson, Bo. <u>Examensarbete</u>. Rännstensbrunnars betydelse för dagvattnets föroreningsbelastning.
- 2/83 Bäckman, H och Svensson, G. Utvärdering av kaliberingspunkter vid flödesmätning i öppen ledning. - Presentation av en metod och ett datorprogram för ABC80
- 3/83 Hallquist, C., Riemsdijk, A., Söderstam, G och Wikström, I. <u>Examensarbete</u> Driftstudier av reningsverk med Järn(II)sulfat fällning.
- 4/83 Arvidsson, M. och Blomquist, U. <u>Examensarbete</u>.
 Miljöfarligt gods över Gullmarn. (Utgivet av Länsstyrelsen i Göteborgs och Bohus län, Naturvårdsenheten).
- 5/83 Söderstam, Gunilla. <u>Examensarbete</u>. Kemisk fällning med järn(II)salter – Litteraturstudie.
- 6/83 Hedberg, Torsten. <u>Föredrag</u>. Rening med hänsyn till distributionsnätet.
- 7/83 Johansson, E., Anderssson, Ö., Hedberg, T. <u>Utredning</u> Vattenkvalitetsförändringar i Distributionsnät, Stenungsund 1983.

8/83	Grane, Ingvar. <u>Examensarbete</u> Teknisk-ekonomisk uppföljning av avloppsinfiltration.
1/84	Hedberg, Torsten Försök med polyaluminiumsulfat (PAS) som fällnings- kemikalie.
2/84	Bergström, T., Pourasghari, H. <u>Examensarbete</u> Driftserfarenheter från markbäddar.
3/84	Hedberg, T. och Kaffehr, B. Oxidationsverfahren der Trinkwasseraufbereitung.
4/84	Bäckman, Hans. <u>Föredrag</u> Undersökningar för att bestämma ledningars funktion.
1/85	Andersson, Stefan och Kolstad, Björn. <u>Examensarbete</u> Undersökning av roterande silar.
2/85	Jonasson, Sven Läckande VA-ledningar. Beräkning av mättad vatten- strömning vid överläckning mellan ledningar.
3/85	Andersson, Ö., Hedberg, T. Aluminium i brunnsvatten. Översiktlig test av behand- lingsmetoder.
1/86	Andersson, Claes-Axel. <u>Examensarbete</u> Simulering av läckande avloppsledningar Ett beräk- ningsprogram för vattenströmning vid överläckning mellan ledningar.
2/86	Thomasson, Laila. <u>Examensarbete</u> Inläckning till avloppsledningar. – En undersökning av

Inläckning till avloppsledningar. – En undersökning av samband mellan flöde, temperatur och klorid för ett bostadsområde. Agersborg, Finn. <u>Examensarbete</u>

Kartläggning av inläckageförhållanden med hjälp av reningsverkens årsrapporter.

3/86