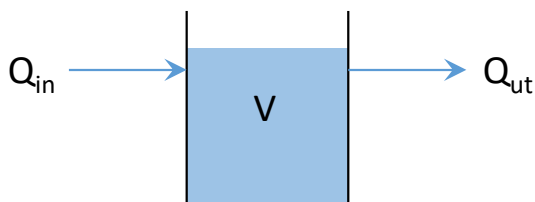


10. TANKREAKTORER

10.1 Flöden i tankreaktorer

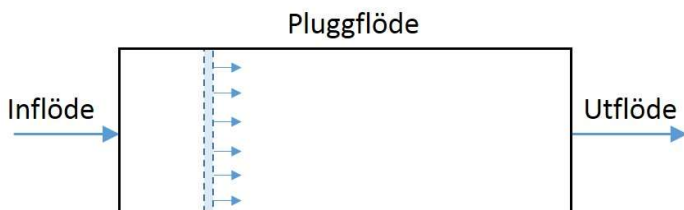
Inom vattenteknik är målet ofta att ta bort föroreningar från vatten med fysikaliska, kemiska, eller biologiska metoder. En mängd olika processer används. Tankreaktorer spelar en viktig roll i många processer, både för dricksvattenberedning och avloppsvattenrening samt lak- och dagvattenrening. En tankreaktor består av en tank i vilken det sker en reaktion. Ofta kallas en tankreaktor bara för "tank", "bassäng" eller "reaktor". Två parametrar är speciellt viktiga för hur väl tankreaktorn fungerar: vattnets flöde och reaktionshastigheten. Vattenflödet till tankreaktorn kan vara kontinuerligt eller satsvis. Här fokuserar vi på tankreaktorer med kontinuerligt flöde (Figur 10-1). För dessa gäller följande:

- Flödet in till tanken är lika med flödet ut från tanken ($Q = Q_{in} = Q_{ut}$)
- Vattenvolymen i tanken är konstant ($V = \text{konstant}$)
- Uppehållstiden för vattnet i tanken kan beräknas enligt ekvationen: $\theta = V/Q$ där θ är uppehållstiden (s), V är volymen (m^3) och Q är flödet (m^3/s).



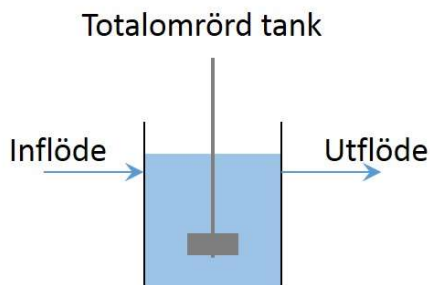
Figur 10-1. Tankreaktor med kontinuerligt flöde. Flödet Q_{in} är lika med Q_{ut} och vattenvolymen (V) är konstant.

Flödet genom tanken har två extrempåfall: pluggflöde (*eng. plug flow*) och totalomrörd (*eng. completely stirred tank*). Pluggflöde innebär att man tänker sig att en "plugg" av vatten förflyttar sig genom tanken utan att blandas med omgivningen (Figur 10-2). Detta betyder att varje enskild vattenmolekyl som förflyttar sig genom tanken har exakt samma uppehållstid.



Figur 10-2. Illustration av pluggflöde.

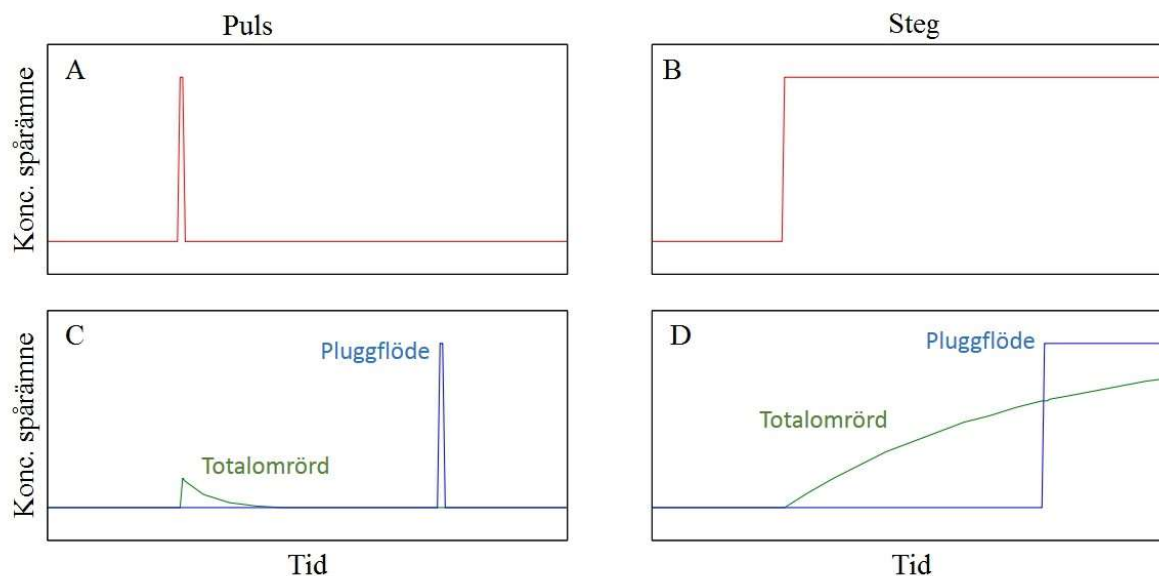
I en totalomrörd tank (Figur 10-3) tänker man sig att varje vattenmolekyl som flödar in har lika stor chans att befinna sig var som helst i tanken. Den hydrauliska uppehållstiden (θ) är ett genomsnittligt värde. Vissa vattenmolekyler har dock en betydligt kortare uppehållstid och andra har en betydligt längre uppehållstid.



Figur 10-3. Illustration av en totalomrörd tank.

10.2 Spårämnesanalys

I verkligheten är tankreaktorer oftast varken pluggflöde eller totalomrörda utan någonting däremellan. Genom att använda ett spårämne kan man undersöka flödet i en tank. Detta är t.ex. viktigt för att bestämma om man har tillräckligt lång kontakttid i en kloreringstank eller för att upptäcka hydrauliska kortslutningar (döda zoner) i en dagvattendamm eller i en reaktor i ett reningsverk. Spårämnet ska vara någonting som är lätt att mäta och som inte reagerar (konsumeras eller produceras) i tanken. Ett exempel är salter, t.ex. NaCl, vilka kan detekteras med konduktivitetmätningar. Fluorescerande färgämnen är också användbara eftersom de kan detekteras vid låga koncentrationer. Fluorescein, rhodamine WT och Pontacyl Brilliant Pink B används ofta i studier vid reningsverk.¹ Spårämnet tillsätts antingen som en puls eller som ett konstant höjning av inflödeskoncentrationen. Sedan mäter man kontinuerligt koncentrationen vid utflödet (Figur 10-4).

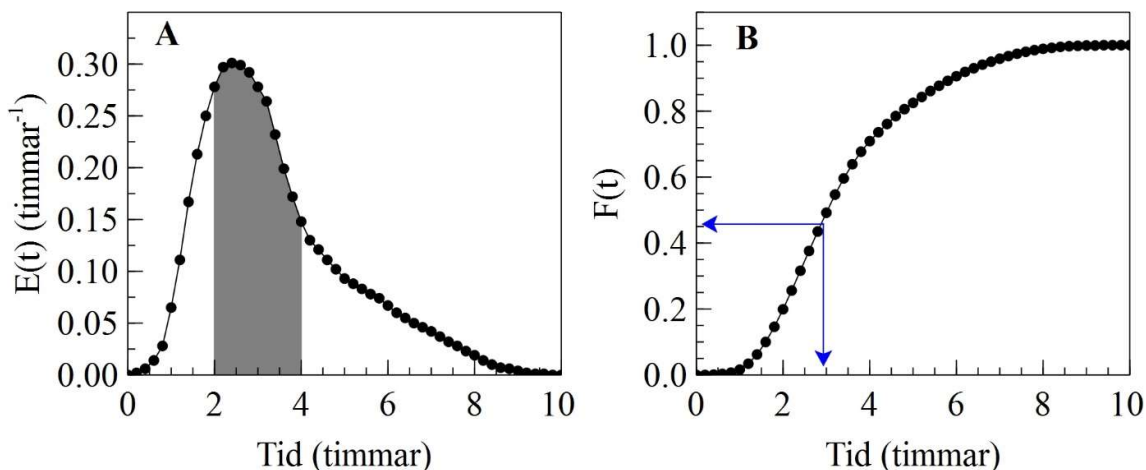


Figur 10-4. (A-B) Koncentrationen av spårämnet i inflödet till en tank vid tillsatts antingen som en puls (A) eller som ett steg (B). (C-D) Koncentration i utflödet från tanken vid tillsatts som puls (C) och steg (D). Om tanken har pluggflöde ser utflödeskoncentrationen ut som den blå linjen. Om tanken är totalomrörd ser det ut som den gröna. En verklig tank har antagligen en flödesprofil som ligger någonstans emellan.

Baserat på resultat från spårämnesförsök så kan vi beräkna fyra parametrar som ger oss mycket information hur vattnet beter sig i tanken.

- Uppehållstidsfördelningsfunktionen, $E(t)$, ger oss information om hur länge vattnet befinner sig i tanken. I Figur 10-5A kan vi t.ex. se att den största fraktionen av vattnet har en uppehållstid i tanken på cirka 2,5 timmar men att en viss fraktion av vattnet bara stannar i tanken i en timme och en annan fraktion stannar så länge som 8 timmar. Arealen under hela kurvan $E(t)$ är lika med ett. Den skuggade arean i Figur 10-5A visar hur stor fraktion av vattnet som har en uppehållstid mellan 2 och 4 timmar.
- Den kumulativa uppehållstidsfördelningsfunktionen, $F(t)$, ger oss samma information som $E(t)$, men är lättare att läsa av. Från Figur 10-5B kan vi t.ex. läsa av att cirka 45% av vattnet som strömmar in i tanken har en uppehållstid kortare än 3 timmar.
- Den genomsnittliga uppehållstiden, t_m .
- Uppehållstidens varians, σ^2 , ger oss en indikation om flödesförhållandena liknar pluggflöde eller omrörd tank. En omrörd tank har stor varians medan ett pluggflöde har liten. Standard-

deviationen, σ , är lika med kvadratroten ur variansen. Om man dividerar σ med den genomsnittliga uppehållstiden (σ/t_m) så får vi ett värde mellan 0 och 1. Värdet 0 innebär perfekt pluggflöde och värdet 1 innebär en perfekt omrörd tank.

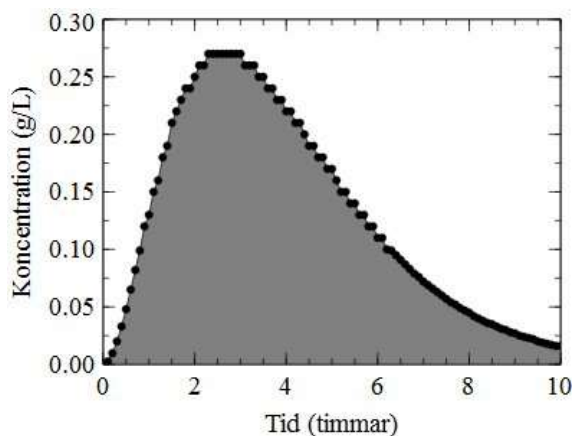


Figur 10-5. (A) Uppehållstidsfördelningsfunktionen, $E(t)$. Som ett exempel visas att fraktionen vatten som har en uppehållstid på 2-4 timmar i tanken motsvaras av den skuggade arean. (B) Den kumulativa uppehållstidsfördelningsfunktionen, $F(t)$. Som ett exempel visas att cirka 45% av vattnet som strömmar in till tanken har en uppehållstid kortare än 3 timmar.

Data från spårämnesförsök förekommer ofta som tabeller där spårämnets koncentration i utflödet av tanken har mätts med jämna tidsintervall. Beräkningsmetodik för att tolka sådan data beskrivs nedan för spårämnesförsök som utförts med pulshöjning och steghöjning. Vid en pulshöjning pågår försöket tills koncentration har återgått till bakgrundskoncentrationen. Vid en steghöjning av spårämnet pågår vanligtvis försöket tills koncentration i utflödet är lika stor som koncentrationen i inflödet.

Beräkningsmetodik – pulshöjning

Antag att vi har resultat från ett spårämnesförsök där en puls av spårämnet har tillsatts i inflödet till reaktortanken vid $t=0$. Vi har mätt koncentrationen av spårämnet i utflödet från tanken (Figur 10-6).



Figur 10-6. Data från ett spårämnesförsök.

Steg 1 – beräkna $E(t)$

Först vill vi räkna ut uppehållstidsfördelningsfunktionen, $E(t)$.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

$C(t)$ är koncentrationen av spårämnet vid tiden, t . Integralen i nämnaren är lika med den skuggade arean i Figur 10-6 (om vi antar att 10 timmar är ungefär lika med ∞ i det här fallet). Om vi skriver resultaten från spårämnesförsöket som en tabell kan vi räkna ut de värden vi behöver för att få $E(t)$. Kolumn ” $X=C(t) \cdot \Delta t$ ” i Tabell 10-1 nedan visar hur vi kan räkna ut nämnaren i ekvationen ovan. Sedan kan vi lätt räkna ut $E(t)$.

Tabell 10-1. Beräkning av $E(t)$ baserat på uppmätta spårämneskoncentrationer, $C(t)$. Δt är tidsintervallet mellan varje mätpunkt.

t	$C(t)$	$X=C(t) \cdot \Delta t$	$E(t)$
t_0	C_0	$X_0=0$	$E_0=C_0/X_{sum}$
t_1	C_1	$X_1=((C_1+C_0)/2) \cdot (\Delta t)$	$E_1=C_1/X_{sum}$
t_2	C_2	$X_2=((C_2+C_1)/2) \cdot (\Delta t)$	$E_2=C_2/X_{sum}$
t_3	C_3	$X_3=((C_3+C_2)/2) \cdot (\Delta t)$	$E_3=C_3/X_{sum}$
...
t_N	C_N	$X_N=((C_N+C_{N-1})/2) \cdot (\Delta t)$	$E_N=C_N/X_{sum}$
		$X_{sum} = \sum_{i=0}^N X_i$	

Figur 10-7 visar funktionen $E(t)$. Vi kan se att den har precis samma form som $C(t)$. Integralen av $E(t)$ med avseende på t , dvs den skuggade arean under kurvan, är dock lika med 1. Detta är praktiskt när vi ska analysera resultaten. Baserat på $E(t)$ kan vi räkna ut flera relevanta parametrar inklusive den kumulativa uppehållstidsfördelningen $F(t)$, den genomsnittliga uppehållstiden i tanken t_m , samt uppehållstidens varians (σ^2).

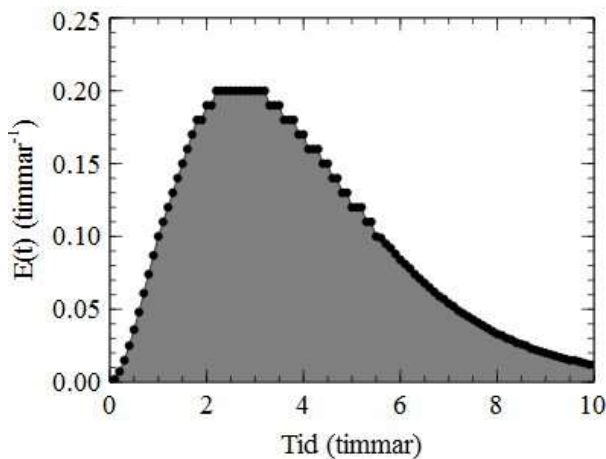
Steg 2 – beräkna $F(t)$

$F(t)$ är den kumulativa uppehållstidsfördelningen och beräknas med ekvationen nedan.

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt$$

Vi beräknar $F(t)$ numeriskt med hjälp av Tabell 10-2. Om vi tar våra värden på t och $E(t)$ som vi räknade ut i Tabell 10-1 ovan, kan vi räkna ut $F(t)$ med följande ekvation:

$$F_i = F_{i-1} + (\Delta t) \cdot (E_i + E_{i-1})/2$$

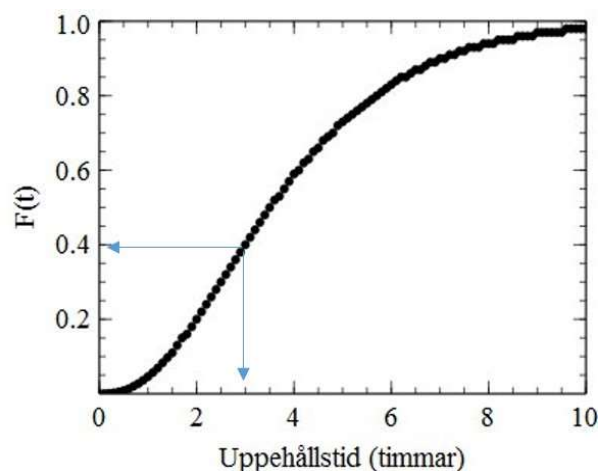


Figur 10-7. Uppehållstidsfördelningen $E(t)$ beräknad från spårämnesdata.

Tabell 10-2. Beräkning av den kumulativa uppehållstidsfördelningen, F(t).

t	E(t)	F(t)
t ₀	E ₀	F ₀ =0
t ₁	E ₁	F ₁ = F ₀ +(Δt)·(E ₁ +E ₀)/2
t ₂	E ₂	F ₂ = F ₁ +(Δt)·(E ₂ +E ₁)/2
t ₃	E ₃	F ₃ = F ₂ +(Δt)·(E ₃ +E ₂)/2
...
t _N	E _N	F _N = F _{N-1} +(Δt)·(E _N +E _{N-1})/2

Funktionen F(t) kan ge oss viktig information om uppehållstidsfördelningen i tanken. I Figur 10-8 kan vi t.ex. läsa av att ungefär 40% av vattnet som flödar in i tanken har en uppehållstid som är kortare än 3 timmar. Detta betyder också att 60% av vattnet har en uppehållstid som är längre än 3 timmar.

**Figur 10-8. Den kumulativa uppehållstidsfördelningen F(t).****Steg 3 – beräkna t_m**

Baserat på funktionen E(t) kan vi räkna ut den genomsnittliga uppehållstiden för vattnet i tanken (t_m).

$$t_m = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt$$

Detta kan vi göra numeriskt baserat på våra tabulerade värden av E(t). Tabell 10-3 visar hur vi räknar ut t_m. Värdet på t_m som vi mätt upp med hjälp av spårämnesanalys kan sedan jämföras med den teoretiska uppehållstiden i tanken (θ) som vi får genom att dividera volymen med flödet (θ=V/Q). Om t_m är betydligt mindre än θ så betyder det att finns ”döda” zoner i tanken och att dess hela volym inte används effektivt.

Tabell 10-3. Beräkning av den genomsnittliga uppehållstiden i tanken, t_m.

t	E(t)	X=t·E(t)	Y=X·Δt
t ₀	E ₀	X ₀ =t ₀ ·E ₀	Y ₀ =0
t ₁	E ₁	X ₁ =t ₁ ·E ₁	Y ₁ =((X ₁ +X ₀)/2)·(Δt)
t ₂	E ₂	X ₂ =t ₂ ·E ₂	Y ₂ =((X ₂ +X ₁)/2)·(Δt)
t ₃	E ₃	X ₃ =t ₃ ·E ₃	Y ₃ =((X ₃ +X ₂)/2)·(Δt)
...
t _N	E _N	X _N =t _N ·E _N	Y _N =((X _N +X _{N-1})/2)·(Δt)
			$t_m = \sum_{i=0}^N Y_i$

Steg 4 – beräkna σ²

Variansen, σ², är ytterligare en parameter som vi kan använda för att beskriva flödet i tanken. Variansen, vilket är standarddeviationen i kvadrat, räknas ut med följande ekvation:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 \cdot E(t) dt$$

Vi räknar ut σ² baserat på våra tabulerade värden av t och E(t) (Tabell 10-4). Variansen är ett mått på vilken typ av flöde som vi har i tanken. Ett lågt värde på σ² betyder att vi ligger nära pluggflöde och ett högt betyder att vi ligger nära totalomrörd.

Tabell 10-4. Beräkning av variansen, σ^2 .

t	E(t)	X=(t-t_m)²·E(t)	Y=X·Δt
t ₀	E ₀	X ₀ =(t ₀ -t _m) ² ·E ₀	Y ₀ =0
t ₁	E ₁	X ₁ =(t ₁ -t _m) ² ·E ₁	Y ₁ =((X ₁ +X ₀)/2)·Δt
t ₂	E ₂	X ₂ =(t ₂ -t _m) ² ·E ₂	Y ₁ =((X ₂ +X ₁)/2)·Δt
t ₃	E ₃	X ₃ =(t ₃ -t _m) ² ·E ₃	Y ₁ =((X ₃ +X ₂)/2)·Δt
...
t _N	E _N	X _N =(t _N -t _m) ² ·E _N	Y _N =((X _N +X _{N-1})/2)·Δt
			$\sigma^2 = \sum_{i=0}^N Y_i$

Beräkningsmetodik – steghöjning

Om spårämnesförsöket utförs med en steghöjning av inflödeskoncentrationen (Figur 10-4B) så kan man beräkna funktionen F(t) med följande ekvation: $F(t) = C(t)/C_{in}$, där C_{in} är koncentrationen av spårämnet i inflödet efter steghöjningen. Upphållstidsfördelningsfunktionen, E(t), kan sedan beräknas genom att derivera F(t).

Steg 1 – beräkna F(t)

$$F(t) = \frac{C(t)}{C_{in}}$$

Baserat på tabulerade data räknas F(t) enligt Tabell 10-5.

Tabell 10-5. Beräkning av F(t).

t	C(t)	F(t)
t ₀	C ₀	F ₀ =C ₀ /C _{in}
t ₁	C ₁	F ₁ =C ₁ /C _{in}
t ₂	C ₂	F ₂ =C ₂ /C _{in}
t ₃	C ₃	F ₃ =C ₃ /C _{in}
...
t _N	C _N	F _N =C _N /C _{in}

Steg 2 – beräkna E(t)

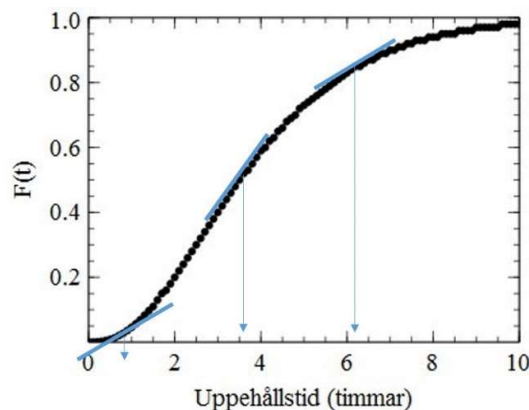
E(t) är derivatan av F(t).

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

För att beräkna $E(t)$ numeriskt måste man hitta lutningen på $F(t)$ -kurvan (Figur 10-9). Ett sätt att beräkna lutningen vid varje mätpunkt är att använda värdena för de två närliggande mätpunkterna, dvs lutningen $E_i=(F_{i+1}-F_{i-1})/(2\cdot\Delta t)$. För det första och sista värdet (E_0 och E_N) kan man dock bara använda en närliggande punkt (se Tabell 10-6).

Tabell 10-6. Beräkning av $E(t)$.

t	$F(t)$	$E(t)$
t_0	F_0	$E_0=(F_1-F_0)/\Delta t$
t_1	F_1	$E_1=(F_2-F_0)/(2\cdot\Delta t)$
t_2	F_2	$E_2=(F_3-F_1)/(2\cdot\Delta t)$
t_3	F_3	$E_3=(F_4-F_2)/(2\cdot\Delta t)$
...
t_N	F_N	$E_N=(F_N-F_{N-1})/\Delta t$



Figur 10-9. $E(t)$ är lika med lutning av $F(t)$ -kurvan. De blå linjerna och pilarna visar lutningen vid olika tidpunkter.

Steg 3 och 4 – beräkna t_m och σ^2

Använd $E(t)$ och samma metodik som vid en pulshöjning för att beräkna t_m och σ^2 .

10.3 Modellering av reaktortankar

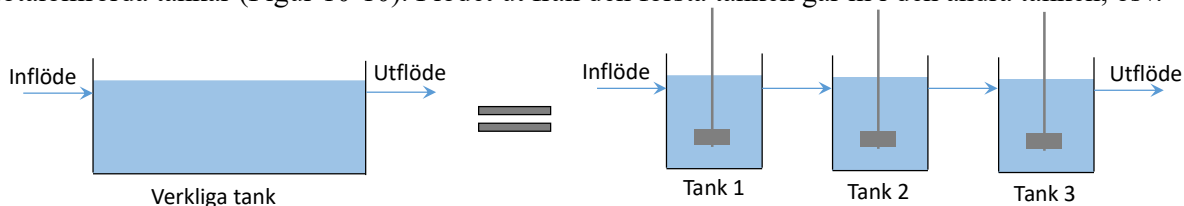
Verkliga tankreaktorer fungerar oftast varken som ideala pluggflödesreaktorer eller som totalomrörda tankar. För att beskriva verkliga tankreaktorer så finns det flera olika matematiska modeller att använda, t.ex.:

- Tankseriemodellen, vilken innebär att man beskriver den verkliga tanken som en serie av omrörda tankar.
- Dispersionsmodellen, vilken utgår från pluggflöde men lägger till en term som beskriver diffusion i tankens flödesriktning.
- Beräkningsströmningsdynamik (eng. "computational fluid dynamics, CFD"), vilket är det mest avancerade sättet att beskriva hydrauliken i tankreaktorer. Navier-Stokes ekvationer löses med numeriska metoder. Flera programvaror för CFD-modellering finns tillgängliga.

Tankseriemodellen presenteras nedan men det är viktigt att vara medveten om att det även finns andra modeller.

Tankseriemodellen

I tankseriemodellen antar man att den verkliga reaktortanken består av en serie med lika stora totalomrörda tankar (Figur 10-10). Flödet ut från den första tanken går in i den andra tanken, osv.



Figur 10-10. En verklig tank modelleras som en serie totalomrörda tankar.

Upphållstidsfördelningsfunktionen ($E(t)$) för en tankserie kan beräknas med följande ekvation, där N är antalet tankar i serie och θ är vattnets uppehållstid i hela tankreaktorn (V_{verklig}/Q). En härledning för den här ekvationen finns i Bilaga C.

$$E(t) = \frac{N^N \cdot t^{N-1}}{(N-1)! \cdot \theta^N} \cdot e^{-\frac{t \cdot N}{\theta}}$$

Ett stort värde på N betyder att flödet i den verkliga tanken är likt pluggflöde. Ett litet värde betyder istället att det är likt omrörd tank. Värdet på N kan bestämmas med hjälp av spårämnesförsök. Man kan t.ex. testa olika värden på N i ekvationen ovan och se vilken $E(t)$ -kurva som är mest lik den som uppmättes i spårämnesförsöket. Man kan också räkna ut variansen, σ^2 , och den genomsnittliga uppehållstiden, t_m . Antalet tankar i serie kan då beräknas med följande ekvation:

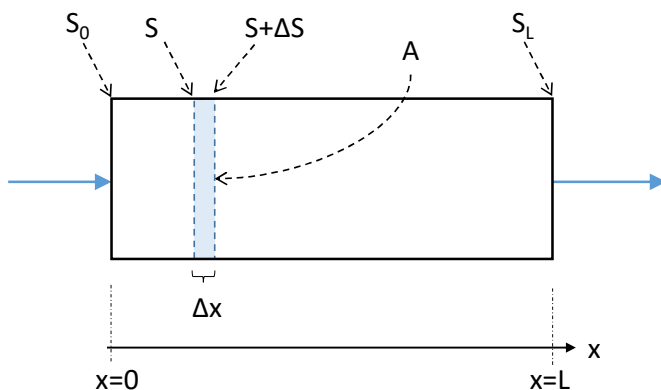
$$N = \frac{t_m^2}{\sigma^2}$$

10.4 Nedbrytning av föroreningar i PFR och CSTR

Pluggflödesreaktor (eng. *plug flow reactor*; *PFR*)

Antag att vi använder en pluggflödesreaktor för att bryta ned en förorening som finns i det inkommande vattnet (Figur 10-11). Vi tänker oss en delvolym av reaktorn med bredden Δx och arean A . Volymen blir $\Delta V = \Delta x \cdot A$. Koncentrationen av föroreningen som vi ska bryta ned är S i den ena kanten på delvolymen och $S + \Delta S$ i den andra kanten. En massbalans för S i delvolymen ser ut så här.

$$\frac{dS}{dt} \Delta V = Q_{in} \cdot S - Q_{ut} \cdot (S + \Delta S) - r \cdot \Delta V$$



Figur 10-11. Illustration av en pluggflödesreaktor. En delvolym med bredden Δx och genomsnittsarean A visas. En förorening med koncentrationen S ska brytas ned i reaktorn.

Vi vet att $Q_{in} = Q_{ut} = Q$. Alltså kan vi förenkla ekvationen.

$$\frac{dS}{dt} \Delta V = -Q \cdot \Delta S - r \cdot \Delta V$$

Vi vet också att $\Delta V = \Delta x \cdot A$ och att systemet är i jämvikt så $dS/dt = 0$.

$$0 = -\frac{Q \cdot \Delta S}{\Delta x \cdot A} - r$$

Om vi antar att Δx är oändligt liten kan vi skriva om uttrycket som differentialekvation.

$$\frac{dS}{dx} = -\frac{r \cdot A}{Q}$$

Om vi vet vad vi har för kinetik som beskriver reaktionshastigheten så kan vi lösa den här ekvationen för $S(x)$. Låt oss anta att vi har första ordningens kinetik, $r = k \cdot S$.

$$\frac{dS}{dx} = -\frac{k \cdot S \cdot A}{Q}$$

Om vi vill räkna ut koncentrationen av S vid punkten x i tanken kan vi lösa ekvationen på följande

sätt.

$$\int_{S_0}^{S_x} \frac{dS}{S} = \frac{-k \cdot A}{Q} \int_0^x dx \rightarrow \ln(S_x) - \ln(S_0) = \frac{-k \cdot A \cdot x}{Q} \rightarrow S_x = S_0 \cdot e^{\frac{-k \cdot A \cdot x}{Q}}$$

Låt oss titta på koncentrationen av S i utflödet, dvs där $x=L$. Vi vet att tankens totala volym är lika med tvärsnittsarean multiplicerat med längden, $V=A \cdot L$. Vi vet också att uttrycket för att beräkna uppehållstiden, $\theta=V/Q$. Därför kan vi förenkla ekvationen på följande sätt.

$$S_L = S_0 \cdot e^{\frac{-k \cdot A \cdot L}{Q}} \rightarrow S_L = S_0 \cdot e^{-k \cdot \theta}$$

Totalomrörd tank (eng. *completely stirred tank reactor; CSTR*)

Antag att vi använder en totalomrörd tank för att bryta ned en förorening, S, som finns i det inkommande vattnet. Hur räknar vi ut koncentrationen av föroreningen i utflödet? Eftersom tanken är totalomrörd så kommer koncentrationen i utflödet vara lika med koncentrationen i tanken. En massbalans på S ser ut så här.

$$\frac{dS}{dt} V = Q_{in} \cdot S_0 - Q_{ut} \cdot S - r \cdot V$$

Vi vet att $Q_{in} = Q_{ut} = Q$ och att systemet är i jämvikt så $dS/dt=0$. Alltså kan vi förenkla ekvation.

$$0 = Q \cdot (S_0 - S) - r \cdot V$$

Vi vet uppehållstiden i tanken $\theta=V/Q$ och vi antar att vi har första ordningens kinetik. Alltså kan ekvationen skrivas om så här.

$$0 = \frac{(S_0 - S)}{\theta} - k \cdot S$$

Vi löser ekvationen för S.

$$S = \frac{S_0}{1 + k \cdot \theta}$$

Om vi har en serie av totalomrörda tankar så blir utflödet från den första tanken inflöde till den andra tanken, osv. Antag att vi har tre tankar i serie (Figur 10-12). Antag också att vi har första ordningens kinetik, dvs $r = k \cdot S$. Från härledningen ovan vet vi hur vi räknar ut koncentrationen ut från Tank 1, S_1 .

$$S_1 = \frac{S_0}{1 + k \cdot \theta_1}$$

Utflödet från Tank 1 är inflöde till Tank 2. Koncentration, S_2 , blir alltså:

$$S_2 = \frac{S_1}{1 + k \cdot \theta_2} = \frac{\left(\frac{S_0}{1 + k \cdot \theta_1}\right)}{1 + k \cdot \theta_2} = \frac{S_0}{(1 + k \cdot \theta_1) \cdot (1 + k \cdot \theta_2)}$$

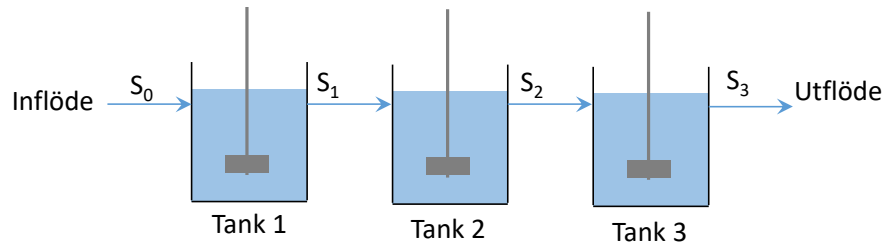
Följaktligen blir koncentration ut från den sista tanken:

$$S_3 = \frac{S_0}{(1 + k \cdot \theta_1) \cdot (1 + k \cdot \theta_2) \cdot (1 + k \cdot \theta_3)}$$

Om vi antar att vi har N antal tankar i en serie och att alla tankarna är lika stora (dvs $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \dots = \theta_N$) så kan vi förenkla uttrycket.

$$S_N = \frac{S_0}{\left(1 + \frac{k \cdot \theta}{N}\right)^N}$$

θ är här den totala uppehållstiden i hela tankserien.



Figur 10-12. En serie av flera totalomrörda tankar. Utflödet från Tank 1 är inflöde till Tank 2, osv.

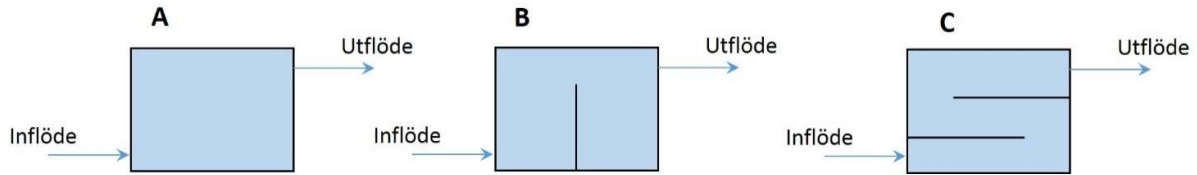
Referenser

1. Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D. Metcalf & Eddy Inc. (2004). Wastewater Engineering, Treatment and Reuse 4th Ed. New York, USA, McGraw-Hill.

10. ÖVNINGAR

Ö10-1. Antag att du har en damm med konstant volym vatten. Dammen har två inflöden och två utflöden. Flödena är $Q_{IN,1}=45 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_{IN,2}=10 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_{UT,1}=33 \text{ m}^3/\text{d}$. Vad är $Q_{UT,2}$?

Ö10-2. Figuren nedan visar tre tankar från ovan. I vilken tank tror du att strömningen har mest pluggflödeskaraktär? I vilken tank tror du vattnets uppehållstid är kortast (antag att alla tankar har samma volym och flödet är lika stort)?



Ö10-3. Du har gjort ett spårämnesförsök i en tank. Resultatet visas i tabellen nedan.

- Beräkna $F(t)$ och ange ungefär hur stor fraktion av inflödet som har en uppehållstid kortare än 2 timmar i tanken.
- Beräkna den genomsnittliga uppehållstiden och variansen.
- Om du skulle modellera tanken med tankseriemodellen, vilket värde på N skulle du använda?

Spårämnesdata

Tid (timmar)	Konc (g/L)
0	0
0,5	0,2
1	1,5
1,5	5
2	8
2,5	9
3	7,5
3,5	6
4	5,5
4,5	4
5	3,5
5,5	3,3
6	2,5
6,5	1,5
7	1
7,5	0,8
8	0,2
8,5	0,1
9	0

Ö10-4. En pluggflödesreaktor har en volym på 50 m³ och ett flöde på 10 m³/h. Antag att en förorening i inkommande vatten har en koncentration på 10 g/m³ och bryts ner med första ordningens kinetik ($k = 0,5 \text{ h}^{-1}$). Vad blir koncentrationen av föroreningen i utgående vatten?

Ö10-5. En totalomrörd reaktor har samma volym, flöde, föroreningskoncentration och kinetik som i uppgift Ö10-4 ovan. Vad blir koncentrationen av föroreningen i utgående vatten från den totalomrörda tanken?

Ö10-6. Vilken typ av reaktor ger bäst rening och varför?

FACIT

10. ÖVNINGAR

Ö10-3.

- a) Cirka 18%
- b) 3,5 h
- c) 5

Ö10-4. Lösningsgång:

För en pluggflödesreaktor med första ordningens kinetik kan koncentrationen i utgående vatten beräknas med följande ekvation (se kapitel 10 för härledning):

$$S_{ut} = S_{in} \cdot e^{-k \cdot \theta}$$

$$k = 0,5 \text{ h}^{-1}$$

$$\theta = V/Q = 50/10 = 5 \text{ h}$$

$$S_{in} = 10 \text{ g/m}^3$$

$$S_{ut} = 10 \cdot e^{-0,5 \cdot 5} = 0,82 \text{ g/m}^3$$

Svar: Koncentrationen av föroreningen i utgående vatten blir 0,82 g/m³.

Ö10-5. Svar: $S_{ut} = 2,86 \text{ g/m}^3$