

Blandning och omsättning i dricksvattenreservoarer

*Ola Nordblom
Olle Ljunggren*



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

SV-Utveckling (fd VA-Forsk) initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

SV-Utveckling styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anders Lago, ordförande	Södertälje
Olof Bergstedt	Göteborg Vatten
Roger Bergström	Svenskt Vatten AB
Daniel Hellström	Stockholm Vatten AB
Stefan Marklund	Luleå
Mikael Medelberg	Roslagsvatten AB
Anders Moritz	Linköping
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Peter Stahre	VA-verket Malmö
Göran Tägtström	Borlänge
Agneta Åkerberg	Falkenberg
Einar Melheim, adjungerad	NORVAR, Norge
Peter Balmér, sekreterare	Svenskt Vatten AB

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Blandning och omsättning i dricksvattenreservoarer
Title of the report:	Mixing and water exchange in drinking water storage tanks
Rapportens beteckning Nr i serien:	2007-15
Författare:	Ola Nordblom, Vatten Miljö Transport, Chalmers, Olle Ljunggren, Göteborgs va-verk
Projektnr:	20-111
Projektets namn:	Vattenomsättning i högreservoarer
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling (f.d. VA-Forsk), Avd. Vatten Miljö Transport, Chalmers tekniska högskola, Göteborgs va-verk, Åke och Greta Lissheds stiftelse
Rapportens omfattning Sidantal: Format:	56 A4
Sökord:	Vattenreservoar, blandning, stagnation, temperaturskiktning, numerisk modell, datorsimulerad strömning
Keywords:	Drinking water storage tank, mixing, stagnation, thermal stratification, numerical model, computational fluid dynamics
Sammandrag:	Undersökning av blandningsprocesser i dricksvattenreservoarer genom temperaturmätningar och datorsimuleringar. Analys av blandningsvillkor. Litteraturgenomgång och rekommendationer om utformning av reservoarer.
Abstract:	Investigations of mixing processes in drinking water storage tanks using temperature measurements and computer simulations. Analysis of mixing conditions. Literature review and recommendations for the design of storage tanks.
Målgrupper:	VA-ingenjörer, konstruktörer
Omslagsbild:	Högreservoaren i Kortedala. Foto: Ola Nordblom
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som pdf-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2007
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Föreliggande rapport redovisar resultaten från VA-Forskprojektet "Vattenomsättning i högreservoarer". Projektet har genomförts vid avd. Vatten Miljö Transport, Chalmers tekniska högskola, i samarbete med Göteborgs va-verk. Finansiering har skett genom VA-Forsk, Chalmers tekniska högskola, Göteborgs va-verk och Åke och Greta Lissheds stiftelse. Arbetet har utförts av Ola Nordblom med handledning av Professor Lars Bergdahl. Olle Ljunggren, Göteborgs va-verk, har varit projektledare. Driftpersonal på Göteborgs va-verk och teknisk personal på Chalmers har deltagit i samband med fältmätningar.

Bakgrunden till projektet var att Göteborgs va-verk i slutet av 90-talet planerade att göra ombyggnader för att förbättra vattenomsättningen i några av kommunens högreservoarer. Man insåg då att det saknades riktlinjer för hur reservoarer bör utformas så att vattenvolymen säkert omsätts. Problemet diskuterades med Chalmers, vilket ledde fram till ett doktorandprojekt i ämnet Vattenbyggnad. Syftet med doktorandprojektet var att undersöka hur olika parametrar påverkar blandningsförhållandena och därmed omsättningen i dricksvattenreservoarer, samt att ta fram anvisningar för den hydrauliska utformningen. VA-Forskprojektet var från början tänkt att utgöra en mindre del av avhandlingsarbetet och pågick formellt sett under tiden 2000-06 till 2002-06. Denna rapport är dock en slutrapportering av hela forskningsprojektet, inklusive den av VA-Forsk finansierade delen.

Innehållet i rapporten bygger till stor del på avhandlingen "Mixing and stagnation in drinking water storage tanks" (se referenslistan). Materialet i avhandlingen har dock kompletterats med praktiska anvisningar för utformning av reservoarer med hänsyn till omsättningen. Några av resultaten i avhandlingen har också presenterats på ett nytt sätt för att göra resultaten mer lättillgängliga och användbara. Under projektets gång har delresultat redovisats på seminarier och föreläsningar för kommuner, VA-ingenjörer och studenter i VA-teknik. Några artiklar har också skrivits i ämnet och publicerats i facktidskrifter och i internationella vetenskapliga journaler.

Göteborg, september 2007

Ola Nordblom Olle Ljunggren

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	7
Summary	8
1 Inledning	9
1.1 Påverkan på vattenkvaliteten	9
1.2 Klassificering av dricksvattenreservoarer	10
1.3 Pluggflödesprincipen och blandningsprincipen	11
1.4 Vad är bäst – pluggflöde eller blandning?	11
1.5 Några egenskaper hos turbulenta jetstrålar	12
1.6 Syfte och avgränsning	13
1.7 Rapportens upplägg	13
2 Metod	13
2.1 Val av metod	13
2.2 Temperaturmätningar	14
2.2.1 Beskrivning av reservoarerna	14
2.2.2 Instrumentering	15
2.3 Datorsimuleringar	16
2.3.1 Modell	16
2.3.2 Utdata från modellen	17
2.3.3 Validering av modellen	17
3 Resultat från temperaturmätningar i fält	17
3.1 Variationer i temperaturen	17
3.2 Data från Gårdstens högreservoar	18
3.3 Data från Kortedals högreservoar	21
3.4 Påverkan på vattenutbytet	23
3.5 Sammanfattning av observationer och mätresultat	24
4 Villkor för blandning i reservoarer	24
5 Resultat från simuleringar av blandning och stagnation	26
5.1 Analyserade fall	26
5.2 Cylindrisk reservoar med vertikalt inlopp	26
5.3 Cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp	28
5.4 Tvådelad cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp	29
5.5 Jämförelser med mätningar	29
5.6 Utveckling av blandningsvillkoret	31
5.7 Tolkning av resultaten	31
6 Resultat från simuleringar av strömningsmönster och blandningstider	32
6.1 Blandning utan densitetseffekter	32

6.2	Strömningsmönster	32
6.3	Blandningstider	34
6.4	Jämförelser med mätningar	37
6.5	Tolkning av resultaten	38
7	Dimensionering av inloppsdysa	39
8	Vattenomsättning i fullständigt omblandade tankar.....	39
8.1	Några definitioner.....	40
8.2	Massbalansmodell för en fullständigt omblandad tank.....	40
8.3	Beräkning av utbytestid.....	41
8.4	Beräkning av genomsnittlig uppehållstid (ålder).....	43
9	Användning av resultaten	45
9.1	Analys av blandning och omsättning.....	45
9.2	Kontroll av blandningsvillkoret	45
9.3	Beräkning av blandningstiden	46
9.4	Beräkning av utbytestid och genomsnittlig uppehållstid	46
9.5	Begränsningar	47
10	Slutsatser och rekommendationer	47
11	Sammanfattande diskussion	48
	Referenser.....	50
	Bilaga A: Densiteten som funktion av temperaturen	53
	Bilaga B: Diagram för kontroll av blandningsvillkoret.....	54
	B1. Cylindrisk reservoar med vertikalt inlopp.....	54
	B2. Cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp.....	55
	B3. Tvådelad cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp (Kortedala)	56

Sammanfattning

Rapporten redovisar resultat från undersökningar av blandningsprocesser i dricksvattenreservoarer. Motivet till studien är den potentiella risken för kvalitetsstörningar i samband med långa uppehållstider i reservoarer. Tyngdpunkten i studien ligger dock på den hydrauliska analysen. Det övergripande syftet är att utreda hur olika parametrar påverkar blandningsprocessen och hur man undviker stagnation. Studien begränsas till reservoarer som omsätts enligt blandningsprincipen, d.v.s. där den magasinerade volymen successivt byts ut genom utspädning med nytt vatten. Analys av pluggflödestankar ingår inte i studien.

Underlaget i utredningen utgörs dels av resultat från temperaturmätningar i två högreservoarer i Göteborgs kommun, dels av resultat från simuleringar med en tredimensionell datormodell. Mätningarna visade att en stabil temperaturskiktning uppstod i båda reservoarerna under sommarmånaderna när temperaturen i ledningssystemet var hög och inkommande vatten var 0,5–1,5 °C kallare än i reservoarerna. I dessa fall upphörde inblandningen av nytt vatten i den övre delen av volymen.

Observationerna i fält visar att det behövs en metod för att avgöra i vilka situationer temperaturskiktning och stagnation uppstår i reservoarer. Det mest kritiska fallet med avseende på omsättningen är då inkommande vatten har högre densitet. Då riskerar det nya vattnet att lägga sig i botten och tappas av innan det har hunnit blanda sig med resten av volymen. Om så sker kan flödet i reservoaren liknas vid ett pluggflöde av typen "sist in - först ut".

Baserat på grundläggande egenskaper hos turbulenta jetstrålar analyserades ett blandningsvillkor som tillämpats i tidigare studier. Blandningsvillkoret gäller fallet när inkommande vatten har högre densitet och bestämmer det lägsta (kritiska) inflöde som förhindrar stagnation i den övre delen av volymen. Konstanterna i blandningsvillkoret bestämdes med datormodellen för några vanliga typer av konstruktioner. Modellresultaten kontrollerades mot temperaturmätningarna och sammanställdes i diagram.

Med hjälp av diagrammen kan man enkelt ta reda på om stagnation uppstår för givna värden på inflöde, djup, inloppsdiаметer och temperatur. Diagrammen visar också hur ett stagnationsproblem kan åtgärdas genom att ändra på en eller flera av parametrarna. En generell slutsats är att risken för stagnation är störst i djupa reservoarer med stor inloppsdiаметer och horisontellt riktat inlopp. I många fall kan dock problem med stagnation lösas genom att reducera inloppsdiаметern med en dysa så att inloppshastigheten höjs över det kritiska värdet för reservoaren.

Summary

The report shows results from investigations of mixing processes in drinking water storage tanks. The study is motivated by the potential risk of water quality degradations caused by excessive aging in storage tanks. The focus is, however, on the hydraulic aspects of drinking water storage. The overall purpose of the work is to investigate how the mixing process is governed by geometric and operational parameters and how stagnation is avoided. The study is limited to tanks where the stored water is exchanged gradually with new water using the principle of mixing. Analyses of plug flow tanks (clearwell storage) is outside the scope of the study.

The study is based on results from temperature measurements and numerical simulations in two storage tanks in the municipal water distribution system of Göteborg, Sweden. The measurements showed that a stable thermal stratification was formed in both tanks during summer when the temperature in the distribution system was high and the inflowing water was 0.5–1.5 °C colder than the tank water. In these situations there was no supply of new water in the upper part of the volume.

The field observations show that a method is needed to determine when thermal stratification and stagnation is formed in storage tanks. The most critical situation with respect to the water exchange is when the inflow is denser than the tank contents. In that case, the inflowing water tends to remain in the lower part of the tank and leave during the following outflow period before mixing with the rest of the volume. This flow characteristic is similar to a plug flow of the “last in-first out” type.

On the basis of fundamental properties of turbulent buoyant jets a mixing condition used in some previous studies was derived and evaluated. The condition is applicable in cases of denser inflow and determines, basically, the lowest (critical) inflow rate to avoid stagnation in the upper part of the volume. The constants in the mixing condition was determined from computer simulations in some common examples of design. The results were validated against the temperature data and presented in diagrams.

Using the diagrams, it is simple to determine if a stagnant zone will develop for given values of the inflow rate, water depth, inlet diameter and temperature conditions. The diagrams also show how a stagnation problem can be solved by changing one or more of the parameters. A general conclusion is that stagnation is more likely to develop in deep tanks with large inlet diameter and horizontal inlet direction. Stagnation problems can, however, often be taken care of by installing a contracted nozzle on the inlet and increasing the inflow velocity above the critical value of the tank.

1 Inledning

1.1 Påverkan på vattenkvaliteten

Reservoarer ingår i de flesta distributionssystem för dricksvatten och har flera viktiga funktioner. De används dels för att utjämna variationer i vattenförbrukningen under dygnet, dels som nödreserv vid avbrott i leveransen från vattenverket eller då stora uttag måste göras för t.ex. brandsläckning. Genom att magasinera vatten i reservoarer får man, förutom högre leveranssäkerhet, också ett jämnare och mer ekonomiskt utnyttjande av vattenverk, pumpar och rörledningar och kan lättare upprätthålla erforderliga trycknivåer i ledningsnätet.

Det finns således flera fördelar med att magasinera dricksvatten i reservoarer, men det finns också nackdelar. Ett problem med reservoarer är risken för inläckage av föroreningar genom otätheter i väggar och tak, genom ventilationskanaler eller via bräddavlopp (Hult 1994; Hult 2000; Jonsson 2004). För att undvika förorening utifrån krävs en säker konstruktion, samt regelbunden tillsyn och underhåll.

Ett annat problem är att det kan uppstå förhållanden i reservoarer som gynnar tillväxten av mikroorganismer. Några mikrobiologiska parametrar som brukar nämnas i samband med vattenprovtagning är heterotrofa bakterier, mikrosvampar (jästsvampar och mögelsvampar) och aktinomyceter (en typ av bakterie). Mikroorganismerna bildar en biofilm på alla ytor som är i kontakt med vatten och finns normalt både i ledningar och i reservoarer. Förhöjda värden på dessa parametrar brukar inte anses utgöra någon direkt hälsofara för konsumenten, men är en indikation på att man har ett problem med tillväxt som behöver åtgärdas. Tillväxt av mikroorganismer kan ibland ge upphov till lukt- och smakstörningar på vattnet (Hult 1994; Kirmeyer *et al.* 1999).

Tillväxt av heterotrofa bakterier i ledningar och reservoarer kan bero på att utgående vatten från vattenverket har en hög resthalt av biologiskt tillgängligt organiskt material som bakterierna livnär sig på (Kirmeyer *et al.* 1999). Vidare kan det slam bestående

av bl.a. järn- och manganoxider och rester av fällningskemikalier (aluminium) som avsätts på botten av reservoarer utgöra en grogrund för mikroorganismer (Hult 1994; VAV P77 1995). Bakterier kan också växa i det tunna slamskikt som bildas på vattenytan p.g.a. avsättning av partiklar och mikroorganismer i ventilationsluften. Det förekommer även att bakterier och svampar växer på vissa organiska material i t.ex. tätfogar och färger (Kirmeyer *et al.* 1999; Schoenen 1989).

En annan påverkan på vattenkvaliteten är den ökning av vattnets ålder som sker då vattnet passerar genom reservoarer. Det tydligaste sambandet mellan vattenkvalitet och ålder är att kloröverskottet minskar med stigande ålder p.g.a. klorets reaktioner med organiska och oorganiska ämnen i vattnet. Minskning av kloröverskottet sker både vid transport i ledningar och under lagring i reservoarer, men kan bli förhållandevis stor i reservoarer eftersom vattnet befinner sig där under lång tid. Det kan leda till att kloröverskottet sjunker till mycket låga värden i utgående vatten från reservoarer.

Även om det är vanligt att ge dricksvatten ett visst kloröverskott för att hålla nere tillväxten av mikroorganismer i ledningsnät och reservoarer kan det i praktiken vara svårt att se något samband mellan låga kloröverskott och förhöjda halter av t.ex. heterotrofa bakterier. Distributionsnät för dricksvatten utgör en komplex miljö där många olika faktorer påverkar livsbetingelserna för mikroorganismer. Förutom kloröverskottet brukar halten av biologiskt lättillgängligt organiskt kol och temperaturen anses vara betydelsefulla parametrar för tillväxtpotentialen (Kirmeyer *et al.* 1999; Piriou *et al.* 1998; Dukan *et al.* 1996; Kerneis *et al.* 1995). En VA-Forskstudie om desinfektion på ledningsnätet har dock visat relativt tydliga tendenser till ökande halter av heterotrofa bakterier med sjunkande kloröverskott i ett antal kommuner i Sverige (Olsson 2005). Det kan betyda att den förlust av kloröverskott som oundvikligen sker i reservoarer har större betydelse för tillväxten i ledningssystemet än man tidigare har trott.

Till följd av långa uppehållstider i reservoarer kan det även ske reaktioner som leder till bildning av klororganiska biprodukter, vilket brukar omnämnas i amerikanska studier, se t.ex. Kirmeyer *et al.* (1999). Detta problem torde dock vara betydligt mindre i Sverige p.g.a. de jämförelsevis låga klorhalter som doseras i svenska vattenverk.

Av litteraturöversikten ovan framgår att reservoarer ökar risken för att vattnets kvalitet påverkas negativt

under transporten ut till konsumenterna. Till en del kan problemen förebyggas genom underhållsåtgärder, framförallt borttagning av bottensediment och rengöring. För att minska risken för mikrobiologiska problem ser man i de flesta kommuner också till att regelbundet omsätta vattnet genom att reglera avsänkning och uppfyllnad enligt ett förbestämt schema. Hur snabbt vattnet behöver omsättas beror på lokala förhållanden, t.ex. beredningsprocessen, vattentemperaturen, samt ledningarnas och reservoarernas skick. I praktiken får man därför lita till drifterfarenhet och regelbunden provtagning för att säkerställa en tillräcklig omsättning.

Ett problem som är nära relaterat till vattenomsättningen är stagnation. Stagnation innebär att vatten blir stillastående i någon del av reservoarvolymen under lång tid utan att omsättas. Det ökar risken för mikrobiella problem. Stagnation inträffar när reservoaren har en sådan utformning eller tillförs så lite blandningsenergi att nytt vatten från inloppet inte kan fördela sig över hela volymen. När vatten som stått stilla länge så småningom lämnar reservoaren kan det ge upphov till oväntade kvalitetsstörningar i ledningsnätet nedströms reservoaren.

1.2 Klassificering av dricksvattenreservoarer

Reservoarer kan klassificeras enligt flera olika principer, t.ex. med avseende på funktion och lokalisering i ledningssystemet, hur konstruktionen är utformad eller sättet att reglera in- och utflöden. En vanlig indelning är i högreservoar respektive lågreservoar och avgörs av hur högt reservoarens trycknivå ligger i förhållande till distributionsområdets trycknivå. I lågreservoarer ligger trycknivån under distributionsområdets trycknivå, vilket innebär att vatten måste distribueras genom pumpning. I regel placeras lågreservoarer i anslutning till vattenverken och kan då samtidigt fungera som kontaktbassäng för klor. I högreservoarer ligger trycknivån över distributionsområdets trycknivå. Vatten kan då tillföras konsumenterna via självfall, vilket säkrar leveransen vid elavbrott.

En annan indelning av reservoarer utgår från lokaliseringen i förhållande till vattenverket och förbrukningsområdet. Återgångsreservoarer är placerade i eller

bortom förbrukningsområdets centrum från vattenverket räknat, medan genomgångsreservoarer ligger mellan vattenverket och förbrukningsområdet.

Det förekommer flera olika konstruktionstyper bland befintliga dricksvattenreservoarer. Vanligast i Sverige är cylindriska behållare av stål eller betong. Även rektangulära behållare är vanligt, i synnerhet för lågreservoarer. Behållaren anläggs antingen på eller under marknivån och benämns då markreservoar eller byggs på pelare och kallas då för vattentorn. Vattentorn utformas i vissa fall som koniska behållare av estetiska skäl. Ofta är reservoarer avdelade i två kammare med separata anordningar för in- och utlopp så att en av kamrarna kan vara i drift medan underhållsarbete görs i den andra. I cylindriska eller koniska vattentorn går mellanväggen som skiljer kamrarna åt antingen diametralt genom reservoaren eller i en cirkel runt mitten. I det senare fallet får reservoaren en ringformad yttre kammare som omsluter den inre kammaren.

När det gäller anordningar för in- och utlopp används flera olika tekniska lösningar. In- och utlopp kan utgöra samma ledning som omväxlande leder vatten till eller från reservoaren, eller separata ledningar för in- och utflöde som mynnar på olika ställen i reservoaren. Ledningarna kan vara indragna en bit i behållaren eller ansluta direkt till väggen eller golvet. Slutligen kan ledningarna vara orienterade på olika sätt: horisontellt eller vertikalt, radiellt in mot behållarens centrum eller parallellt med en vägg. Som regel är både in- och utlopp placerade nära botten.

In- och utflöde till, respektive från, reservoaren kan ske antingen samtidigt eller växelvis. Inflödet regleras vanligen genom att styra pumparna på tryckzonen mot reservoarnivån. I det enklaste fallet går en eller flera pumpar igång när nivån sjunker under en viss miniminivå och slår av när nivån stiger över en viss maximinivå. Vid mer avancerad styrning regleras storleken på inflödet med hjälp av en referensnivå (s.k. börkurva) så att reservoarnivån följer en nästan likadan uppfyllnads- och avsänkningscykel varje dygn.

En exakt uppgift om antalet reservoarer som för närvarande är i drift i Sverige saknas. I en inventering gjord av Statens livsmedelsverk i början av 90-talet (Hult 1993) uppskattades antalet lågreservoarer i Sverige till 2250 och antalet högreservoarer till 1300.

1.3 Pluggflödesprincipen och blandningsprincipen

Omsättning i reservoarer kan teoretiskt sett ske antingen genom att vattnet tvingas att strömma likt en plugg i parallella banor från inlopp till utlopp (pluggflödesprincipen) eller genom att inkommande vatten blandas med den magasinerade volymen som därigenom successivt byts ut mot nytt vatten (blandningsprincipen), se Figur 1-1. Lågreservoarer som ligger i anslutning till vattenverk och fungerar som kontaktbassäng för klor utformas i regel enligt pluggflödesprincipen. Det garanterar en viss minsta uppehållstid så att klorer hinner verka innan vattnet pumpas ut på ledningsnätet. Övriga reservoarer, i första hand högreservoarer, är oftast konstruerade med avsikten att vattnet ska omsättas enligt blandningsprincipen.

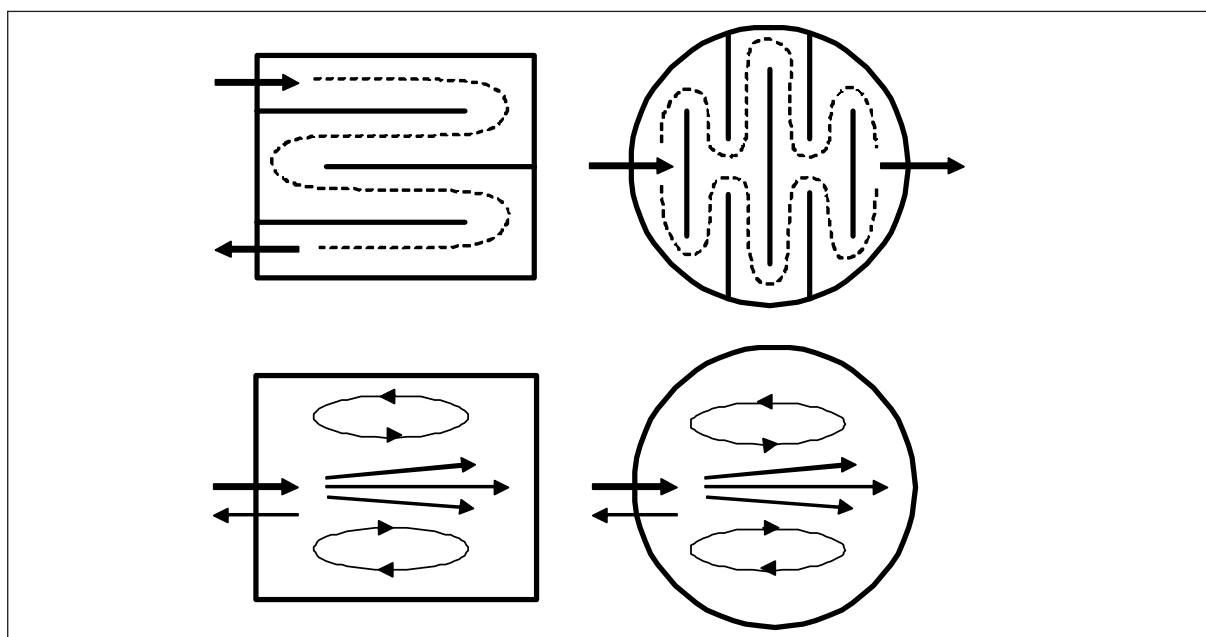
I praktiken går det aldrig att uppnå vare sig ett perfekt pluggflöde eller fullständig och momentan blandning i reservoarer. De hydrauliska förhållandena kan i verkligheten likna en kombination av pluggflöde och blandning där det också kan förekomma stagnanta zoner. Beroende på geometrisk utformning och reglering av in- och utflöden (storlek och varaktighet) går det dock att närma sig någon av ytterligheterna. Ett pluggliknande flöde är enklast att åstadkomma i avlånga och smala bassänger med in- och utlopp i vardera änden och ett kontinuerligt genomflöde av vatten (Grayman *et al.* 2000). I andra typer av geometrier

krävs ledskenor (bafflar) för att kanalisera flödet till ett pluggflöde. Ofta krävs också någon typ av diffusor vid inloppet för att reducera virvelbildning och fördela inflödet jämnt över tvärsnittet.

Bra förutsättningar för blandning kräver istället en bassäng utan bafflar och med någorlunda lika dimensioner i längd-, bredd- och höjdd (Grayman *et al.* 2000). Det ska dessutom råda turbulenta förhållanden i hela volymen och finnas en kontinuerlig tillförsel av rörelseenergi för att upprätthålla turbulensen. I de allra flesta fall är det tillräckligt att ta tillvara rörelseenergin i inströmmande vatten för att skapa turbulens och driva blandningsprocessen, men mekaniska omblandare kan behövas i speciella fall.

1.4 Vad är bäst – pluggflöde eller blandning?

Problem relaterade till vattenomsättningen berör i första hand reservoarer ute på ledningsnätet, speciellt högreservoarer av återgångstyp, eftersom de kan ha ett relativt lågt genomflöde i förhållande till sin magasinerade volym. Även om många reservoarer ute på nätet är konstruerade som blandningstankar används i facklitteraturen ofta pluggflödesprincipen som tankemodell i generella resonemang kring omsättning i



Figur 1-1. Illustration av de två teoretiska principerna för omsättning i reservoarer, pluggflödesprincipen (överst) och blandningsprincipen (underst).

reservoarer. Ett exempel på detta är en artikel i fack-tidskriften Cirkulation (Winnfors 2002) där en hög-reservoar försetts med ett inlopp vid ytan och ett utlopp vid botten för omsättningens skull. Man föreställer sig tydligen att vattnet strömmar genom reservoaren likt en plugg i en cylinder och att det därför är viktigt att separera in- och utlopp. Ett liknande resonemang förs i VAV-publikationen P77 under avsnittet ”Synpunkter på teknisk utformning av en reservoar” (VAV P77 1995). Exemplet tyder på att man inte är säker på vilken teoretisk princip, pluggflödes- eller blandningsprincipen, som bör eftersträvas och hur omsättningen fungerar i olika typer av reservoarer.

Vilken princip bör man då välja för att omsätta vattnet? Pluggflödesprincipen kan verka tilltalande eftersom allt vatten teoretiskt sett befinner sig i reservoaren under lika lång tid – den s.k. nominella uppehållstiden (volymen dividerad med genomflödet). I en fullständigt omblandad reservoar har man istället en blandning av vatten som befunnit sig olika lång tid i reservoaren. Den genomsnittliga uppehållstiden hos blandningen blir densamma som i pluggflödes-fallet för givna in- och utflöden och en given reservoar-volym, men vattenutbytet sker inte lika effektivt. Man kan ganska enkelt visa (se Avsnitt 8.3) att under ett tidsintervall motsvarande en nominell uppehållstid har endast ca 60 % av vattenvolymen bytts ut vid fullständig omblandning jämfört med 100 % vid perfekt pluggflöde.

I litteraturen rekommenderas trots detta att reservoarer som används för att magasinera vatten ute i ledningsnätet konstrueras så att blandning av vattenvolymen underlättas (Grayman *et al.* 2000). Denna rekommendation gäller i stort sett alla högreservoarer, samt många lågreservoarer ute i ledningsnätet. Undantaget är den typ av lågreservoar som även fungerar som kontaktbassäng för klor. I det fallet vill man uppnå en viss fördröjning av flödet mellan inlopp och utlopp, vilket kräver att reservoaren utformas som en lång kanal.

Anledningen till att blandningsprincipen rekommenderas vid magasinering av vatten i ledningsnätet är att det i praktiken har visat sig vara mycket svårt att åstadkomma ett väl fungerande pluggflöde. Resultat som visar detta publicerades redan på 1960-talet (Reitinger 1964, 1967, 1969). Enligt Reitinger är det största problemet med pluggflödestankar att det lätt uppstår temperaturskiktning p.g.a. låga ström-hastigheter och svag turbulens. Den svaga turbulensen medför att vatten med olika temperatur (och därmed olika

densitet) inte blandas så att temperaturskillnaderna utjämnas. Under sådana förhållanden kan redan en liten temperaturskillnad mellan inkommande och magasinerat vatten göra att vattenströmmen från inloppet söker sig utmed botten eller ytan så att bara en del av volymen genomströmmas av nytt vatten. I övriga delar kan vattenutbytet ta mycket lång tid, d.v.s. det finns risk för stagnation. Senare studier (Hammer & Marotz 1986) har bekräftat Reitingers slutsatser angående risken för stagnation i pluggflödestankar.

Blandningsprincipen har visat sig vara betydligt enklare att efterlikna än pluggflödesprincipen (Grayman *et al.* 2000) och fungera väl i de vanligaste konstruktionstyperna (Schubert & Maier 1976; Schubert 1983; DVGW 1981). Inga bafflar eller liknande anordningar behövs för att styra flödet. Jetstrålen som bildas vid inloppet genererar förhållandevis höga ström-hastigheter och kraftig turbulens, vilket gör att risken för stagnation blir betydligt mindre än i pluggflödestankar.

1.5 Några egenskaper hos turbulenta jetstrålar

Eftersom blandning i reservoarer i de flesta fall sker med hjälp av jetstrålen från inloppet beskrivs här några egenskaper hos jetstrålar som är särskilt viktiga ur blandningssynpunkt. Till att börja med måste jetstrålen vara turbulent för att den ska fungera som en effektiv blandare. Övergången från laminära till turbulenta förhållanden börjar vid ett Reynolds tal, R^1 , omkring 1000, vid $R > 3000$ är strålen turbulent (McNaughton & Sinclair 1966) och vid $R > 10000$ är turbulensen fullt utvecklad (Pope 2000). I de flesta dricksvattenreservoarer ligger Reynolds tal med god marginal över gränsen för fullt utvecklad turbulens. Om exempelvis inloppsledningen är 0,2 meter i diameter räcker det att inloppshastigheten är högre än 5 cm/s för att Reynolds tal ska överstiga 10000.

Den viktigaste egenskapen hos en turbulent jetstråle är dess rörelsemängdsflöde (massflöde gånger hastighet), vilket är ett annat ord för tröghetskraften. Om jetstrålen får utvecklas fritt utan att störas av väggar eller andra hinder blir rörelsemängdsflödet i

¹ $R = Ud/\nu$, där U är inloppshastigheten (m/s), d är inloppsdiame-tern (m), och ν är vattnets kinematiska viskositet ($\approx 10^{-6}$ m²/s).

strålen konstant i strömningsriktningen. Volymflödet är dock inte konstant utan ökar med avståndet från rörmynningen p.g.a. att virvelrörelser i strålen drar med sig omgivande vatten. Flera karaktäristiska egenskaper hos fria jetstrålar har visat sig bero enbart av det konstanta rörelsemängdsflödet och avståndet från rörmynningen. Man kan t.ex. visa att centrumhastigheten i strålen minskar linjärt medan bredden ökar linjärt med avståndet från mynningen (Fischer *et al.* 1979).

Det viktigaste resultatet i det här sammanhanget är dock den linjära ökningen av flödet. Experimentella studier visar att flödet i en fri jetstråle ökar med ett belopp motsvarande inloppsflödet efter varje delsträcka om ca 3,5 inloppsdiametrar. I en reservoar med inloppsdiametern 0,2 m och reservoardiametern 15 m (75 gånger inloppsdiametern) innebär det att flödet ökar upp till 20 gånger innan jetstrålen träffar motstående vägg, förutsatt att strålen kan utvidgas fritt åt alla håll. Ökningen av flödet innebär att inströmmande nytt vatten späds ut med omgivande vatten i motsvarande grad. Den snabba utspädningen är en viktig förklaring till varför turbulenta jetstrålar är så effektiva blandare.

1.6 Syfte och avgränsning

Syftet med VA-Forskprojektet är att undersöka hur olika parametrar påverkar blandning och omsättning i dricksvattenreservoarer och hur man förhindrar att stagnation uppstår. För trots att blandning är lättare att åstadkomma än pluggflöde innebär det inte att blandning sker effektivt under alla förhållanden. Reservoarens utformning och dimensioner, inloppets utformning, temperaturskillnader, samt inflödets storlek och varaktighet avgör hur effektivt vattnet blandas och om det finns risk för stagnation.

VA-Forskprojektet omfattar enbart reservoarer som är konstruerade enligt blandningsprincipen. Hög- och lågreservoarer som används för magasinering av vatten ute på ledningsnätet räknas till denna typ. Studien omfattar däremot inte reservoarer av pluggflödestyp, t.ex. lågreservoarer som fungerar som kontaktkammare för klor. För utformning av kontaktkammare hänvisas istället till litteraturen, se t.ex. Crozes *et al.* (1999).

Reservoarer måste utformas med hänsyn till fler krav än bara vattenomsättningen, t.ex. för att underlätta inspektion, rengöring och provtagning, samt förhindra inläckage av föroreningar. Dessa frågor behandlas inte här. Rapporten tar inte heller upp problem relaterade till materialval eller drift- och underhållsrutiner. För en genomgång av dessa frågor hänvisas till Kirmeyer *et al.* (1999), Svensk standard (1998), VAV P77 (1995), NORVARs vägledning för konstruktion och drift av dricksvattenreservoarer (Sirum, Mostue & Bellingmo 2004) samt artiklar i facktidskrifter, t.ex. Hult (1994, 2000) och Thureson (2002).

1.7 Rapportens upplägg

Efter en genomgång av mätmetoder och modeller i Avsnitt 2 följer en redovisning av observationer från temperaturmätningar i fält i Avsnitt 3. I Avsnitt 4 härleds ett villkor som måste vara uppfyllt för att hela volymen ska blandas. Avsnitt 5 redovisar resultat från datorsimuleringar av blandning under temperaturpåverkan. Avsnitt 6 ägnas åt strömningsmönster och blandningstider utan inverkan av temperaturen. Avsnitt 7 är ett kort avsnitt om dimensionering av inloppsdysor. Därefter följer ett fristående teoriavsnitt om omsättning i fullständigt omblandade reservoarer i Avsnitt 8. I Avsnitt 9 ges exempel på hur man tillämpar resultaten från studien. I Avsnitt 10 redovisas praktiska slutsatser och rekommendationer för utformning av reservoarer och i Avsnitt 11 följer en sammanfattande diskussion.

2 Metod

2.1 Val av metod

Undersökning av blandningsförhållandena i dricksvattenreservoarer kräver i regel att man gör någon form

av spårämnesanalys. Kortfattat innebär det att man doserar ett konservativt (icke reagerande) ämne på inloppsledningen och sedan undersöker hur ämnet sprider sig över volymen. Spårämnesanalysen kan göras experimentellt i fullskala i fält eller i modellskala i laboratorium. Ett alternativ till experimentella studier är att simulera spårämnesförsöket med hjälp av datormodeller.

Fältmätningar som pågår under normal drift ställer särskilda krav på att spårämnet som används är helt ofarligt. Det måste även gälla vid höga koncentrationer om det skulle bli något fel vid doseringen så att ämnet kommer ut i ledningsnätet i outspädd form. Ämnen som tidigare har använts i fältmätningar är salter i låga koncentrationer, t.ex. natriumklorid och kalciumklorid (Grayman *et al.* 2000) och natriumnitrat (DVGW 1981; Schubert & Maier 1976). Vidare måste mätutrustningen vara godkänd för mätningar i dricksvatten och desinficeras före användning. Spårämnesförsök i skalmodeller är ett billigare och enklare alternativ till fullskalemätningar men kräver tillgång till laboratorium och personal som kan konstruera modellerna. En annan nackdel med skalmodeller är att de inte alltid återger förhållandena i fullskala, p.g.a. att skalningsfel kan uppstå.

Simulering av spårämnesförsök med datormodeller kan göras med kommersiella programvaror men kräver speciell simuleringskompetens och tillgång till mätdata för att validera beräkningsmodellerna. Den stora fördelen med datorsimuleringar jämfört med mätningar är att man ganska snabbt och enkelt kan studera vilken effekt en förändring av geometrin får på blandningsförhållandena.

I denna studie har vi valt att använda oss av fältmätningar och datorsimuleringar för att studera blandningsprocesser i reservoarer. Vid fältmätningarna har dock inget spårämne använts. Mätningar har enbart gjorts av temperaturen i inkommande vatten, samt temperaturen i ett antal punkter inuti de undersökta reservoarerna. Från ett stort antal mättillfällen har ett fåtal fall valts ut då värmetransporten genom väggar, tak och golv varit försumbar. Vid dessa tillfällen har temperaturen fungerat som ett konservativt spårämne. Syftet med temperaturmätningarna var att ta reda på om och när en stabil temperaturskiktning uppstår. Ett annat syfte var att ta fram mätdata för validering av datormodellen. Datormodellen användes för att undersöka hur olika geometriska parametrar påverkar blandningsförhållandena.

2.2 Temperaturmätningar

2.2.1 Beskrivning av reservoarerna

Mätningarna utfördes i högreservoarerna i Gårdsten och Kortedala i Göteborgs kommun. Båda reservoarerna får vatten från Alelyckans vattenverk där Göta älv är råvattentäkt och Delsjöarna är reservvattentäkt. Reservoaren i Gårdsten bedömdes vara särskilt intressant eftersom en mätning som gjordes under sommaren några år tidigare visade att det fanns ett temperatursprångskikt i reservoaren. Provtagningar på utgående vatten hade dessutom visat förhöjda halter av heterotrofa 7-dygnsbakterier. Misstankar fanns därför att vattenomsättningen i Gårdstensreservoaren fungerade dåligt och att det bidrog till de förhöjda bakteriehalterna.

Reservoaren i Kortedala valdes p.g.a. att vattenvolymen var lätt åtkomlig för mätningar och att reservoaren representerar en annan konstruktionstyp än Gårdstensreservoaren. Ytterligare en faktor av betydelse vid valet av mätobjekt var att reservoarerna i Gårdsten och Kortedala båda ligger relativt nära vattenverket. Av den anledningen kunde man förvänta sig att de snabba temperaturändringar som ibland sker i råvattnet i samband med väderomslag eller byte till reservvattentäkten skulle ge tydliga förändringar ute vid reservoarerna. Mätningarna pågick under flera månaders tid för att få med ett antal intressanta situationer.

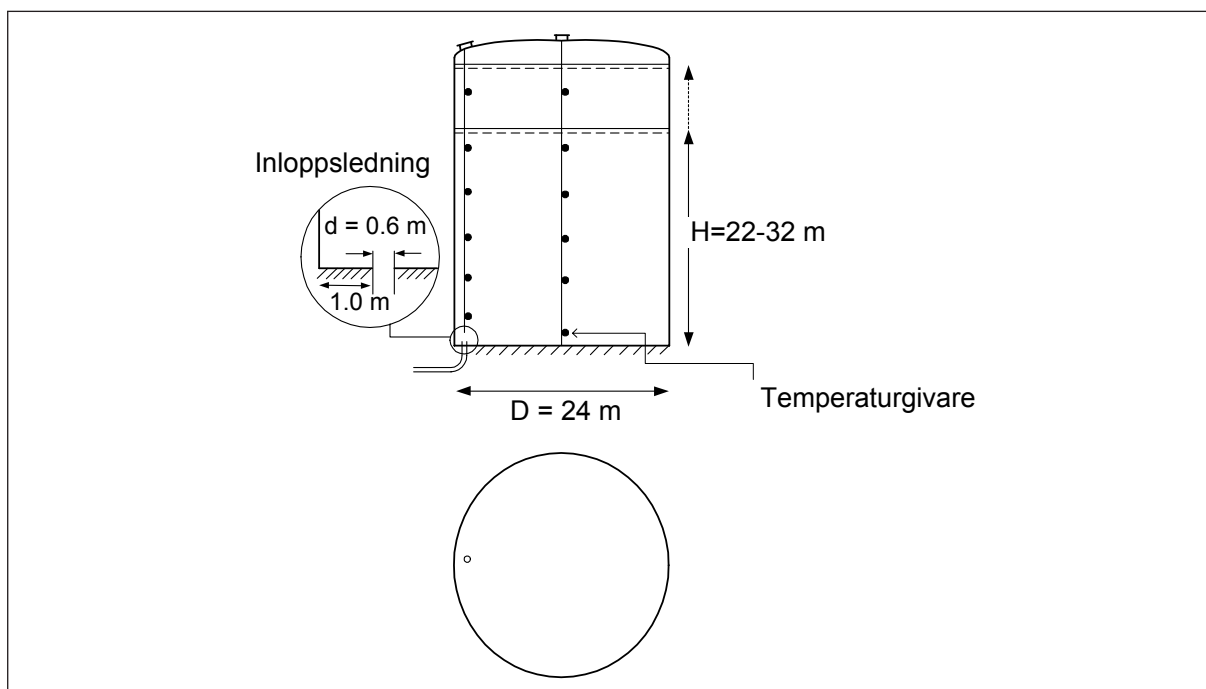
Båda reservoarerna är högzonsreservoarer av återgångstyp med en inströmnings- och en utströmningsperiod per dygn. Nivåvariationerna uppvisar ett likartat mönster varje dygn eftersom pumparna i respektive tryckzon styrs mot aktuell reservoarnivå och en referenskurva (börkurva). Under en typisk dygnsykel börjar vatten strömma in till reservoarerna strax före midnatt. Uppfyllnaden pågår sedan fram till morgonen, varefter reservoarerna successivt sänks av under resten av dygnet.

Reservoarerna representerar två olika konstruktionstyper. Gårdstensreservoaren är en cylindrisk ståltank utan avdelning. Den har plan botten och ett vertikalt kombinerat in/utlopp som mynnar några decimeter över botten. Djupet i reservoaren varierar mellan 22 och 32 meter under en typisk dygnsykel. Reservoaren rymmer fylld ca 14 500 m³ vatten. Reservoaren i Kortedala är en betongcylinder uppdelad i två kammare och försedd med pelare som bär upp taket. Botten

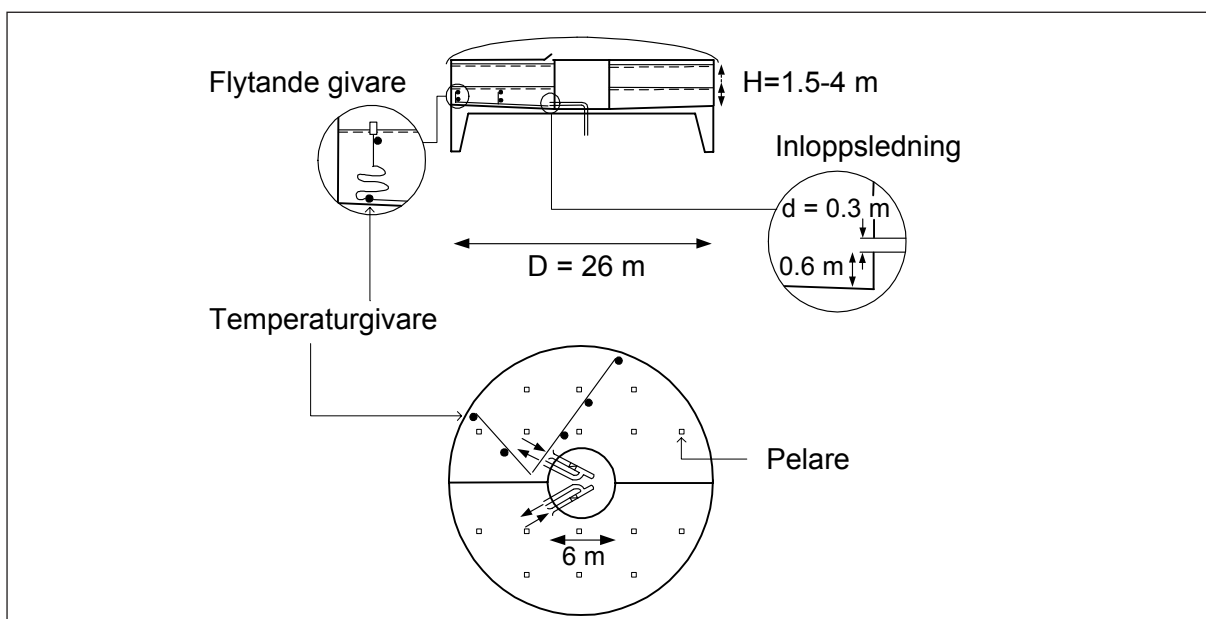
lutar svagt in mot ett trapphus i mitten. Inloppet är riktat horisontellt och mynnar några decimeter ut från väggen till trapphuset. In- och utloppsledningarna är separerade genom ett backventilsystem. Djupet varierar mellan 1,5 och 4 m under ett normaldygn. När reservoaren är full rymmer den ca 2000 m³ vatten. I Figur 2-1 och Figur 2-2 visas profil- och planskisser över reservoarerna samt temperaturgivarnas placering under mätkampanjen.

2.2.2 Instrumentering

Temperaturen mättes med tolv fristående termistorgivare av typen 10k NTC (produktnamn TinyTag 12, Temp G, återförsäljare INTAB²) som placerades i vattentäta kapslar. Givarna hade en upplösning på 0,03 °C och en kapacitet att lagra mätvärden var 20:e minut under 3,5 månaders tid. Efter kalibrering i



Figur 2-1. Profil- och planskiss över högreservoaren i Gårdsten med markering av temperaturgivarnas placering.



Figur 2-2. Profil- och planskiss över högreservoaren i Kortedala med markering av temperaturgivarnas placering.

² www.intab.se.

vattenbad mot en referenstermometer i intervallet 5–20 °C blev den inbördes skillnaden mellan givarna vid samma temperatur mindre än 0,05 °C, vilket definierar mätnoggrannheten.

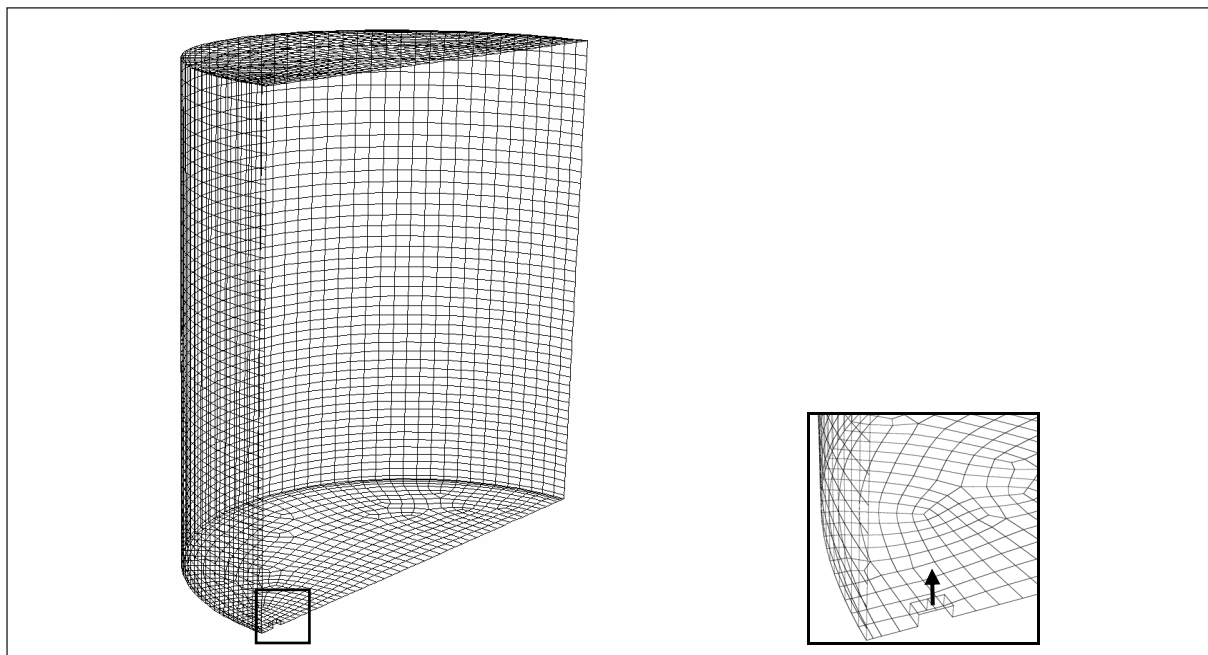
Temperaturgivarna sattes fast på tunna rostfria stål-vajrar som installerades via reservoarernas manluckor på taket. Givarna fördelades så att en så stor del av volymen som möjligt kunde täckas in. I Gårdsten användes två vadersystem, ett rakt ovanför in/utloppet och ett mitt i reservoaren (se Figur 2-1). I Kortedala krävdes ett speciellt arrangemang med vajrar fästade vid rör som skarvades ihop och trycktes in genom manluckan för att komma åt de centrala delarna av tanken (se Figur 2-2). Mätningar gjordes enbart i den ena kammaren. I Gårdstensreservoaren var alla givare placerade på fasta nivåer, medan några givare i Kortedalas reservoar var fästade vid flottörer så att temperaturen kunde mätas på ett fixt avstånd från vattenytan. I båda reservoarerna placerades också temperaturgivare på in- och utgående ledningar. All mätutrustning desinficerades med hypokloritlösning före installation.

Vattennivån i Gårdsten mättes med en tryckgivare med en absolut mätnoggrannhet på 0,2 m och en repeterbarhet på 0,02 m. I Kortedala användes en specialbyggd resistiv nivåmätare med en absolut mätnoggrannhet på 0,05 m och en repeterbarhet på 0,005 m.

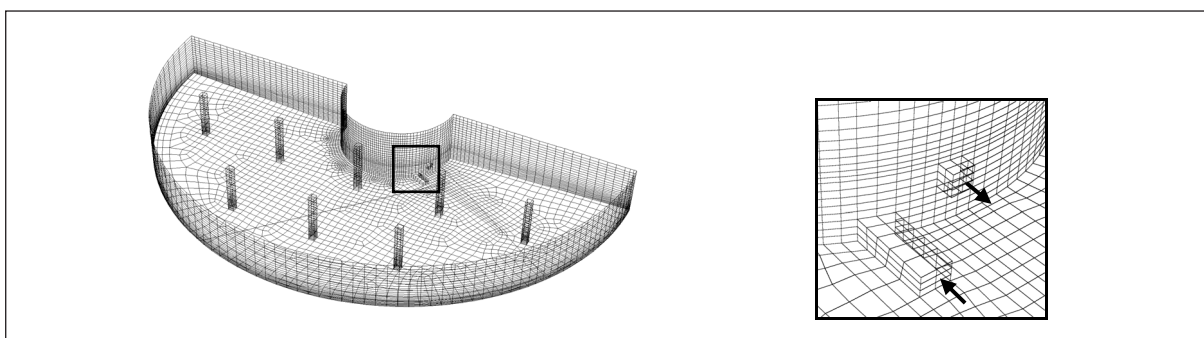
2.3 Datorsimuleringar

2.3.1 Modell

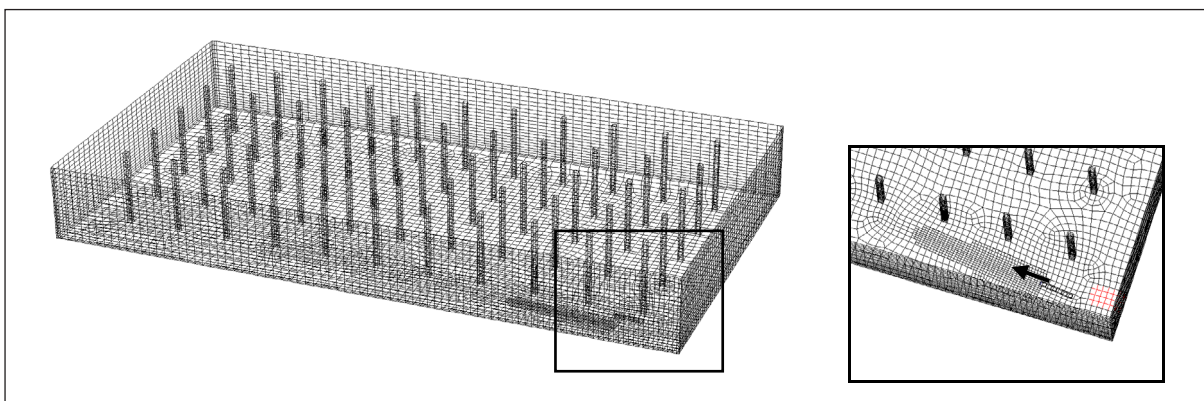
Datorsimuleringarna gjordes med Fluent (Fluent 2003) som är en kommersiell standardprogramvara för strömningsanalys. Simuleringstekniken brukar allmänt kallas för Computational Fluid Dynamics (CFD) och innebär att man numeriskt löser de differentialekvationer som styr vattnets rörelse i tid och rum. Med ett CAD-program skapas ett beräkningsnät bestående av ett stort antal delvolym (celler) som tillsammans definierar reservoarens geometri. Modellen av högreservoaren i Gårdsten visas i Figur 2-3. För tydlighetens skull visar figuren bara beräkningsnätet på cylinderns mantelyta, samt på botten och vattenytan, men i själva verket fyller cellerna upp hela volymen. Av symmetriskäl behöver dock bara halva reservoaren tas med i modellen i det här fallet. In- och utloppsloppsledningar representeras i modellen med rör med kvadratisk tvärsnitt (med samma area som motsvarande cirkulära rör) för att förenkla konstruktionen av beräkningsnätet. Motsvarande beräkningsnät visas i Figur 2-4 för en av kamrarna i Kortedalas högreservoar och i Figur 2-5 för en rektangulär reservoar med pelare.



Figur 2-3. Modell över högreservoaren i Gårdsten (vänster) med detalj över det kombinerade in- och utloppet (höger).



Figur 2-4. Modell över högreservoaren i Kortedala (vänster) med detalj över in- och utloppsledningarna (höger).



Figur 2-5. Modell över en rektangulär reservoar (vänster) med detalj över inloppsledningen (höger).

2.3.2 Utdata från modellen

Med datorprogrammet kan man beräkna strömhastigheter, turbulensförhållanden, temperatur och spårämneskoncentration i varje delvolym och på så sätt få fram en tredimensionell bild av hur vattnet strömmar och blandas i reservoaren. Modellen kan hantera en varierande vattennivå och ta hänsyn till att vattnets densitet varierar med temperaturen. Flödet till och från reservoaren, samt temperaturen i inkommande vatten, kan variera med tiden för att efterlikna verkliga driftförhållanden. Genom att stega sig framåt i tiden kan modellen simulera en hel uppfyllnads- och avsänkingscykel. För en mer utförlig beskrivning av datormodellen och simuleringstekniken hänvisas till Nordblom (2004).

2.3.3 Validering av modellen

Datormodellen som används i detta projekt är väl dokumenterad och testad på olika industriella strömningssproblem. När modellen tillämpas på nya typer av problem, i detta fall blandning i reservoarer, bör

man kontrollera resultaten mot mätdata i någon form. Valideringen av modellen inriktades på de två processer som är mest intressanta i detta sammanhang; uppkomst av temperaturskiktning och inblandning av nytt vatten via inloppet. Jämförelser gjordes både mot data från temperaturmätningarna och mot referensdata från litteraturen.

3 Resultat från temperaturmätningar i fält

3.1 Variationer i temperaturen

Mätningarna i Gårdsten och Kortedala visade att temperaturen i stort sett följde den årstidsbundna variationen i råvattentäkten Göta älv. Temperaturen var strax över 0 °C under vintern och omkring 20 °C

under sommaren. Den långsamma årsvariationen avbröts ibland av perioder med snabbt ökande eller minskande temperaturer i ledningsnätet. Dessa snabba förändringar orsakades av plötsliga förändringar i råvattentemperaturen i samband med väderleksförändringar eller, i något fall, byte till reservvattentäkten. Ibland var temperaturskillnaden mellan inkommande och magasinerat vatten tillräckligt stor för att påverka blandningsförhållandena. I dessa fall kan man försumma värmeledningen genom väggar, tak och golv jämfört med uppvärmningen eller avkylningen med det inkommande vattnet. Några exempel på perioder med snabba temperaturändringar har valts ut och beskrivs i detta avsnitt. I exemplen är vattentemperaturen alltid över 4 °C, vilket innebär att vattnets densitet minskar med ökande temperatur.

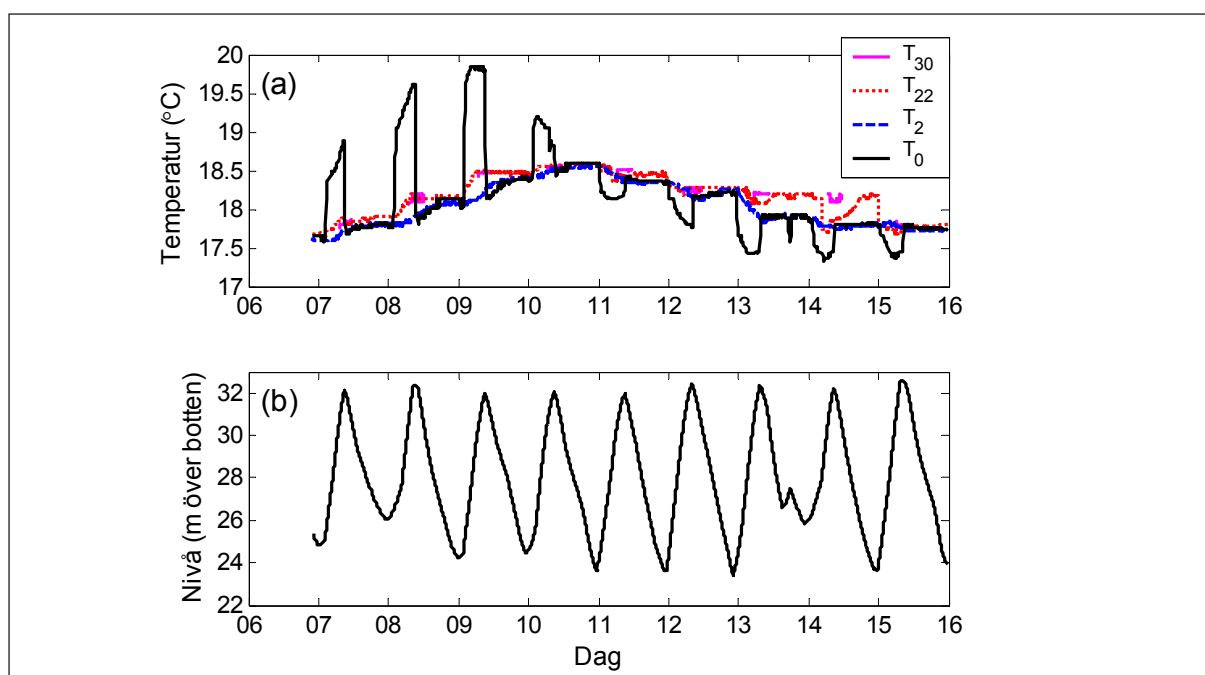
3.2 Data från Gårdstens högreservoar

Figur 3-1 visar ett exempel på uppmätta temperaturer och vattennivåer i Gårdstensreservoaren under 9 dygn i augusti 1999. För tydlighetens skull visar figuren bara temperaturen i några av mätpunkterna: T_2 , T_{22} och T_{30} är temperaturen 2 m, 22 m, respektive 30 m

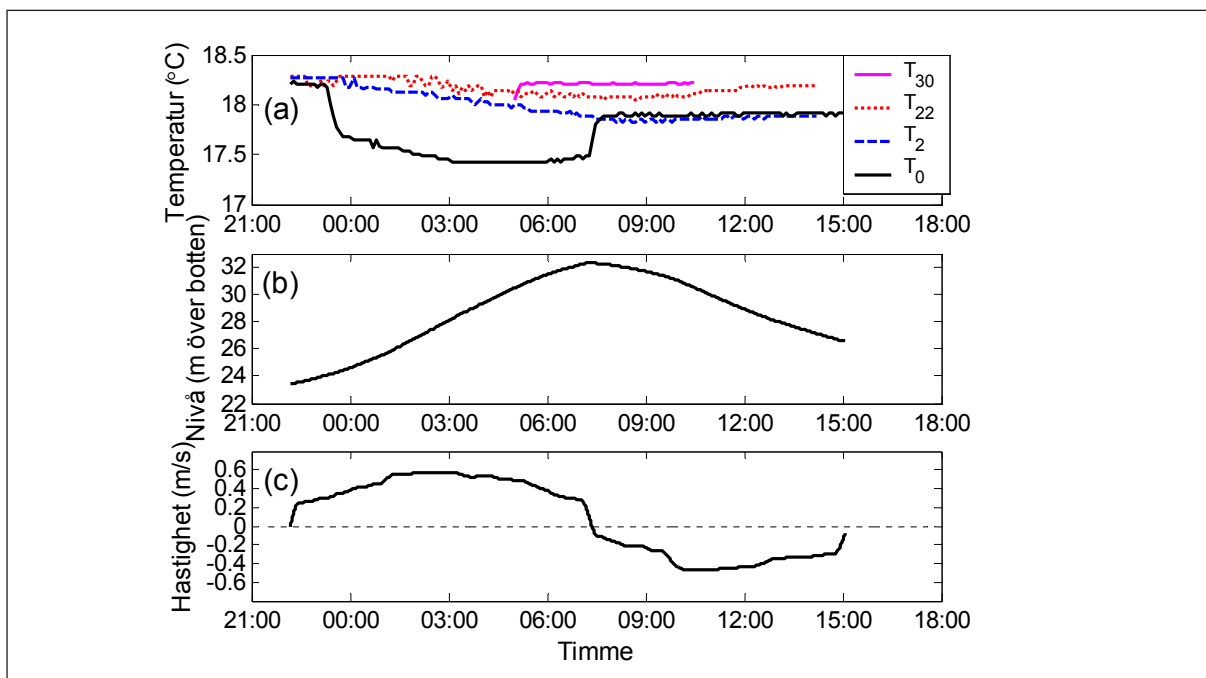
över botten längs den mittersta temperaturkedjan, medan T_0 är temperaturen på in- och utgående vatten. Temperaturen 30 m över botten visas bara när djupet överstiger denna nivå (d.v.s. när givaren är under vatten).

Som framgår av Figur 3-1 är inkommande vatten varmare än vattnet i reservoaren under de första fyra dygnen (Dag 7–10), vilket gör att temperaturen i reservoaren stiger varje gång den fylls upp. De små skillnaderna mellan mätpunkterna, med något varmare vatten i den övre delen av volymen, avslöjar att reservoaren inte är fullständigt omblandad i slutet av varje inströmningsperiod, utan är svagt stabilt skiktad. Skillnaderna försvinner dock nästan helt under utströmningsperioderna när den skiktade undre delen av volymen tappas av.

Under Dag 11–15 är inkommande vatten kallare än vattnet i reservoaren. Under Dag 13 uppstår en jämförelsevis stor temperaturskillnad på 0,4 °C mellan den undre och övre delen av volymen. Temperaturskillnaden kvarstår under följande utströmningsperiod. Under nästa inströmningsperiod (Dag 14) når det kallare vattnet upp till nivån 22 m över botten, vilket syns som en plötslig sänkning av temperaturen där. Fortfarande finns dock ett lager med ca 0,4 °C varmare vatten 30 m över botten. Detta varmare lager passerar sedan temperaturgivaren på nivån 22 m under utströmningsperioden (Dag 14). Temperaturskillnaderna utjämnas när reservoaren fylls upp Dag 15.



Figur 3-1. Uppmätta temperaturer på olika nivåer i Gårdstensreservoaren under en period på 9 dygn i augusti 1999 (a), vattennivå (b).

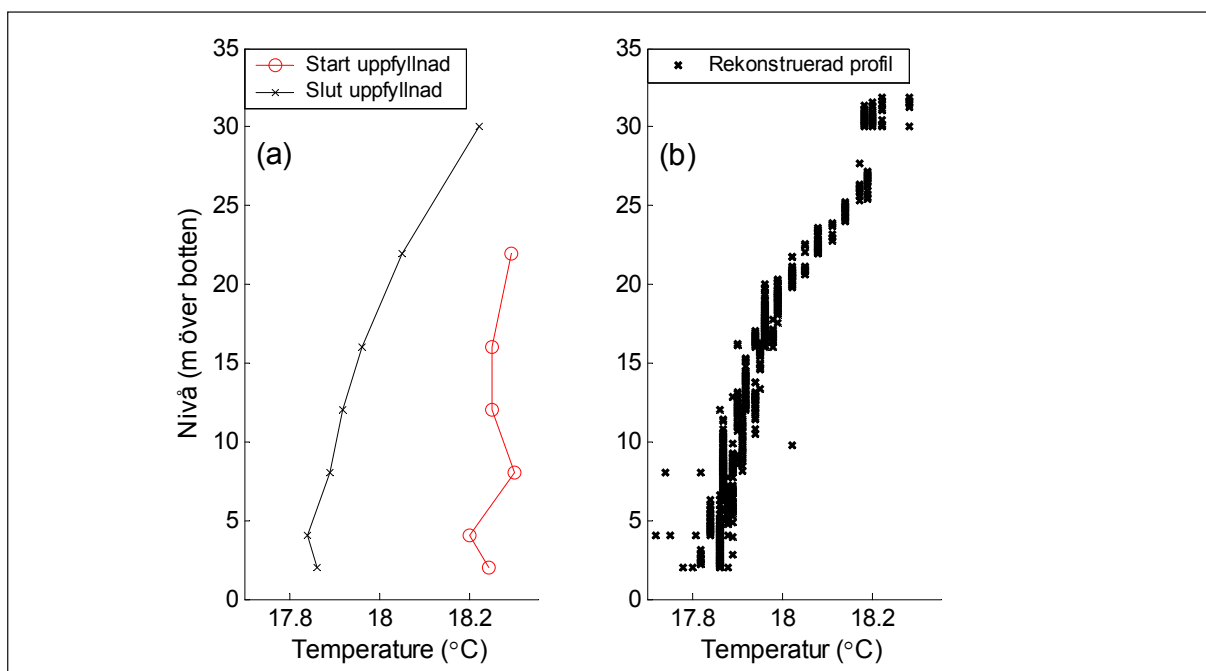


Figur 3-2. Detaljbild av temperaturvariationerna i Figur 3-1 under Dag 13 (a), vattennivå (b), in- och utloppshastighet (c).

Figur 3-2 visar en mer detaljerad bild av temperaturvariationerna under Dag 13. Förutom vattennivån visas också in- och utloppshastigheten, vilken har beräknats från nivåändringarna i reservoaren. Positiva hastigheter svarar mot inflöde och negativa hastigheter mot utflöde.

I Figur 3-3(a) har samma temperaturdata som visas i Figur 3-2(a) plottats som profiler i början respektive

i slutet av uppfyllnadsperioden. Från profilerna kan man se att det kallare vattnet lägger sig i den undre delen av volymen medan temperaturen närmast ytan är nästan opåverkad. Från Figur 3-3(a) är det dock svårt att bestämma vilken form temperaturprofilen har eftersom det är glest mellan mätpunkterna. Det går t.ex. inte att avgöra på vilken nivå språngskiktet ligger i slutet av uppfyllnadsperioden. Det går dock att

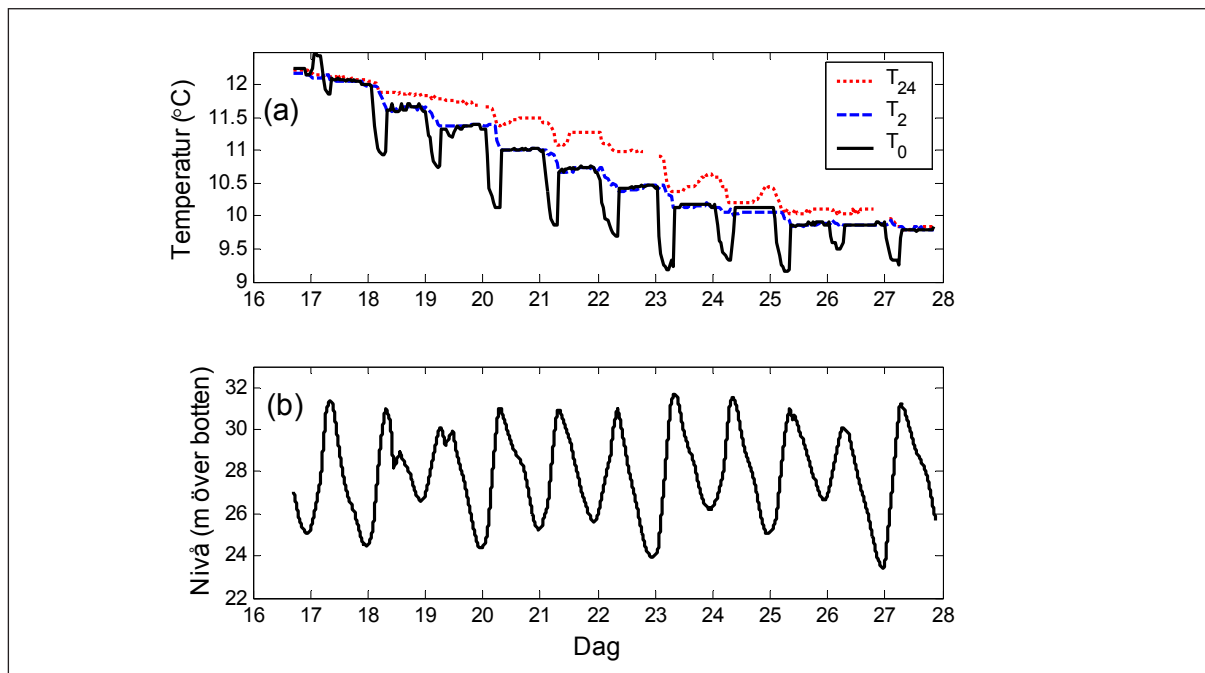


Figur 3-3. Temperaturprofiler i början och i slutet av uppfyllnadsperioden (a), rekonstruerad temperaturprofil vid fylld reservoar (b), data från Figur 3-2.

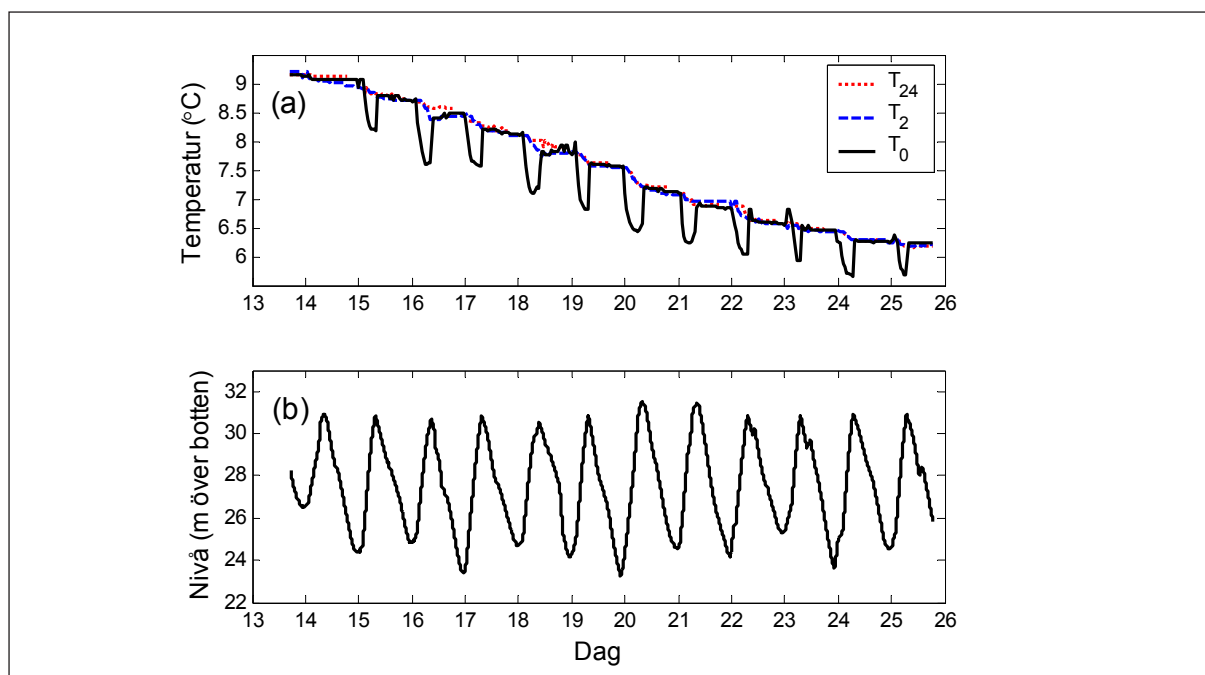
rekonstruera temperaturprofilen i den fyllda reservoaren om man använder sig av mätdata från utströmningsperioden. Metoden bygger på antagandet att vattnet passerar de fasta temperaturgivarna likt en kolv i en cylinder utan att det sker någon blandning i vertikalled medan volymen tappas av. En sådan rekonstruerad profil har tagits fram i Figur 3-3(b) genom att plotta temperaturen i alla mätpunkter under

utströmningsperioden och förflytta varje mätpunkt uppåt med ett avstånd motsvarande avsänkningen från den högsta nivån. I den rekonstruerade profilen kan man se en snabb förändring i temperaturen, ett s.k. språngskikt, 21–26 m över botten.

Fler exempel från mätningarna i Gårdstensreservoaren visas i Figur 3-4 (data från oktober 1999) och Figur 3-5 (data från november 1999). Under båda



Figur 3-4. Uppmätta temperaturer i Gårdstensreservoaren under en period på 11 dygn i oktober 1999 (a), vattennivå (b).



Figur 3-5. Uppmätta temperaturer i Gårdstensreservoaren under en period på 12 dygn i november 1999 (a), vattennivå (b).

perioderna sjunker temperaturen i inkommande vatten under drygt en veckas tid. Temperaturskillnaden mellan inkommande och magasinerat vatten är som mest ca 1 °C i båda fallen och inloppshastigheten ca 0,5 m/s. Temperaturfördelningen i reservoaren blir dock olika. I oktobermätningen (Figur 3-4) uppstår en tydlig skiktning med en skillnad på ca 0,5 °C mellan botten och ytan. I novembermätningen (Figur 3-5) är temperaturen i reservoaren väsentligen densamma på alla mätnivåer.

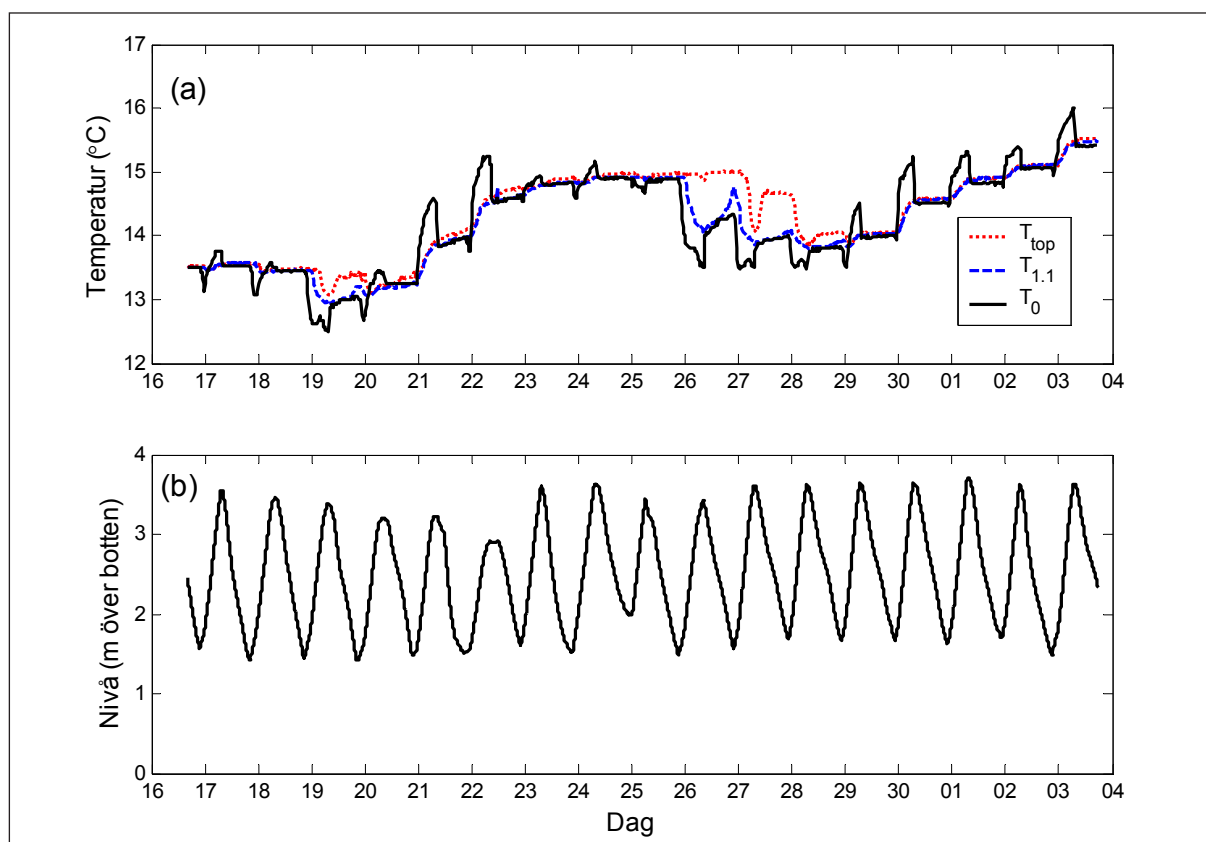
3.3 Data från Kortedalas högreservoar

Figur 3-6 visar en mätserie i Kortedalas högreservoar från mitten av juni till början av juli 2000. Temperaturen i den övre delen av volymen, T_{top} , har i detta fall uppmätts med en rörlig givare som fästs vid en flottör 0,2 m under vattenytan. $T_{1,1}$ markerar temperaturen från en fast givare 1,1 m över reservoarens lägsta punkt och T_0 betecknar temperaturen på in- och

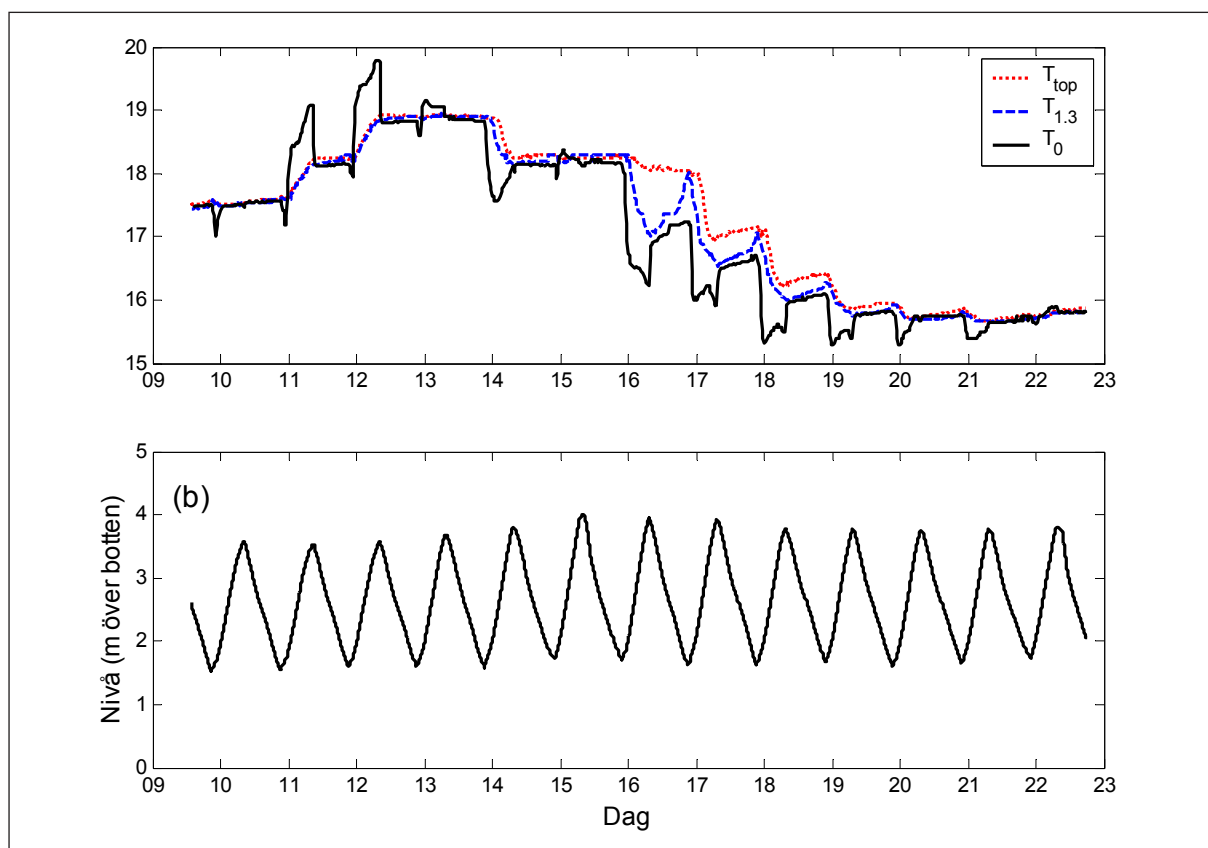
utgående vatten. Som tidigare är det temperaturen i inkommande vatten som styr temperaturförändringarna i reservoaren. Dagar med varmare inflöde leder till nära homogena förhållanden medan dagar med kallare inflöde (Dag 19 och Dag 26–28) initierar en stabil skiktning med en temperaturskillnad på upp till 1 °C mellan ytan och botten.

Figur 3-7 (nedan) visar en liknande mätserie från juli 2001. En stabil skiktning uppstår under Dag 16–18. Under perioden kan man också se en situation när kallare inflöde inte leder till skiktning (Dag 14). Figur 3-8 (nedan) visar en mer detaljerad bild av temperaturen den 16:e juli 2001 tillsammans med vattennivån och in- och utloppshastigheten.

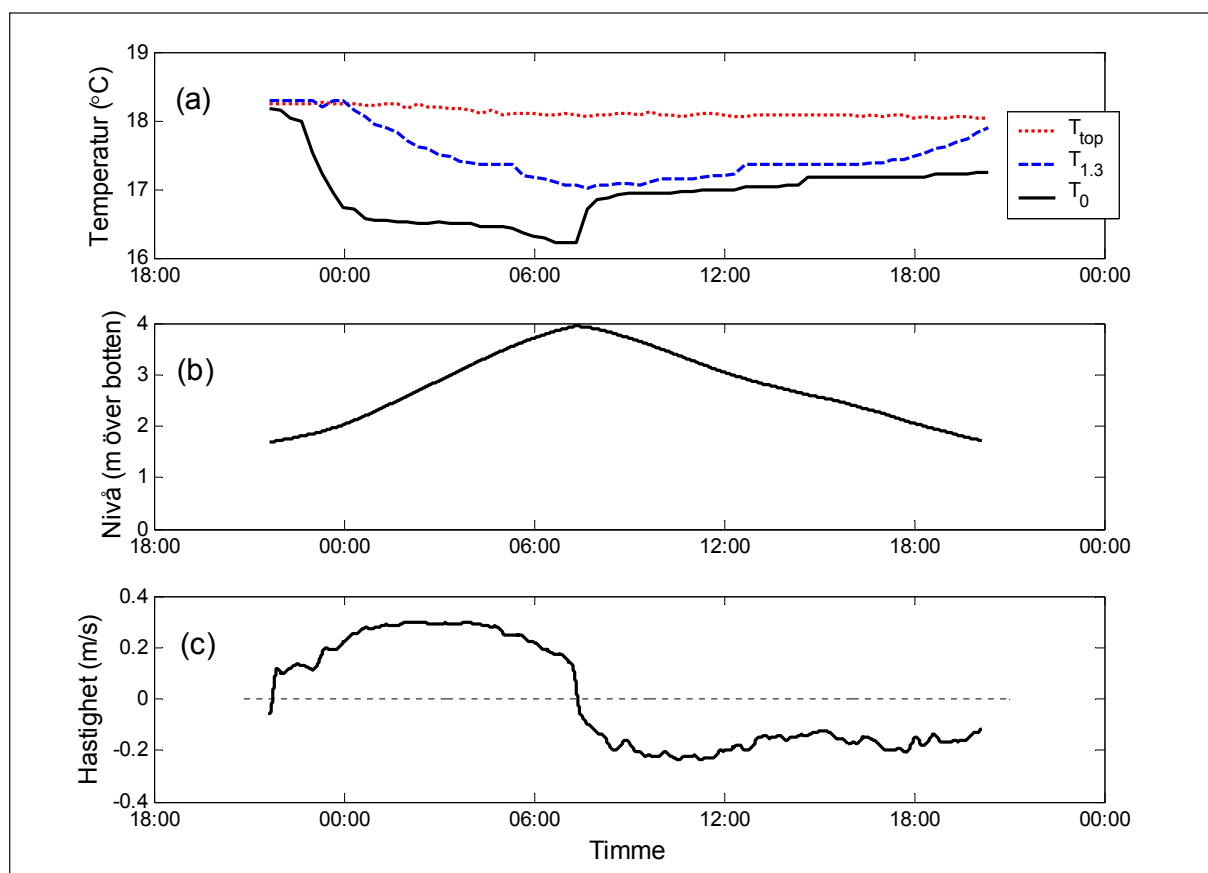
I Figur 3-9(a) (nedan) har samma temperaturdata som visas i Figur 3-8(a) plottats som profiler i början och slutet av uppfyllnadsperioden. Av profilerna framgår att det kallare vattnet som strömmar in lägger sig i den undre delen av volymen medan temperaturen vid ytan är nästan opåverkad. En rekonstruerad temperaturprofil har tagits fram på samma sätt som i Gårdstensreservoaren för att få fram temperaturen mellan mätpunkterna i slutet av uppfyllnadsperioden. Från den rekonstruerade profilen i Figur 3-9(b) ser man



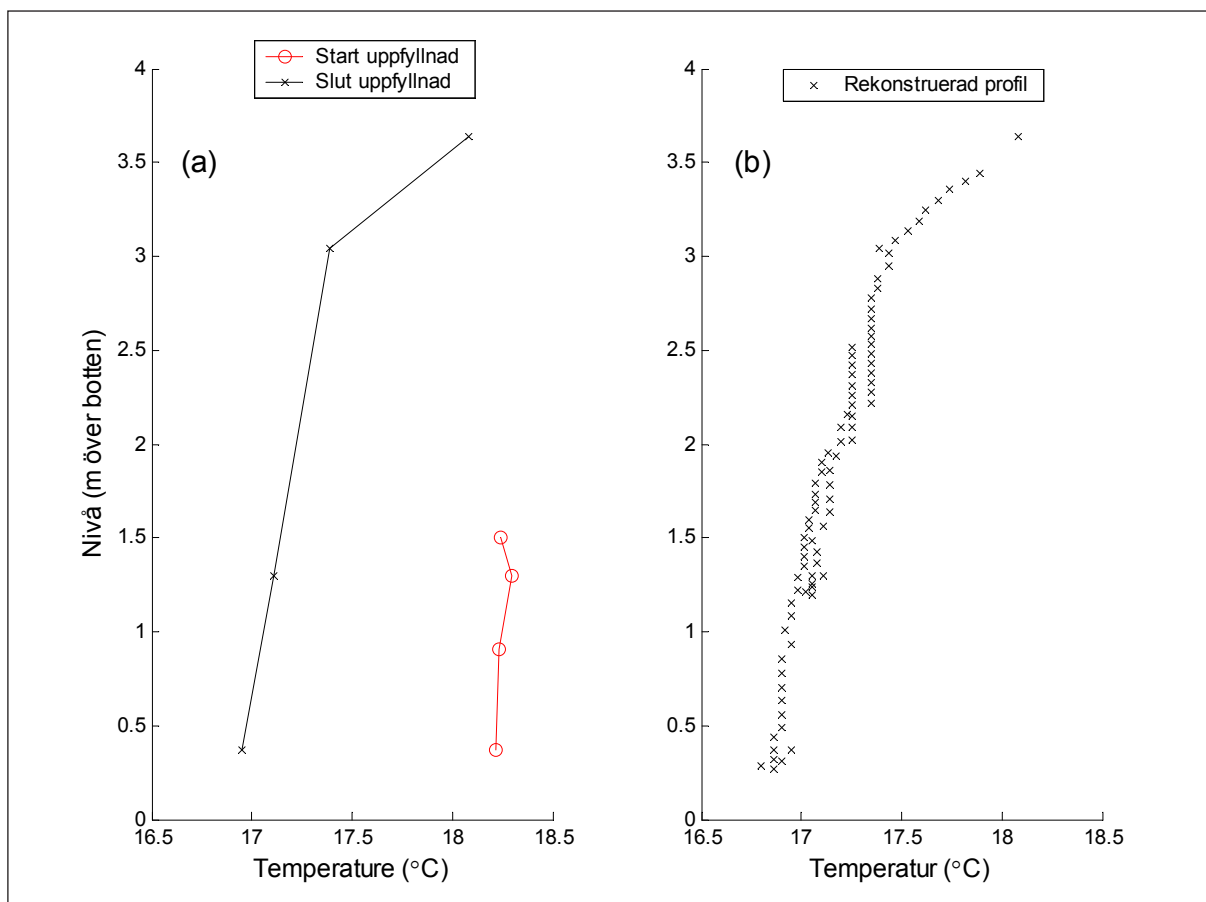
Figur 3-6. Uppmätta temperaturer på olika nivåer i Kortedalas högreservoar under en period på 16 dygn i juni och juli 2000 (a), vattennivå (b).



Figur 3-7. Uppmätta temperaturer på olika nivåer i Kortedals högreservoar under en period på 13 dygn i juli 2001 (a), vattennivå (b).



Figur 3-8. Detaljbild av temperaturvariationerna i Figur 3-7 under Dag 16 (a), vattennivå (b), in-utloppshastighet (c).



Figur 3-9. Temperaturprofiler i början respektive i slutet av uppfyllnadsperioden (a), rekonstruerad temperaturprofil vid fylld reservoar (b), data från Figur 3-8.

att språngskiktet börjar ca 3 m över botten i detta fall, d.v.s. skiktningen ligger i den översta metern.

3.4 Påverkan på vattenutbytet

Av resultaten från temperaturmätningarna kan man dra slutsatsen att vattenutbytet påverkas av den stabila skiktning som uppstår när varmare eller kallare vatten strömmar in. Speciellt visar mätningarna att ett kallare och därmed tyngre inflöde lägger sig i den undre delen av volymen. Det tappas sedan av innan det har hunnit blanda sig med vattnet vid ytan, vilket ger ett lägre vattenutbyte jämfört med om reservoaren hade varit fullständigt omblandad. Med hjälp av en energibalans kan man uppskatta vattenutbytet under en uppfyllnads-avsänkingscykel genom att jämföra värmeinflödet via inströmmande vatten när reservoaren fylls upp med värmeutflödet via utströmmande vatten när reservoaren sänks av. För en utförlig

beskrivning av hur en sådan energibalans ställs upp och vilka förutsättningar som måste vara uppfyllda hänvisas till Nordblom (2004). Här nöjer vi oss med att referera till resultaten.

Vid kallare inflöde minskade vattenutbytet i Gårdstensreservoaren med 10–20 % och i Kortedala med 20–30 % jämfört med motsvarande fullständigt omblandade fall. Vid varmare inflöde blev effekten den motsatta. Vattenutbytet ökade med upp till 10 % i Gårdstensreservoaren. I Kortedala gick det inte att bestämma hur stor ökningen av vattenutbytet blev vid varmare inflöde eftersom volymen var nästan fullständigt omblandad i dessa fall (se Figur 3-6 eller Figur 3-7).

3.5 Sammanfattning av observationer och mätresultat

De viktigaste observationerna och resultaten från mätningarna i Gårdsten och Kortedala kan sammanfattas i följande punkter:

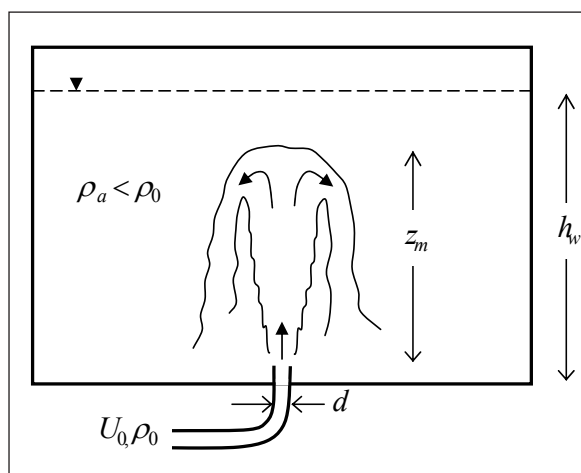
1. Under perioder med snabbt stigande eller sjunkande temperaturer i ledningssystemet uppstår en temperaturskillnad mellan inkommande och magasinerat vatten varje gång reservoarerna fylls upp. Ibland blir temperaturskillnaden tillräckligt stor för att initiera en stabil skiktning i vattenmassan.
2. Samtidiga mätningar i flera profiler visar att temperaturen i mätpunkter som befinner sig på samma vertikala nivå skiljer sig mycket lite. Vid varmare eller kallare inflöde utjämnas alltså temperaturen snabbt i horisontalled medan vertikala temperaturskillnader blir mer bestående.
3. Temperaturskiktningen blir starkare vid kallare inflöde än vid varmare inflöde. I vissa fall med kallare inflöde lägger sig vattnet p.g.a. sin högre densitet i den undre delen av volymen och tappas av innan det har hunnit blanda sig med vattnet i ytan. Förloppet leder till stagnanta förhållanden i den övre delen av volymen och kan pågå under flera dygn i följd.
4. Analyser av mätresultaten visar att vattenutbytet under en uppfyllnads-avsänkingscykel med kallare inflöde minskar med upp till 20 % i Gårdstensreservoaren och med upp till 30 % i Kortedala-reservoaren jämfört med om reservoarerna hade varit fullständigt omblandade.

4 Villkor för blandning i reservoarer

Mätningarna i Gårdsten och Kortedala visar att det behövs en metod för att avgöra när stagnation p.g.a. temperaturskiktning uppstår i reservoarer. I det här avsnittet härleds ett villkor som måste vara uppfyllt för att inkommande vatten ska blanda sig med den

magasinerade volymen. Endast fallet där inkommande vatten har högre densitet analyseras eftersom det är det mest kritiska med hänsyn till vattenomsättningen. Inloppsledningen förutsätts mynna nära botten av reservoaren, vilket är det vanligaste i praktiken. Härledningen görs för en reservoar som fylls upp från en viss startnivå. Blandningsvillkoret är dock tillämplbart även när djupet (volymen) är konstant i tiden p.g.a. att in- och utflöde är lika stora.

Blandningsvillkoret bygger på fundamentala egenskaper hos turbulenta jetstrålar. Den viktigaste egenskapen i det här sammanhanget illustreras i Figur 4-1. Vatten strömmar in i en reservoar genom ett vertikalt inloppsrör med diametern d . Inloppshastigheten är U_0 , densiteten är ρ_0 och djupet är h_w . Om vattnet i reservoaren har en lägre densitet ρ_a ($< \rho_0$) kommer den turbulenta jetstråle som bildas vid inloppet först att stiga uppåt en sträcka z_m och sedan falla tillbaka mot botten likt en fontän p.g.a. gravitationskraften.



Figur 4-1. Schematisk bild av stigningen hos en turbulent jetstråle som riktas uppåt i en volym med lägre densitet.

Experimentella studier av turbulenta jetstrålar (Turner 1966; Zhang & Baddour 1998; Pantzlaß & Lueptow 1999) visar att stighöjden z_m kan relateras till övriga parametrar genom sambandet

$$z_m = c_1 F d, \quad (1)$$

där c_1 är en experimentellt bestämd (empirisk) konstant och F är jetstrålens s.k. densimetriska Froudes tal. Froudes tal är ett mått på förhållandet mellan tröghetskraften i det inströmmande vattnet och gravitationskraften verkande på jetstrålen. Densimetriska Froudes tal definieras av:

$$F = \frac{U_0}{\sqrt{gd(\rho_0 - \rho_a)/\rho_a}}, \quad (2)$$

där g är tyngdaccelerationen.

För att inströmmande vatten ska kunna blanda sig med allt vatten i reservoaren är det ett rimligt antagande att avståndet mellan rörmynningen och vattenytan inte får vara större än jetstrålens stighöjd. I annat fall når inte det inströmmande vattnet hela vägen upp till ytan, vilket leder till stagnation i den övre delen av volymen. Om vi försummar rörmynningens höjd över botten kan vi ställa upp följande villkor för blandning:

$$h_w(0) < c_2 Z_m, \quad (3)$$

där $h_w(0)$ är det initiala djupet i reservoaren och c_2 är en empirisk konstant. Värdet på c_2 bör vara omkring 1 enligt resonemanget ovan (men troligtvis något mindre för att jetstrålen ska ha kvar lite av sin fart när den träffar vattenytan).

Ekvation (1) och (3) ger efter division med inloppsdiametern blandningsvillkoret:

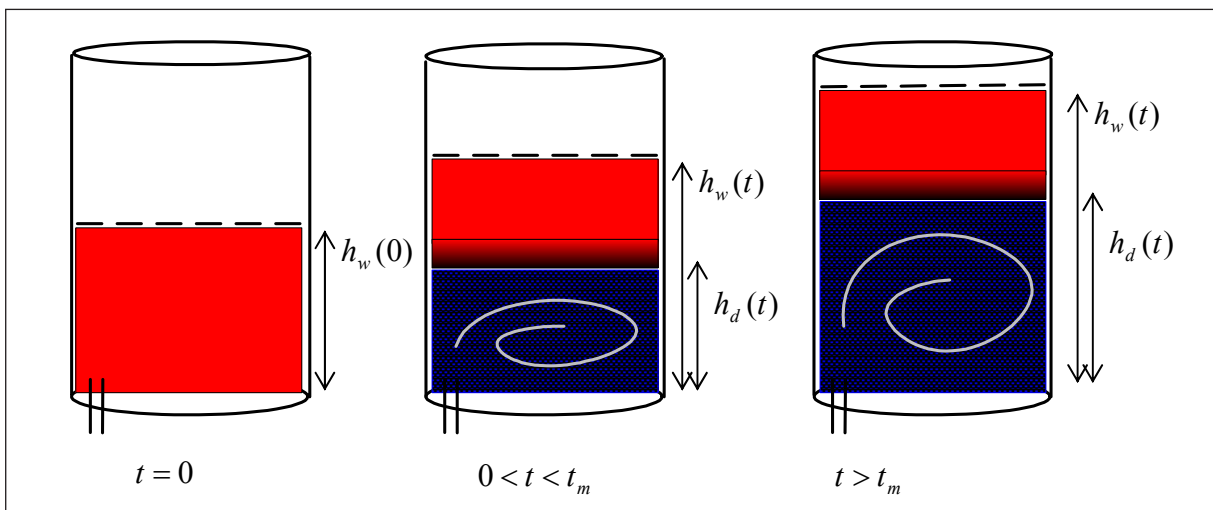
$$\frac{h_w(0)}{d} < cF, \quad (4)$$

där $c (= c_1 c_2)$ är en ny empirisk konstant. Vi är intresserade av det största (kritiska) värde på c för vilket hela volymen blandas under inströmningsperioden. Det kritiska värdet, som vi kan beteckna med c_{cr} , måste bestämmas experimentellt eller med

hjälp av datorsimuleringar för varje typ av reservoar-geometri. Även om härledningen av (4) avser ett fall med uppåtriktat inlopp är villkoret tillämplbart på andra inloppsriktningar, t.ex. horisontella inlopp, eftersom det är samma grundläggande parametrar som styr blandningsprocessen. Värdet på c_{cr} blir dock olika för olika inloppsriktningar.

Blandningsvillkoret (4) har tillämpats i tidigare studier (Rossman & Grayman 1999; Nordblom 2004). Det har dock visat sig vara svårt att bestämma det kritiska värdet svarande mot gränsen mellan blandning och stagnation. I ett fall där hela volymen blir blandad för vissa värden på parametrarna $h_w(0)$, d och F går det inte att avgöra från Ekvation (4) hur långt motsvarande värde på $c (= h_w(0)/(Fd))$ ligger under det kritiska värdet. På samma sätt kan man i stagnanta fall inte avgöra från Ekvation (4) hur långt c -värdet ligger över det kritiska värdet. Det bästa man kan göra är att försöka begränsa c_{cr} till ett intervall från ett antal fall som ger c -värden strax över respektive under det kritiska värdet.

En alternativ och betydligt effektivare metod att bestämma c_{cr} presenteras i en artikel av Martinson & Lucey (2004) och bygger på noggranna observationer av blandningsförloppet i fysiska modeller. Blandningsförloppet illustreras schematiskt i Figur 4-2. I startögonblicket ($t=0$, vänstra figuren) har hela volymen samma temperatur och djupet är $h_w(0)$. När tyngre (kallare) vatten börjar strömma in i botten på tanken blandar det sig delvis med den initiala volymen ($0 < t < t_m$, mittersta figuren). Under denna s.k. blandningsfas minskar höjden, $h_w(t) - h_d(t)$, på det övre lagret allteftersom det blandar sig med det undre



Figur 4-2. Schematisk bild av blandningsförloppet i en reservoar: startfas (vänster), blandningsfas (mitten) och slutfas (höger), från Martinson & Lucey (2004).

lagret. Efter en viss tid ($t > t_m$, högra figuren) upphör blandningen mellan lagren. Vattennivån fortsätter att stiga så länge vatten strömmar in, men höjden på det övre lagret förblir konstant.

Höjden, $h(t)$, på den del av den ursprungliga volymen som blandar sig med det inströmmande vattnet under blandningsfasen kallas för "blandningshöjden" och ges av:

$$h(t) = h_w(0) - (h_w(t) - h_d(t)), \quad (5)$$

Eftersom uttrycket inom parentes blir konstant för $t > t_m$ enligt ovan, kommer $h(t)$ att gå mot ett konstant slutvärde under blandningsfasen. Slutvärdet betecknas med h och anger hur mycket av den initiala volymen som blandat sig med inströmmande vatten för givna värden på Froudes tal (F) och inloppsdiаметern (d).

Genom en serie experiment visar Martinson och Lucey (2004) att det grundläggande sambandet (1) gäller även blandningshöjdens slutvärde, d.v.s. h ökar linjärt med Fd . Efter division med d får vi därför ekvationen:

$$\frac{h}{d} = kF, \quad (6)$$

där k är en proportionalitetskonstant.

Ekvation (6) har den stora fördelen att konstanten k i princip kan bestämmas från ett enda försök (en uppsättning värden på parametrarna F , d och h), förutsatt att försöket leder till stagnation. Om man nu sätter blandningshöjdens slutvärde, h , lika med höjden på den initiala volymen, $h_w(0)$, (d.v.s. man kräver att höjden på det övre lagret går mot noll under blandningsfasen) så ger ekvation (6) direkt det samband mellan parametrarna F , d och $h_w(0)$ som svarar mot gränsen mellan blandning och stagnation, d.v.s. $c_{cr} = k$. Med denna metod att bestämma c_{cr} blir Ekvation (4) med $c = c_{cr}$ ett tillräckligt villkor för blandning, förutsatt att reservoarens inströmningsperiod inte är kortare än t_m .

Sammanfattningsvis har vi kommit fram till att blandning precis uppnås i hela volymen när $h_w(0)/d = kF$, där k ges av Ekvation (6). Om $h_w(0)/d < kF$ är vi på den säkra sidan och om $h_w(0)/d > kF$ inträffar stagnation i den övre delen av volymen. Värdet på konstanten k beror av reservoarens geometri och inloppsriktningen och måste bestämmas antingen experimentellt eller med hjälp av datorsimuleringar.

5 Resultat från simuleringar av blandning och stagnation

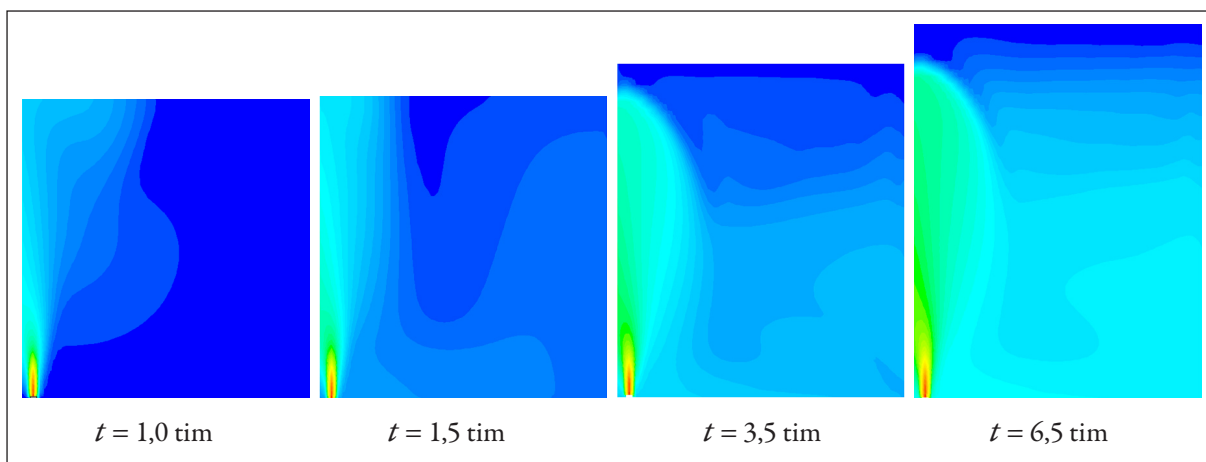
5.1 Analyserade fall

Med hjälp av datorsimuleringar bestämdes konstanten i blandningsvillkoret för vanliga cylindriska reservoarer utan avdelning av samma typ som i Gårdsten. Både vertikala och horisontella inlopp undersöktes. Simuleringar gjordes också i en modell av reservoaren i Kortedala. I samtliga fall analyserades blandningsförhållandena under inströmningsperioden.

Från varje simulering får man fram temperaturfördelningen i vertikalled under inströmningsperioden. Beräkningar gjordes för olika värden på initiala vattendjupet, $h_w(0)$, inloppsdiаметern, d , inloppshastigheten, U_0 , inloppstemperaturen, T_0 , och initiala temperaturen, T_a . Blandningshöjden, h , bestämdes med en metod baserad på temperaturfördelningens tyngdpunkt. Metoden bygger på att det finns en skarp övergång mellan den välblandade undre och den oblandade övre delen av volymen. För en mer detaljerad beskrivning av simuleringarna hänvisas till Nordblom (2004, 2004b).

5.2 Cylindrisk reservoar med vertikalt inlopp

Figur 5-1 visar resultat från en simulering av blandningsförloppet i en numerisk modell av Gårdstensreservoaren i ett fall som leder till stagnation. Figuren visar temperaturfördelningen i ett vertikalt snitt genom reservoarens centrum vid olika tidpunkter efter inströmningsperiodens början. Inloppet är placerat längst ner till vänster i figuren och är riktat vertikalt uppåt. Temperaturen på inkommande vatten är något lägre än i den initiala volymen (färgskalan är dock omvänd så att mörkare blå färg svarar mot högre temperatur). Efter 1 timme har inkommande vatten nått upp till ytan och är på väg att falla tillbaka ner mot



Figur 5-1. Beräknad temperaturfördelning i ett vertikalt snitt genom Gårdstensreservoaren vid olika tidpunkter efter inströmningsperiodens början ($h_w(0) = 24$ m, $d = 0,6$ m, $U_0 = 0,5$ m/s, $T_0 = 14,6$ °C, $T_a = 15$ °C).

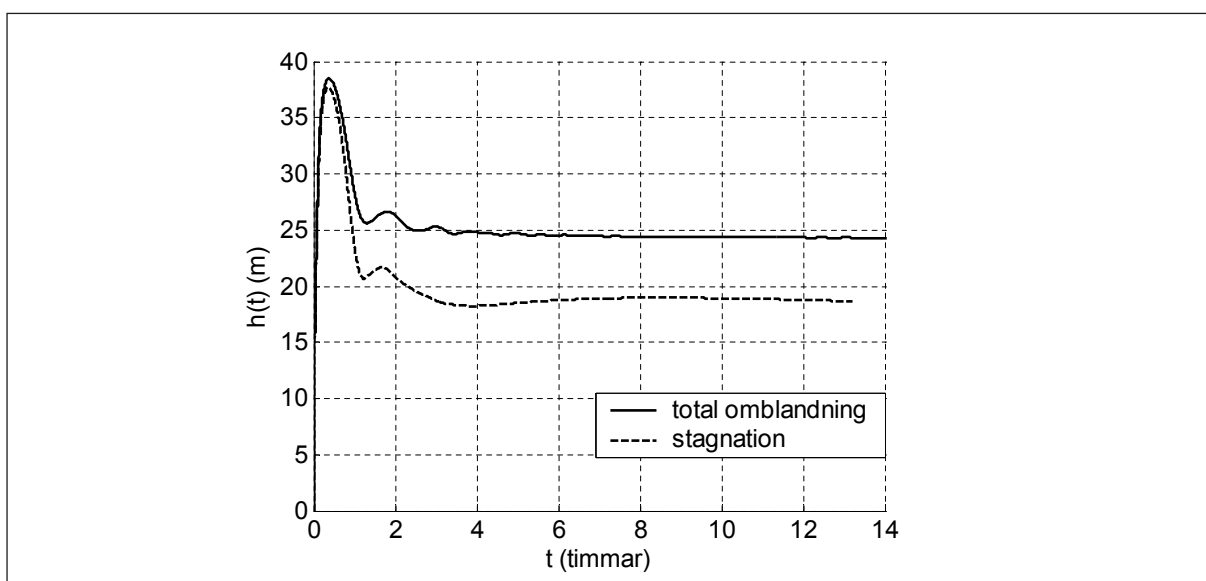
botten p.g.a. sin högre densitet. Därefter sker en spridning i den undre delen av volymen. Efter 3,5 timme kan man se att ett stagnanta skikt bildats närmast ytan. Under de följande timmarna sker bara små förändringar av tjockleken på det stagnanta skiktet.

Motsvarande värden på blandningshöjden, $h(t)$, under inströmningsperioden visas med den streckade linjen i Figur 5-2. Toppen i början på inströmningsperioden beror på att det kortvarigt uppstår en instabil skiktning med tyngre vatten i den övre delen av volymen. Som framgår av figuren blir blandningshöjdens slutvärde ≈ 19 m efter 6 timmar, vilket innebär att tjockleken på det stagnanta lagret blir $h_w(0) - h \approx 24 - 19 = 5$ m.

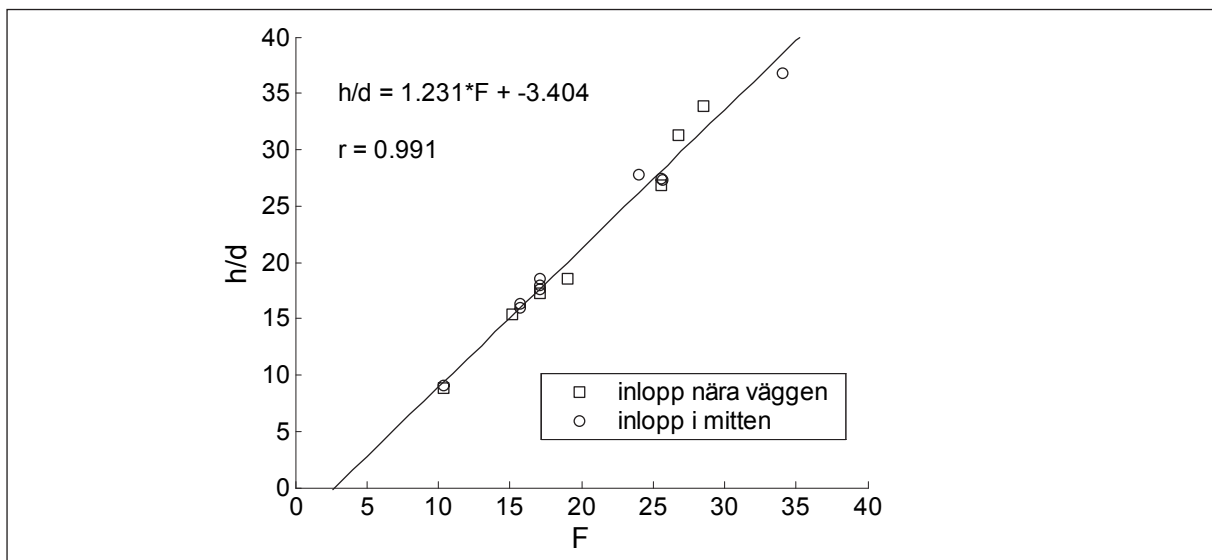
Den heldragna linjen i Figur 5-2 svarar mot ett fall som leder till total omblandning ($h(t) \rightarrow 24$ m). För att

uppfylla blandningsvillkoret räckte det i det här fallet att höja inloppstemperaturen med 0,1 °C till 14,7 °C. Alla övriga parametrar är oförändrade. Exemplet visar att även en liten temperaturändring kan ha stor betydelse för blandningsförhållandena när man befinner sig nära gränsen mellan blandning och stagnation.

Blandningshöjdens slutvärde i alla simuleringar som ledde till stagnation visas i dimensionslös form i Figur 5-3 (nedan). Två olika placeringar av inloppet undersöktes: nära reservoarens sidovägg som i Gårdstensreservoaren, respektive i centrum av reservoaren. Figur 5-3 visar att punkterna ligger väl samlade längs en rät linje och att de två olika placeringarna av inloppet ger väsentligen samma resultat. Regressionslinjen baserad på samtliga punkter går dock inte genom origo som i Ekvation (6). Parallellförskjutningen av linjen kan bero



Figur 5-2. Variation i blandningshöjden under inströmningsperioden för det stagnanta fallet i Figur 5-1 (streckad linje), samt i ett välblandat fall där temperaturen i inkommande vatten är 0,1 °C högre (heldragen linje).



Figur 5-3. Blandningshöjdens slutvärde som funktion av Froudes tal för cylindrisk reservoar med vertikalt inlopp, inlopp nära sidoväggen ($\square$) respektive i mitten av reservoaren ($\circ$).

på den metod som används för att beräkna blandningshöjden från temperaturfördelningen. Med konstanttermen inkluderad skrivs det linjära sambandet

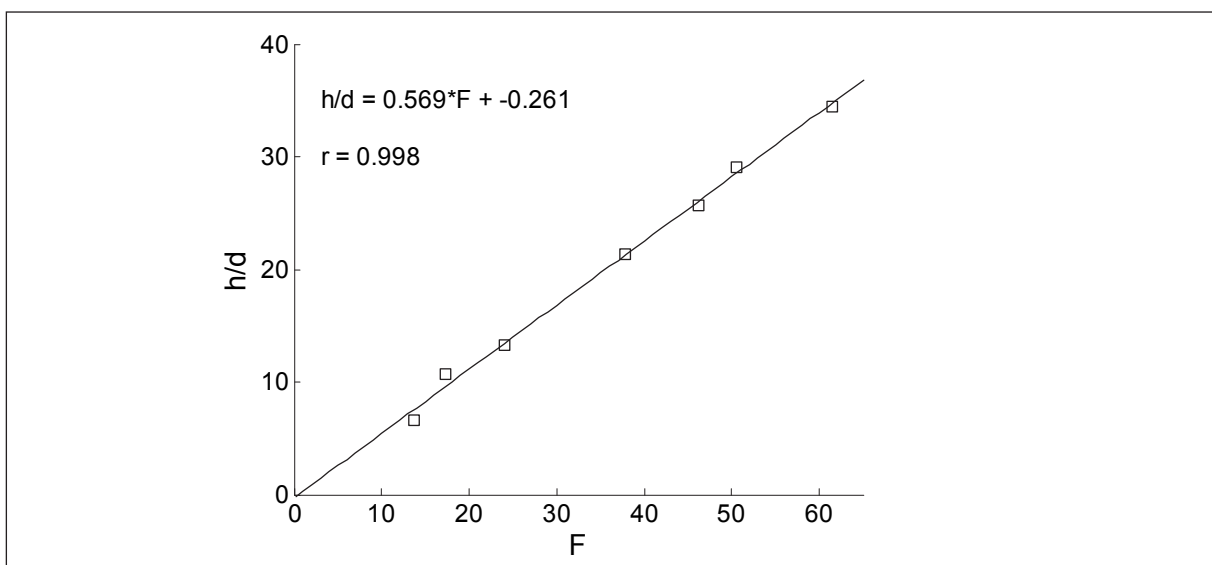
$$h/d = k_1 F + k_0, \quad (7)$$

där $k_1 = 1,2$ och $k_0 = -3,4$

Figur 5-3 kan användas för att bestämma om blandningsvillkoret uppfylls i ett specifikt fall genom att sätta $h = h_w(0)$ och pricka in punkten $[F, h_w(0)/d]$ i diagrammet. Om punkten hamnar under linjen uppfylls blandningsvillkoret och om den hamnar ovanför linjen inträffar stagnation.

5.3 Cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp

Figur 5-4 visar resultat från simuleringar av blandningshöjdens slutvärde i cylindriska reservoarer med horisontellt inlopp. Inloppsledningen mynnar strax innanför sidoväggen direkt ovanför botten och är riktad in mot reservoarens centrum. Punkterna i diagrammet hamnar även i detta fall nästan perfekt på en rät linje. Konstanterna i den linjära anpassningen blir $k_1 = 0,57$ och $k_0 = -0,26$.



Figur 5-4. Blandningshöjdens slutvärde som funktion av Froudes tal för cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp.

5.4 Tvådelad cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp

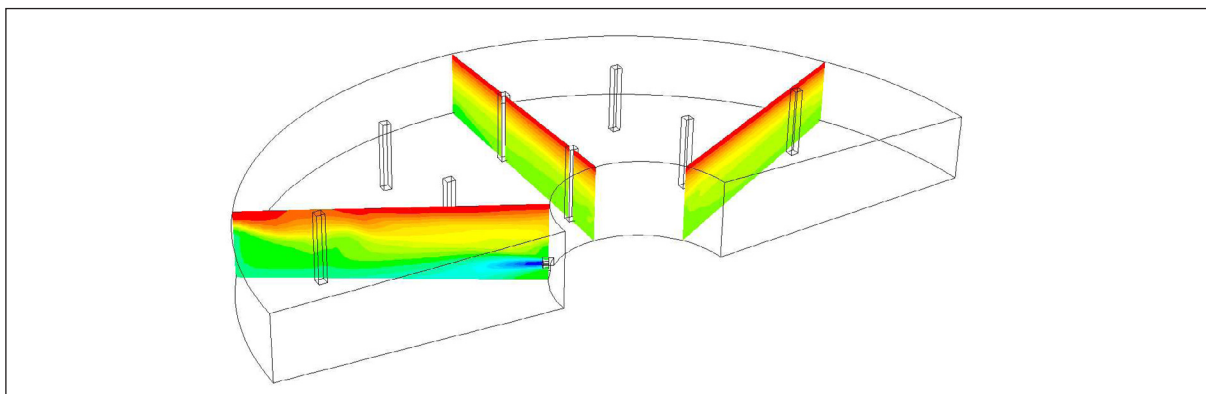
Till detta fall har alla mått hämtats från ritningar av högreservoaren i Kortedala. Resultaten från simuleringarna kan inte sägas gälla generellt för tvådelade reservoarer med horisontellt inlopp och trapphus i centrum, utan i första hand reservoarer med en utformning liknande den i Kortedala. Figur 5-5 visar temperaturfördelningen i tre vertikala snitt några timmar efter inströmningsperiodens början i ett fall där blandningsvillkoret inte uppfylls.

Figur 5-6 visar resultat från simuleringar av blandningshöjdens slutvärde. Konstanterna i den linjära anpassningen blir $k_1 = 0,16$ och $k_0 = 2,5$. Att konstanttermen, k_0 , är större än i det föregående fallet med horisontellt inlopp beror antagligen på att inloppet i Kortedala mynnar längre upp från golvet (om

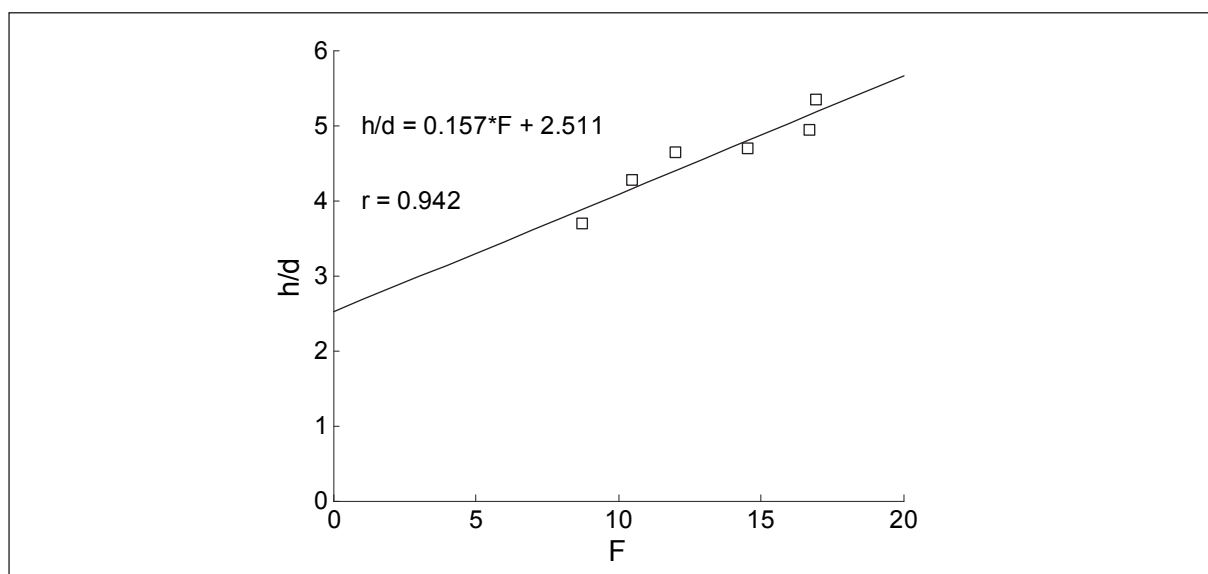
blandningsvillkoret skrivs om enligt $(h - h_i)/d = kF$, där h_i är inloppets avstånd från botten, faller nämligen konstanttermen $h_i/d = 0,75/0,3 = 2,5$ ut ur sambandet mellan h/d och F).

5.5 Jämförelser med mätningar

Resultaten från datorsimuleringarna kan jämföras med data från fältmätningarna. Från Figur 3-2 avläses uppmätta värden på inloppshastigheten, inloppstemperaturen och initiala temperaturen i Gårdstensreservoaren till $U_0 = 0,5$ m/s, $T_0 = 17,6$ °C respektive $T_a = 18,3$ °C. Med dessa värden beräknas Froudes tal till $F = 18,8$. I Figur 3-2 avläses sedan vattennivån i början och i slutet av uppfyllnadsperioden till 23,4 respektive 32,3 m.



Figur 5-5. Exempel på modellresultat för reservoaren i Kortedala några timmar efter inströmningsperiodens början.



Figur 5-6. Blandningshöjdens slutvärde som funktion av Froudes tal för reservoaren i Kortedala.

Tjockleken på det stagnanta lagret i den fyllda reservoaren beror på var gränsen ligger mellan det välblandade undre och det stagnanta övre lagret. Med en språngskiktshöjd mellan 21 och 26 m, enligt Figur 3-3, blir det stagnanta lagret mellan 6,3 m (32,3–26) och 11,3 m (32,3–21) tjockt. Om vi använder medelvärde 8,8 m blir blandningshöjden, h , lika med $23,4 - 8,8 = 14,6$ m enligt Ekvation (5), vilket ger kvoten $h/d = 14,6 / 0,6 = 24,3$. Punkten [$F = 18,8$; $h/d = 24,3$] hamnar strax ovanför regressionslinjen i Figur 5-3.

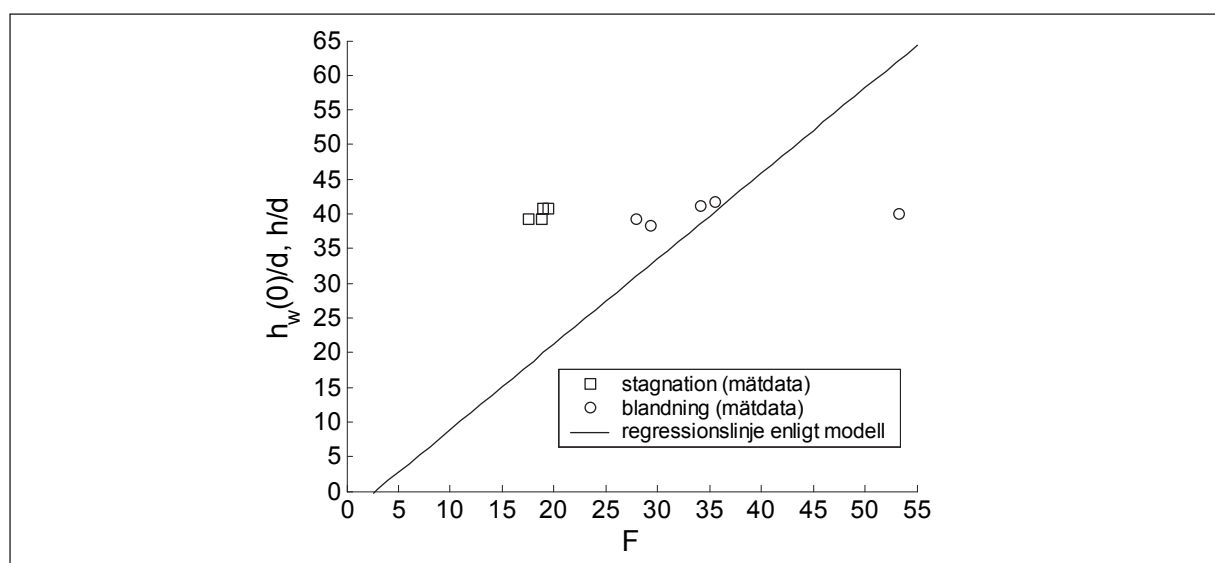
Ett annat sätt att kontrollera modellresultaten är att pricka in några samhörande värden på F och $h_w(0)/d$ från temperaturmätningarna i diagrammet i Figur 5-3 och se om punkterna hamnar på rätt sida av regressionslinjen. Fall som leder till total omblandning ska hamna under linjen och fall som leder till stagnation ska hamna över linjen. Figur 5-7 visar några punkter från mätningarna tillsammans med regressionslinjen i Figur 5-3. Som framgår av Figur 5-7 ligger de uppmätta fallen med stagnation (4 stycken) ovanför linjen helt enligt teorin. De uppmätta fallen med blandning (5 stycken) ligger strax ovanför linjen i fyra fall och under linjen i ett fall.

Jämförelserna med fältmätningarna tyder på att konstanttermen k_0 i Ekvation (7) bör sättas till noll. Då hamnar punkten [$F = 18,8$; $h/d = 24,3$] nästan exakt på regressionslinjen och punkterna som svarar mot blandning i Figur 5-7 hamnar närmare eller under (på rätt sida av) linjen.

Resultaten från simuleringarna kan också jämföras med data från litteraturen. Rossman & Grayman (1999) gjorde spårämnesförsök i fysiska modeller av

cylindriska reservoarer och bestämde det kritiska värdet på konstanten c i Ekvation (4) till 1,25 för vertikalt inlopp respektive 0,67 för horisontellt inlopp. Motsvarande resultat i denna studie var 1,23 för vertikalt inlopp och 0,57 för horisontellt inlopp, om vi bortser från konstanttermerna (antar att linjen går genom origo).

Resultaten från modellen av Kortedalareservoaren kan också jämföras med data från fältmätningarna. I Figur 3-8 avläses inloppshastigheten, inloppstemperaturen och initiala temperaturen till $U_0 = 0,3$ m/s, $T_0 = 16,5$ °C respektive $T_a = 18,3$ °C, vilket ger $F = 9,6$. I Figur 3-8 avläses vattennivån i början och i slutet av uppfyllnadsperioden till 1,70 respektive 3,95 m. Språngskiktshöjden i den fyllda reservoaren ligger ungefär på nivå 3,4 m (se Figur 3-9), vilket betyder att det stagnanta lagret blir 0,55 m tjockt. Blandningshöjden, h , blir $1,70 - 0,55 = 1,15$ m, vilket ger kvoten $h/d = 1,15 / 0,3 = 3,8$. Punkten [$F = 9,6$; $h/d = 3,8$] hamnar strax under regressionslinjen i Figur 5-6. Ytterligare punkter som kan räknas fram ur mätserien är [$F = 9,4$; $h/d = 4,2$] och [$F = 10,6$; $h/d = 3,3$]. Samtliga punkter ligger nära linjen i Figur 5-6, vilket styrker modellresultaten.



Figur 5-7. Kontroll av modellresultaten i Figur 5-3 (heldragen linje) mot data från temperaturmätningarna (symboler).

5.6 Utveckling av blandningsvillkoret

Diagrammen i Figur 5-3, Figur 5-4 och Figur 5-6 är lite besvärliga att använda eftersom de kräver beräkningar av Froudes tal, vilket är en funktion av flera andra parametrar. Därför visas här hur gränsen mellan blandning och stagnation kan uttryckas på en form som är enklare att använda. Ur Ekvation (7) löser man först ut det kritiska värdet på Froudes tal, F_{cr} , som svarar mot $h = h_w(0)$. Det ger följande ekvation:

$$F_{cr} = \frac{\frac{h_w(0)}{d} - k_0}{k_1}, \quad (8)$$

Definitionen av Froudes tal, Ekvation (2), ger den kritiska inloppshastigheten:

$$U_{cr} = F_{cr} \sqrt{g \frac{\rho(T_0) - \rho(T_a)}{\rho(T_a)} d}, \quad (9)$$

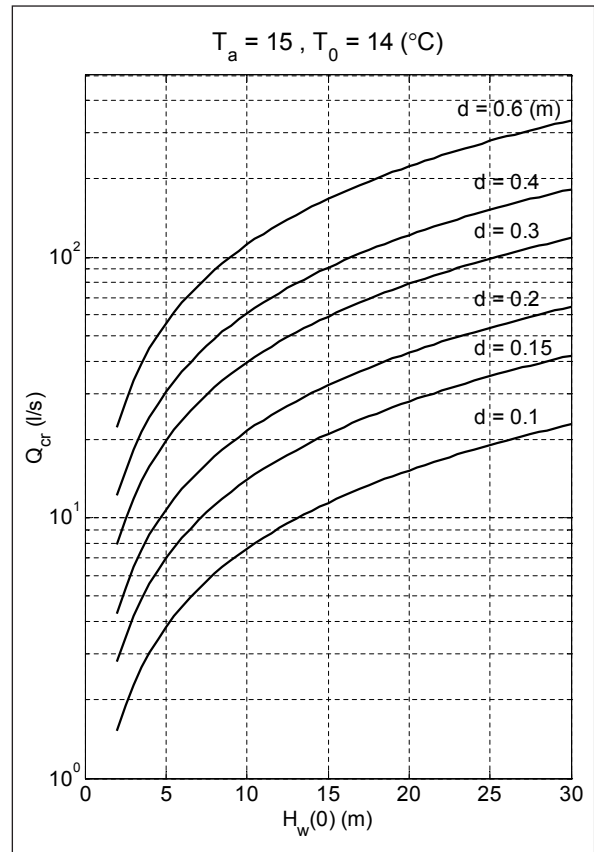
och sedan det kritiska inflödet:

$$Q_{cr} = U_{cr} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2, \quad (10)$$

Densitetens variation med temperaturen i Ekvation (9) kan beräknas med någon standardformel. I denna studie har vi använt formlerna i Unesco (1981), se diagrammet i Bilaga A.

Ekvationerna (8), (9) och (10), samt densitetens temperaturberoende ger tillsammans det samband mellan Q_{cr} , $h_w(0)$, d , T_a och T_0 som svarar mot gränsen mellan blandning och stagnation. Sambandet kan visas grafiskt i ett diagram med Q_{cr} som funktion av $h_w(0)$ och d för varje par av värden på T_a och T_0 . Figur 5-8 visar ett exempel för $T_a = 15^\circ\text{C}$ och $T_0 = 14^\circ\text{C}$. Logaritmisk skala används på y-axeln för att underlätta avläsning av flöden i ett intervall från några liter per sekund till flera hundra liter per sekund.

I Figur 5-8 är det enkelt att se om blandningsvillkoret uppfylls genom att avläsa Q_{cr} för aktuella värden på $h_w(0)$ och d och jämföra med det faktiska inflödet (Q). Om $Q > Q_{cr}$ uppfylls blandningsvillkoret och om $Q < Q_{cr}$ inträffar stagnation. I det senare fallet kan man också utläsa vilka åtgärder som krävs för att komma över på rätt sida av kurvan. Antingen minskar man den initiala vattennivån eller höjer man inflödet. Alternativt kan man byta till en



Figur 5-8. Kritiskt inflöde som funktion av initiala vattendjupet och inloppsdiametern i en cylindrisk reservoar med vertikalt inlopp.

mindre inloppsdiameter, d.v.s. byta kurva. Diagram för några olika fall finns i Bilaga B.

5.7 Tolkning av resultaten

Från datorsimuleringarna kan man dra vissa allmänna slutsatser om hur vattendjup, inloppsdiameter och inloppsriktning påverkar blandningsförhållandena. Figur 5-3, Figur 5-4 och Figur 5-6 visar att det värde på F som erfordras för att uppfylla blandningsvillkoret ökar med $h_w(0)$ (vi har här satt $h = h_w(0)$). Ju djupare reservoaren är desto större måste, enligt definitionen av Froudes tal, inloppshastigheten vara och desto mindre måste densitetsskillnaden vara för att undvika stagnation.

En annan slutsats är att blandningsvillkoret lättare uppfylls om reservoaren har liten inloppsdiameter. Det framgår inte direkt av Figur 5-3, Figur 5-4 och Figur 5-6 eftersom diametern ingår både i kvoten

$h_w(0)/d$ och i Froudes tal. När det linjära sambandet mellan $h_w(0)/d$ och F istället uttrycks i de grundläggande parametrarna enligt föregående avsnitt framgår detta tydligare. För ett givet inflöde ökar alltid $h_w(0)$ med minskande värde på d , d.v.s. med en mindre inloppsdiameter är det möjligt att åstadkomma blandning över ett större djup.

En jämförelse mellan Figur 5-3 och Figur 5-4 visar att lutningen på linjen är större för vertikala inlopp än för horisontella inlopp. För ett givet värde på Froudes tal betyder det att ett vertikalt inlopp klarar av att blanda en djupare volym än ett horisontellt inlopp. Resultatet är rimligt med tanke på att ett uppåtriktat inlopp utnyttjar jetstrålens tröghetskraft maximalt för att generera blandning i vertikalled. Med ett horisontellt inlopp måste jetstrålen först träffa en vägg innan en del av vattenströmmen kan avlänkas uppåt och driva en vertikal cirkulation.

6 Resultat från simuleringar av strömningsmönster och blandningstider

6.1 Blandning utan densitetseffekter

I föregående avsnitt såg vi att gravitationskrafter som verkar på vatten med olika densitet kan ha stor betydelse för hur vattnet strömmar i reservoarer. Med hjälp av blandningsvillkoret kunde vi avgöra när gravitationskrafterna blev så starka att inkommande vatten sjönk till botten och bildade ett stagnant lager ovanför. Om blandningsvillkoret uppfylls gäller dock att gravitationskrafterna blir försumbara jämfört med tröghetskraften i jetstrålen. I det fallet är det reservoarens form, inloppets riktning och inloppshastigheten som bestämmer vilket strömningsmönster som uppstår och hur fort inkommande vatten sprider sig till olika delar av volymen. Speciellt ger jetstrålen från inloppet

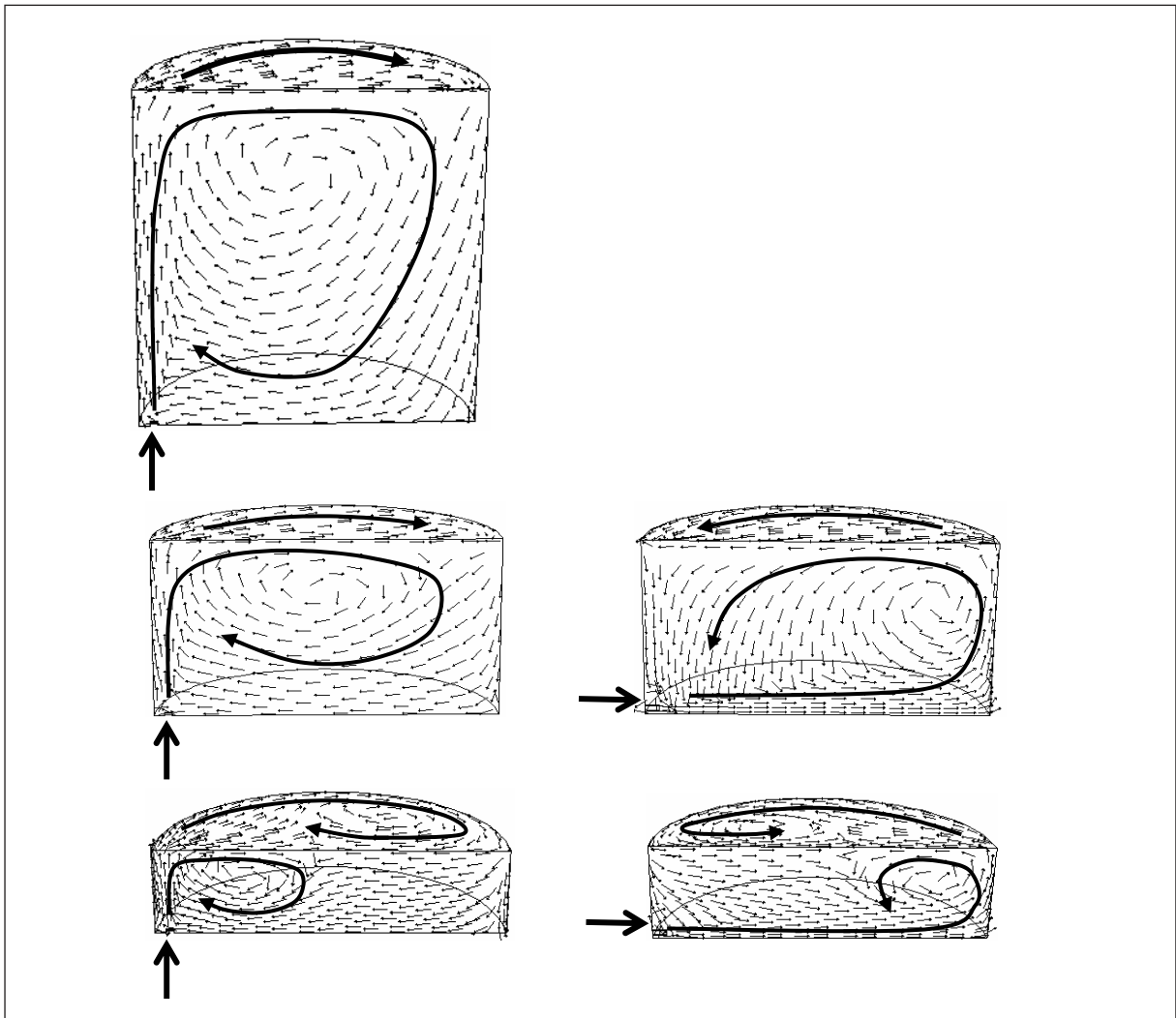
alltid upphov till en eller flera s.k. cirkulationszoner, vilket är områden där vattnet strömmar runt i cirklar. Dessa områden är särskilt intressanta eftersom nytt vatten från inloppet sist når fram till centrum av cirkulationszonerna.

I detta avsnitt redovisas resultat från simuleringar av strömmar och blandningstider i några olika typer av reservoarer. I samtliga fall råder samma temperatur inuti reservoaren som i inkommande vatten. I verkligheten motsvarar detta en situation där blandningsvillkoret är uppfyllt med god marginal så att densitetsskillnader är försumbara.

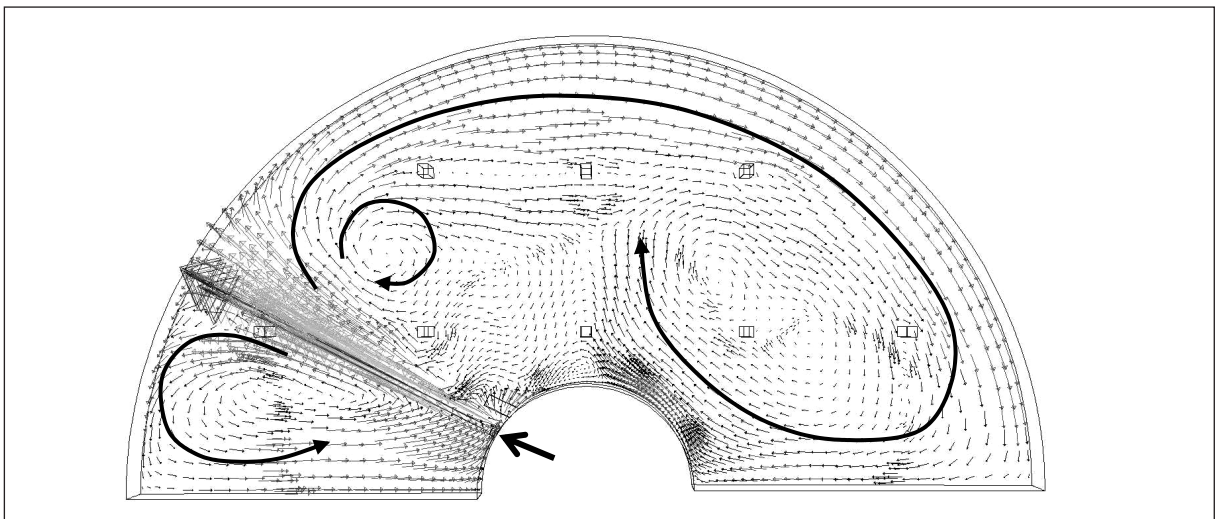
6.2 Strömningsmönster

Figur 6-1 (nedan) visar exempel på strömningsmönster i cylindriska reservoarer vid olika förhållanden mellan initiala djupet $h_w(0)$ och reservoardiametern D . Inloppet är placerat nära sidoväggen och är riktat antingen rakt uppåt eller horisontellt in mot centrum. De små pilarna markerar beräknade strömriktningar på vattenytan, samt i ett vertikalt snitt i mitten av reservoaren. De tjocka pilarna har ritats ut för hand för att förtydliga huvuddragen i strömningsmönstret. Inloppsriktningen markeras med en pil utanför reservoaren. I exemplen där $h_w(0)/D \geq 0,5$ (överst och mitten) domineras strömbilden av en stor cirkulationszon som sträcker sig över hela reservoarens djup. För $h_w(0)/D = 0,25$ (underst) är den vertikala cirkulationen svagare, medan den horisontella cirkulationen är starkare. Om kvoten mellan vattendjupet och reservoardiametern minskar ytterligare undertrycks den vertikala cirkulationen och strömningsmönstret blir mer och mer tvådimensionellt i planet.

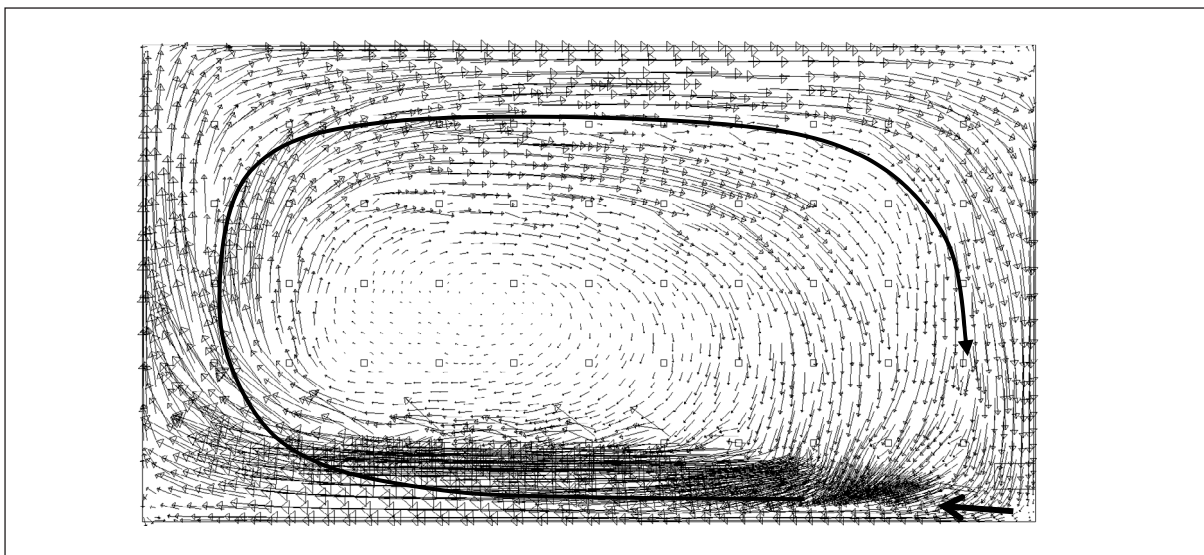
Figur 6-2 visar beräknade strömmar i ett horisontellt plan i reservoaren i Kortedala. Kvoten, $h_w(0)/D$, är ca 0,1 och strömningsmönstret är huvudsakligen tvådimensionellt i planet. De beräknade pilarna visar i detta fall både riktning och relativ storlek på strömmen. För att de svaga strömmarna inuti reservoaren ska synas har längden på pilarna förstörats. Hastigheten vid inloppet är i storleksordningen några decimeter per sekund och inuti reservoaren endast någon millimeter per sekund. Horisontella cirkulationszoner uppstår dels på vardera sidan av jetstrålen, dels i den högra delen av volymen (sett uppifrån).



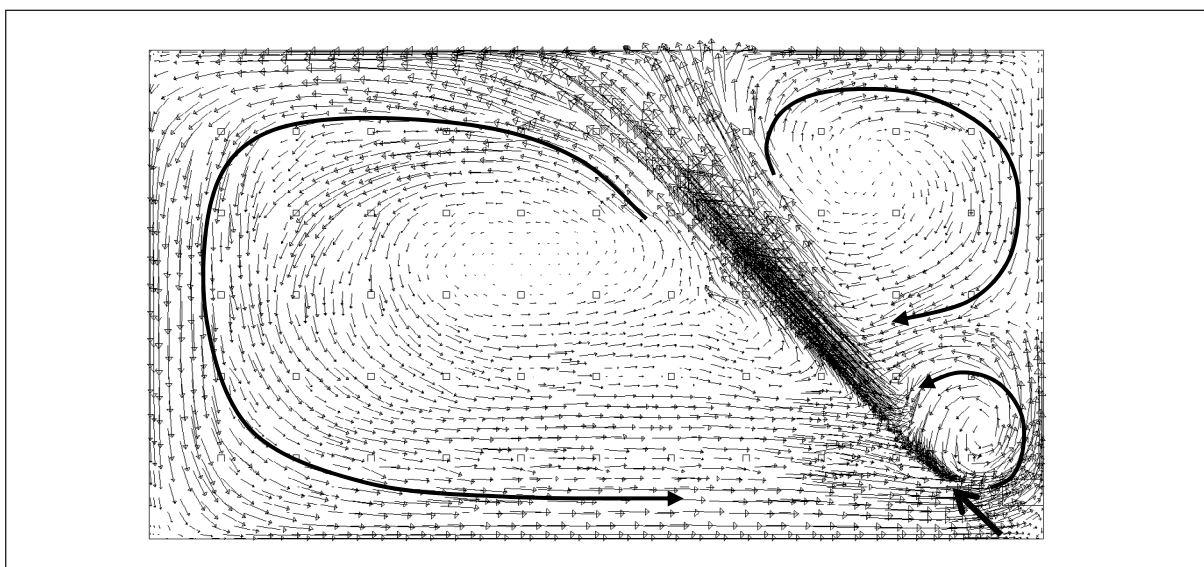
Figur 6-1. Strömningsmönster i cylindriska reservoarer med olika djup-breddförhållande, $h_w(0)/D = 1$ (överst), $h_w(0)/D = 0,5$ (mitten), $h_w(0)/D = 0,25$ (underst).



Figur 6-2. Strömningsmönster i Kortedalarreservoaren. På vardera sidan av jetstrålen uppstår en horisontell cirkulationszon.



Figur 6-3. Beräknat strömningsmönster i ett horisontellt plan i en rektangulär reservoar med tangentiellt riktat inlopp i nedre högra hörnet.

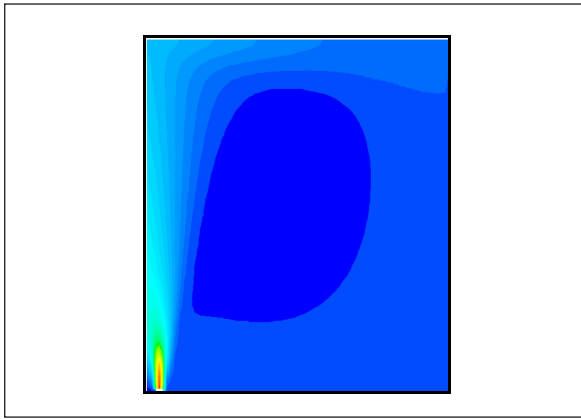


Figur 6-4. Beräknat strömningsmönster i ett horisontellt plan i en rektangulär reservoar med diagonalt riktat inlopp i nedre högra hörnet.

Figur 6-3 visar beräknade strömmar i en rektangulär reservoar med dimensionerna 65 x 35 x 7,5 m. Måtten ger ett relativt litet värde på djup-längdförhållandet, vilket innebär att strömningsmönstret huvudsakligen blir tvådimensionellt. Inloppet är placerat i det nedre högra hörnet och är riktat tangentiellt längs den undre långsidan. Jetstrålen från inloppet skapar en stor horisontell cirkulationszon med centrum snett ned till vänster om reservoarens mittpunkt. Om inloppet istället riktas diagonalt genom reservoaren som i Figur 6-4 blir strömningsmönstret mer komplicerat. På vänster sida av jetstrålen bildas en större cirkulationszon och på höger sida två mindre.

6.3 Blandningstider

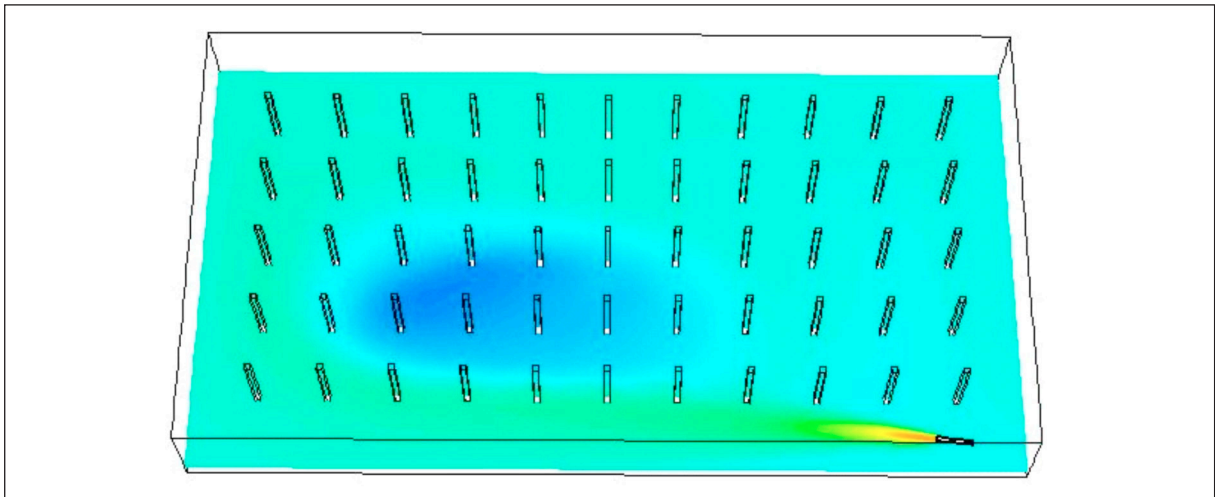
Med hjälp av spårämnessimuleringar går det att beräkna hur fort inkommande vatten sprider sig till olika delar av volymen. Man startar med koncentrationen noll i hela volymen och "märker" allt vatten som strömmar in med ett spårämne med en konstant koncentration. Med hjälp av spårämnet kan man följa hur det nya vattnet successivt sprider sig över volymen och även beräkna proportionen mellan nytt och gammalt vatten i olika punkter. En ögonblicksbild från en spårämnesberäkning visas i Figur 6-5 för den cylindriska



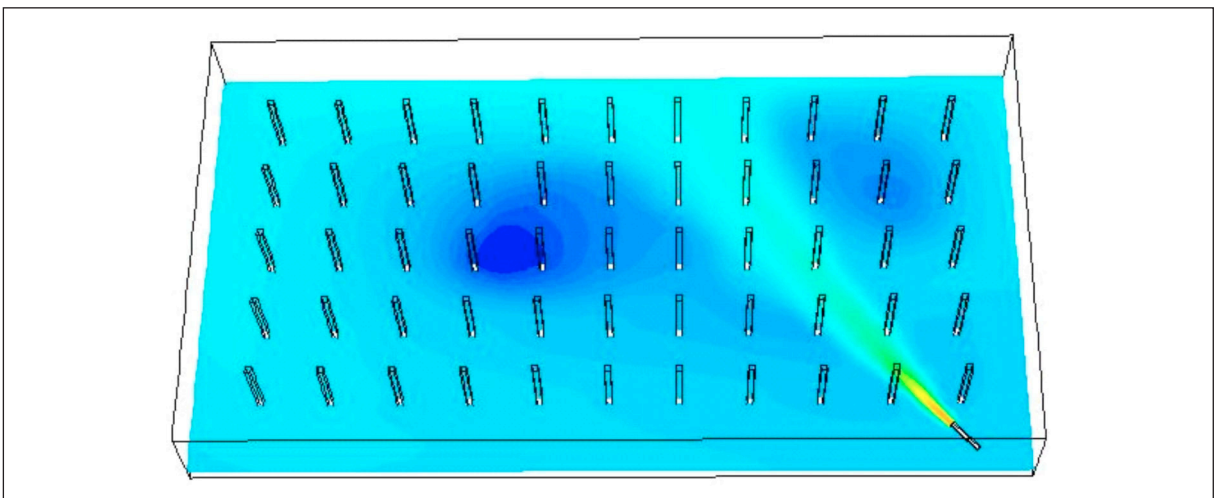
Figur 6-5. Beräknad spårämneskoncentration i ett vertikalt snitt genom en cylindrisk reservoar med $h_w(0)/D = 1$. Den mörkare blå färgen i mitten av reservoaren svarar mot lägre koncentration av spårämnet, jämför med strömningsmönstret i Figur 6-1.

reservoaren med $h_w(0)/D = 1$. Spårämneskoncentrationen är högst i närheten av inloppet och lägst i mitten av cirkulationszonen. Motsvarande resultat för den rektangulära reservoaren visas i Figur 6-6 och Figur 6-7. Även här blir spårämneskoncentrationen lägst i centrum av cirkulationszonerna.

Med hänsyn till vattenomsättningen är det intressant att veta hur lång tid det tar för inströmmande vatten att fördela sig jämnt över volymen. Denna tid kan vi kalla för blandningstiden. Blandningstiden kan definieras på olika sätt beroende på hur man uttrycker skillnader i koncentration mellan olika punkter och var man lägger gränsen för hur små avvikelser som krävs för att homogena förhållanden ska anses råda i reservoaren.



Figur 6-6. Beräknad spårämneskoncentration i ett horisontellt plan i en rektangulär reservoar med tangentiellt riktat inlopp i nedre högra hörnet. Mörkare blå färg svarar mot lägre koncentration av spårämnet, jämför med strömningsmönstret i Figur 6-3.



Figur 6-7. Beräknad spårämneskoncentration i ett horisontellt plan i en rektangulär reservoar med diagonalt riktat inlopp i nedre högra hörnet. Mörkare blå färg svarar mot lägre koncentration av spårämnet, jämför med strömningsmönstret i Figur 6-4.

I detta avsnitt jämförs två olika definitioner av blandningstid: (1) den tid det tar innan den lägsta spårämneskoncentrationen överstiger 90 % av medelkoncentrationen och (2) den tid det tar innan standardavvikelsen baserad på samtliga beräkningsceller i modellen understiger 10 % av medelkoncentrationen. Den första definitionen betecknas med $t_{c_{\min}}$ och den andra med $t_{\sigma 10}$. En viktig principiell skillnad mellan definitionerna är att $t_{c_{\min}}$ baseras på koncentrationen i en enda punkt (koncentrationen i centrum av en cirkulationszon), medan $t_{\sigma 10}$ baseras på koncentrationsfördelningen över hela volymen.

Med hjälp av dimensionsanalys kan man visa att blandningstiden är proportionell mot $l^2 d / Q$, där l är en karaktäristisk längdskala som bestäms av reservoarens form och dimensioner, d är inloppsdiametern och Q är inflödet (Nordblom 2004). Om allt annat är konstant betyder det att blandningstiden halveras om inloppsdiametern halveras. Detsamma gäller om inflödet ökas till det dubbla. Sambandet kan skrivas:

$$t_{c_{\min}} = K_1 \frac{l^2 d}{Q}, \quad (11)$$

$$t_{\sigma 10} = K_2 \frac{l^2 d}{Q}, \quad (12)$$

där K_1 och K_2 är proportionalitetskonstanter som måste bestämmas experimentellt eller med hjälp av datorsimuleringar för varje typ av reservoargeometri.

Vid analys av blandningsförloppet i reservoarer med varierande volym är det praktiskt att normalisera blandningstiden med initialvärdet av nominella uppehållstiden, $t_N(0) = V(0) / Q$, där $V(0)$ är volymen vid inströmningsperiodens början. Om de normaliserade blandningstiderna betecknas med $\tau_{c_{\min}}$ respektive $\tau_{\sigma 10}$ får vi följande samband:

$$\tau_{c_{\min}} = \frac{t_{c_{\min}}}{t_N(0)} = \frac{t_{c_{\min}} Q}{V(0)} = K_1 \frac{l^2 d}{V(0)}, \quad (13)$$

$$\tau_{\sigma 10} = \frac{t_{\sigma 10}}{t_N(0)} = \frac{t_{\sigma 10} Q}{V(0)} = K_2 \frac{l^2 d}{V(0)}, \quad (14)$$

Av Ekvationerna (13) och (14) framgår att $\tau_{c_{\min}}$ och $\tau_{\sigma 10}$ kan tolkas som en kvot mellan två volymer. Täljaren motsvarar den volym vatten som måste strömma in för att uppnå den önskade graden av blandning, medan nämnaren är den initiala volymen. De normaliserade blandningstiderna motsvarar således den

relativa volymökning, $\Delta V / V(0)$, som krävs för att inströmmande vatten ska fördela sig jämnt.

I litteraturen finns flera exempel på undersökningar av blandningstankar inom processindustrin där man har försökt att bestämma konstanten och relatera den karaktäristiska längdskalan l till tankens dimensioner, se t.ex. översikterna av Jayanti (2001) och Patwardhan (2002). Resultaten varierar dock mellan olika studier och är svåra att jämföra p.g.a. skillnader i mätteknik, definition av blandningstid, tankgeometri och Reynolds tal. Ett uttryck för längdskalan som är speciellt intressant i det här sammanhanget föreslås av Rossman och Grayman (1999) i cylindriska reservoarer utan avdelning. Där sätts l till $D^{2/3} h_w(0)^{1/3}$, vilket är proportionellt mot $V(0)^{1/3}$. Insatt i Ekvation (13) och (14) ger det uttrycken:

$$\tau_{c_{\min}} = K_1 \frac{d}{V(0)^{1/3}}, \quad (15)$$

$$\tau_{\sigma 10} = K_2 \frac{d}{V(0)^{1/3}}, \quad (16)$$

Tabell 6-1 visar en sammanställning av resultat från de simuleringar av blandningstider som gjorts i detta projekt. Simuleringarna gjordes med olika värden på initiala vattendjupet, inloppsdiametern och inflödet. I cylindriska reservoarer med vertikalt eller horisontellt inlopp varierar den normaliserade blandningstiden $\tau_{c_{\min}}$ i intervallet 0,29–0,63 och $\tau_{\sigma 10}$ i intervallet 0,20–0,39. Det krävs alltså en volymökning med 30–60 % för att uppnå blandning enligt den första definitionen och med 20–40 % enligt den andra definitionen.

Motsvarande värden på K_1 och K_2 enligt Ekvationerna (15) och (16) hamnar i intervallet 10,3–17,6 respektive 9,1–11,7. Värdet på K_1 överstiger alltid värdet på K_2 , vilket betyder att definitionen av $\tau_{c_{\min}}$ innebär ett större krav på koncentrationsutjämning än definitionen av $\tau_{\sigma 10}$. De två största värdena på K_1 och K_2 svarar mot fallet $h_w(0) / D = 0,5$ och horisontellt inlopp. Den större variationen i K_1 jämfört med K_2 tyder på att $\tau_{c_{\min}}$ är känsligare för skillnader i blandningsförhållandena än $\tau_{\sigma 10}$. Detta verkar rimligt med tanke på att $\tau_{c_{\min}}$ mäter den tid det tar för spårämnet att sprida sig till centrum av en cirkulationszon, vilken i sin tur är starkt kopplad till strömningsmönstret.

Som jämförelse visar Tabell 6-1 även blandningstider i Kortedalarervoaren och i en rektangulär

Tabell 6-1. Resultat från simuleringar av blandningstider under uppfyllnadsfasen.

Geometri, vertikalt eller horisontellt inlopp	$h_w(0)$ (m)	D (m)	$V(0)$ (m ³)	d (m)	Q (m ³ /s)	$\tau_{C_{\min}}$ (-)	$\tau_{\sigma 10}$ (-)	K_1 (-)	K_2 (-)
Cylindrisk ¹ , v	24	24	10 860	0,6	0,141	0,31	0,29	11,4	10,7
Cylindrisk, v	12	24	5430	0,6	0,141	0,35	0,32	10,3	9,4
Cylindrisk, v	6	24	2710	0,6	0,141	0,63	0,39	14,6	9,1
Cylindrisk, v	12	24	5430	0,4	0,063	0,29	0,22	12,7	9,7
Cylindrisk, h	12	24	5430	0,4	0,063	0,37	0,26	16,3	11,4
Cylindrisk, h	6	24	2710	0,4	0,063	0,34	0,30	11,9	10,5
Cylindrisk, h	3	24	1360	0,4	0,063	0,47	0,38	13,0	10,5
Cylindrisk, h	12	24	5430	0,3	0,063	0,30	0,20	17,6	11,7
Kortedala, h	1,6	26	400	0,3	0,035	3,0	2,0	73,4	48,9
Rektangulär ² , h	4	–	9100	0,5	0,079	1,0	0,34	41,8	14,2

¹ geometri motsvarande reservoaren i Gårdsten.

² dimensioner 65x35x4 m, tangentiellt inlopp.

Tabell 6-2. Resultat från simuleringar av blandningstider under stationära förhållanden.

Geometri, horisontellt inlopp	h_w (m)	D (m)	V (m ³)	d (m)	Q (m ³ /s)	$\tau_{C_{\min}}$ (-)	$\tau_{\sigma 10}$ (-)	K_1 (-)	K_2 (-)
Cylindrisk, h	17,5	35	16 830	0,5	0,088	0,27	0,21	13,8	10,8
Cylindrisk, h	14,0	35	13 460	0,5	0,088	0,25	0,22	11,9	10,5
Cylindrisk, h	11,5	35	11 060	0,5	0,088	0,25	0,23	11,1	10,2
Cylindrisk, h	11,5	35	11 060	0,3	0,088	0,16	0,15	11,9	11,1
Cylindrisk, h	11,5	35	11 060	0,6	0,088	0,30	0,27	11,1	10,0
Cylindrisk, h	11,5	35	11 060	0,6	0,175	0,30	0,27	11,1	10,0
Cylindrisk, h	7,0	35	6 730	0,5	0,088	0,33	0,27	12,5	10,2
Cylindrisk, h	3,5	35	3 370	0,5	0,088	0,53	0,39	15,9	11,7

reservoar med tangentiellt inlopp. Tabellen visar att blandningstiden kan variera mycket mellan olika typer av geometrier och att vanliga cylindriska reservoarer utan avdelning ger förhållandevis korta blandningstider.

Formlerna för beräkning av blandningstid är tillämpbara även vid stationära förhållanden (konstanta in- och utflöden och konstant volym). Den konstanta volymen V ersätter då initialvolymen $V(0)$ i Ekvation (13)–(16). Den normaliserade blandningstiden ska nu tolkas som kvoten mellan den volym vatten (ΔV) som måste passera genom reservoaren för att uppnå önskad grad av blandning och reservoarvolymen (V). Tabell 6-2 visar resultat från simuleringar av blandningstider i cylindriska reservoarer med horisontellt inlopp under stationära förhållanden. Konstanterna K_1 och K_2 hamnar i ungefär samma intervall som i Tabell 6-1.

6.4 Jämförelser med mätningar

De simulerade blandningstiderna kan jämföras med mätdata från fysiska modellförsök redovisade i Grayman *et al.* (2000). I referensen används $t_{\sigma 10}$ som mått på blandningstiden. Konstanten K_2 från Ekvation (16) hamnar enligt mätningarna i referensen i intervallet 5–10 för vertikalt inlopp och i intervallet 2–12 för horisontellt inlopp. Motsvarande resultat för simuleringarna ligger i intervallet 9–12, d.v.s. nära den övre gränsen i referensen. Vid jämförelsen bör man beakta att blandningstiderna inte beräknats på exakt samma sätt. I modellförsöken beräknades standardavvikelsen från uppmätta spårämneskoncentrationer i några få mätpunkter vid sidan av jetstrålen, medan de simulerade blandningstiderna i Avsnitt 6.3 baseras

på spårämneskoncentrationen i ett stort antal punkter fördelade över hela volymen, inklusive jetstrålen. Det kan förklara de större värdena på K_2 i simuleringarna.

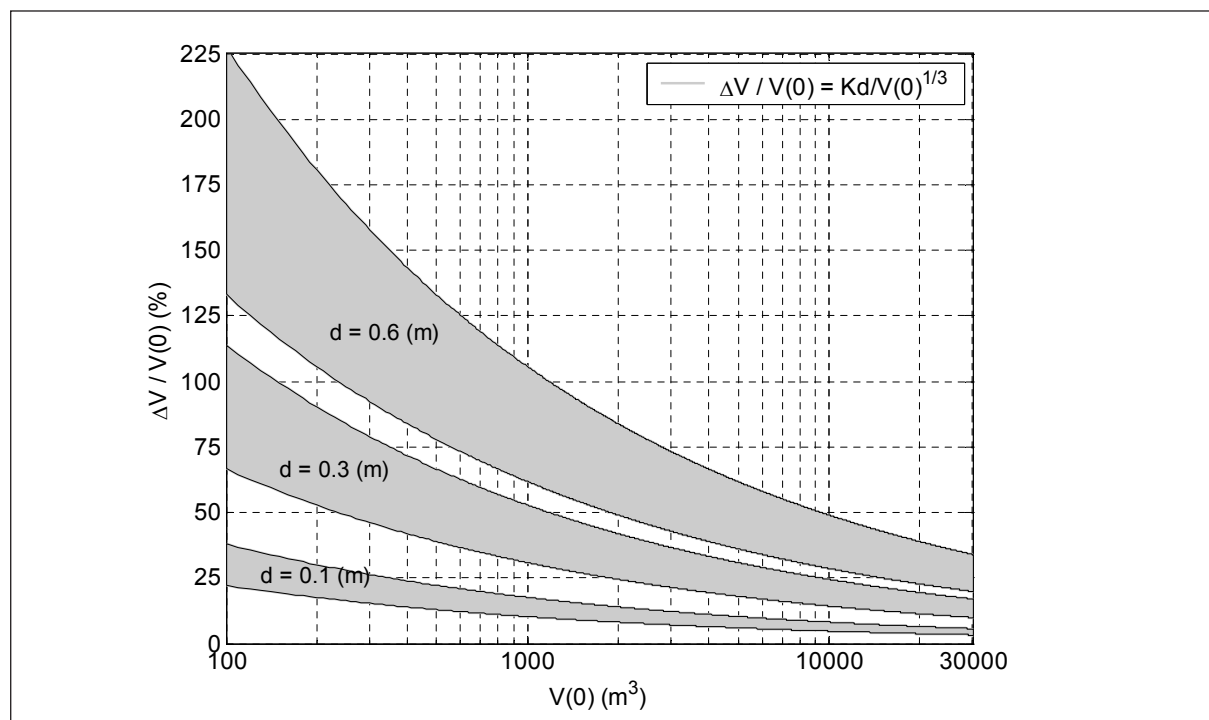
De simulerade blandningstiderna kan också jämföras med experimentella data från Giesecke *et al.* (1984). Mätningarna gjordes i det fallet i en cylindrisk reservoar med ett horisontellt inlopp riktat in mot centrum. Spårämneskoncentrationen uppmättes i centrum av cirkulationszonerna, vilket gjorde det möjligt att bestämma $t_{C_{min}}$. För stationära förhållanden gav mätningarna värden på K_1 i intervallet 10–20, vilket kan jämföras med resultaten i Tabell 6-2 där K_1 varierar mellan 11 och 16.

tre olika inloppsdiametrar. För att illustrera variationen i K_1 i Tabell 6-1 visar diagrammet en kurvsara svarande mot konstantvärden i intervallet 10,3–17,6. Som framgår av Figur 6-8 ökar den erforderliga relativa volymökningen med ökad inloppsdiameter och minskar med ökad reservoarvolym.

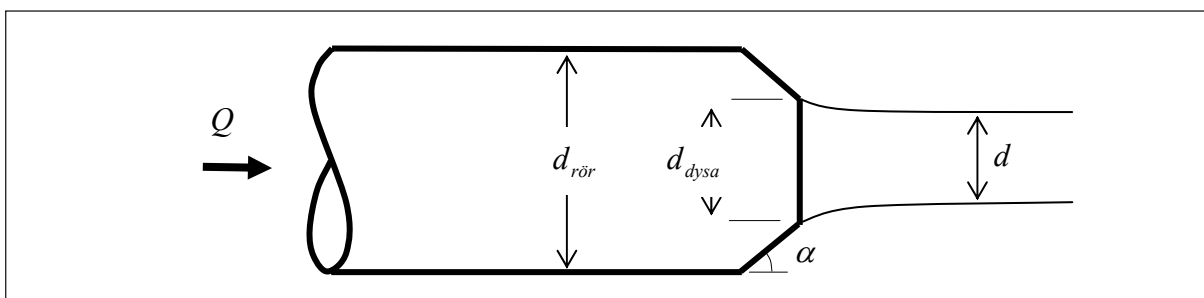
Figur 6-8 kan användas för att kontrollera om volymökningen under uppfyllnadsperioden är tillräckligt stor för att vattnet ska hinna blandas. Exempelvis krävs en volymökning med 25–40 % i en reservoar med initialvolymen 2000 m³ och inloppsdiametern 0,3 m. Vid analys av blandning under stationära förhållanden används diagrammet med den konstanta volymen (V) istället för den initiala volymen ($V(0)$).

6.5 Tolkning av resultaten

Ekvationerna (15) och (16) kan åskådliggöras grafiskt för varje givet värde på konstanten. Figur 6-8 visar Ekvation (15) och gäller fallet cylindrisk reservoar utan avdelning, med vertikalt inlopp eller horisontellt inlopp riktat in mot centrum. Diagrammet visar erforderlig relativ volymökning som funktion av initialvolym för



Figur 6-8. Erforderlig volymtillförsel i procent av initialvolymen för att inkommande vatten ska fördela sig jämnt över volymen. Diagrammet gäller för cylindriska reservoarer utan avdelning, med vertikalt inlopp eller horisontellt inlopp riktat in mot centrum.



Figur 7-1. Schematisk bild av inloppsdysa.

7 Dimensionering av inloppsdysa

Enligt tidigare avsnitt är det lättare både att uppfylla blandningsvillkoret och att uppnå en kort blandningstid om reservoaren har en liten inloppsdiameter. Att minska inloppsdiametern är därför ett effektivt sätt att förbättra blandningsförhållandena i befintliga reservoarer.

Det enklaste sättet att minska inloppsdiametern är att montera en förträngning (dysa) på rörmynningen. Figur 7-1 (ovan) visar en schematisk bild av en dysa med rördiametern $d_{rör}$ och öppningsdiametern d_{dysa} . På grund av jetstrålens kontraktion strax efter dysan minskar strålens diameter. Den reducerade diametern betecknas med d och är den diameter som analysen av blandningsförhållandena ska baseras på. Kontraktionskoefficienten C_C definieras av $C_C = (d / d_{dysa})^2$ och varierar med kvoten $d_{dysa} / d_{rör}$ samt dysans vinkel α . Värden på kontraktionskoefficienten listas i Tabell 7-1 för vinklarna $\alpha = 45^\circ$ och $\alpha = 90^\circ$ (Fischer *et al.* 1979). För givna dimensioner på dysan avläses ett värde på kontraktionskoefficienten i Tabell 7-1 varefter strålens effektiva diameter ges av $d = \sqrt{C_C} \cdot d_{dysa}$. Omvänt kan man för en given rördiameter ($d_{rör}$) och en given önskad effektiv diameter (d) få fram öppningsdiametern (d_{dysa}) genom att leta upp den rad i Tabell 7-1 som uppfyller ekvationen

$$(d_{dysa} / d_{rör}) \cdot \sqrt{C_C} = d / d_{rör}.$$

Tabell 7-1. Kontraktionskoefficienter (Fischer *et al.* 1979)

$\frac{d_{dysa}}{d_{rör}}$	$\alpha = 45^\circ$ C_C	$\alpha = 90^\circ$ C_C
0,0	0,746	0,611
0,1	0,747	0,612
0,2	0,747	0,616
0,3	0,748	0,622
0,4	0,749	0,631
0,5	0,752	0,644
0,6	0,758	0,662
0,7	0,768	0,687
0,8	0,789	0,722
0,9	0,829	0,781
1,0	1,000	1,000

8 Vattenomsättning i fullständigt omblandade tankar

Som ett komplement till de tidigare avsnitten om blandningsvillkor och blandningstider redovisas nedan hur vattenomsättningen beräknas i en ideal, fullständigt omblandad, reservoar. Analysen ger en allmän förståelse för hur förhållandet mellan volymer och flöden styr hur snabbt vattnet byts ut och hur länge vattnet i genomsnitt uppehåller sig i reservoaren. Avsnittet är fristående från de tidigare och kan därför hoppas över av den som vill gå direkt på slutsatserna från studien.

8.1 Några definitioner

Andel nytt vatten

Vid analys av vattenomsättning i reservoarer är det praktiskt att utgå från en given vattenmassa i reservoaren vid en viss tidpunkt (startögonblicket för analysen) och betrakta allt vatten som därefter strömmar in till reservoaren som nytt vatten. Efterhand som nytt vatten strömmar in och blandar sig med vattnet som fanns i reservoaren från början ökar successivt andelen nytt vatten.

Utbytestid

Utbytestiden definieras här som den tid det tar att byta ut en viss andel av den ursprungliga vattenmassan mot nytt vatten. Exempel på tider som kan vara intressanta att bestämma är hur lång tid det tar innan 50, 90 eller 95 % av den ursprungliga vattenmassan har bytts ut.

Genomsnittlig uppehållstid (ålder)

Vattnets genomsnittliga uppehållstid i reservoaren är densamma som vattnets genomsnittliga ålder om inkommande vatten antas ha åldern noll.

Nominell uppehållstid

Den nominella uppehållstiden definieras som reservoarens volym dividerad med flödet genom reservoaren. Begreppet nominell uppehållstid hör ihop med det stationära fallet där in- och utflöden är lika stora och

konstanta i tiden och där följaktligen även reservoarvolymen är konstant i tiden.

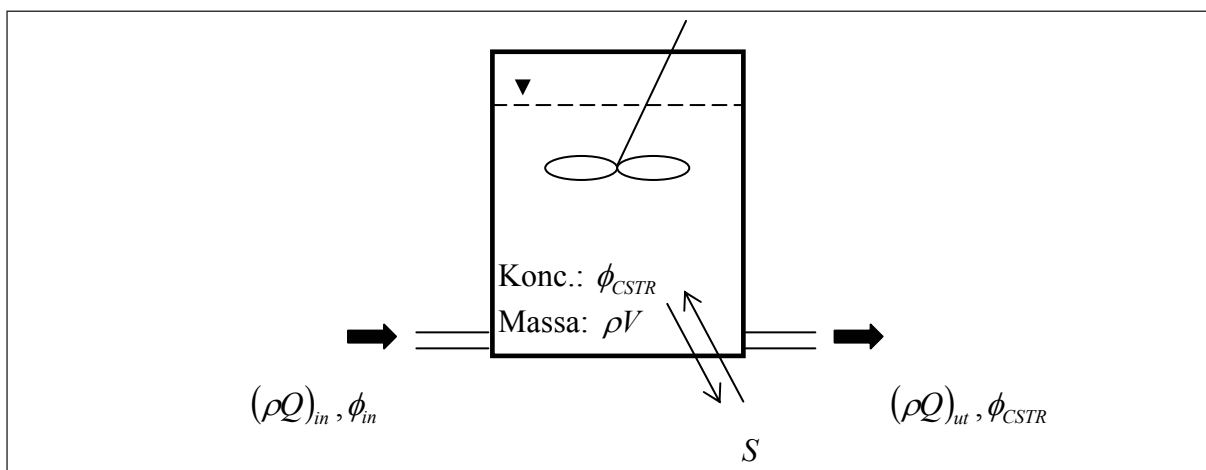
8.2 Massbalansmodell för en fullständigt omblandad tank

I en fullständigt omblandad tank antas det vatten som strömmar in via inloppet blanda sig momentant och fullständigt med resten av volymen. Vattenutbyte och uppehållstid kan i detta ideal fall beräknas genom att ställa upp en massbalans för ett godtyckligt ämne i reservoaren, se Figur 8-1.

Propellern i Figur 8-1 symboliserar att tanken är fullständigt omblandad, vilket även beteckningen CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor) syftar på. Övriga beteckningar i figuren är: ϕ_{CSTR} = masskoncentration inuti den fullständigt omblandade tanken (kg av ämnet/kg vatten), ϕ_{in} = masskoncentration i inflödande vatten (kg av ämnet/kg vatten), ρ = vattnets densitet (kg/m³), V = volymen av vattnet i reservoaren (m³), ρV = massan av vattnet i reservoaren (kg), $(\rho Q)_{in}$ = massinflöde till reservoaren (kg/s), $(\rho Q)_{ut}$ = massutflöde från reservoaren (kg/s), S = käll- eller sänktterm (kg/s) som representerar tillskott ($S > 0$) eller förlust ($S < 0$) av ämnet. För ett konservativt (icke-reagerande) spårämne är $S = 0$.

Ekvationen som beskriver massbalansen i Figur 8-1 kan formuleras matematiskt på följande sätt (se ruta med formel 17).

Lösningen till massbalans ekvationen (17) beskriver för givna initial- och randvillkor hur koncentrationen av ämnet varierar med tiden. Ekvationen förutsätter



Figur 8-1. Schematisk figur över massbalansen för ett godtyckligt ämne i en fullständigt omblandad tank.

$$\frac{d}{dt}(\rho V \varphi_{CSTR}) = (\rho Q)_{in} \varphi_{in} - (\rho Q)_{ut} \varphi_{CSTR} + S, \quad (17)$$

massändring per tidsenhet	massinflöde	massutflöde	källa/sänka
------------------------------	-------------	-------------	-------------

att reservoaren är fullständigt omblandad i varje ögonblick, men är generell såtillvida att in- och utflöden samt reservoarens volym kan variera med tiden. Eventuella skillnader mellan densiteten hos vattnet i reservoaren och i det inströmmande vattnet behöver inte tas hänsyn till i det här fallet. För vissa intressanta specialfall kan man finna analytiska lösningar till ekvationen. Exempel ges i nästa avsnitt. I andra fall får man ta till numeriska lösningsmetoder.

8.3 Beräkning av utbytetid

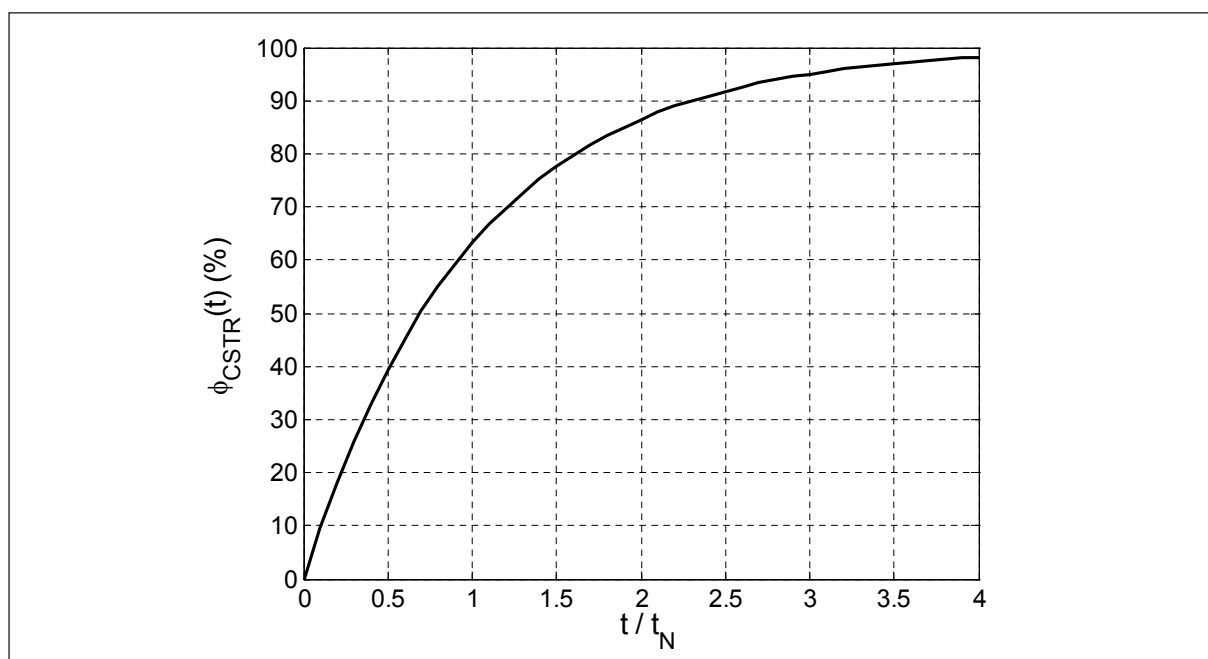
Utbytet av vatten i en fullständigt omblandad reservoar kan beskrivas av Ekvation (17) genom att låta variabeln $\varphi_{CSTR}(t)$ representera andelen (massfraktionen) nytt vatten i reservoaren vid tidpunkten t efter utbytesprocessens början. Det inströmmande vattnet består till 100 % av nytt vatten, vilket ger randvillkoret

$\varphi_{in} = 1$. Eftersom andelen nytt vatten är noll från början blir initialvillkoret $\varphi_{CSTR}(0) = 0$. Ingen tillförsel eller bortförsel av nytt vatten kan ske annat än via in- och utflödet, varför käll/sänktermen (S) blir noll.

För reservoarar med ett konstant genomflöde, $Q_{in} = Q_{ut} = Q$, och därmed en konstant volym, V , blir lösningen till massbalanskvationen:

$$\varphi_{CSTR}(t) = 1 - e^{-t/t_N}, \quad (18)$$

där $\varphi_{CSTR}(t)$ betecknar andelen nytt vatten i reservoaren (= andelen vatten som har bytts ut) vid tiden t och $t_N = V/Q$ är reservoarens nominella uppehållstid. Figur 8-2 visar $\varphi_{CSTR}(t)$ som funktion av t/t_N . Av figuren kan man utläsa hur många nominella uppehållstider som krävs för att byta ut en viss andel av den ursprungliga vattenmassan mot nytt vatten. T.ex. framgår att 63 % av vattnet har bytts ut ($\varphi_{CSTR}(t) = 63\%$) efter 1 nominell uppehållstid ($t/t_N = 1$), 86 % har bytts ut efter 2 nominella uppehållstider och 95 % har bytts ut efter 3 nominella uppehållstider.



Figur 8-2. Andelen nytt vatten (vattenutbytet) som funktion av t/t_N i en fullständigt omblandad tank med kontinuerligt genomflöde av vatten och konstant volym.

En liknande analys kan göras för reservoarer där in- och utströmning sker växelvis och volymen därför varierar med tiden. Det räcker att studera hur andelen nytt vatten ändras under uppfyllnaden av reservoaren eftersom andelen är oförändrad under tiden reservoaren sänks av. Allt vatten som strömmar in när reservoaren fylls upp betraktas som nytt vatten och antas blanda sig fullständigt med resten av volymen. Lösningen till Ekvation (17) ger i detta fall följande funktion:

$$\phi_{CSTR}(t) = \frac{\Delta V(t)}{V(0) + \Delta V(t)}, \quad (19)$$

där $\phi_{CSTR}(t)$ enligt tidigare betecknar andelen nytt vatten vid tiden t , $\Delta V(t)$ är volymökningen sedan inströmningsperiodens början och $V(0)$ är den initiala vattenvolymen. I Figur 8-3 plottas ϕ_{CSTR} som funktion av den relativa volymökningen $\Delta V(t) / V(0)$ under uppfyllnadsperioden. Figuren visar hur stor relativ volymökning som krävs för att uppnå en viss andel nytt vatten. Andelen nytt vatten blir t.ex. 50 % ($\phi_{CSTR} = 50\%$) vid en fördubbling ($\Delta V / V(0) = 1$) av initialvolymen och 80 % för $\Delta V / V(0) = 4$.

Utbytesprocessen under flera uppfyllnads-avsänkningssyklar kan studeras genom att beräkna hur många cykler som behövs för att byta ut en viss andel av den vattenmassa som fanns i reservoaren från början. Vid varje uppfyllnads-avsänkningssykel försvinner en del av den ursprungliga vattenmassan och ersätts med nytt vatten. Efter den första cykeln gäller enligt Ekvation

(19) att andelen nytt vatten är:

$$\phi_{CSTR}^1 = \frac{\Delta V}{V(0) + \Delta V}$$

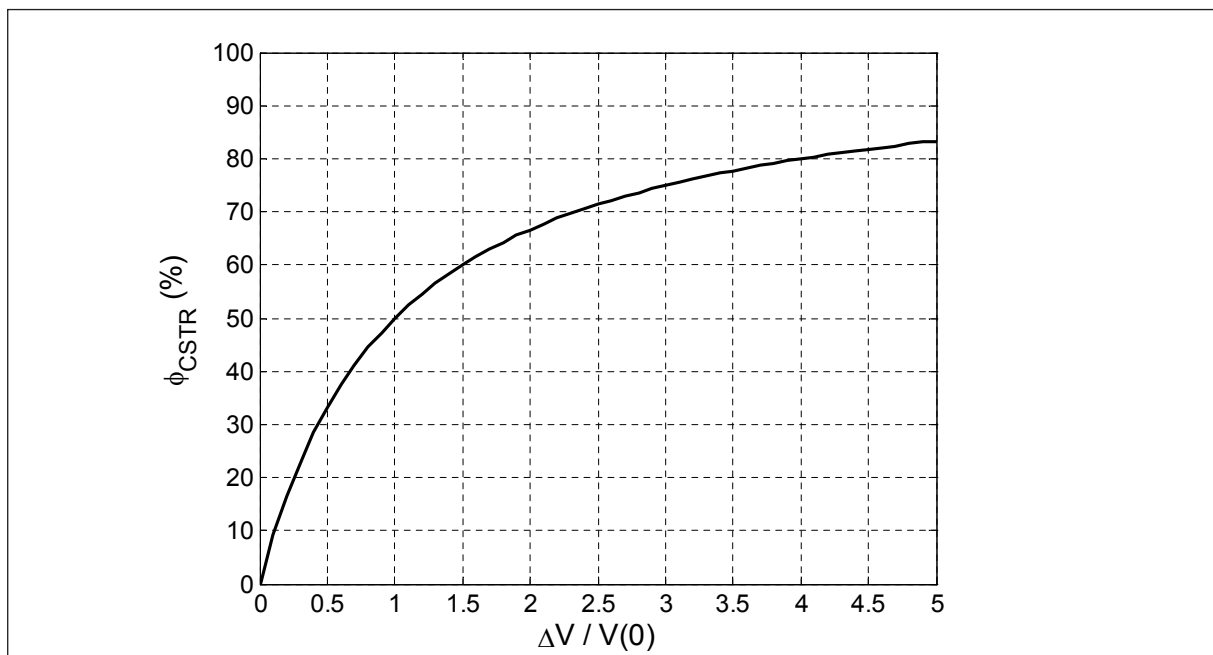
Andelen av den ursprungliga vattenmassan som finns kvar blir då:

$$1 - \phi_{CSTR}^1 = \frac{V(0)}{V(0) + \Delta V}.$$

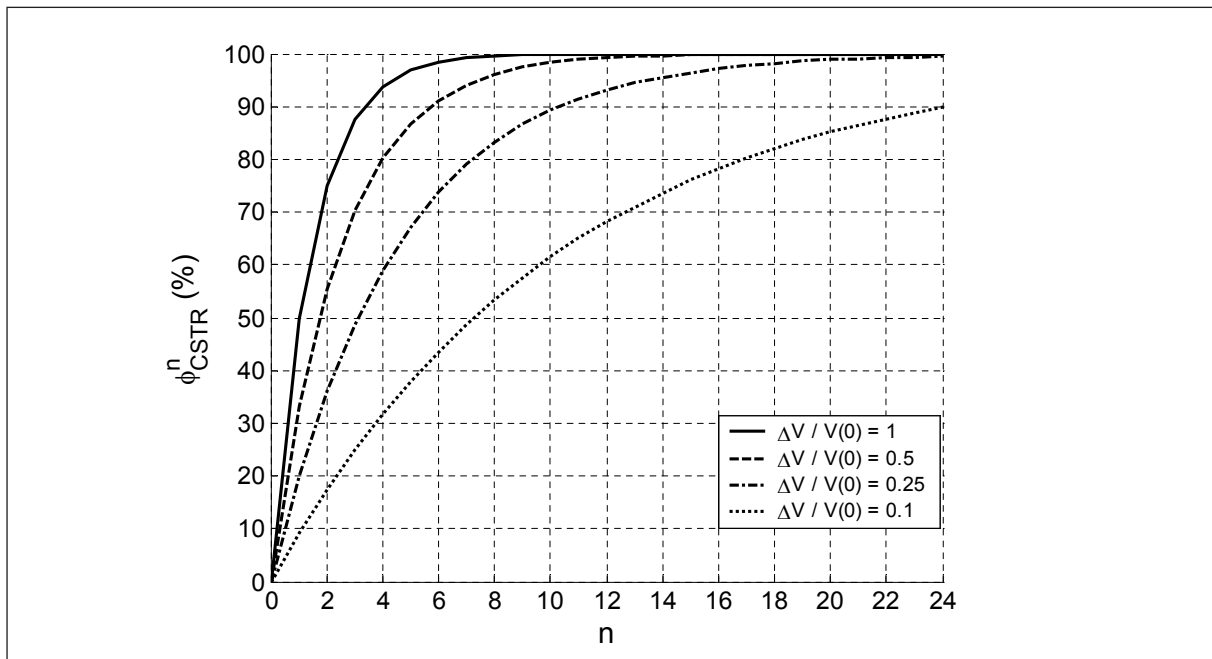
På motsvarande sätt inser man att efter n likadana cykler (samma relativa volymökning varje gång reservoaren fylls upp) blir den kvarvarande andelen av den ursprungliga vattenmassan $(V(0) / (V(0) + \Delta V))^n$, medan andelen nytt vatten blir:

$$\phi_{CSTR}^n = 1 - (V(0) / (V(0) + \Delta V))^n \quad (20)$$

Figur 8-4 visar andelen nytt vatten, ϕ_{CSTR}^n som funktion av antalet uppfyllnads-avsänkningssyklar (n) för några olika värden på relativa volymökningen ($\Delta V / V(0)$). Om en cykel motsvarar ett dygn visar figuren t.ex. att andelen nytt vatten blir ca 90 % efter 10 dygn vid en relativ volymökning på 25 %. Vid en relativ volymökning på 10 % dröjer det 24 cykler (24 dygn) innan 90 % av den ursprungliga vattenmassan har bytts ut.



Figur 8-3. Andelen nytt vatten som funktion av relativa volymökningen under uppfyllnadsperioden i en fullständigt omblandad tank.



Figur 8-4. Andelen nytt vatten (vattenutbytet) som funktion av antal uppfyllnads-avsänkingscykler (n) vid olika värden på kvoten $\Delta V / V(0)$ i en fullständigt omblandad tank.

8.4 Beräkning av genomsnittlig uppehållstid (ålder)

I en fullständigt omblandad reservoar kan vattnets genomsnittliga uppehållstid beräknas genom att tolka Ekvation (17) som en balansekvation för "mängd ålder", d.v.s. massa (enhet: kg) multiplicerad med ålder (enhet: s). Variabeln φ_{CSTR} svarar nu mot genomsnittsåldern och åldern φ_{in} är noll i inströmmande vatten. Ändringen av "mängd ålder" med tiden kommer dels att bero på bortförslen via utloppet, dels av åldrandet som innebär att vattenmassan i reservoaren blir en sekund äldre för varje sekund som går. Åldrandet införs i ekvationen via källtermen genom att sätta $S = 1 \cdot \rho V$, där konstanten 1 har enheten sekund per sekund (s/s).

I fullständigt omblandade reservoarer med ett konstant genomflöde av vatten och därmed en konstant volym ger balansen mellan "mängd ålder" som transporteras bort med utflödande vatten och "mängd ålder" som tillförs genom vattenmassans åldrande lösningen:

$$t_{CSTR} = t_N = \frac{V}{Q} \quad (21)$$

Den genomsnittliga uppehållstiden (åldern) i reservoaren blir alltså lika med den nominella uppehållstiden, vilket är ett förväntat resultat.

Om in- och utströmning sker växelvis kommer den genomsnittliga uppehållstiden inte att vara konstant utan ändras under uppfyllnad och avsänkning. Enligt balansekvationen sker en kontinuerlig tillförsel av "mängd ålder" både under uppfyllnad och under avsänkning p.g.a. vattenmassans åldrande. Bortförslen av "mängd ålder" kan däremot bara ske med utströmmande vatten under avsänkingsperioden. Om man integrerar balansekvationen under uppfyllnad och avsänkning var för sig så får man fram den totala ändringen i "mängd ålder" under uppfyllnad respektive avsänkning. Efter många upprepade cykler kommer ökningen av "mängd ålder" under uppfyllnad att vara densamma som minskningen av "mängd ålder" under avsänkning. Man kan då beräkna genomsnittsåldern i vändläget när reservoaren har nått sin högsta nivå. Om tiden det tar att fylla upp och sänka av reservoaren betecknas med t_{fyll} respektive $t_{töm}$ blir genomsnittsåldern (t_{CSTR}^{min}) vid fylld reservoar:

$$t_{CSTR}^{min} = \frac{t_{fyll} + t_{töm}}{\Delta V / V(0)} + \frac{t_{fyll}}{2}, \quad (22)$$

Detta är således genomsnittsåldern i just det ögonblick då reservoaren börjar sänkas av. Under avsänkingsperioden ökar sedan åldern linjärt med tiden, vilket gör att genomsnittsåldern (t_{CSTR}^{max}) då reservoaren nått sin lägsta nivå blir:

$$t_{CSTR}^{max} = t_{CSTR}^{min} + t_{i\ddot{o}m} = \frac{t_{fyll} + t_{i\ddot{o}m}}{\Delta V / V(0)} + \frac{t_{fyll}}{2} + t_{i\ddot{o}m}, \quad (23)$$

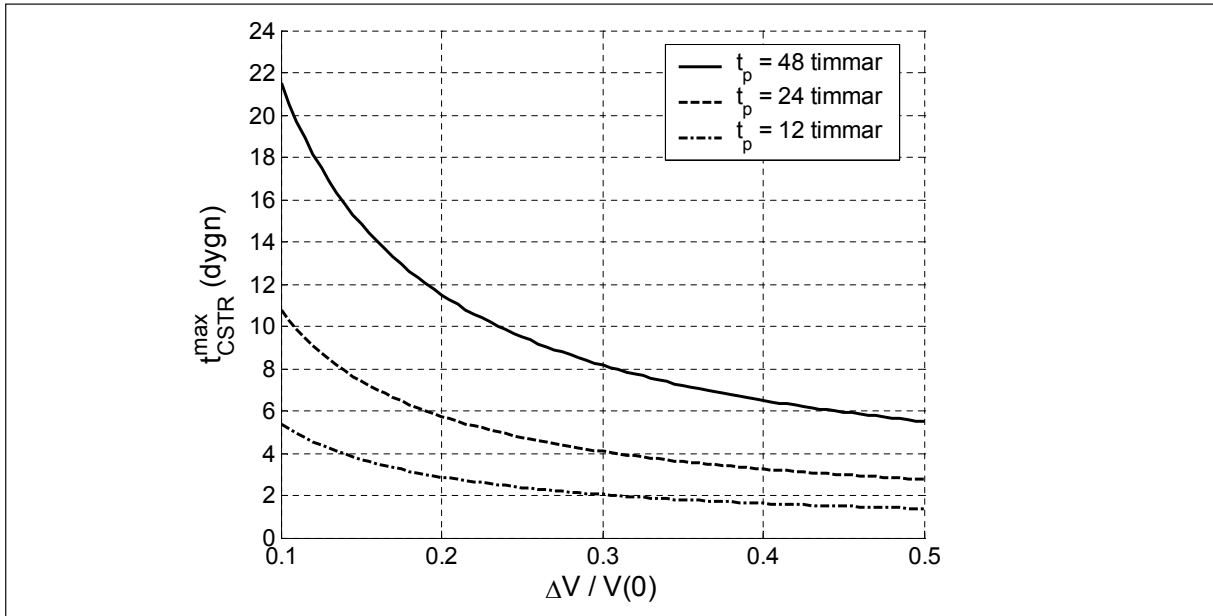
Den minsta genomsnittliga åldern i reservoarerna med växelvis in- och utströmning uppnås således precis i slutet av uppfyllnadsperioden och ges av Ekvation (22), medan den största genomsnittliga åldern uppnås precis i slutet av avsänkingsperioden och ges av Ekvation (23). Om uppfyllnads- och avsänkingsperioderna är

lika långa ($t_{fyll} = t_{i\ddot{o}m}$) kan Ekvationerna (22) och (23) förenklas till:

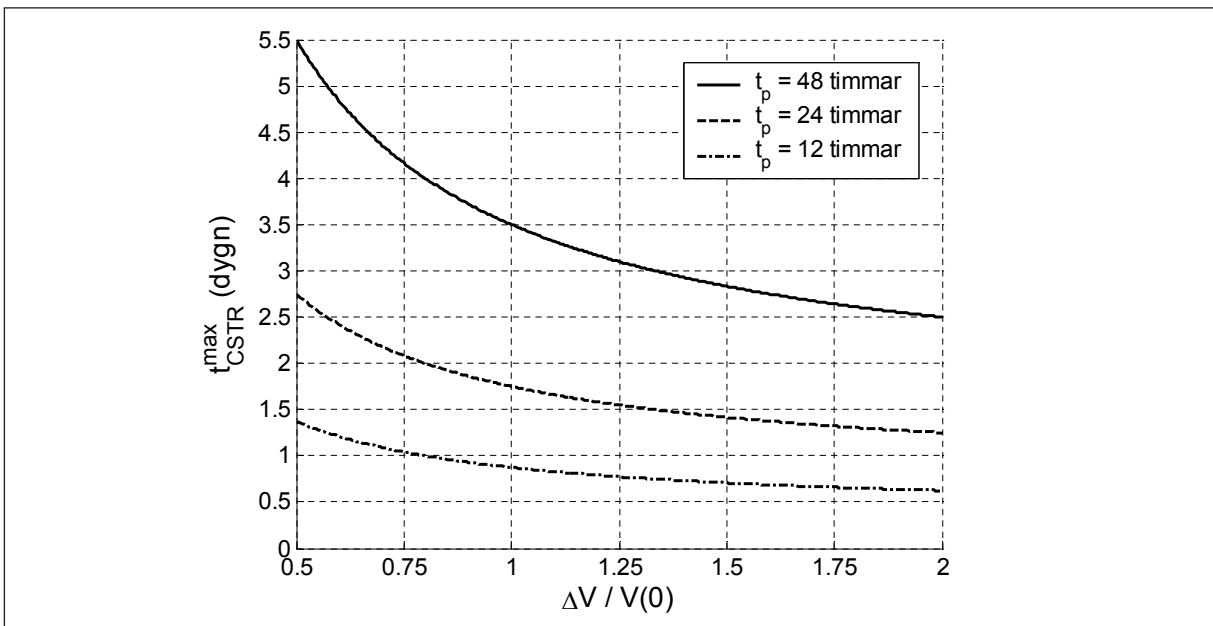
$$t_{CSTR}^{min} = t_p \left[\frac{1}{\Delta V / V(0)} + \frac{1}{4} \right], \quad (24)$$

respektive

$$t_{CSTR}^{max} = t_p \left[\frac{1}{\Delta V / V(0)} + \frac{3}{4} \right], \quad (25)$$



Figur 8-5. Maximal genomsnittlig uppehållstid (ålder), t_{CSTR}^{max} , som funktion av relativa volymökningen, $\Delta V / V(0)$, vid olika längd, t_p , på uppfyllnads-avsänkingscykeln.



Figur 8-6. Maximal genomsnittliga uppehållstid, t_{CSTR}^{max} , som funktion av relativa volymökningen, $\Delta V / V(0)$, vid olika längd, t_p , på uppfyllnads-avsänkingscykeln.

där $t_p = t_{fyll} + t_{töm}$ betecknar längden på hela uppfyllnads-avsänkingscykeln.

I Figur 8-5 och Figur 8-6 (ovan) visas t_{CSTR}^{max} som funktion av $\Delta V / V(0)$ för några olika värden på periodtiden t_p när $t_{fyll} = t_{töm}$. Om längden på perioden är $t_p = 24$ timmar, vilket är vanligast i praktiken, och relativa volymändringen $\Delta V / V_{init} = 0,1$ fås en maximal genomsnittlig uppehållstid (ålder) på drygt 10 dygn (Figur 8-5). Med $\Delta V / V(0) = 0,25$ blir den maximala genomsnittliga uppehållstiden ca 5 dygn (Figur 8-5) och med $\Delta V / V(0) = 1$ ca 1,75 dygn (Figur 8-6).

9 Användning av resultaten

9.1 Analys av blandning och omsättning

Resultaten i rapporten kan direkt användas för analys av blandningsförhållanden i reservoarer av samma typ som studerats här, d.v.s. i första hand vanliga cylindriska reservoarer utan avdelning. Analysen kan dels visa om blandningen fungerar dåligt, dels visa på vilka åtgärder som krävs för att förbättra situationen.

För säkerhets skull bör man börja med att kontrollera att jetstrålen är turbulent, även om det är ovanligt att så inte är fallet (jfr. Avsnitt 1.5). Nästa steg är att undersöka om blandningsvillkoret är uppfyllt. Efter att eventuella problem med stagnation åtgärdats kan man gå vidare och kontrollera om blandning hinner ske under reservoarens inströmningsperiod. Om villkoren uppfylls med viss marginal kan man betrakta reservoaren som välblandad. Den ideala modellen för en fullständigt omblandad tank är då tillämpbar och kan t.ex. användas för att beräkna utbytestid och genomsnittlig uppehållstid. Nedan ges en utförlig beskrivning av analysmetoden och ett räkneexempel.

9.2 Kontroll av blandningsvillkoret

Diagrammen i Bilaga B används för att kontrollera om blandningsvillkoret är uppfyllt. Först måste man dock ta reda på värdena på alla ingående parametrar. Inloppsdiameter, djup och inloppsflöde är i regel inte svåra att bestämma från ritningar och nivåmätningar. Om inflödet och vattendjupet varierar över veckan eller året är det lämpligt att studera det mest ogynnsamma fall som kan förekomma.

Temperaturförhållandena kan vara besvärligare att ta reda på. Alternativen är antingen att sätta ut temperaturgivare och göra mätningar på plats eller att försöka uppskatta temperaturvariationerna. Kännedom om temperaturen i utgående vatten från vattenverket kan ge viss vägledning om förhållandena ute vid reservoaren. Ibland kan man behöva ta hänsyn till att temperaturen i reservoaren ändras p.g.a. uppvärmning genom solbelysta väggar och tak.

Ett enkelt och effektivt sätt att kartlägga temperaturförhållandena är att endast mäta temperaturen på in- och utgående flöden. Det ger ofta tillräcklig information om hur stora skillnaderna är mellan inkommande och magasinerat vatten. Oavsätt vilken metod som används för att fastställa temperaturskillnaden bör man vara medveten om att densitetens variation med temperaturen är större vid höga temperaturer och gardera sig för det värsta fallet. En grads temperaturskillnad ger t.ex. större densitetsskillnad runt 20 grader än runt 10 grader (se densitetskurvan i Bilaga A).

När värdena på $h_w(0)$, d , Q , T_0 och T_a har fastställts går man in i rätt diagram i Bilaga B, läser av det kritiska flödet (Q_{cr}) och jämför med det aktuella flödet (Q). Om $Q > Q_{cr}$ är man på den säkra sidan och om $Q < Q_{cr}$ inträffar stagnation. I det senare fallet kan man även utläsa vilka åtgärder som krävs för att uppfylla blandningsvillkoret. Antingen ökar man inflödet (pumpar ett större flöde på kortare tid), minskar det initiala djupet eller byter till en mindre inloppsdiameter. En kombination av dessa åtgärder är naturligtvis också möjlig. Många gånger är dock inloppsdiametern den enda parameter som kan ändras eftersom systemet är dimensionerat för att upprätthålla vissa volymer, flöden och nivåer.

Nedan ges exempel på hur man kontrollerar blandningsförhållandena och beräknar vilken inloppsdiameter som krävs för att uppfylla blandningsvillkoret

med oförändrade värden på övriga parametrar. Som exempel använder vi reservoaren i Gårdsten där vi redan har tillgång till alla parametervärden som behövs. Tabell 9-1 visar en sammanställning av parametervärdena i Gårdsten. Den maximala temperaturen i magasinerat vatten antas vara 20 °C under sommaren och inkommande vatten antas vara högst 1,5 °C lägre.

Tabell 9-1. Parametervärden för reservoaren i Gårdsten.

Parameter	Värde
Djup i början av inströmningsperioden, $h_w(0)$	24 m
Inloppsdiаметer, d	0,6 m
Inflöde, Q	140 l/s
Maximal temperatur i magasinerat volym, T_a	20 °C
Temperatur i inkommande flöde, T_0	18,5 °C
Initial volym, $V(0)$	10900 m ³
Volymökning under uppfyllnad, ΔV	3400 m ³
Inströmningsperiodens längd, t_{fyll}	8 tim
Utströmningsperiodens längd, $t_{röm}$	16 tim

Vid kontroll av blandningsvillkoret i Gårdsten används diagrammen i Bilaga B1. Med $h_w(0) = 24$ m, $d = 0,6$ m, $T_a = 20$ °C och $T_0 = 18,5$ °C avläses det kritiska inflödet till $Q_{cr} \approx 400$ l/s. Eftersom $Q < Q_{cr}$ är blandningsvillkoret inte uppfyllt (i det här exemplet var det redan känt från fältmätningarna). Diagrammen i Bilaga B1 visar att inloppsdiаметern måste minskas till 0,3 m för att motsvarande kritiska inflöde ska understiga det aktuella inflödet. En halvering av inloppsdiаметern innebär att inloppshastigheten ökar med en faktor 4, från 0,50 m/s till 2,0 m/s, vilket ökar inströmningsförlusten i reservoaren med en faktor 16, från 0,013 m till 0,20 m.

Enklast minskas inloppsdiаметern genom att montera en dysa på inloppsröret. Öppningsdiаметern på dysan får enligt Avsnitt 7 vara något större än den nya inloppsdiаметern p.g.a. strålens kontraktion. Om vi väljer en dysa med vinkeln 45° räcker det att dysans öppningsdiаметer är 60 % av inloppsrörets diámetro för att få önskad reducering (en dysa med vinkeln 90° ger samma öppningsdiámetro i detta exempel). Dysans öppningsdiámetro blir således 0,36 m.

9.3 Beräkning av blandningstiden

Resultaten i Avsnitt 6.3 kan användas för att kontrollera blandningstiden, förutsatt att blandningsvillkoret är uppfyllt så att eventuella densitetseffekter är försumbara. Blandningstiden ska sättas i relation till den tillgängliga tiden för blandning. Enligt Avsnitt 6.3 är det praktiskt att införa en normaliserad blandningstid och tolka den som en erforderlig relativ volymökning för att uppnå önskad grad av blandning. Jämförelse kan sedan göras direkt med det aktuella värdet på $\Delta V / V(0)$.

Vid användning av resultaten bör man observera att konstanten i Tabell 6-1 och Tabell 6-2 varierar med djup-bredd-förhållandet och inloppsriktningen. För att inte riskera att underskatta blandningstiden är det säkrast att välja det största värdet på konstanten i tabellerna, samt använda $\tau_{c_{min}}$ som är det starkare av de två kraven på koncentrationsutjämning.

I exemplet Gårdstensreservoaren kan vi utgå direkt från det resultat i Tabell 6-1 som svarar mot Gårdstensreservoarens parametervärden. Den erforderliga relativa volymökningen ($\tau_{c_{min}}$) är ca 0,30 för inloppsdiаметern 0,6 m. Eftersom det aktuella värdet på $\Delta V / V(0)$ är ca 30 % enligt Tabell 9-1 hinner blandning precis uppnås när reservoaren har fyllts upp. Halveringen av (effektiva) inloppsdiаметern, vilken krävs för att undvika stagnation, gör dock att även den erforderliga relativa volymökningen halveras (från 0,30 till 0,15) eftersom $\tau_{c_{min}}$ är direkt proportionell mot d . Med god marginal kommer då det aktuella värdet på $\Delta V / V(0)$ att överstiga det erforderliga värdet.

9.4 Beräkning av utbytestid och genomsnittlig uppehållstid

Om blandningsvillkoret är uppfyllt och blandning hinner ske på den tid som finns tillgänglig kan modellen för en fullständigt omblandad tank användas för att beräkna t.ex. utbytestid och genomsnittlig uppehållstid. Med värden från Tabell 9-1 insatta i Ekvation (20) blir utbytestiden i Gårdstensreservoaren ca 9 dygn vid ett vattenutbyte på 90 %. Den maximala genomsnittliga uppehållstiden beräknas med Ekvation (23) till ca 4 dygn.

9.5 Begränsningar

Eftersom konstanterna i blandningsvillkoret antar olika värden beroende på reservoarens geometri bör resultaten i rapporten användas med försiktighet i fall som skiljer sig från dem som studerats här. Vidare bör det finnas en marginal till gränsen mellan blandning och stagnation så att man inte ligger precis på kurvan i diagrammen i Bilaga B.

Att blandning hinner ske under reservoarens inströmningsperiod är mindre kritiskt än att blandningsvillkoret uppfylls. Det främsta syftet med att beräkna blandningstiden är att få ett mått på hur effektivt vattnet blandas. Om det skulle vara stor differens mellan faktisk och tillgänglig blandningstid finns det anledning att göra något åt förhållandena genom att t.ex. bygga om inloppet.

10 Slutsatser och rekommendationer

I detta avsnitt redovisas praktiska slutsatser och rekommendationer för utformning av dricksvattenreservoarer med hänsyn till vattenomsättningen. Rekommendationerna baseras dels på resultaten i denna studie, dels på kunskap som inhämtats från litteraturen. Rekommendationerna avser reservoarers som omsätts enligt blandningsprincipen och där blandningen drivs enbart med hjälp av jetstrålen från inloppet.

- **Reservoaren bör ha någorlunda lika dimensioner i längd-, bredd- och djupled**

Cylindriska eller rektangulära geometrier är vanligast och är ofta lämpliga val. Det måste dock inte vara en perfekt rund cylinder eller en kvadratisk tank. Huvudsaken är att man undviker avlånga volymer som kan skapa ett pluggliknande flöde, mycket grunda reservoarers som kan försvåra blandning i vertikalled eller mycket djupa reservoarers som kan bli känsliga för temperaturskiktning. Om tankvolymen delas in i två

eller flera kammare bör det göras så att alla kammare får lämplig form.

- **Undvik ledskenor (bafflar) i reservoaren**

Det förekommer att bafflar används i reservoarers som egentligen är tänkta att fungera enligt blandningsprincipen. I dessa fall har syftet troligtvis varit att bygga in en extra säkerhet mot kortslutningsströmmar mellan in- och utlopp genom att tvinga vattnet att följa en längre bana. Bafflarna riskerar dock att försämra blandningsförhållandena eftersom de hindrar vattnet från att cirkulera runt i reservoaren och dämpar turbulensen från jetstrålen (Hammer & Marotz 1986).

- **Välj dimension på inloppet så att inloppshastigheten blir tillräckligt stor**

Hur hög inloppshastigheten måste vara beror bl.a. på temperaturskillnaden mellan inkommande och magasinerat vatten, inloppets diameter och riktning, samt vattendjupet. I vanliga cylindriska reservoarers med vertikalt eller horisontellt inlopp, normala dimensioner på inloppsledningen, en maximal temperaturskillnad på någon grad och ett vattendjup på omkring 10 m krävs en inloppshastighet mellan 0,5 och 2 m/s. Om inloppsledningen har för stor dimension kan man enkelt höja hastigheten genom att montera en förträngning (dysa) på rörmynningen.

Vid kombinerat in- och utlopp förekommer det att rörmynningen förses med en tratt (VAV P77 1995). Detta görs troligtvis för att minska utströmningsförlusten. Konsekvensen blir dock att jetstrålens blandningskapacitet försämras eftersom inloppshastigheten blir lägre. Det ökar risken för stagnation.

- **Placera inloppet så att jetstrålen når långt in i volymen utan att hindras av väggar, golv eller vattenyta**

En lång fri väg för jetstrålen betyder att en stor volym vatten hinner sättas i rörelse innan strålen träffar ett hinder. Det leder till snabbare inblandning av nytt vatten och minskar risken för stagnation. Om reservoaren har pelare bör man undvika att rikta jetstrålen rakt mot en pelare. I övrigt har experiment i fysiska modeller visat att pelare inte har någon större

inverkan på blandningsförhållandena (Giesecke *et al.* 1981, Grayman *et al.* 2000). I reservoarer med horisontellt inlopp är det bättre att rikta inloppet mot centrum än att rikta det tangentiellt längs med en vägg (Grayman *et al.* 2000). I det senare fallet uppstår en stor cirkulationszon med centrum i mitten av volymen, vilket fördröjer inblandningen av nytt vatten.

- **Rikta inloppet uppåt i djupa reservoarer**

Resultaten i denna studie visar att bottenmonterade inlopp som riktas vertikalt uppåt ger större blandningshöjd än horisontella inlopp. Risken för stagnation minskar således om inloppet riktas uppåt. I grunda reservoarer kan det däremot vara bättre med ett horisontellt inlopp för att strålen ska få en längre fri väg genom volymen (se punkten ovan). I cylindriska reservoarer utan avdelning visar datorsimuleringarna att det är en fördel att använda ett vertikalt inlopp om djupet är ungefär lika stort eller större än halva reservoardiametern.

- **Volymutbytet måste vara tillräckligt stort**

Med hänsyn till omsättningen är det positivt att pumpa in och ta ut en stor volym vatten varje dygn. Hur snabbt volymen behöver omsättas varierar med de lokala förhållandena: beredningsprocessen, vattentemperaturen, samt ledningarnas och reservoarnas skick. Ur vattenkvalitetssynpunkt går det inte att ge något generellt råd om hur stor del av volymen som bör bytas ut varje dygn. Som en tumregel föreslås dock en uppehållstid på 3–5 dygn i en av referenserna (Kirmeyer *et al.* 1999).

- **Omsättningen ska inte vara beroende av utloppets placering**

I en välblandad reservoar har utloppets placering en försumbar inverkan på vattenomsättningen. Man kan därför välja att placera utloppet där det är mest praktiskt. En lämplig placering är ofta strax bredvid inloppsledningen i nära anslutning till rörgalleriet. Även om in- och utflöde skulle ske samtidigt är risken för kortslutningsströmmar direkt från inlopp till utlopp liten när inkommande flöde riktas bort från utloppet.

Om reservoaren är stabilt skiktad får utloppets placering däremot betydelse för omsättningen. Om både in- och utlopp är placerade i botten kan

inkommande vatten med högre densitet strömma direkt från inlopp till utlopp och bara delvis blandas med resten av volymen. I det läget är det sällan någon bra lösning att flytta utloppet. Istället bör man göra någonting åt inloppsledningen, t.ex. öka inloppshastigheten genom att montera en dysa på rörmyningen och eventuellt ändra inloppets riktning.

11 Sammanfattande diskussion

En viktig förutsättning för att kunna förstå och kontrollera vattenkvalitetsförändringar i distributions-system för dricksvatten är att man vet hur snabbt vattnet omsätts i reservoarerna. Av litteraturstudien framgick att det enklaste och säkraste sättet att omsätta vattnet är att se till att hela volymen blandas vid varje inströmningstillfälle.

Tidigare studier av dricksvattenreservoarer visar också att det finns ett nära samband mellan temperaturskiktning och stagnation i reservoarer. När en stabil skiktning bildas dämpas turbulensen från jetstrålen, vilket kan försvaga blandningen så mycket att stagnanta områden uppstår. En stabil skiktning med ett mer eller mindre tydligt språngskikt är därför ett ganska säkert tecken på stagnation.

För att förhindra temperaturskiktning och stagnation måste tröghetskraften (rörelsemängdsflödet) i jetstrålen övervinna gravitationskraften som verkar på vatten med olika densitet. Ju djupare reservoaren är och ju större densitetsskillnaden mellan inkommande och magasinerat vatten är, desto större måste tröghetskraften hos jetstrålen vara. Blandningsvillkoret beskriver matematiskt gränsen, uttryckt som en hastighet eller ett flöde, då tröghetskraften hos jetstrålen precis klarar av att blanda hela volymen från botten till ytan vid en given densitetsskillnad.

Med hjälp av datormodellen kunde vi bestämma konstanterna i blandningsvillkoret för reservoarerna i Gårdsten och Kortedala. Kontroller av modellresultaten mot mätdata visade att modellresultaten låg tillräckligt nära observationerna för att man ska kunna dra rätt slutsatser om blandningsförhållandena

vid olika flöden, vattendjup och temperaturer. Det betyder att modellen inte bara är ett komplement till mätningar utan att den även kan ersätta mätningar, vilka ofta är dyra och besvärliga att utföra (däremot är temperaturmätningar i fält ett utmärkt sätt att påvisa stagnation). Fortsatta analyser med modellen bör göras av reservoarer där formen på volymen eller inloppets placering skiljer sig från de fall som studerats här. Det vore t.ex. intressant att bestämma blandningsvillkoret i ringformade volymer, vilket är ganska vanligt i vattentorn.

En grundlig analys av blandningsförhållandena bör även inkludera blandningstiden. Den delen av analysen görs efter att eventuella problem med stagnation är åtgärdade så att densitetseffekter kan försummas. Som framgick av datorsimuleringarna är blandningstiden

starkt kopplad till strömningsmönstret, vilket i sin tur beror av reservoarens form och inloppets placering och riktning. Det gör blandningstiden till ett bra jämförelsemått när man studerar hur effektivt vattnet blandas i olika typer av reservoarer.

Den kanske viktigaste praktiska slutsatsen från projektet är att bra blandningsförhållanden kan uppnås i de flesta reservoarer om man följer några enkla principer för placering och dimensionering av inloppsledningen. Speciellt bestämmer inloppsdiametern hur stor tröghetskraften blir i jetstrålen och därmed både hur stort djup jetstrålen klarar av att blanda och hur snabbt inblandningen sker. En mindre ombyggnad av inloppet, där inloppsdiametern minskas, är ofta den bästa lösningen på problem med dålig blandning.

Referenser

Crozes, G.F., Hagstrom, J.P., Clark, M.M., Ducoste, J., Burns, C. (1999). *Improving Clearwell Design for CT Compliance*. Denver, Colo.: American Water Works Association (AWWA).

Dukan, S., Levi, Y., Piriou, P., Guyon, F. & Villon, P. (1996). *Dynamic modelling of bacterial growth in drinking water networks*. Water Research, 30(9), 1991–2002.

DVGW. (1981). *Durchströmung (Wasseraustausch) in Wasserbehältern – Forschungsberichte*. DVGW-Schriftenreihe Wasser, Nr 27, ZfGW-Verlag, Frankfurt am Main, Tyskland.

Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. & Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York.

Fluent. (2003). *Fluent 6.1 User's Guide*. Fluent Inc., Lebanon, US.

Grayman, W. M., Rossman, L. A., Clifford, A., Deininger, R. A., Smith, C., Smith, J. F. & Schnipke, R. (2000). *Water Quality Modeling of Distribution System Storage Facilities*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Denver, Colorado, US.

Giesecke, J., Marotz, G., and Hammer, D. (1984). *Modelluntersuchung zur Optimierung des Wasseraustausches im Reinwasserbehälter Stuttgart-Rohr (Süd)*, Technischer Bericht 81/2, Institut für Wasserbau der Iniversität Stuttgart, Tyskland.

Hammer, D. & Marotz, G. (1986). *Verbesserung des Wasseraustausches in Trinkwasserbehältern durch hydraulische Maßnahmen*. Wasserwirtschaft, 76(4), 145–150.

Hult, A. (1993). *Risk- och säkerhetsfaktorer vid anläggningar för dricksvatten*. Livsmedelsverkets rapport nr 8/1993.

Hult, A. (1994). *Dålig tillsyn av dricksvattenreservoarer*. VAV-Nytt (1), 20–22.

Hult, A. (2000). *Allvarliga brister i kontroll av reservoarer*. Cirkulation 8/2000, 16–17.

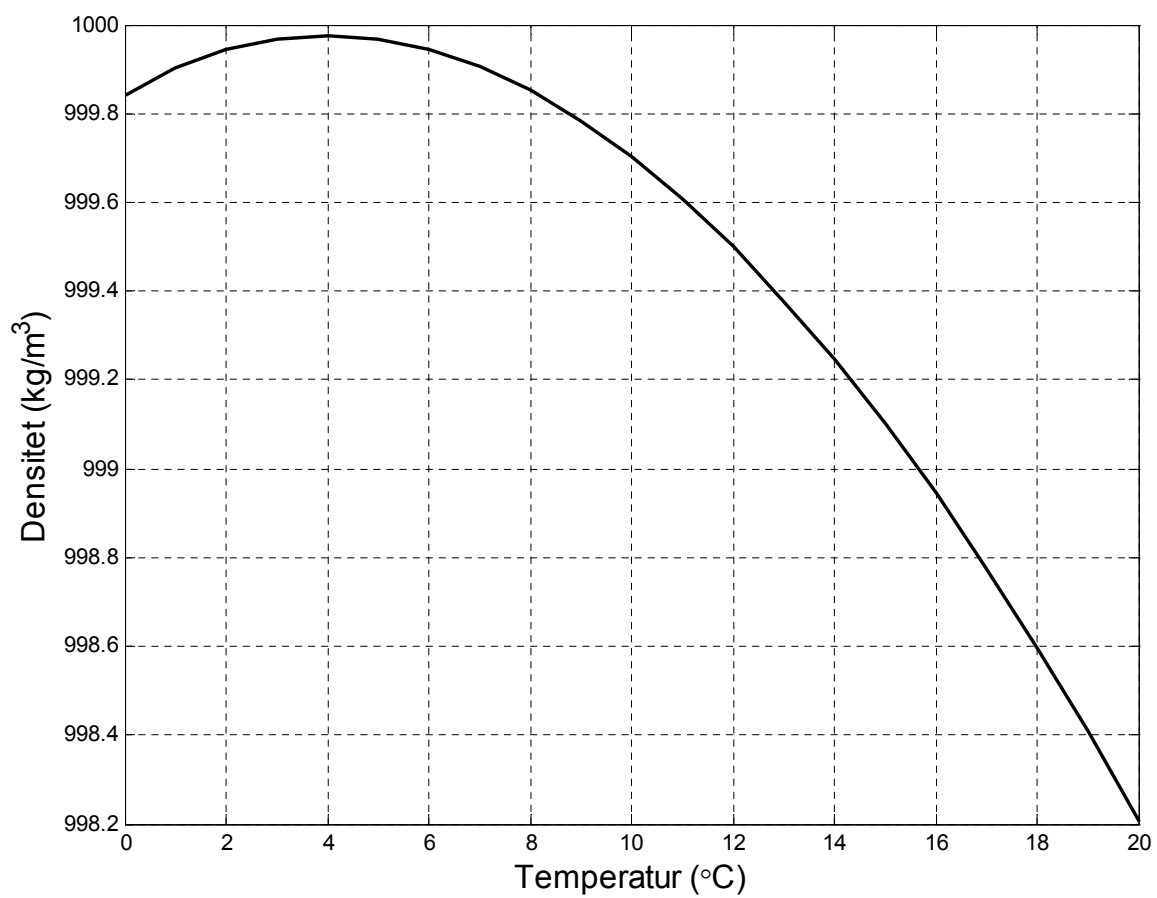
Jonsson, D. (2004). *Risker för inläckage i dricksvattenreservoarer*. C-uppsats. Örebro universitet, Inst. för teknik.

Jayanti, S. (2001). *Hydrodynamics of jet mixing in vessels*. Chemical Engineering Science, 56(1), 193–210.

- Kerneis, A., Nakache, F., Deguin, A. & Feinberg, M. (1995). *The effects of water residence time on the biological quality in a distribution network*. Water Research, 29(7), 1719–1727.
- Kirmeyer, G. J., Kirby, L., Murphy, B. M., Noran, P. F., Martel, K. D., Lund, T. W., Anderson, J. L. & Medhurst, R. (1999). *Maintaining Water Quality in Finished Water Storage Facilities*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Denver, Colorado, US.
- Martinson, D. B. & Lucey, A. D. (2004). *Reduction of mixing in jet-fed water storage tanks*. Journal of Hydraulic Engineering, 130(1), 75–81.
- McNaughton, K. J. & Sinclair, C. G. (1966). *Submerged jets in short cylindrical flow vessels*. Journal of Fluid Mechanics, 25, 367–375.
- Nordblom, O. (2004). *Mixing and Stagnation in Drinking Water Storage Tanks*, Doktorsavhandling. Vatten Miljö Transport. Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Nordblom, O. (2004b). *Mixing processes in drinking water storage tanks*. Shallow water processes conference. Lund 2004.
- Olsson, J. (2005). *Desinfektion på ledningsnätet – effekten på dricksvattenkvaliteten*. VA-Forsk rapport 2005-15.
- Pantzlaff, L. & Lueptow, R. M. (1999). *Transient positively and negatively buoyant turbulent round jets*. Experiments in Fluids, 27, 117–125.
- Patwardhan, A. W. (2002). *CFD modeling of jet mixed tanks*. Chemical Engineering Science, 57(8), 1307–1318.
- Piriou, P., Dukan, S. & Kiene, L. (1998). *Modelling bacteriological water quality in drinking water distribution systems*. Water Science and Technology, 38(8–9), 299–307.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Reitinger, J. (1964). *Untersuchung über die Strömungsverhältnisse in Trinkwasserbehältern*. Österreichische Wasserwirtschaft, 16(9/10), 216–223.
- Reitinger, J. (1967). *Temperatur- und Färbuntersuchungen der Strömungsvorgänge in rechteckigen Behältern*. Österreichische Wasserwirtschaft, 19(7/8), 151–157.
- Reitinger, J. (1969). *Strömungsvorgänge in Trinkwasserbehältern*. Gas Wasser Wärme, 23(2), 33–39.
- Rossmann, L. A. & Grayman, W. M. (1999). *Scale-model studies of mixing in drinking water storage tanks*. Journal of Environmental Engineering, 125(8), 755–761.
- Schoenen, D. (1989). *Influence of materials on the microbiological colonization of drinking water*. Journal of Water Supply Research and Technology – Aqua, 38, 101–113.

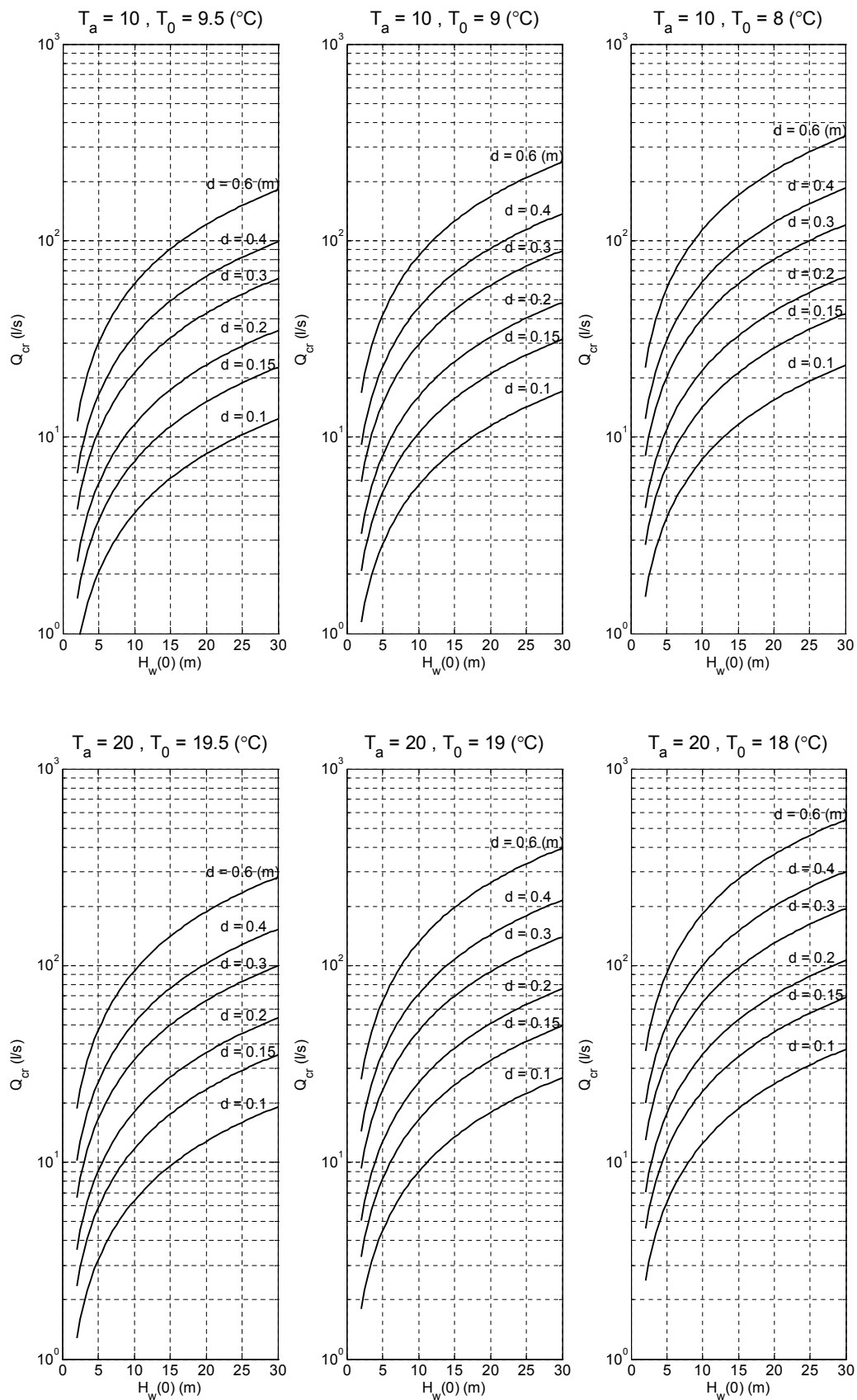
- Schubert, J. (1983). *Wasseraustausch – Auswirkungen auf Grundrissform sowie Gestaltung und Lage von Zu- und Ablauf*. DVGW-Schriftenreihe: Wasser(33), 121–139.
- Schubert, J. & Maier, D. (1976). *Untersuchungen über den Wasseraustausch in Trinkwasserbehältern*. gwf-wasser/abwasser, 117(7), 290–299.
- Sirum, J., Mostue, G. och Bellingmo, H. (2004). *Veiledning i bygging og drift av drikkevannbasseng*. NORVAR-Rapport 137/2004.
- Svensk standard. (1998). *Vattenförsörjning – Reservoarer – Krav*. Svensk standard SS-EN 1508:1998. SIS Förlag, Stockholm.
- Thureson, L. (2002). *Så kan man sköta reservoarerna*. Svenskt Vatten (3), 28–30.
- Turner, J. S. (1966). *Jets and plumes with negative or reversing buoyancy*. Journal of Fluid Mechanics (26), 779–792.
- Unesco. (1981). *Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards*. Unesco Technical Papers in Marine Science 36, Sidney, B.C., Canada.
- VAV P77. (1995). *Vattenledningar och reservoarer*. Svensk byggtjänst, Solna.
- Winnfors, E. (2002). *Ökar trycket med nybyggt vattentorn*. Cirkulation 7/2002, 24.
- Zhang, H. & Baddour, R. E. (1998). *Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large Froude numbers*. Journal of Hydraulic Engineering, 124(5), 550–553.

Bilaga A: Densiteten som funktion av temperaturen

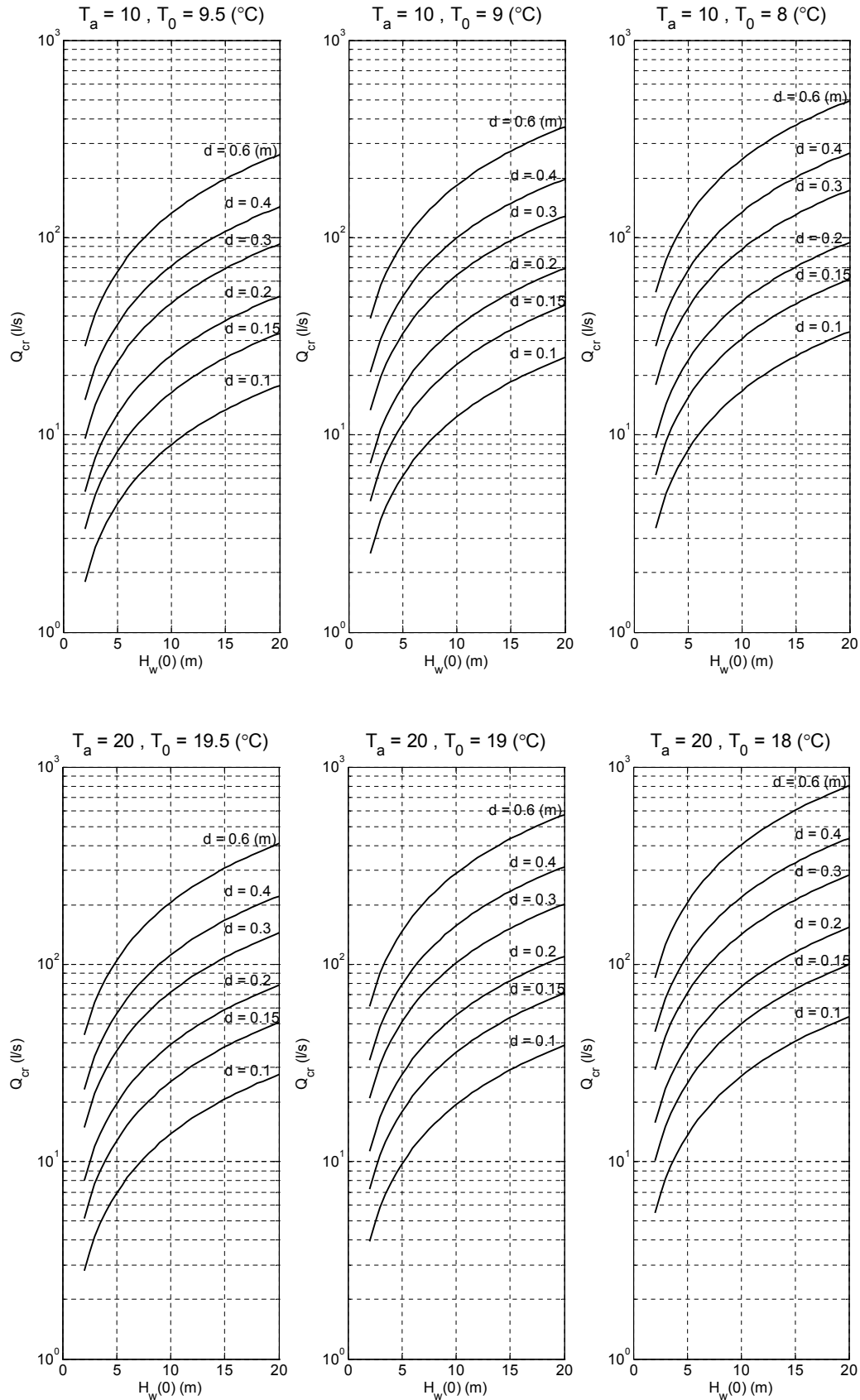


Bilaga B: Diagram för kontroll av blandningsvillkoret

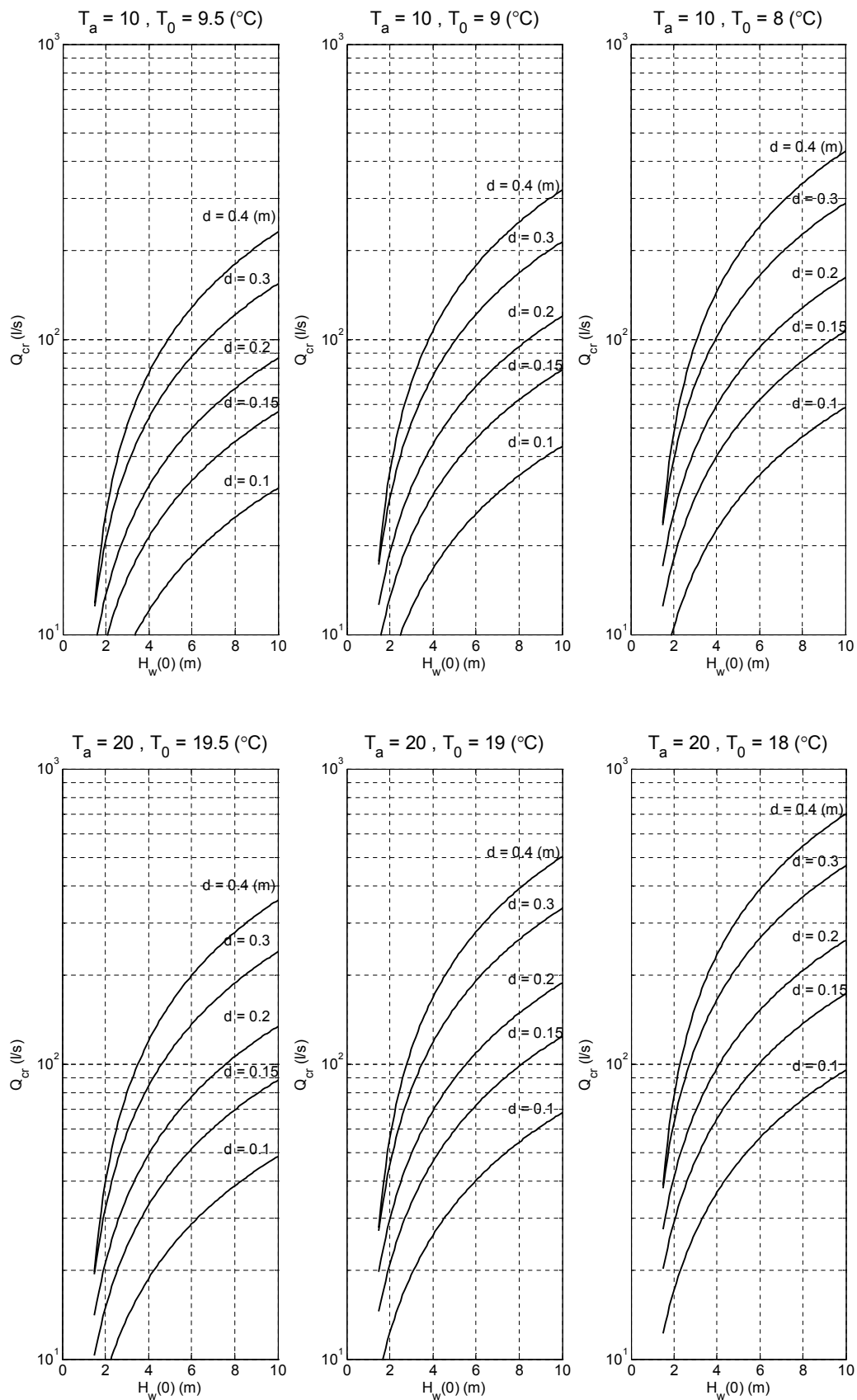
B1. Cylindrisk reservoar med vertikalt inlopp



B2. Cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp



B3. Tvådelad cylindrisk reservoar med horisontellt inlopp (Kortedala)





Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se