

Dynamisk modellering av filterbyggnad på Ryaverket En testbänk för styrsystem

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad

DAVID GUSTAFSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Vatten Miljö Teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2009
Examensarbete 2009:79

Dynamisk modellering av filterbyggnad på Ryaverket

En testbänk för styrsystem

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad

David Gustafsson

Dynamisk modellering av filterbyggnad på Ryaverket
En testbänk för styrsystem
DAVID GUSTAFSSON

© DAVID GUSTAFSSON 2009

Examensarbete 2009:79
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Vatten Miljö Teknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031 – 772 10 00

Chalmers reproservice / Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg, 2009

Förord

Föreliggande examensarbete har utförts på ÅF Engineering AB i Göteborg under handledning av Anders Hellgren, verksam på företaget under avdelningen ÅF-APC (Advanced Process Control). Arbetet är skrivet på Chalmers tekniska högskola för avdelningen Vatten Miljö Teknik vid institutionen för Bygg- och Miljöteknik. Lars Bergdahl har varit examinator för examensarbetet som påbörjades i mars 2009 och avslutades i augusti 2009.

Jag vill tacka alla på ÅF som hjälpt mig genomföra detta arbete; Anders för handledning under arbetets gång, Richard för att ha hjälpt mig med ekvationer och implementering och Pär för att ha hjälpt mig bita i de svåraste nötterna. Jag vill även passa på att tacka Peter, Glenn och Thomas på Gryaab för gästfrihet och trevligt sällskap under testkörning på Ryaverket. Lasse på WET skall ha ett stort tack för att han trots ont om tid tackade ja till att vara examinator för mitt examensarbete. Ett sista tack riktar jag till Olle Ljunggren som under sin sista arbetsdag på Göteborgs vattenverk avsatte tid för att hjälpa mig att stämma av värden från modellen.

Arbetet är tillägnad min mamma. Tack för att du alltid trodde på mig.

Dynamic modeling of a filter facility at Ryaverket
A test bench for control systems
Master's Thesis in Civil and Environmental Engineering
DAVID GUSTAFSSON
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Water Environment Technology
Chalmers University of Technology

Abstract

This master thesis has been carried out at ÅF Engineering AB in Gothenburg. The aim of the thesis has been to build a model of the water flow in a new treatment step which is about to be constructed at Ryaverket (water treatment plant for the town of Gothenburg). Gryaab AB, owner of Ryaverket, has constructed a control system for the new facility and its process. To be able to see if the control system and its regulation parameters are working correctly, the model will act as the real process together with the control system. This is done to avoid stoppage, which can result in large costs, when the facility is launched later this year.

The new treatment step, last in the process chain at Ryaverket, is a big filtration facility. The facility is one of a kind when it comes to size and capacity and consists of disc filters with the purpose to achieve the goals for emissions of phosphorous.

The model has been constructed in a software called Dymola and implemented with an object-oriented programming language called Modelica. A part of the thesis deals with dynamic equations for horizontal channel flow. Equations for pressure fall, brim flows and different channel segments have been retrieved, in order to make a model over the entire treatment step. Simplifications have also been made in order to reach the demand for the model to execute in real time.

The result of the model describes the reality well enough for the purpose to validate the control system. Tests have been made on parts of the model with very good results. The final model of the treatment step performs well but is hard to validate against reality. The model cannot be validated until after the facility is launched later this year.

Keywords: dynamic modeling, horizontal channel flow, disc filters, flow equations, Dymola, Modelica, Saint Venant, suspension

Dynamisk modellering av filterbyggnad på Ryaverket
En testbänk för styrsystem
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad
DAVID GUSTAFSSON
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Vatten Miljö Teknik
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Detta examensarbete är utfört på ÅF Engineering AB i Göteborg. Syftet med arbetet är att skapa en dynamisk verklighetslik modell av vattenflödet i ett nytt reningssteg som håller på att byggas på Ryaverket (Göteborgs stads reningsverk). Gryaab AB, ägare av Ryaverket, har konstruerat ett styrsystem för den nya anläggningen och dess process. Modellen är tänkt att köras mot detta styrsystem för att undersöka om reglerparametrar och styrstrategier fungerar tillfredsställande och för att inte riskera att styrningen orsakar driftstopp i den färdiga anläggningen.

Det nya reningssteget, som blir det sista i processen på Ryaverket, är en stor filteranläggning. Anläggningen är ensam i sitt slag när det kommer till storlek och består av skivfilter som ska se till att begränsningskraven för utsläpp av fosfor inte överskrids.

Modellen har tagits fram i en mjukvara som heter Dymola och har implementerats med hjälp av det objektorienterade språket Modelica. En stor del av arbetet har bestått att finna dynamiska ekvationer för att beskriva flödet i horisontella kanaler. För att kunna modellera hela filteranläggningen har även ekvationer och modeller för tryckfall, bräddflöde, olika kanalsegment etc. tagits fram. Många förenklingar har dock gjorts för att uppfylla kravet på att modellen skall kunna exekveras i realtid.

Resultatet modellen uppvisar beskriver verkligheten tillräckligt bra för att styrsystemet skall kunna valideras på bra grunder och tester har gjorts på enskilda delmodeller med gott resultat. Den slutgiltiga modellen ger tillfredsställande resultat men har varit svårt att validera mot verkligheten då anläggningen fortfarande är under konstruktion. Om resultat återspeglar verkligheten fullt ut kommer inte kunna undersökas förrän anläggningen är i drift.

Sökord: dynamisk modellering, horisontellt kanalflöde, skivfilter, flödesekvationer, Dymola, Modelica, Saint Venant, suspension

Innehållsförteckning

1. Inledning	2
1.1 Syfte	2
1.2 Metod	2
1.3 Avgränsningar	3
1.4 ÅF.....	3
2. Bakgrund	4
2.1 Om Gryaab.....	4
2.2 Skivfilteranläggningen	4
2.3 Vattenflödet till skrivfiltren.....	5
2.4 Test av styrsystem	5
3. Filteranläggningen och begränsningar av modellen	8
3.1 Randvillkor och avgränsningar	8
3.2 Flödet genom anläggningen.....	9
3.2.1 Flödet efter eftersedimenteringen.....	9
3.2.2 Flödet i filteranläggningen.....	9
4. Verktyg för framtagning av modellen	12
4.1 Stationär och dynamisk modellering	12
4.2 Ekvationer för matematisk modellering	12
4.2.1 Explicit och implicit form	13
4.2.2 Lösningssmetod	13
4.3 Dymola.....	14
4.4 Modelica	14
4.4.1 Grunder i språkets uppbyggnad	14
4.4.2 Konnektorer	15
4.4.3 Exekvering av modell.....	16
4.4.4 DASSL DAE lösare	17
5. Flödesberäkningar och teori.....	18
5.1 Energiekvationen	18
5.1.1 Friktionsförluster	18
5.1.2 Tilläggsförluster	19
5.2 Ekvationer för kanalströmning	19
5.3 Filterekvation	20
5.4 Tryckfall	21
5.5 Bottenlucka.....	21
5.6 Bräddflöde	22
5.7 Beräkningar av suspensionshalt	22
6. Modellering.....	24
6.1 Modeller för strömning i horisontell öppen kanal	24
6.1.1 Grundmodell	24
6.1.2 Kanal med lateralt inflöde	26
6.1.3 Kanal med bräddflöde	27
6.1.4 L-formad kanal med bräddflöde.....	28
6.1.5 L-formad kanalmodell med bräddflöde och suspberäkningar	28

6.2 Delmodell för T-korsning.....	30
6.3 Delmodell för krök	30
6.4 Delmodell för tryckfall	30
6.5 Delmodell för nödlucka.....	31
6.6 Delmodell för lucka och filter.....	31
6.7 Slutliga modellen	31
7. Resultat.....	34
7.1 Steady state	34
7.1.1 Kanalerna fram till filteranläggningen.....	34
7.1.2 Filterhuset	35
7.2 Transienter och störningar	35
7.2.1 Flödesförändring	35
7.2.2 Bräddning	36
7.2.3 Öppning av nödluckor	37
7.2.4 Öppning och stängning av filter	38
7.2.5 Ändring av susphalt	39
8. Slutsats.....	42
Källförteckning	44

Förkortningslista

A	Area	$[m^2]$
b	Bredd	$[m]$
C	Avbördningskoefficient	$[-]$
g	Gravitationen	$[m/s^2]$
H	Energinivå för en punkt i kanalen	$[m]$
h	Vattennivå	$[m]$
h_b	Höjd på brädd	$[m]$
h_f	Friktionsförlust	$[m]$
h_t	Tilläggsförlust	$[m]$
$h_{\text{öppning}}$	Höjd på öppning för en lucka	$[m]$
h_0	Bottenlutning	$[m]$
Δh	Tryckfall vid strömningsförlust	$[m]$
k_x	Konstanter i filterekvation	$[-]$
M	Mannings tal	$[m^{1/3}/s]$
N	Antalet delpolymer	$[-]$
P	Våta perimetern	$[m]$
Q	Flöde	$[m^3/s]$
$Q_{\text{brädd}}$	Bräddflöde	$[m^3/s]$
Q_{filter}	Flöde genom filter	$[m^3/s]$
Q_{lat}	Lateralt flöde	$[m^3/s]$
Q_{lucka}	Flöde genom lucka	$[m^3/s]$
R	Hydrauliska radien	$[m]$
S	Suspensionshalt	$[mg/l]$
t	Tid	$[s]$
U	Hastighet	$[m/s]$
u	Insignal till modell	$[-]$
V	Volym	$[m^3]$
x	Längd	$[m]$
z	Referensnivå	$[m]$

1. Inledning

I takt med att miljödebatten tilltagit i samhället har kraven för att minska utsläppen av kväve och fosfor skärpts. Höga halter av kväve och fosfor i naturen leder till övergödning av hav, sjöar och vattendrag. Vid landets reningsverk har därför nya krav införts, där varje liter renat vatten som återförs till naturen år 2010 maximalt får innehålla 0.3 mg fosfor [1] (nuvarande krav ligger på 0.4 mg per liter [2]). För att klara kraven har man vid Gryaabs reningsverk i Göteborg beslutat att bygga världens största anläggning för avskiljning av partikulärt fosfor. Anläggningen består av roterande skivfilter och skall stå klar hösten 2009.

Anläggningen består av totalt 32 skivfilter med en väldigt god filtreringsförmåga där mycket små partiklar innehållande fosfor kan avskiljas. Filteranläggningen är placerad som sista steg i reningsprocessen innan vattnet rinner ut i Göta älvs mynning.

I Gryaabs fall där man är världsunika med storleken på anläggningen och då reningssteget är nytt saknas erfarenhet och kunskap för driften. Svårigheter ligger då i att bestämma och skapa en strategi för hur anläggningen skall styras, t.ex. hur många filter som skall vara öppna vid olika flöden och hur snabbt filtren skall öppnas och stängas för att inte påverka vattenmassorna i alltför stor utsträckning. Man har därför valt att skapa en driftstrategi från grunden där man med erfarenhet av den befintliga processen bestämt hur filteranläggningen skall regleras.

Vid starten av en anläggning tar det alltid tid att justera styrsystemet och optimera reglerparametrarna. Att göra detta i full skala, efter driftsättning, i den färdiga anläggningen kan både bli tids- och kostnadskrävande om reglerstrategin inte fungerar som man tänkt sig. För att validera styrsystemet och säkerställa parametrar och reglerstrategi innan driftsättning har man valt att simulera anläggningen med en modell. Modellen skall efterlikna verkligheten så väl som möjligt, t.ex. hur hydrauliken i kanalerna beter sig och hur halten suspension i anläggningen påverkar flödet.

1.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka hur Gryaabs nya filterreningsanläggning beter sig i teorin genom att bygga en modell och simulera vattenflödet och dess suspensionshalt genom reningssteget. Modellen skall sedan testas mot Gryaabs egna styrsystem som är tilltänkt för den nya filteranläggningen. På så sätt skall justering och inställning av styrning och reglerparametrar kunna göras innan anläggningen sätts i drift.

1.2 Metod

Arbetet inleddes med litteraturstudier inom området för dynamisk modellering, simulering, reglerteknik och hydraulik.

Efter det följde en tid för att sätta sig in i mjukvara och programmeringsspråk. För att göra sig familjär med Dymola, mjukvaran som användes för modelleringen, studerade jag olika fördefinierade modeller från det medföljande modellbiblioteket. Jag programmerade även egna testmodeller för att sätta mig in i hur programmeringsspråket Modelica [3] var uppbyggt.

Det första och mest grundläggande steget i själva modelleringen var att ta fram ekvationer och formler för att beskriva dynamiken i vattenflödet i en enkel rak horisontell kanal. Detta var kärnan i modelleringen, d.v.s. att ta fram ekvationer som beskrev flödesdynamiken så detaljerat som möjligt utan att vara allt för komplicerade och beräkningstunga.

När det väl var gjort bestämde jag hur gränssnitten för modellen skulle se ut och vilka parametrar jag behövde för att modellens ekvationssystem skulle bli lösbart. För att modelleringen skulle hinna slutföras på utsatt tid var jag även tvungen att bestämma mig för vissa förenklingar för att minska modellens komplexitet.

Nästföljande steg var att ta fram olika modeller för alla olika specifika delar av kanalsystemet, t.ex. tryckfall i kurvor, modeller för L-formade kanaler, flöden genom luckor och flöden genom skivfilter etc.

Modellen testkördes sedan och parametrar trimmades för att stämma så bra överens med verkligheten som möjligt.

Slutligen kördes modellen kopplad mot styrsystemet på Ryaverket där jag tillsammans med sakkunnig personal validerade modellen.

1.3 Avgränsningar

Modellen som konstrueras skall styras av Gryaabs egna styrsystem, där man via ett visuellt gränssnitt sätter parametrar för flöden och suspensionshalter. I detta arbete beskrivs ej styrsystemet, hur det fungerar eller hur det är uppbyggt.

Kopplingen mellan styrsystem och modell sker via ett OPC-gränssnitt¹, men arbetet och beskrivningen kring detta ligger utanför arbetets omfattning och tas därför inte upp i den här rapporten.

All strömning som beräknas och behandlas i detta arbete antas vara turbulent.

1.4 ÅF

ÅF, f.d. Ångpanneföreningen, är ett teknikkonsultbolag med huvudsäte i Sverige och kontor runt om i världen i sammanlagt 19 länder. Företaget inriktar sig först och främst på Energi och Miljö, Infrastruktur, Industri och Teknisk Kontroll och antalet anställda uppgår i dagsläget till ca 4500 i hela världen. I Göteborg ligger ÅFs kontor i centrala staden på Kvarnbergsgatan där omkring 400 medarbetare har sin bas [4].

Inom avdelningen ÅF-APC återfinns kompetens inom styrsystem, automation och modellering av testbänkar där man i huvudsak sysslar med konsultuppdrag riktade mot processindustrin.

¹ En standard för kommunikation mellan datorer

2. Bakgrund

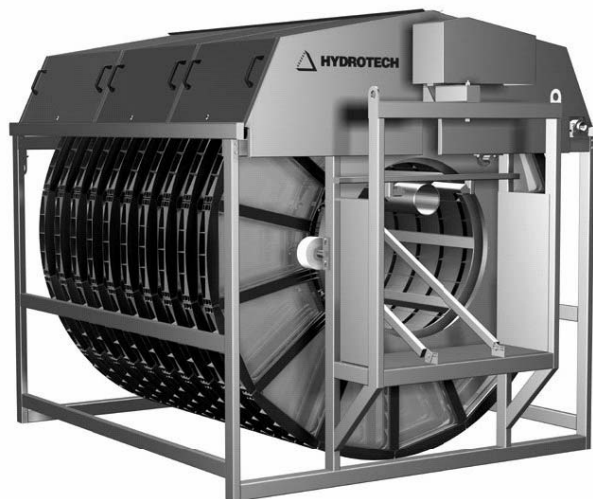
2.1 Om Gryaab

Gryaab AB ansvarar för rening av avloppsvatten i Göteborgsregionen [1]. Företaget ägs gemensamt av kommunerna Göteborg, Ale, Härryda, Kungälv, Lerum, Mölndal och Partille. Vid Göta Älvs utlopp i havet, strax nordväst om Älvsborgsbron, ligger Gryaabs reningsanläggning Ryaverket. Hit leds avloppsvatten från de sju ovan nämnda kommunerna. Det är inte bara avloppsvatten från hushållen som anländer till Ryaverket, utan en stor del består av dagvatten från t.ex. väggar och tak. Spill- och avloppsvatten från industrin hamnar även här, men först efter att de själva renat det.

Genom Ryaverket passerar i medeltal 4000 liter vatten per sekund. Vid t.ex. nederbörd och snösmältning kan tillflödet variera kraftigt och därför har verket en maxkapacitet på 8000 liter per sekund. Skulle tillflödet bli större än så, vilket kan ske vid mycket häftiga regnskurar, frångår man den vanliga reningsproceduren, och man kan istället t.ex. rena vattnet på kemisk väg vilket tillfälligt ökar kapaciteten.

2.2 Skivfilteranläggningen

I takt med att debatten kring miljön och det hållbara samhället ökat har kraven på det vatten som återförs till havet från landets reningsverk, med åren blivit högre. Debatten har många gånger handlat om övergödning och hur utsläpp av kväve och fosfor påverkar sjöar och vattendrag. I dagsläget finns bestämmelser som säger att fosforhalten i vattnet som släpps ut skall minskas till 0.3 mg per liter vatten, senast år 2010. För att klara av det kravet har Gryaab beslutat att man skall bygga ut sin anläggning med nya s.k. skivfilter för att ytterligare minska fosforhalten som ett sista steg i reningsprocessen.



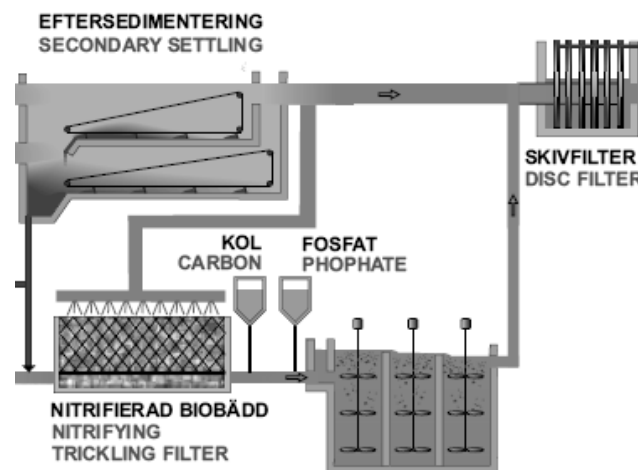
Figur 1 Skivfilter från Hydrotech som skall användas på Ryaverket [5].

Den nya anläggningen bestående av 32 skivfilter är planerad att vara klar för driftsättning under hösten 2009. Skivfiltren består av vardera tio vertikala filterdukar uppspända på kontinuerligt

roterande hjul. Alla filter har filterduk med en maskvidd på 15 µm vilket ger en mycket god filtreringsförmåga där mycket små partiklar innehållande fosfor kan avskiljas.

2.3 Vattenflödet till skivfiltren

Själva filteranläggningen är installerad som det sista steget i reningsprocessen. Vattenflödet till filteranläggningen kommer från eftersedimenteringsbassängerna¹ och även från efterdenitrifikationen² (se Figur 2). Dessa två flöden innehåller dessutom olika halter av suspenderat material vilket ger en koncentrationsgradient i ena änden av filterbyggnaden där dessa flöden möts.



Figur 2 Tillflödet till skivfiltrena.

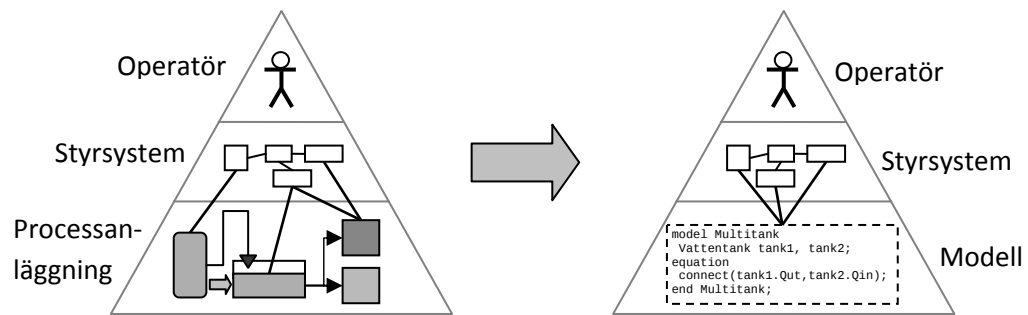
En viss del av utflödet från sedimenteringsbassängerna pumpas ut över en biobädd vilket är det första steget i kvävereningen. Här sker något som kallas nitrifikation där bakterier i en syrerik miljö omvandlar ammoniumkväve till nitratkväve. Från biobäddarna leds vattnet sedan vidare till två processer, dels aktivslambassänger och dels till efterdenitrifikation. Båda processerna utnyttjar denitrifikationsbakterier till att bryta ner nitratkväve till ofarlig kvävgas som sedan släpps ut i luften [5]. Processen sker i en syrefattig miljö med god tillgång på organiskt material. Det kväverenade vattnet från efterdenitrifikationsprocessen leds sedan vidare in i norra änden av filterbyggnaden.

2.4 Test av styrsystem

Anläggningen på Ryaverket styrs via ett modernt styrsystem. Styrsystemets uppgift är att samla in information och data om processen samt att styra utrustning eller hela processförlopp [6]. På Ryaverket sköts styrsystemet av operatörer med uppgift att övervaka att styrningen går korrekt till och att korrigera delar av processen om så behövs. Då anläggningen är ensam i sitt slag finns inget färdigkonfigurerat styrsystem att tillgå utan styrsystemet byggs upp från grunden av personal på Gryaab. För att testa det tilltänkta styrsystemets funktion och påverkan på flöde och vattennivåer i filterhuset kopplas det ihop med den modell som beskrivs i detta arbete. Modellen agerar då processanläggning och skickar signaler till styrsystemet så som det hade fungerat i verkligheten (se Figur 3).

¹ Bassänger där flödet är lågt så att tunga partiklar sjunker till botten för att sen kunna avskiljas.

² Olika processer där nitrat omvandlas till ofarlig kvävgas.



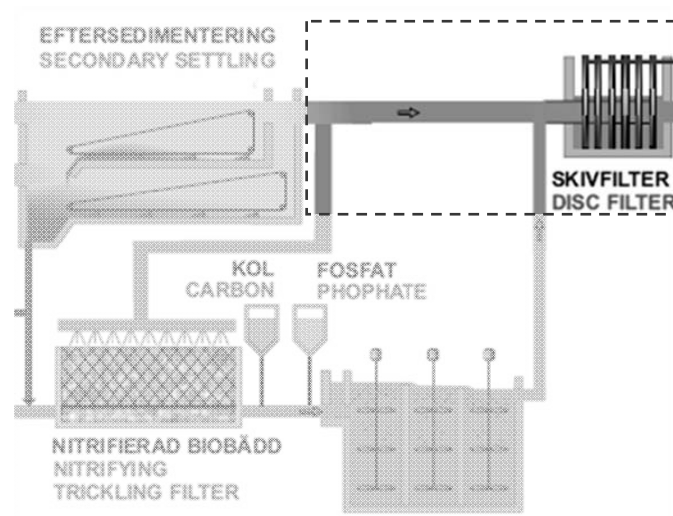
Figur 3 Modellen ersätter den verkliga processanläggningen vid test av styrsystemet.

3. Filteranläggningen och begränsningar av modellen

Följande kapitel beskriver den del av anläggningen och processen på Ryaverket som skall modelleras och det tar även upp randvillkor och avgränsningar för modellen. Samtliga angivna värden i följande kapitel refererar till [7] och [8] och är baserade på ett dimensionerande maxflöde på $10 \text{ m}^3/\text{s}$ genom anläggningen. I den fortsatta rapporten benämns eftersedimenteringsbassängerna med ES, skivfilteranläggningen med SF, efterdenitrifikationen med ED och biobäddarna med BB.

3.1 Randvillkor och avgränsningar

Flödet genom den, för modellen avgränsade del av anläggningen, definieras enligt Figur 4. Flödet in i modellen kommer från ES, varefter det strömmar till BB och SF. Från BB leds en del av flödet till ED för att sedan strömma in i norra änden av filteranläggningen. Storleken på flödet från BB via ED till SF är alltid relaterat till flödet från ES, men aldrig större än flödet från ES.



Figur 4 Modellens avgränsning.

Modellen avgränsas via ett antal randvillkor som även sätts som inparametrar till modellen. Randvillkoren består av flöden och suspensionshalter som antas vara kända i processen. Följande lista beskriver randvillkor för modellen:

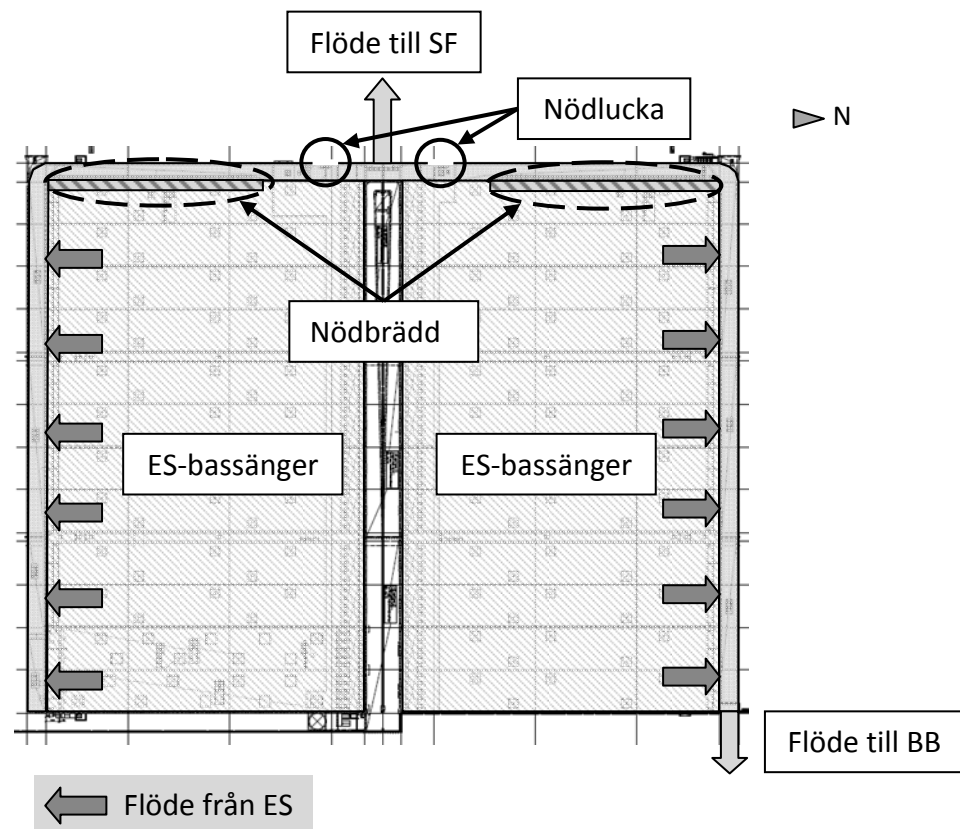
1. Totalflödet från ES till kanalen före SF
2. Flödet till BB från kanalen efter ES
3. Flödet från ED med inlopp i norra änden av filterhuset
4. Suspensionshalt från ES
5. Suspensionshalt från ED till SF
6. Fast vattennivå efter filtren

Tabell 1 Randvillkor för modellen.

3.2 Flödet genom anläggningen

3.2.1 Flödet efter eftersedimenteringen

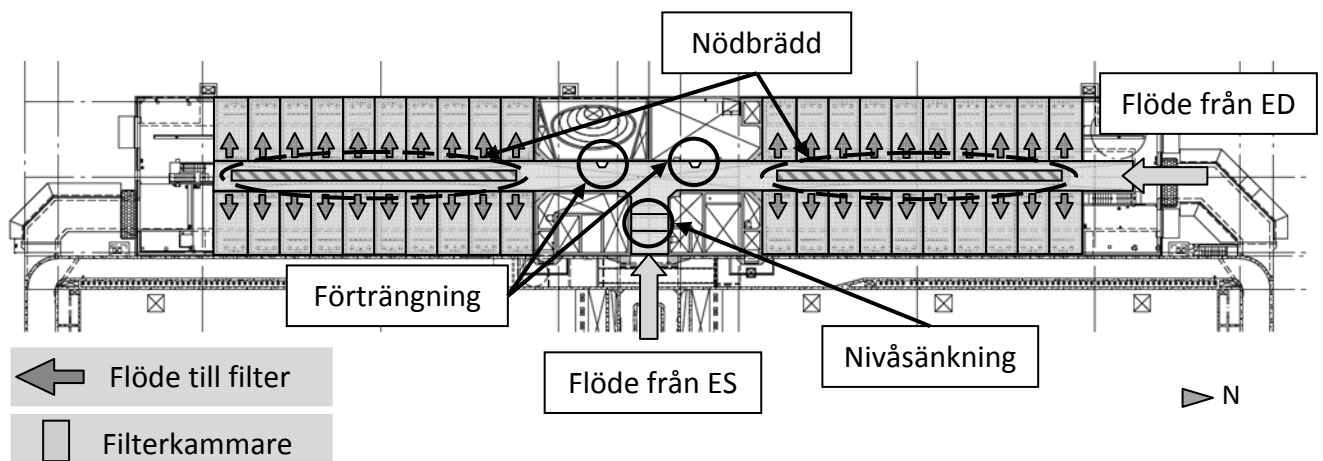
Flödet lämnar eftersedimenteringsbassängerna genom att lateralt, via hål, strömma in i två 100 meter långa kanaler utmed ES-bassängernas långsidor (*randvillkor 1 och 4*). Kanalerna har en botten som ligger på +18.60 m och i nordöstra änden av ena kanalen leds en del av flödet vidare till BB (*randvillkor 2*). Flödet som rinner vidare mot SF passerar en 90°-krök och en T-korsning innan det strömmar in i filterbyggnaden. På kanalerna vid kortsidan, sett från ES-bassängerna, finns två bräddöverfall vilka är tänkta som nödbräddar om filterkapaciteten skulle understiga det inkommande flödet i filterhuset. Bräddarna har en total längd på 72.5 m och ligger på +21.30 m. Före T-korsningen som avlänkar flödet in i filterhuset finns två luckor. Luckorna öppnas från botten och har bredden 1.5 m, en nedre kant på +19.55 m och en övre kant på +21.30 m. Luckorna har kapacitet att kunna avleda ett dimensionerade flöde på 10 m³/s och har en ramptid på 292 sekunder för öppning och stängning.



Figur 5 Flödet från ES till SF.

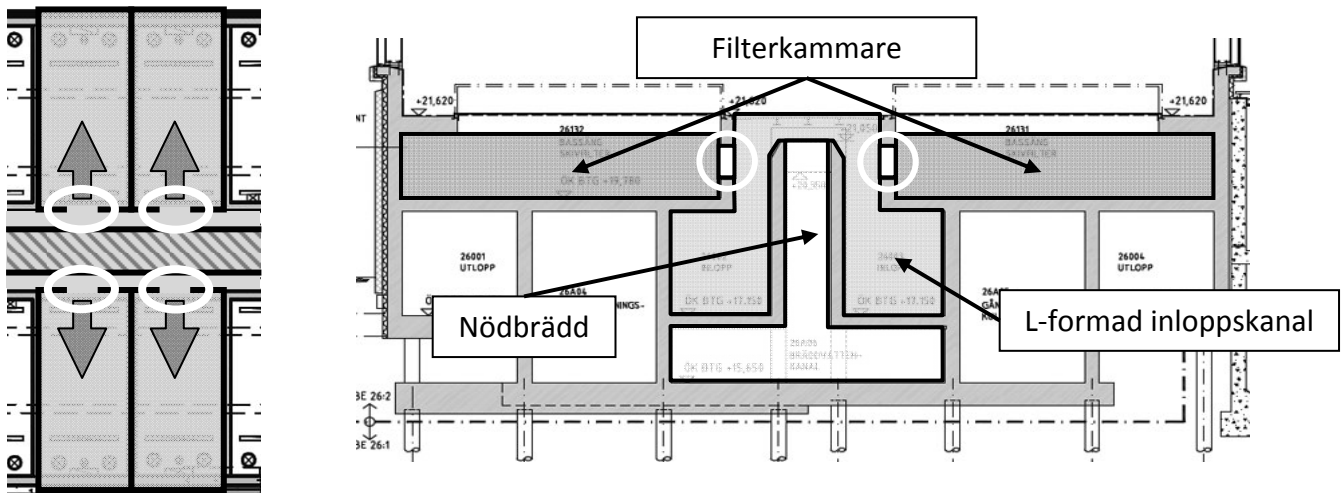
3.2.2 Flödet i filteranläggningen

I inloppskanalen till filterhuset sker en successiv nivåförändring där nivån på botten sjunker från +18.60 m ner till +17.15 m. Detta är enda stället i kanalsystemet för modellen där botten har en lutning (se Figur 6). Efter nivåsänkningen leds vattnet vinkelrätt, i ytterligare en T-korsning, vidare mot södra respektive norra filterblocken. I den efterföljande kanalen återfinns en förträngning vid placeringen av två luckor där kanalens bredd reduceras från 3 m till 2.6 m.



Figur 6 Filterbyggnaden.

Vattnet rinner sedan in i filterblocken, där kanalen delas upp i två L-formade kanaler som i sin tur leder fram till luckorna in till filterkammarna. Den L-formade kanalen med botten på +17.15 m är 1.5 m bred i den breda sektionen och 0.7 m bred i den smala sektionen. I respektive filterblock skiljs de två L-formade kanalerna åt av en 30 m lång nödbredd på +21.10 m. Nödbredden är endast tänkt att komma till användning i absoluta nödfall. I första hand skall vatten tappas genom nödluckorna eller brädden i kanalerna efter ES ifall flödet överstiger filtrens kapacitet. I ändarna där nödbredden upphör går kanalerna ihop och har tvärsnittet av ett upp- och nervänt T. I norra änden av filterhuset leds resterande flödet från ED in (*randvillkor 3 och 5*).



Figur 7 Del av filterhuset sedd från ovan och sidan med luckor markerade.

I respektive kanal i filterblocken sitter 40 luckor som leder vattnet in i filterkammarna. Luckorna har bredden 1 m och höjden 0.6 m med överkant på +20.80 m. Vattennivån i kanalen kommer aldrig att understiga luckans överkant och fungerar då som vattenlås och förhindrar obehaglig lukt i filterhallen. Luckans öppning och stängning har en ramtid på 30 sekunder. I dagsläget är endast 32

filterkammare och luckor i drift med resterande åtta kammare är tänkta att utnyttjas i framtiden om behov av ökad kapacitet uppstår.

I varje filterkammare sitter skivfiltren uppspända på roterande skivor. Inflödet sker genom varje filterduk och dess storlek beror på halten suspension i vattnet samt trycknivån över filterduken. Tvärs genom filterkassunen sker sedan utströmningen till en ränna med botten på +20.75 m (*randvillkor 6*).

4. Verktyg för framtagning av modellen

En modell kan definieras som ett försök att beskriva ett fenomen förekommande i verkligheten [3]. Vetenskapliga modeller beskrivs ofta med hjälp av matematiska uttryck, t.ex. ekvationer. Vid framtagning av en verklighetsbaserad modell görs nästan alltid förenklingar och antagande för att minska komplexiteten. Detta då modellen nästan aldrig kan likställas med verkligheten, utan ses som en approximation av hur verkligheten ser ut.

4.1 Stationär och dynamisk modellering

En modell beskrivs ofta av variabler som förändras med tiden, t.ex. strömstyrka eller en massa i rörelse. Ibland finns momentana samband mellan variablerna och modellen kallas då för stationär [9]. En stationär modell beskriver ofta tillstånd av jämvikt, s.k. steady state, där resultatet inte förändras så länge inparametrarna till modellen inte ändras. Modellen kan dock återge en viss dynamik då den matas med en dynamisk signal.

Flödesberäkningar är oftast stationära och ger information om hur nivåer och flöden ser ut vid steady state. Bernoullis lag, energiekvationen, är ett exempel på ett vanligt stationärt samband för flödesberäkningar (se kapitel 5.1).

För att beskriva verkligheten på bästa sätt krävs dock att modellen är dynamisk. Till skillnad från en stationär modell kan en dynamisk modell även bero på tidigare insignaler och förändras utan påverkningar av yttre störningar. Skillnaden matematiskt sett visar sig nästan alltid i form av derivator med avseende på tid eller andra variabler, d.v.s. förändringshastigheten av en variabel. Dynamiska modeller innehåller därför ofta ekvationer med derivator för olika variabler vilket även kallas för differentialekvationer.

4.2 Ekvationer för matematisk modellering

Hjärtat i modellering med Modelica är matematiska ekvationer som beskriver modellens fysikaliska egenskaper. Nästan alla modeller av fysikaliska system består i huvudsak av fyra sorters ekvationer:

1. *Ordinära differentialekvationer* som innehåller en tidsderivata som ofta skrivs som $\dot{x}$ eller dx/dt , t.ex.:

$$\frac{dx}{dt} = a \cdot x + b \quad (1)$$

2. *Algebraiska ekvationer* där differentierade variabler saknas:

$$x^2 = y^2 + a^2 \quad (2)$$

3. *Partiella differentialekvationer* som innehåller derivator med avseende på andra variabler än tid, t.ex. i rumsled:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \quad (3)$$

4. *Differensekvationer* som uttrycker relationen mellan variabler vid t.ex. olika tidpunkter:

$$x(t) = x(t-2) + a \quad (4)$$

Som tidigare nämnts är modeller vanligtvis uppbyggda av ekvationer uttryckta i system av differentialekvationer, då antingen som ordinära differentialekvationer (benämns ODE i fortsättningen) eller differential-algebraiska ekvationer (benämns DAE i fortsättningen). Som namnet antyder är DAE'er en blandning av ODE'er och vanliga algebraiska ekvationer.

4.2.1 Explicit och implicit form

När man pratar om ODE'er och DAE'er så pratar man ofta om implicit eller explicit form. I en ekvation på explicit form ges den beroende variabeln explicit som en funktion av den oberoende variabeln. Se följande exempel med beroende variabel y och oberoende variabel x :

$$y = f(x) \quad (5)$$

En implicit funktion däremot uttrycker inget klart samband mellan den beroende och den oberoende variabeln. Istället ges den oberoende variabeln av lösningen till följande funktion:

$$g(x, y) = 0 \quad (6)$$

4.2.2 Lösningsmetod

Metoder för att lösa ODE'er kallas ofta integrationsmetoder. Detta då lösningen till ekvationen kan tas fram direkt genom integration. Se följande exempel:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(t, x(t)) \\ x(0) = x_0 \end{cases} \Rightarrow x(t) = \int_0^t f(s, x(s)) ds \quad (7)$$

Den största skillnaden mellan att lösa ODE'er och DAE'er är att lösningen för DAE'er också inkluderar beräkningar av derivatan för variabler. Ibland måste man differentiera uttryck för att kunna erhålla en lösning då de algebraiska ekvationerna ofta innehåller samband mellan olika variabler men inte alltid mellan dess derivator.

Hur många gånger ekvationerna måste differentieras för att reducera systemet till lösbara ODE'er, brukar benämnas vid (differential) index. Följande exempel har index 0 då den är skriven på önskad explicit form:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t)) \quad (8)$$

Följande system av DAE'er uttryckta på s.k. semiexplicit¹ form har index 1 då den algebraiska ekvationen måste differentieras en gång med avseende på den beroende variabeln x för att anta formen av en ODE.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(t, x(t), y(t)) \\ 0 = g(t, x(t), y(t)) \end{cases} \quad (9)$$

¹ System av ekvationer uttryckta både på explicit och implicit form

Många lösningsmetoder går ut på att minimera index för att på så sätt skriva om ekvationerna till system av ODE'er. Detta brukar benämnas symbolisk indexreducering.

4.3 Dymola

Dymola är en modelleringsmjukvara utvecklad av företaget Dynasim i Lund. Företaget är sedan 2006 en del av Dassault Systèmes AB [10]. Dymola har ett visuellt utvecklingsgränssnitt för Modelica med både möjlighet för grafiskt gränssnitt och möjlighet att implementera kod själv. Fördelen är att språkets uppbyggnad för modellering av fysiska system gör det väldigt logiskt att använda i ett grafiskt gränssnitt. Implementerade modeller kan ges en grafisk profil, t.ex. en bild eller en ikon, i likhet med verkligheten. Modellen blir då lättöverskådlig och kan presenteras som den ser ut i verkligheten.

Dymola kommer även med ett standardbibliotek för fysikalisk modellering, MSL¹, för t.ex. mekaniska och elektriska system. Biblioteket innehåller även komponenter för t.ex. olika signaler och fysiska konstanter.

4.4 Modelica

Ursprunget till dagens version av programmeringsspråket Modelica började utvecklas av Hilding Elmqvist. Utvecklingen av språket, som han kallade Dymola, var en del i hans doktorsavhandling från år 1978 [11]. Syftet med språket var tillåta utvecklare att se modelleringen ur ett fysikaliskt perspektiv istället för ett matematiskt med hjälp av ekvationer, objekt och kopplingar. Dymola använde sig av grafteori och algoritmer för att transformera modellen till en form som sedan kunde lösas numeriskt. En milstolpe i utvecklingen kom år 1988 med Pantelides algoritmen för indexreducering av DAE'er. Med algoritmen kunde man minska graden på ekvationen genom att addera differentierade former av ekvationerna i modellen. Detta gjorde systemet mindre komplext och lättare att lösa och med detta följde många liknande modelleringsverktyg.

Kompatibiliteten mellan verktygen var dock dålig och modeller som gjorts i ett verktyg kunde inte användas i ett annat. År 1996 initierade Hilding Elmqvist utvecklingen av ett standardiserat modelleringsspråk vid namn Modelica. Det nya språket skulle vara domänneutralt för att kunna användas för alla typer av modellering. Tillsammans med experter från olika ingenjörsinriktningar med intresse för modellering skapade man en specifikation för hur Modelica skulle vara uppbyggt.

Modelica kan användas för att lösa olika problem uttryckta i form av DAE'er med kontinuerliga variabler. Man behöver med andra ord inte formulera om sina ekvationer till ett vanligt system av ODE'er vilket spar mycket arbete.

Modelica är ett objekt- och ekvationsorienterat språk. Fördelen med ett objektorienterat språk är att man enkelt kan bygga modellbibliotek vilket gör det lätt att återanvända modellerna. Mycket tid sparas då modeller lätt kan ärva egenskaper från varandra.

4.4.1 Grunder i språkets uppbyggnad

Modelica har en syntax som påminner om många moderna programmeringsspråk. Grunderna för att skapa en enkel modell går ut på att man definierar vilka parametrar och variabler som skall ingå i modellen. Sedan listas de ekvationer som beskriver den fysikaliska modellen. Ett enkelt exempel är klassen för en vattentank med in- och utflöde där koden ser ut enligt följande:

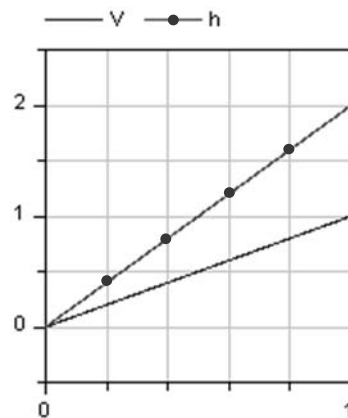
¹ Modelica Standard Library

```

model Vattentank
  parameter Real Qin=0.2 "Inflöde [m3/s]";
  parameter Real Qut=0.19 "Utflöde [m3/s]";
  Real V "Volym på vattentanken [m3]";
  Real h "Vattennivå i tanken [m]";
  Parameter Real A=2 "Bottenarea på tanken [m2]";
equation
  der(V) = Qin - Qut;
  V = A * h;
end Vattentank;

```

Ekvationssystemet består av två ekvationer. Dels en massbalans för tanken, d.v.s. att volymändringen per tidsenhet skall vara lika stor som skillnaden mellan inflödet och utflödet och dels en beräkning för vattnets volym i tanken. Simuleringen av modellen visar då hur volymen och vattennivån i tanken varierar med tiden enligt Figur 8.



Figur 8 Graf på resultat av simulering av vattentanksmodellen.

4.4.2 Konnektorer

Ofta vill man bryta ner en modell i enklare delmodeller. Modelica är konstruerat så att man på ett enkelt sätt skall kunna sammankoppla delmodeller. Ihopkopplingen sker med hjälp av s.k. konnektorer, som anger gränssnittet för sammankopplingen. Villkoret för att kunna koppla ihop konnektorer är att de måste överföra samma egenskaper, d.v.s. vara av samma konnektorklass. Följande kod beskriver en enkel konnektorklass för vattentanken:

```

Connector Con
  Flow Q "Flöde [m3/s]";
End Flode;

```

Variablerna i konnektorklassen kan deklarerats på två sätt. Antingen som `real` eller `flow`. Skillnaden är att `real`-variabler sätts lika med varandra vid sammankoppling av två konnektorer, medan summan av `flow`-variablerna sätts till 0. På så sätt ges `flow`-variabler en riktning där positivt tecken innebär att flödet går in i modellen och negativt tecken anger att flödet går ut ur modellen.

Klassen för vattentanken med definition av konnektorer blir då följande:

```

model Vattentank
  Real V "Volym på vattentanken [m3]";
  Real h "Vattennivå i tanken [m]";
  Parameter Real A=2 "Bottenarea på tanken [m2]";
  Con Qin "Konnektor för inflöde";
  Con Qut "Konnektor för utflöde";
equation
  der(V) = Qin.Q - Qut.Q;
  V = A * h;
end Vattentank;

```

På så sätt kan man sammanlänka instanser av vattentankar i en större modell. Följande kod beskriver systemet:

```

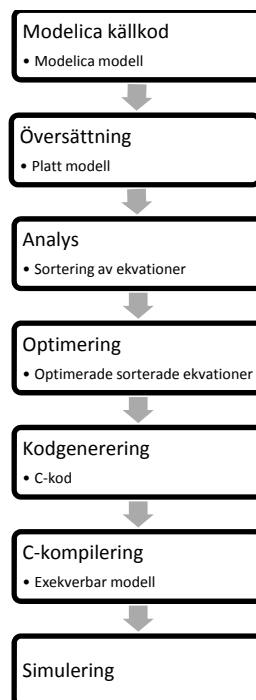
model Multitank
  Vattentank tank1, tank2;
equation
  connect(tank1.Qut, tank2.Qin);
end Multitank;

```

Fördelarna med ett objektorienterat modelleringsspråk är många. Hierarkierna blir tydliga och uppbyggnaden av stora modeller kan brytas ner i mindre beståndsdelar, vilket gör det enklare och mer lättöverskådligt.

4.4.3 Exekvering av modell

När en modell är färdigimplementerad och redo att simuleras sker en kedja av olika processer för att lösa ekvationssystemet. Första steget är att alla ekvationer förenklas och plattas till, vilket bl.a. innebär att klasser ärvs och infogas i källkoden och att ekvationer för kopplingar mellan konnektorer införs som standardekvationer.



Figur 9. Översättning och exekvering av modell i Modelica

Nästa steg är att ekvationerna sorteras beroende på hur dataflödet mellan ekvationerna är bestämt. Inbyggda algoritmer (se kapitel 4.4.4) eliminerar sedan ekvationerna till ett minimum med hjälp av symbolisk indexreducering. Ekvationerna optimeras därefter ytterligare genom att dubletter tas bort och oberoende ekvationer på explicit form räknas ut.

När ekvationerna är reducerade till ett minimum genereras C-kod¹ som sedan exekveras för att simulera modellen.

4.4.4 DASSL DAE lösare

Den mest använda numeriska lösaren för system av DAE'er är DASSL (Differential Algebraic System Solver). DASSL är standardlösare i de flesta utvecklingsmiljöer för Modelica [3], där ibland Dymola, och har använts som lösare för modelleringen som beskrivs i det här arbetet. Den löser system av index 0 till 1 och använder sig av en bakåtdifferensmetod för att finna lösningar. Vanligtvis används Eulers bakåtdifferensmetod [12] där derivatan approximeras med en finit differens med fast steglängd. För en ODE skrivs algoritmen enligt följande:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \rightarrow \frac{y_n - y_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} = f(t_n, y_n) \rightarrow$$

$$y_n = y_{n-1} + \Delta t \cdot f(t_n, y_n) \quad (10)$$

Algoritmen är implicit då den okända variabeln y_n återfinns på båda sidor i ekvationen och detta leder ofta till ett olinjärt ekvationssystem. Algoritmen är dock mycket stabil [13] om man jämför med t.ex. en framåtdifferens, där funktionen $f(t, y)$ bygger på föregående punk $n-1$.

För DAE'er ser algoritmen på liknande sett ut enligt följande:

$$f\left(t_n, y_n, \frac{y_n - y_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}\right) = 0 \quad (11)$$

Denna metod brukar också kallas för första ordningens bakåtdifferensmetod (BDF på engelska) då derivatan approximeras med en första ordningens differens [12]. Ekvationerna måste vara skrivna på full implicit form för att denna metod skall kunna användas. Är ekvationerna däremot skrivna på semiexplicit form används följande algoritm för att lösa ekvationssystemet:

$$f\left(t_n, y_n, \frac{\rho \cdot y_n}{t_n - t_{n-1}}\right) = 0 \quad (12)$$

$$\rho \cdot y_n = \sum_{i=0}^k \alpha_i \cdot y_{n-i} \quad (13)$$

Här är α_i metodens koefficient och k har ett värde mellan 1 och 5 för varje tidssteg. Ämnet numeriska lösare är väldigt komplext och ligger utanför omfattningen av detta arbete. För vidare läsning i ämnet hänvisas till [12] och [13].

¹ C/C++ är ett välkänt objektorienterat programmeringsspråk

5. Flödesberäkningar och teori

Detta kapitel tar upp ekvationer och förklaringar till beräkningar som berör kanalströmning. Inledningsvis beskrivs den grundläggande teorin kring stationära flödesberäkningar. Dessa beräkningar ligger till grunden för tryckfallsberäkningar och flödesberäkningar för t.ex. luckor och krökar. Tyngdpunkten i kapitlet ligger dock på dynamiska ekvationer för kanalflöden.

5.1 Energiekvationen

Beräkningar för kanalströmning har sitt ursprung i Bernoullis ekvation [14]. För en sektion i en kanal ser ekvationen ut som följer:

$$H = z + h + \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad (14)$$

Första termen z i högerledet beskriver nivån från en angiven referensnivå till botten lägsta punkt och h är höjden från botten till vattenytan (tryckhöjden). Den sista termen i ekvationen är hastighetshöjden där U är medelhastigheten och tillsammans ger termerna den totala energinivån för en sektion i kanalen. Genom att jämföra två sektioner med vetskapen om vart energin tar vägen kan man då ställa upp följande uttryck:

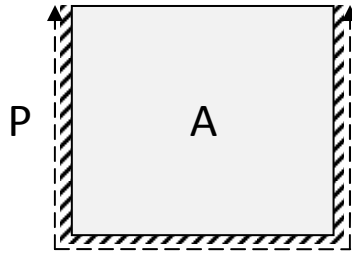
$$z_1 + h_1 + \frac{U_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + h_2 + \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + h_f + h_t \quad (15)$$

I denna ekvation, som kallas energiekvationen, tillkommer ytterligare två termer som beskriver energiförlusterna mellan sektionerna. Energiförlusterna är friktionsförluster, h_f , och tilläggsförluster, h_t . Friktionsförlusterna beror på hastigheten på flödet och materialet i kanalen. Tilläggsförlusterna är engångsförluster i form av t.ex. sektionsförändringar, krökar på kanalen etc.

5.1.1 Friktionsförluster

Friktionsförluster uppkommer alltid vid likformig strömning [14], d.v.s i raka kanaler eller ledningar. Friktionsförlusttermen påverkas av hastigheten på flödet i kanalen, d.v.s. den ökar när hastigheten ökar. Friktionen blir även större om materialet i kanalen har en grov ytstruktur. Berg och grus ger en hög friktion medan t.ex. järn ger en minimal energiförlust. Termen beror även på den hydrauliska radien, R , som är arean dividerad med den våta perimetern. Den våta perimetern, P , är sträckan på den del av tvärsnittet där kanalens ytskikt har kontakt med vatten (se Figur 10).

$$h_f = \frac{Q^2}{A \cdot M^2 \cdot R^{4/3}} \quad (16)$$
$$\begin{cases} R = \frac{A}{P} \\ P = b + 2 \cdot h \end{cases}$$



Figur 10 Våta perimetern för ett rektangulärt tvärsnitt.

Grovheten på ytan ges av Mannings tal, M , där värdet på talet ges enligt följande tabell:

Material	Mannings tal
Stål	90 – 110
Trä	70 – 95
Slät betong	80 – 90
Bräddriven betong	65 – 75
Gjutjärn	60 – 70
Slät jord	35 – 50
Berg	20 – 35

Tabell 2 Mannings tal för olika material.

5.1.2 Tilläggsförluster

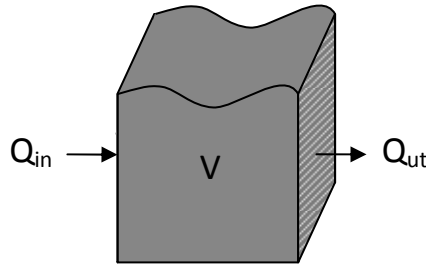
Till skillnad från friktionsförluster uppkommer tilläggsförluster vid olikformig strömning [14], t.ex. vid sektionssändringar och krökar. Förlusterna beräknas enligt följande formel där k är en konstant som varierar beroende på typ av förlust:

$$h_t = k \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad (17)$$

5.2 Ekvationer för kanalströmning

Ekvationerna för att beskriva flödets dynamik i kanalströmningen kallas för Saint Venants ekvationer [15]. De två ekvationerna beskriver flödesförändringen mellan två tvärsnitt i kanalen, d.v.s. för en kontrollvolym. Den första ekvationen kallas kontinuitetsekvationen och beskriver en massbalans där vattennivån beror på skillnaden i in- och utflöde i kontrollvolymen.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (18)$$



Figur 11 Kontrollvolym med in- och utflöde.

Den andra ekvationen kallas för rörelsemängdsekvationen och beskriver hur rörelsemängden i vattenmassan mellan tvärsnitten förändras. Ekvationen har sitt ursprung i Newtons andra lag som säger att en resulterande kraft som verkar på ett föremål är lika med förändringen, med avseende på tid, i rörelsemängd hos föremålet [15].

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_o) = 0 \quad (19)$$

Den första termen beskriver den totala flödesförändringen mellan tvärsnitten med avseende på tiden.

Då rörelsemängden för kontrollvolymen ges av massan på vattnet multiplicerat med dess hastighet, ges rörelsemängdsflödet av massflödet multiplicerat med vattnets hastighet. Massflödet omskrivet till volymflöde ger den andra termen som beskriver hur rörelsemängden överförs mellan tvärsnitten.

Den tredje termen beskriver hur det yttre trycket inverkar på rörelsemängden medan den sista termen beskriver tyngdkraftens och friktionens påverkan på kontrollvolymen. Här är S_o lutningen på kanalen och S_f , i likhet med energiekvationen, friktionsförlusten för kanalen. Då denna rapport endast beskriver horisontell kanalströmning kan bottenlutningen sättas till noll.

Bredden b i ekvationerna (ingående term vid beräkningen av arean A) är alltid bredden på kanalen i nivå med vattenytan vilket spelar roll i de fall där tvärsnittet inte är rektangulärt.

5.3 Filtrekvation

Genomströmningen genom ett filter beror på tryckdifferensen över filtret och halten suspension i det inkommande flödet. Flödet beskrivs enligt [16] av följande ekvationer:

$$Q_{filter} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\Delta h}{k_1}} \cdot \frac{10}{3600}, & s < 3 \frac{mg}{l} \\ \sqrt{\frac{\Delta h}{k_1}} \cdot (1 - (k_2 - k_3 \cdot k_4^s)) \cdot \frac{10}{3600}, & s \geq 3 \frac{mg}{l} \end{cases} \quad (20)$$

Q_{filter} är flödet genom filtret, Δh är tryckdifferensen över filtret uttryckt i centimeter och s är suspensionshalten uttryckt i mg/l. k_x är konstanter med värden enligt följande tabell:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = 0.0004 \\ k_2 = 0.84 \\ k_3 = 1.9 \\ k_4 = 0.75 \end{array} \right.$$

Tabell 3 Värden för k-parametrar i filterekvationen.

Flödet är multiplicerat med en faktor 10 då varje filterkassun består av 10 parallellkopplade filter.

5.4 Tryckfall

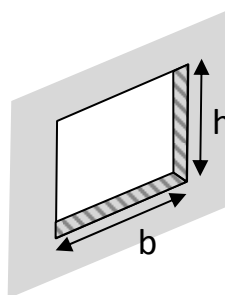
När vatten strömmar genom t.ex. en lucka eller ett hål uppstår energiförluster [14]. Hur stor energiförlusten blir beror på utformningen av öppningen, t.ex. utformningen av kanterna på öppningen. Tryckfallet som uppkommer genom minskningen av energi i flödet kan uttryckas som följer:

$$Q = C \cdot A \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta h)^2 \quad (21)$$

$\Rightarrow$

$$\Delta h = \frac{Q \cdot |Q|}{(C \cdot A)^2 \cdot 2 \cdot g} \quad (22)$$

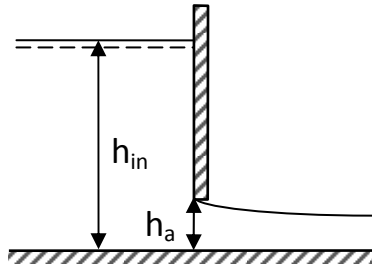
C kallas för avbördningskoefficienten och den påverkas bl.a. av om öppningen har skarpa kanter eller om kanterna är avrundade. Avbördningskoefficienten erhålls ur tabeller eller grafer som i sin tur beror på dimensioner och egenskaper hos elementet som orsakar tryckfallet.



Figur 12 Rektangulär skarpkantad lucka.

5.5 Bottenlucka

Utströmning genom en lucka som öppnas från botten är ett specialfall av ekvationer från ovan.



Figur 13 Flöde genom bottenlucka.

Med förutsättning att strömningsförlusterna är försumbara kan ekvationen för en sådan lucka skrivas enligt följande [14]:

$$Q_{lucka} = C \cdot h_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{in} - C \cdot h_a)} \quad (23)$$

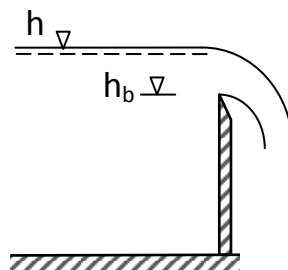
Där Q_{lucka} är flödet genom luckan, h_a är luckans höjd, C är en koefficient som kallas vertikal-kontraktionen och som beror på utformningen av luckan och h_{in} är vattennivån innan luckan. Formeln uttrycker flödet per breddmeter lucka och gäller då flödes hastigheten in till luckan är noll.

5.6 Bräddflöde

Flödet över en bräddkant ges enligt [7] av följande ekvation:

$$Q_{brädd} = C \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot (h - h_b)^{3/2} \quad (24)$$

Här är h vattennivån innan bräddkanten och h_b nivån på bräddkanten. C är avbördningskoefficienten vilken beror på utformningen av bräddkanten och dess värde erhålls ur tabell. Formeln gäller för sidleds bräddning där flödes hastigheten in mot brädden är noll.



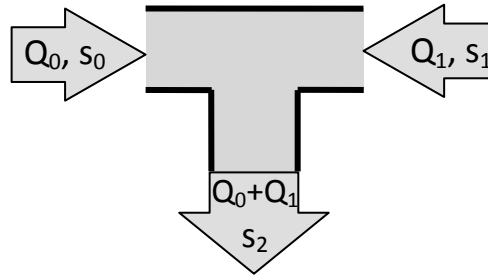
Figur 14 Flöde över bräddkant.

5.7 Beräkningar av suspensionshalt

Genom hela rapporten antas att vattnet har en perfekt omrörning, d.v.s. att suspensionshalten (suspension benämns härnåfter med susp) är homogen i varje delvolym. Randvillkor för modellen är två flöden med olika susphalter, dels flödet från ES och dels flödet från ED. Susphalten där två

flöden med olika susphalter blandas, t.ex. i en T-korsning, kan beräknas enligt utspädningsmetoden [14]. Beräkningen ser ut enligt följande:

$$Q_0 s_0 + Q_1 s_1 = (Q_0 + Q_1) s_2 \quad (25)$$



Figur 15 Utspädningsmetoden.

6. Modellering

Följande kapitel handlar om modellering och framtagning av olika delmodeller och dess parametrar. Varje delmodell beskrivs separat där förenklingar och fysikaliska egenskaper ges en förklaring. Slutligen beskrivs den totala modellen av systemet; dels hur den är uppbyggd av delmodeller men även förenklingar och förklaringar som ligger bakom den slutgiltiga modellen.

Alla ekvationer som implementerats har tre gemensamma variabler som modellen i huvudsak bygger på. Dessa är flödet Q , vattennivån h , och susphalten s . De är okända och löses vid simulering i Dymola. För varje delmodell och för den övergripande modellen över hela systemet krävs att antalet ekvationer och antalet okända variabler är lika många för att ekvationssystemet skall vara lösbart. Detta är testat under arbetets gång och gäller för varje delmodell och även för huvudmodellen. Varje delmodell beskrivs enbart i form av ekvationer, inte hur de har implementerats.

Alla delmodeller är i Dymola definierade med ett gränssnitt, en konnektor, med de tre ovan nämnda variablerna. Flödet definieras i konnektorn som en flow-variabel då flödet har en riktning, medan h och s definieras som real-variabler.

För flertalet av delmodellerna sker inga förändringar av susphalten varför inga beräkningar av suspen sker. Om inget annat anges för delmodellen ser ekvationen för susphalten ut enligt följande:

$$s_{in} = s_{ut} \quad (26)$$

6.1 Modeller för strömning i horisontell öppen kanal

Modellen för kanalströmningen kan beskrivas som en serie delvolym ihopkopplade i en lång kedja. Varje delvolym i kedjan består av en volym med fast längd, fast bredd och variabel höjd som kan beskrivas genom en massbalans (ekv. 18). Kopplingen mellan delvolymerna beskrivs av ett volymflöde som ges av rörelsemängdsekvationen och beror huvudsakligen på vattennivån i intilliggande tankar (ekv. 19). Fem olika kanalmodeller har implementerats för att alla typer av kanaler i anläggningen skall täckas in.

6.1.1 Grundmodell

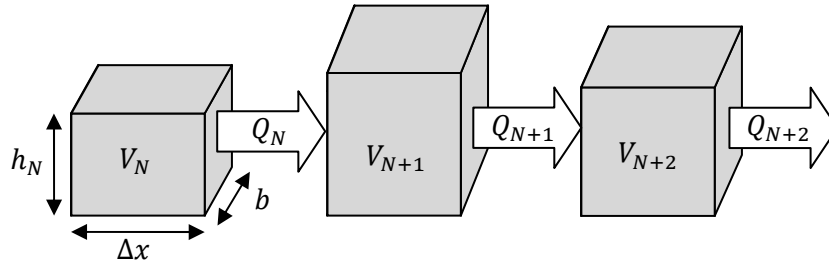
Grundmodellen beskriver en enkel rak och horisontell kanal med in- och utflöde i ändarna och rektangulärt tvärsnitt.



Figur 16 Schematisk bild över en enkel rak kanalmodell.

En kanal med längden L kan delas upp i ett bestämt antal delvolym N . Längden på varje delvolym ges då av den totala kanallängden L dividerat med antalet delvolym N , vilket kan ses som upplösningen på kanalen eller detaljeringsgraden på hur väl flödesdynamiken i kanalen beskrivs. En

lång kanal med få delvolymen beskriver dynamiken sämre än en kort kanal med många delvolymen eftersom fler delvolymen delar upp ytan i fler punkter som beskriver nivån i kanalen.



Figur 17 Modell för kanalströmning med seriekopplade delvolymen.

Strömningen i kanalen beskrivs av ekvation 18 och 19. Båda ekvationerna är dock uttryckta som partiella differentialekvationer vilka inte är lösbara i Dymola. Ekvationerna kan då skrivas om till vanliga ODE'er där derivatan i rumsled diskretiseras och ersätts med en finit differens med fast steglängd i rummet. Följande ekvation är definitionen för derivatan av Q med avseende på x :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{Q(x + \Delta x) - Q(x)}{\Delta x} \quad (27)$$

Derivatan kan då approximeras med följande ekvation för små värden på Δx :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{Q_{N+1} - Q_N}{\Delta x} \quad (28)$$

Approximation ovan kallas för en första ordningens framåtdifferens där Q_N är flödet in i delvolymen, Q_{N+1} är flödet ut ur delvolymen och Δx är längden på delvolymen.

Saint Venants ekvationer får efter förenkling följande utseende där h_o har satts till noll för en horisontell kanal.

$$\frac{dh}{dt} + \frac{1}{b} \left(\frac{Q_{N+1} - Q_N}{\Delta x} \right) = 0 \quad (29)$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{(Q_{N+1} - Q_N)^2}{A \cdot \Delta x} + gA \left(\frac{h_{N+1} - h_N}{\Delta x} \right) + gAS_f = 0 \quad (30)$$

Massbalansen kan förenklas ytterligare vid införande av en variabel för volymen, V , enligt följande:

$$\frac{dV}{dt} = Q_N - Q_{N+1} \quad (31)$$

$$V = h \cdot b \cdot \Delta x \quad (32)$$

För att ekvationerna skall bli lösbara i Dymola har även termen för överföring av rörelsemängd i rörelsemängdsekvationen försumrats. Detta är nödvändigt för att tillfredsställa tillvägagångssättet som Dymola använder sig av för att lösa ekvationssystem (se kap. 4.4.3). Då flödet återfinns som variabler i både massbalansen och rörelsemängdsekvationen leder en ökning av antalet delvolymen till en exponentiell tillväxt av Lösningsvariabler vid simulering. För storleken på den slutliga modellen och det stora antalet delvolymen leder detta till ett olösbart ekvationssystem.

Efter förenkling ser ekvationerna för modelleringen av kanalen ut enligt följande:

$$\Delta x = \frac{L}{N} \quad (33)$$

$$\frac{dV_N}{dt} = Q_N - Q_{N+1} \quad (34)$$

$$V_N = h_N \cdot b \cdot \Delta x \quad (35)$$

$$\frac{dQ_{N+1}}{dt} + gA_N \left(\frac{h_{N+1} - h_N}{\Delta x} \right) + gA_N h_{f,N} = 0 \quad (36)$$

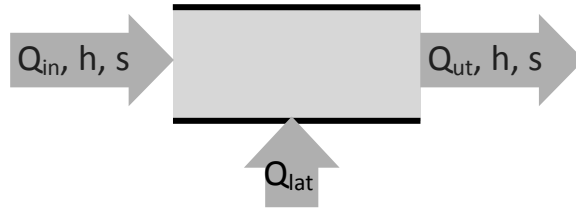
$$\begin{cases} h_{f,N} = \frac{Q_{ut,N} \cdot |Q_{ut,N}|}{A_N \cdot M^2 \cdot A_N / P_N} \\ P_N = b + 2 \cdot h_N \end{cases} \quad (37)$$

$$A_N = h_N \cdot b \quad (38)$$

Här är Q_N och h_N okända variabler för varje delvolym av längden Δx . Modellen avslutas med en ekvation för rörelsemängdsöverföring vilket gör att modellen antingen måste kopplas ihop med en annan delmodell som börjar med en volym eller med en modell enbart av en volym. Detta för att beräkningarna skall bli fysikaliskt korrekta.

6.1.2 Kanal med lateralt inflöde

Vattnet från ES strömmar lateralt via hål in till kanalerna mot SF. Kanalmodellen som beskrivs här bygger på grundmodellen men med skillnaden att ytterligare ett flöde adderas i massbalansen (ekv. 34). Flödet som i verkligheten lateralt faller ner på ytan i kanalen antas i modellen inte ge någon turbulens på ytan utan ses istället som att flödet antrar delvolymen under vattenytan.



Figur 18 Schematisk bild över kanalmodell med lateralt inflöde.

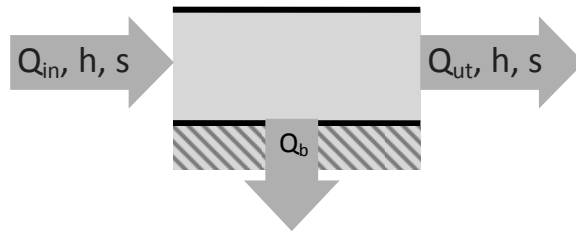
Följande ekvation beskriver den utökade massbalansen (se ekv. 34):

$$\frac{dV_N}{dt} = Q_N - Q_{N+1} + Q_{lat,N} \quad (39)$$

Susphalten i det laterala flödet är det samma som i det befintliga flödet varför ingen beräkning av susphalt behöver göras.

6.1.3 Kanal med bräddflöde

Nästa kanalmodell skiljer sig från grundmodellen då den även innehåller ett bräddflöde. Bräddflödet påverkar vattnet i delvolymen på så sätt att delar av vattenvolymen försvinner via bräddöverfallet.



Figur 19 Schematisk bild över kanalmodell med bräddflöde.

Ett antagande görs att bräddflödet, som sker vinkelrätt mot huvudströmriktningen, inte påverkar rörelsemängden i delvolymen. Massbalansen (se ekv. 34) får följande utseende efter tillägg för bräddflödet:

$$\frac{dV_N}{dt} = Q_N - Q_{N+1} - Q_{brädd,N} \quad (40)$$

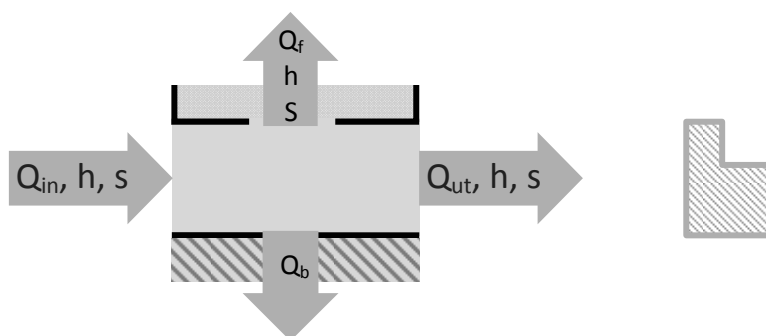
Här är $Q_{brädd}$ flödet över brädden som ligger på en given nivå $h_{brädd}$. Bräddflödet beskrivs (se ekv. 24) enligt följande:

$$\begin{cases} Q_{brädd,N} = 0.6 \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \Delta x \cdot (h_N - h_{brädd})^{3/2} \\ \text{om } h_N > h_{brädd} \end{cases} \quad (41)$$

Då överfallet sker vinkelrätt mot huvudflödet kommer bredden på bräddkanten vara lika med delvolymens längd, Δx . Flödet är negativt och kommer därmed leda till en minskning av volymen i ekvationen för massbalansen.

6.1.4 L-formad kanal med bräddflöde

Den tredje kanalmodellen återfinns i södra filterhuset där tvärsnittet på kanalen har formen av ett L till skillnad från föregående modeller med rektangulärt tvärsnitt. Modellen är baserad på modellen med bräddflöde men med tillägget av ett flöde in till filterkammaren.



Figur 20 Schematisk bild över L-formad kanalmodell med bräddflöde och flöde till filterkammare.

Kanalens L-form gör att beräkningarna för grundmodellen måste utökas med villkor för kanalens bredd enligt följande:

$$\begin{cases} b = 2.0 \text{ m}, & h < +19.55 \text{ m} \\ b = 0.7 \text{ m}, & h \geq +19.55 \text{ m} \end{cases} \quad (42)$$

Enligt [8] skall vattennivån teoretiskt sett aldrig sjunka under +20.80 m vilket är nivån för luckans övre kant in till filterkamrarna. Detta är över nivån för den bredare delen av kanalens tvärsnitt men ekvationerna har ändå implementerats för ett scenario med en vattennivå lägre än så. Utöver ekvationen för bräddflöde enligt ovan leder flödet till filterkamrarna till att ytterligare en term adderas i massbalansen (se ekv. 40). Ekvationen ser då ut enligt följande:

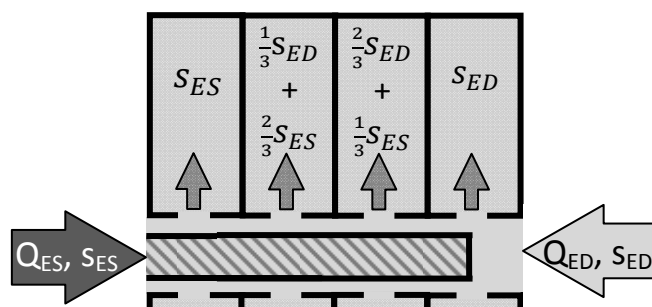
$$\frac{dV_N}{dt} = Q_N - Q_{N+1} - Q_{brädd,N} - Q_{filter,N} \quad (43)$$

Flödet in till filterkammaren, Q_{filter} , är implementerat i en separat modell och beskrivs vidare i kapitel 6.6.

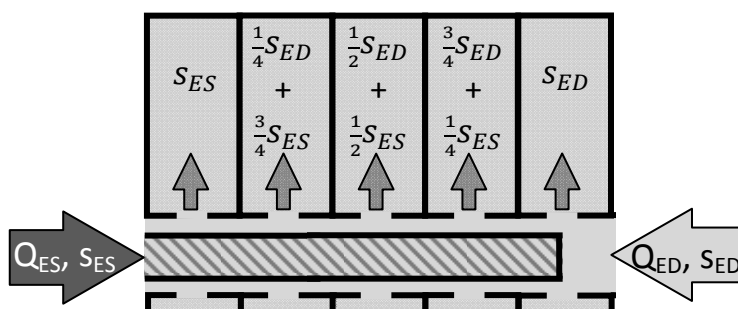
6.1.5 L-formad kanalmodell med bräddflöde och suspberäkningar

Den sista kanalmodellen är baserad på föregående modell men skiljer sig i beräkningarna för susphalten. Kanalmodellen i fråga återfinns i norra filterblocket där kanalen innehåller tillflöden från både ES och ED. Vid flöden med olika susphalt från ES och ED, kommer en koncentrationsgradient uppstå i kanalen där antalet delvolym som gradienten spänner över kommer bero på antalet filter i drift

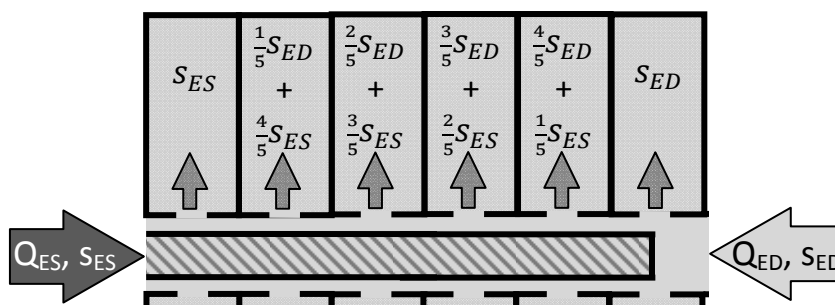
och storleken på flödena. I samråd med Gryaab¹ har beräkningarna för susphalten i detta fall förenklats utan att resultatet felaktigt speglar verkligheten. Då susphalten antas vara homogen i alla delvolymerna har en förenklad viktad beräkning gjorts för susphalten i de olika delvolymerna. Utgångspunkten är att suspen fördelas på tre olika sätt beroende på storleken på flödet från ED. Ju större flöde från ED desto längre ner i kanalen påverkas susphalten från ES av susphalten från ED. Följande figurer beskriver beräkningarna för susphalten i de olika delvolymerna och för flödet in i filterkamrarna.



Figur 21 Susphaltens fördelning i norra filterblocket för flöden från ED (Q_{ED}) på 0 - 0.8 m³/s.



Figur 22 Susphaltens fördelning i norra filterblocket för flöden från ED (Q_{ED}) på 0.8 - 1.5 m³/s.



Figur 23 Susphaltens fördelning i norra filterblocket för flöden från ED (Q_{ED}) större än 1.5 m³/s.

Här är s_{ES} susphalten i flödet från ES medan s_{ED} är susphalten i flödet från ED.

¹ Thomas Bjelke, drifttekniker på Ryaverket.

6.2 Delmodell för T-korsning

På ställen i kanalsystemet där flöden adderas har en modell av en volym med flödesberäkningar skapats. Ekvationerna består enbart av en utökad massbalans (se ekv. 34) enligt nedan:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in,1} + Q_{in,2} - Q_{ut} \quad (44)$$

För T-korsningar där flöden med olika susphalt möts beräknas även susphalten för det utgående flödet (se ekv. 25).

$$Q_{in,1}s_{in,1} + Q_{in,2}s_{in,2} = Q_{ut}s_{ut} \quad (45)$$

Q_{in} och s_{in} är flödet och susphalten i de flöden som möts i T-korsningen medan Q_{ut} och s_{ut} är det adderade flödet och den resulterande susphalten i utflödet från korsningen.

6.3 Delmodell för krök

Huvudmodellen innehåller två 90°-kurvor i kanalerna efter ES. Modellen för en kurva beskriver tilläggsförlusten och tryckfallet som den ger upphov till. Kurvorna har enligt [7] ett k -värde på 0.3 där energiekvationen (se ekv. 15) ger vattennivån efter kurvan enligt:

$$h_{in} + \frac{(Q/(b \cdot h_{in}))^2}{2 \cdot g} = h_{ut} + \frac{(Q/(b \cdot h_{ut}))^2}{2 \cdot g} + 0.3 \cdot \frac{(Q/(b \cdot h_{ut}))^2}{2 \cdot g} \quad (46)$$

Här är h_{in} är den kända vattennivån i föregående delvolym och h_{ut} är vattennivån som beräknas fram för nästkommande delvolym. Kurvmodellen har alltså ingen fysisk volym utan beräknar enbart tryckfallet som energiförlusten i kurvan medför.

6.4 Delmodell för tryckfall

När vattnet strömmar in i filterhuset möts två flöden i en T-korsning vilket leder till ett tryckfall och en lägre vattennivå. Tryckfall sker även när vattnet strömmar genom luckorna in till filterkammaren. En generell modell för tryckfall har därför skapats, en modell som enbart beräknar ett tryckfall med avseende på flöde och genomströmningsarea enligt ekv. 22.

$$\Delta h = \frac{Q \cdot |Q|}{(C \cdot (b \cdot h_{in}))^2 \cdot 2 \cdot g} \quad (47)$$

$$h_{ut} = h_{in} - \Delta h \quad (48)$$

Tryckfallet, Δh , beräknas med avseende på hastigheten (flödet dividerat med arean) från föregående delvolym och flödet i täljaren har absolutbelopp för att inkludera riktningen på flödet. T-korsningen in i filterbyggnaden är skarpkantad och har en avbördningskoefficient på 0.8 medan luckorna in till filterkammarna har en avbördningskoefficient på 0.6 [8]. Modellen för tryckfall har ingen fysisk volym utan beräknar enbart en nivåförändring till följd av energiförlusten.

6.5 Delmodell för nödlucka

I modellen finns två luckor i kanalerna efter ES vilka öppnas från botten och har en ramptid på 92 sekunder. Styrningen av luckorna i modellen sker genom att styrsystemet ger en signal som går från 0 till 100, där 0 betyder stängd lucka och 100 betyder öppen lucka. Delmodellen beskriver flödet genom luckan (enligt ekv. 23) vilket har förutsatts vara linjärt proportionellt mot hålets area, varför signalen för luckans läge i procent multipliceras med luckans storlek för att ge arean på öppningen.

$$Q_{lucka} = 0.61 \cdot (h_{\text{öppning}} \cdot u/100) \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{in} - 0.61 \cdot (h_{\text{öppning}} \cdot u/100))} \quad (49)$$

Här är u signalen för luckans läge mellan 0 och 100 och $h_{\text{öppning}}$ är höjden på öppningen under luckan. Vertikalkontraktionen är teoretiskt och experimentellt bestämd till 0.61 för den skarpkantade luckan.

6.6 Delmodell för lucka och filter

Modellen för filtren beskriver storleken på genomflödet (se ekv. 20) som en funktion av nivåskillnaden över filtret och susphalten i vattnet. I modellen försummas att filtret sätts igen under drift, vilket i verkligheten gradvis försämrar genomflödet. För att kunna bestämma tryckskillnaden över filtret måste vattennivån efter utflödet bakom filtren vara känd. I verkligheten varierar den men i samråd Gryaab har den antagits ligga fast på +20.79 m.

Flödet in till filtren begränsas även av öppningen in till filterkammaren, d.v.s. av läget på luckan in till kammaren. Här antas, precis som för nödluckorna, att flödet är linjärt proportionellt mot öppningsarean varför flödet multipliceras med hur stor procentandel av luckan som är öppen. Luckans läge ges av styrsystemet och har ett värde mellan 0 och 100 där 0 betyder stängd lucka och 100 öppen.

$$Q_f = \begin{cases} (u/100) \cdot \sqrt{\frac{h_{in} - 20.79}{k_1}} \cdot \frac{10}{3600}, & S < 3 \frac{mg}{l} \\ (u/100) \cdot \sqrt{\frac{h_{in} - 20.79}{k_1}} \cdot (1 - (k_2 - k_3 \cdot k_4^S)) \cdot \frac{10}{3600}, & S \geq 3 \frac{mg}{l} \end{cases} \quad (50)$$

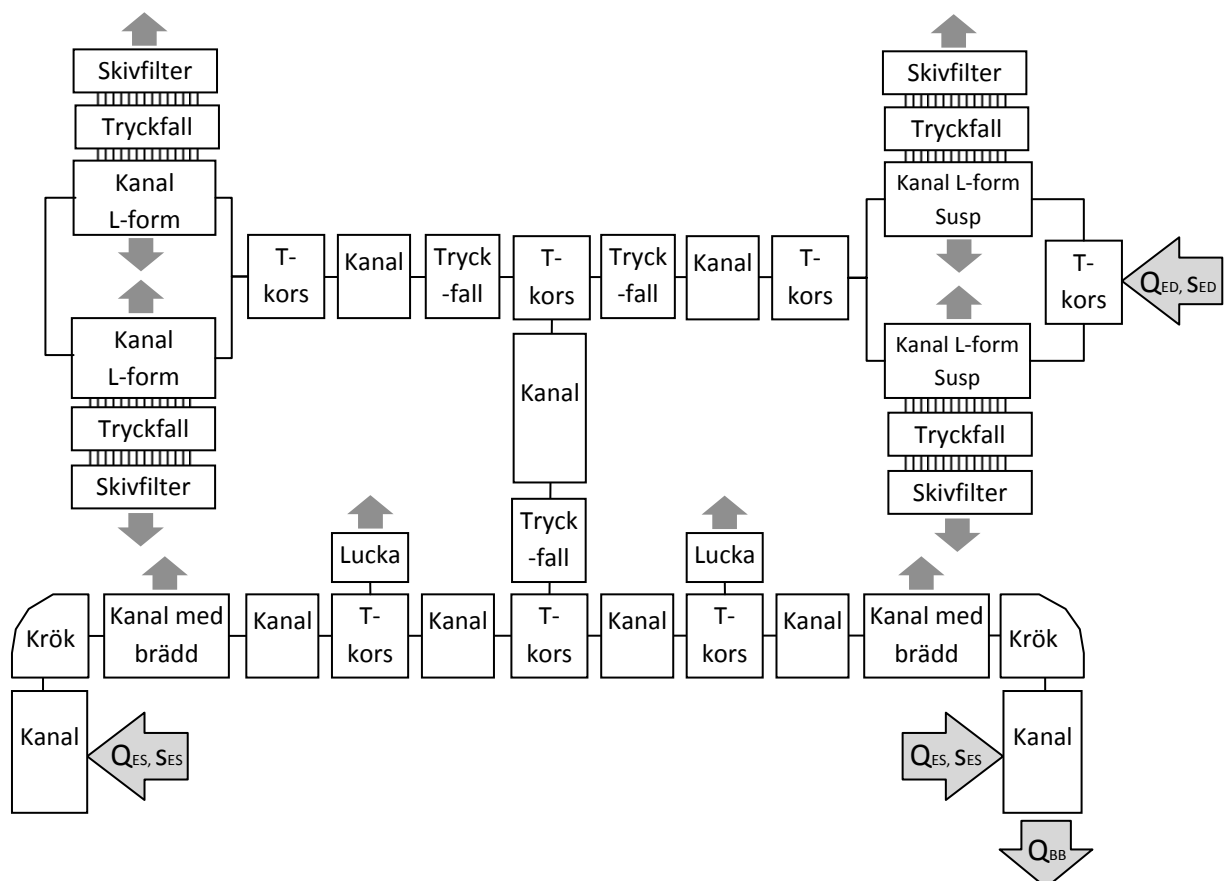
Här är u signalen för luckans läge och h_{in} vattennivån innan skivfiltren. Alla k-parametrar har värden enl. Tabell 3. Modellen har ingen fysisk volym då filterkammarens dimensioner är små och vattensytans rörelse inne i kammaren inte är av intresse.

6.7 Slutliga modellen

Den slutliga modellen över hela kanalsystemet är uppbyggd av ovanstående delmodeller enligt Figur 24. Modellen har på några punkter förenklats för att hinna färdigställa arbetet under utsatt tid och

för att modellen inte skall bli allt för beräkningstung. Förutom de förenklingar som tidigare nämnts för varje delmodell har även följande förenklingar och antaganden gjorts:

1. Övergången från rektangulär till L-formad kanal sker successivt genom en areaökning i filterhuset. Denna övergång har inte modellerats utan areaförändringen sker momentant.
2. Vid vissa flödessituationer kan vatten strömma från södra ES-kanalen via norra ES-kanalen till BB. Så som modellen är uppbyggd sker ingen beräkning av ett ev. tryckfall i T-korsningen in mot SF.
3. Ingen hänsyn tas till förträngningen i kanalerna in mot respektive filterblock då tryckfallet som de orsakar är försumbart [8].
4. I norra filterblocket har ingen hänsyn tagits till att vattnet strömmar in vertikalt från ED. Flödet är precis som i resten av modellen definierat som om det strömmar in under ytan utan att orsaka turbulens.
5. Kanalen i norra filterblockets ände har formen av ett upp- och nervänt T, vilket i modellen har approximerats med en volym med rektangulärt tvärsnitt.



Figur 24 Schematisk bild för modellen över hela kanalsystemet.

Alla flöden in i modellen har definierats med hjälp av inbyggda signalmodeller från Dymolas standardbibliotek. Signalen definieras som ett massflöde och sätts som insignal till modellen på de ställen där randvillkoren är in- eller utflöden. På samma sätt sätts värden för susphalt i samma punkt för inflödena.

7. Resultat

Resultatet för modellen presenteras i följande kapitel där värden för steady state granskas och olika simuleringsfall presenteras.

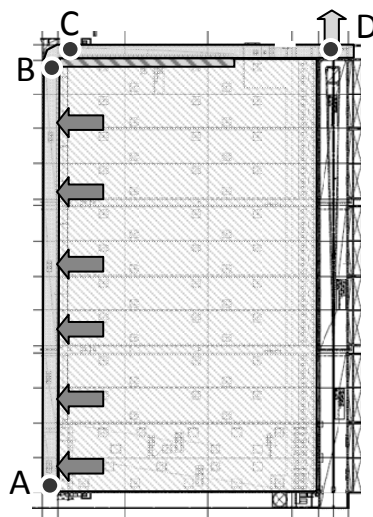
7.1 Steady state

För att undersöka hur pass väl modellen efterliknar verkligheten vid steady state har jämförelser gjorts med [8] som bygger på dimensionerande beräkningar inför konstruktionen av filteranläggningen. Resultaten har även jämförts med beräkningar från kanalerna efter ES [7] för utbyggnaden då en turbin verkade där inflödet till filterhuset i dagsläget sitter. Beräkningarna i rapporterna är gjorda för att ge en ungefärlig bild av vattennivån i hela anläggningen. Simuleringarna till steady state är därför gjorda med samma dimensionerande flöden för att se hur pass väl värdena stämmer överens.

Värden för vissa steady state tillstånd har även stämts av med Olle Ljunggren, författare av rapporterna för dimensioneringsberäkningarna. Han har bekräftat att modellen ger en korrekt bild av verkligheten och att värdena stämmer överens med värdena i rapporterna. De små avvikelser som finns avviker dock åt rätt håll, enligt Olle Ljunggren.

7.1.1 Kanalerna fram till filteranläggningen

I kanalen efter ES, punkt A till punkt B i Figur 25, ger beräkningar enligt [7], en nivåförändring på ca 0,04 m vid ett flöde på $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Modellen ger vid samma flöde en nivåförändring på ca 0,01 m. Skillnaden är här ganska stor men beror till stor del på att beräkningarna i rapporten är gjorda för flöden som strömmar ut ur hål och vertikalt faller ner i kanalen, medan flödet i modellen anträt kanalen utan turbulens. Skillnaden har godtagits då störst vikt har lagts på att få en korrekt nivåmodellering och flödesbild i filterhuset, då det är i dessa kanaler mätning sker för att styra filterluckorna.



Figur 25 Punkter för jämförelse av värden i ena kanalen efter ES.

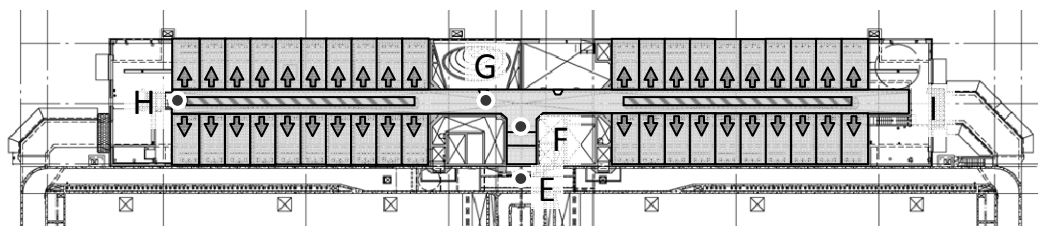
Kurvan efter ES, mellan punkt B och C i figuren, ger en nivåsenkning på ca 0,02 m enligt rapporten. Modellen ger en senkning på ca 0,01 m vilket får ses som godkänt. Värdet från rapporten är inte helt korrekt då det är framtaget med antagna vattennivåer efter kurvan för att räkna fram ett värde på

friktsionsförlusten. Detta kan förklara skillnaden mellan värdena och då samma formel använts i modellen som i rapporten antas modellens värde vara korrekt.

Från punkt C till D i figuren ger modellen en nivåsenkning på ca 0,02 m, ett värde som överensstämmer bra med rapporten.

7.1.2 Filterhuset

Vid inströmning till filterhuset (punkt E i Figur 26) sker ett tryckfall som i rapporten beräknas till ca 0,09 m för ett flöde på $10 \text{ m}^3/\text{s}$ och med kanalbredd 3,6 m. Modellen ger för samma flöde ett tryckfall på 0,08 m. Detta stämmer bra överens då bredden på inströmningskanalen i verkligheten är 4 meter vilket leder till ett lite mindre tryckfall.



Figur 26 Punkter för jämförelse av värden i filterhuset.

Mellan punkt F och G i figuren sker ytterligare en tryckförlust på liknande sätt där flödet delas upp i riktning mot norra och södra filterblocket. Vid flödet $5 \text{ m}^3/\text{s}$ i vardera riktningen blir tryckfallet ca 0,03 m både enligt modellen och enligt rapporten.

Tryckfallet mellan punkt G och H i figuren är minimalt och uppskattas i rapporten med marginal till ca 0,02 m. Modellen ger ett värde på mindre än 0,01 m vilket får antas stämma då kanalmodellerna i övrigt överensstämmer med beräknade värden ifrån rapporten.

För inströmning genom luckan in till filterkammaren beräknas nivåförändringen till 0,025 m vid ett flöde på $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$. Modellen ger för susphalten 5 mg/l ett flöde på $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ och ett tryckfall på 0,04 m. Detta stämmer bra överens vid kontrollräkning och jämförelse med rapporten.

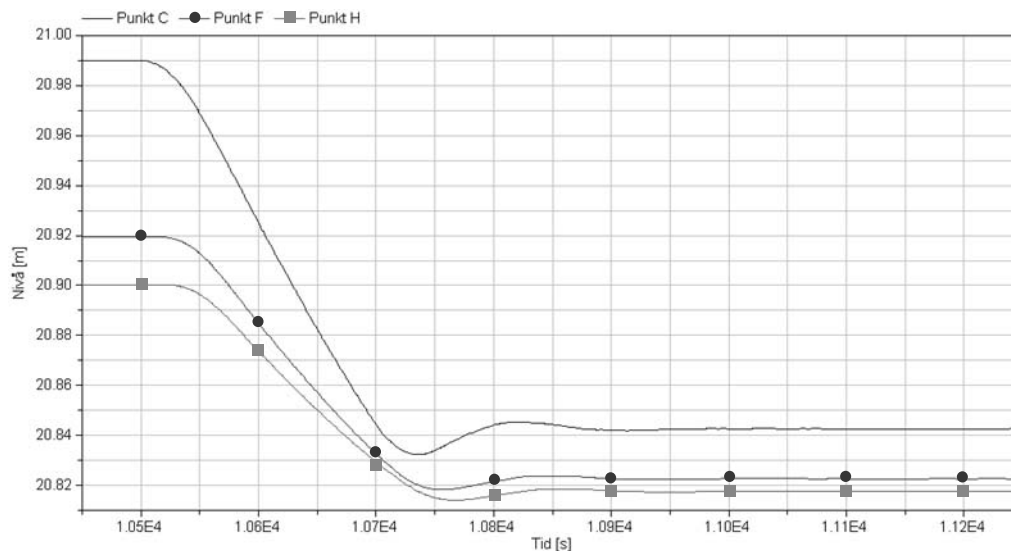
7.2 Transienter¹ och störningar

För att testa dynamiken i modellen har vissa simuleringar med flödesförändringar gjorts. Även simuleringar med förändring av susphalter har gjort för att undersöka hur nivåerna i kanalen förändras. Nämnas bör också att det inte finns några tidigare beräkningar, modeller eller driftdata för transienta förlopp för den här typen av anläggning. Anläggningen kommer således inte att kunna verifieras fullt ut förrän den är i drift.

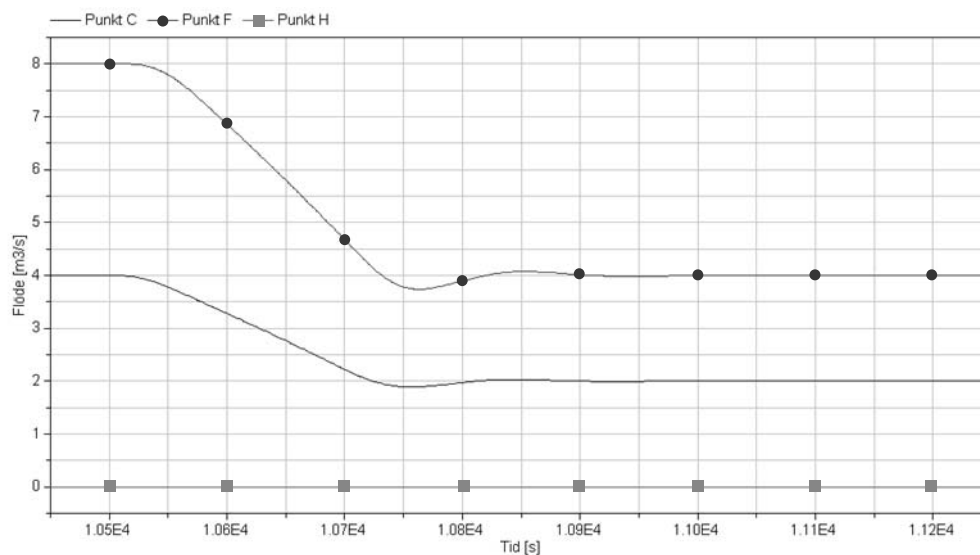
7.2.1 Flödesförändring

Flödet genom anläggningen är aldrig helt konstant. För att se hur modellen beter sig vid flödesförändringar har ett antal scenarion simulerats där vattennivåer och flöden sedan studerats. Första fallet är en flödesförändring från ES där flödet minskar från $8 \text{ m}^3/\text{s}$ till $4 \text{ m}^3/\text{s}$ och alla filter är öppna. Graferna visar flödet och vattennivån i tre olika punkter från Figur 25.

¹ Signal eller störning av kort varaktighet



Figur 27 Vattennivån som funktion av tiden i tre olika punkter.

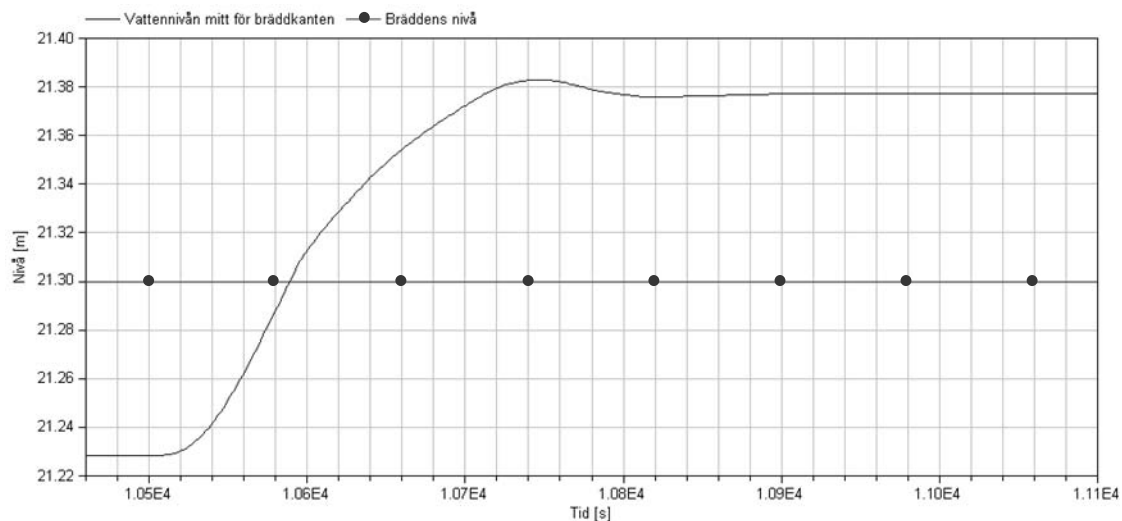


Figur 28 Flödet som funktion av tiden i tre olika punkter.

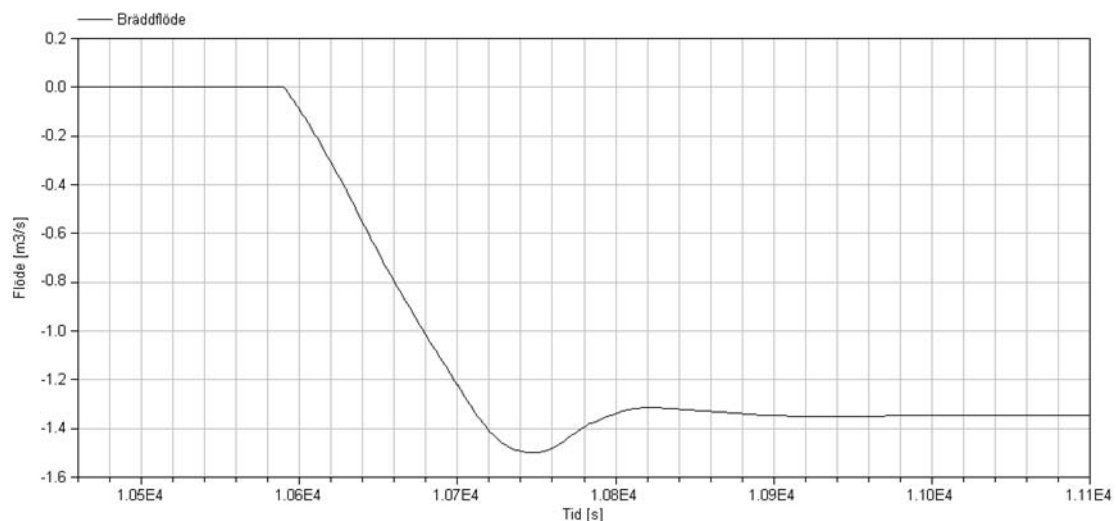
Flödet i kanalen beter sig som man kan förvänta sig för stora vattenmassor i rörelse med minimal turbulens på ytan. En viss svängning i flödet uppkommer dock vilket leder till vågrörelse på vattenytan.

7.2.2 Bräddning

Vid höga flöden skall bräddning ske för att minska trycket på filtren. Följande simulering har gjorts med ett flöde som ökar från 8 m³/s till 12 m³/s från ES, en hög susphalt på 20 mg/l och med alla filter öppna. Detta gör att genomsläppligheten genom filtren blir låg vilket tillsammans med det höga flödet gör att bräddning i kanalerna efter ES blir nödvändig. Följande diagram presenterar resultatet av simuleringen.



Figur 29 Vattennivån mitt för bräddkanten.

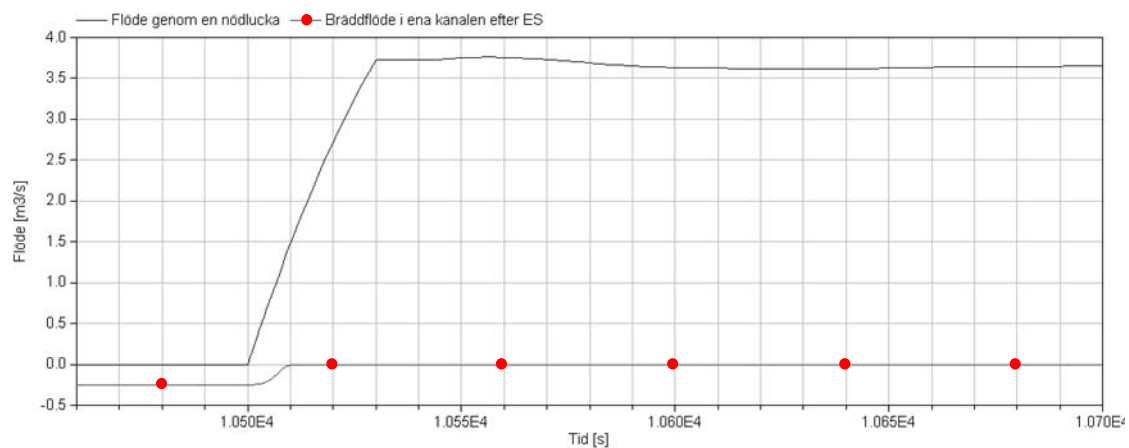


Figur 30 Bräddflödet i ena kanalen efter ES.

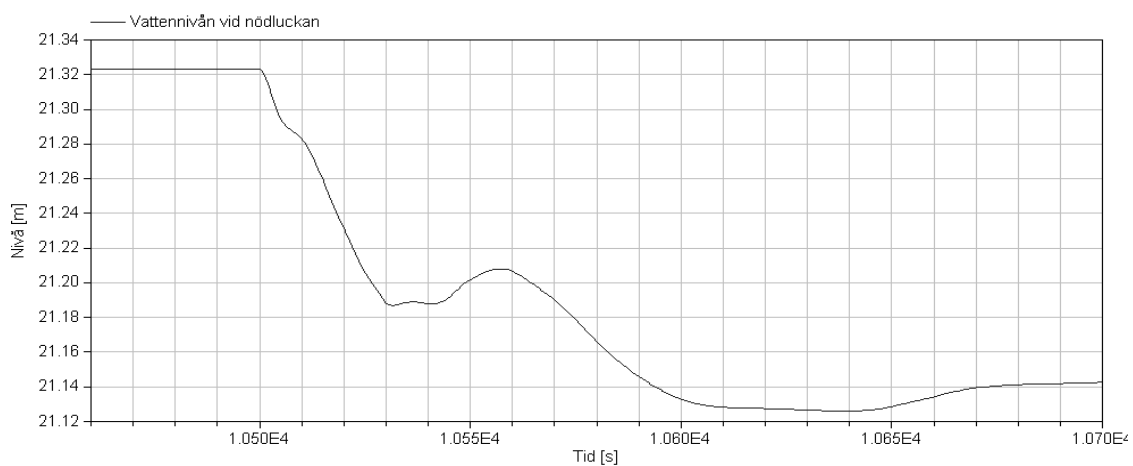
Nivån över bräddkanten stiger till 0.08 m då kapaciteten på filtren inte räcker till. Flödet över bräddkanten ökar från 0 till ca $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$ i en av kanalerna efter ES vilket stämmer överens med kontrollberäkningar för bräddflödet.

7.2.3 Öppning av nödluckor

Att öppna nödluckorna är ett annat sätt att minska trycket på filtren. Nödluckorna används enbart då bräddningen blir för stor, d.v.s. då vattennivån i filterhuset blir för hög. Följande simulering utgår från ett flöde på $12 \text{ m}^3/\text{s}$ där nödluckorna öppnas 50 % för att avleda en del av flödet.



Figur 31 Flödet genom en av nödluckorna samt bräddflödet i ena kanalerna efter ES.

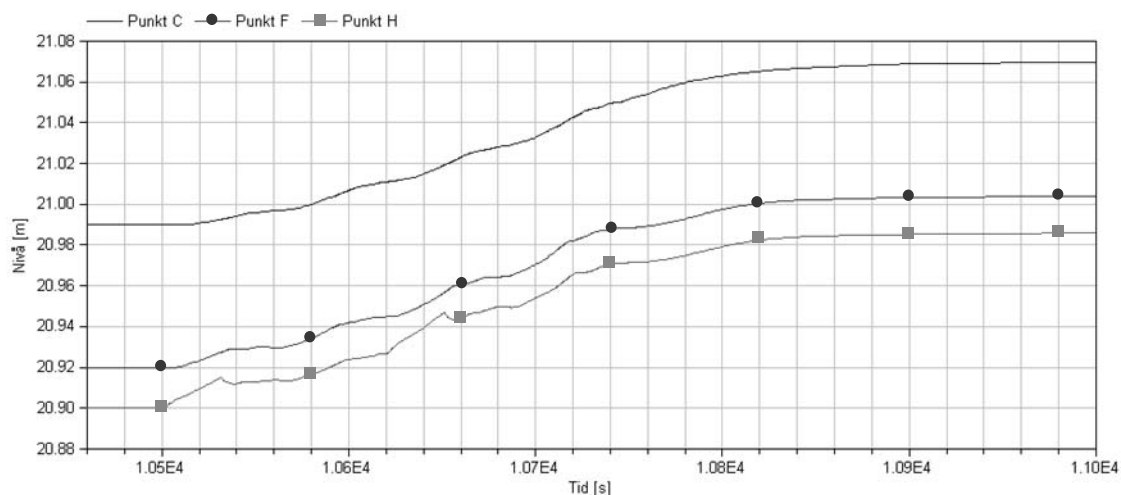


Figur 32 Vattennivån mitt för nödluckan.

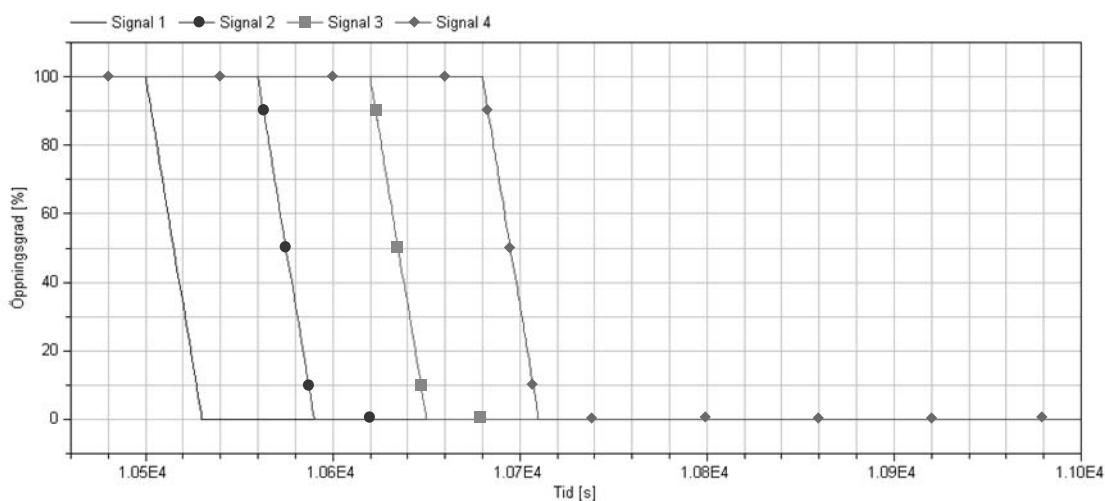
Flödet genom luckorna ökar och skapar en tillfällig återhämtning av vattennivån när stängningen upphör. Nivån fortsätter sedan att sjunka för att sakta närma sig steady state.

7.2.4 Öppning och stängning av filter

I verkligheten kommer filter öppnas och stängas automatiskt beroende på flöden, vattennivåer och susphalter i filterhuset. Stängning av filter sker även efter en viss drifttid då de regelbundet måste rengöras med syra för att inte kapaciteten skall minska p.g.a. igensättning. Följande simulering utgår från att alla filter är i drift med flödet $8 \text{ m}^3/\text{s}$ och susphalten 5 mg/l in i filterhuset. Sedan stängs sammanlagt åtta filter i grupper om två där varje grupp stängs med 60 sekunders fördröjning (inkl. 30 sekunders ramptid för stängning av luckan). Detta för att se hur vattennivån i filterhuset reagerar och hur flödet beter sig.



Figur 33 Vattennivån i punkt C, F och H vid stängning av filter.

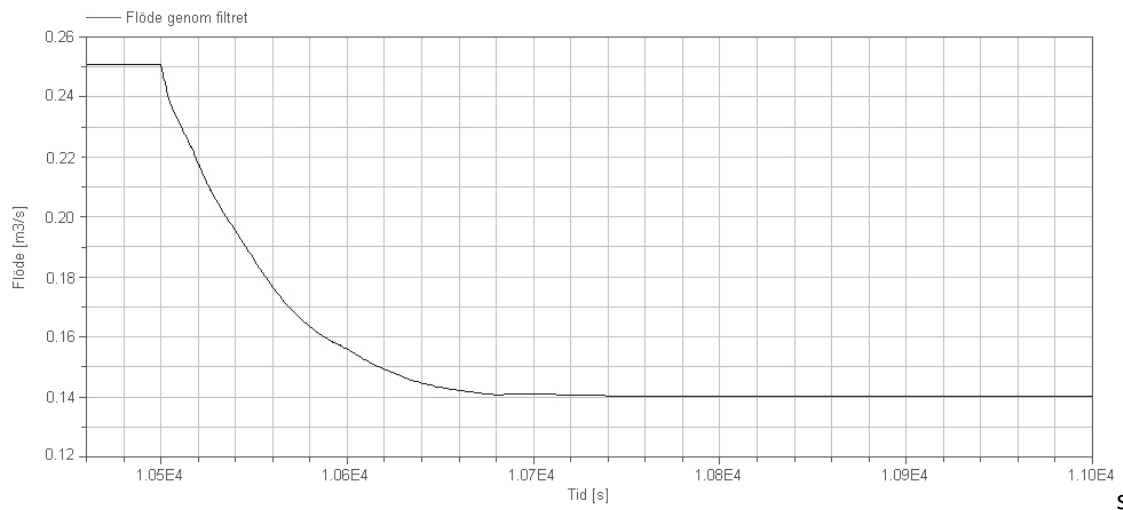


Figur 34 Luckornas lägen för de fyra filtergrupperna.

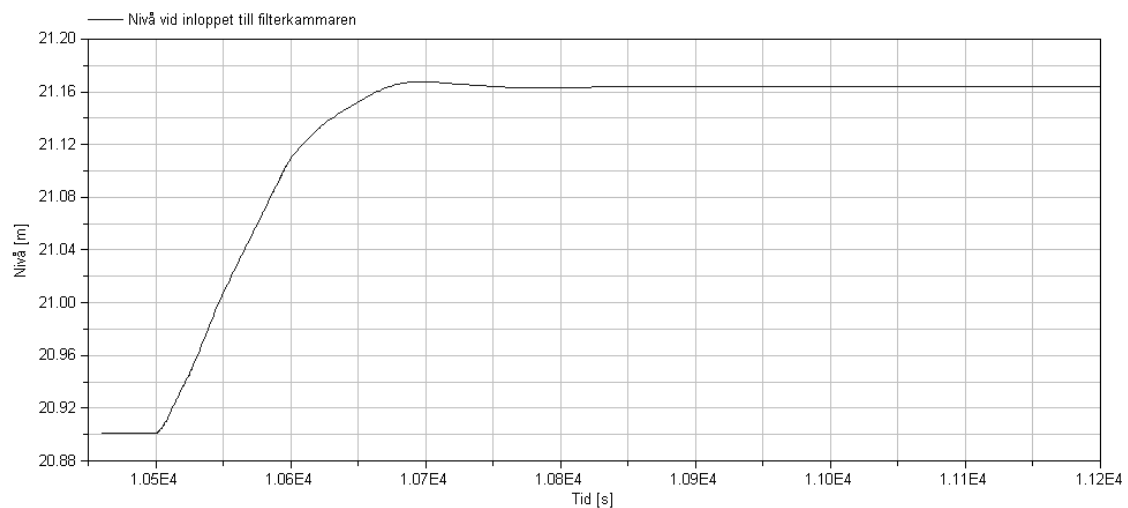
I takt med att filter stängs ökar vattennivån i hela anläggningen. Ju längre upp i kanalsystemet man kommer desto större är fördröjningen innan stängningarna märks. Stängningarna leder även till mer vågrörelse i de kanaler som ligger nära luckorna.

7.2.5 Ändring av susphalt

En simulering har även gjorts för att kontrollera hur susphaltens förändring påverkar vattennivån och genomflödet i filtren. Följande simulering har gjorts för flödet $8 \text{ m}^3/\text{s}$ där alla filter är i drift. Diagrammen nedan beskriver kurvor där susphalten ökar från 5 mg/l till 20 mg/l under en tid av 3 min.



Figur 35 Flödet genom ett filter vid höjning av susphalt från 5 till 20 mg/l.



Figur 36 Vattennivån i filterkammaren vid ökning av susphalt.

Kapaciteten på ett filter sjunker drastiskt vid höga susphalter. Flödet minskar från 0.25 till 0.14 m³/s vilket är en minskning på 45 %. Reduceringen av flödet leder till en stor höjning av vattennivån i filterhuset där nivåhöjningen i filterkammaren är nästan 0.17 m. Det visar att susphalten har en stor inverkan på systemet då flödet varierar kraftigt vid en liten ökning av susphalten.

8. Slutsats

Modellen uppvisar gott resultat vid jämförelse med värden från de dimensionerande beräkningarna för anläggningen. Även om dynamiken, som modellen återspeglar, är svår att validera ger ändå resultatet av de transienta simuleringarna en bild som överensstämmer med verkligheten. Slutsatsen efter tester med styrsystemet är att modellen uppfyller syftet att agera testbänk för intrimning och justering av styrningen för anläggningen.

Testerna på plats hos Gryaab har varit lyckosamma och påvisat brister i styrningen men även validerat att delar av styrningen fungerar så som det är tänkt. Modellen har använts av personalen utan svårigheter. Tydligt var att öppningen av filter var tvunget att ske i rask takt vid förändring av susphalt, något som missbedömts. En sådan missbedömning hade kunnat skapa stora problem om styrsystemet testats på den riktiga anläggningen, men med modellens hjälp kan nu styrningen trimmas ytterligare innan det är dags att släppa på flödet i den nya filterbyggnaden.

Dock kan man ifrågasätta hur pass bra modellen beskriver dynamiken i kanalflödet p.g.a. förenklingarna som är gjorda i rörelsemängdsekvationen. I detta fall finns också en begränsning i att Dymola inte har stöd för att beräkna partiella derivator. Många ekvationer består av både tids- och rumsderivata, så man hade förmodligen erhållit ett bättre resultat om man använt en programvara med stöd för beräkning av partiella derivator.

Mycket av problematiken i att efterlikna verkligheten ligger också i prestandan på datorn där modellen körs. Styrsystemet körs i realtid och för att efterlikna verkligheten måste även modellen klara av alla beräkningar i realtid. Det har visat sig spela ganska stor roll i presentanda mellan en äldre och en ny dator. För att råda bot på prestandaproblemet kan man minska antalet delvolymmer i kanalsegmenten, vilket å andra sidan ger en sämre bild av ytans dynamik. Var man skall dra gränsen för hur små delvolymmer man skall använda är något som bör utredas ytterligare. I modellen över kanalsystemet fick antalet delvolymmer minskas för att klara beräkningarna i realtid. Då fokus låg på att modellera filterhuset minskades delvolymerna i första hand i kanalerna efter ES.

Det har inte funnits några lätta sätt att validera modellen förutom att testa delmodellerna var för sig och kontrollera att de ger ett verklighetsnära resultat eller att jämföra med stationära beräkningar. Det dynamiska samspelet mellan delmodellerna i huvudmodellen däremot kommer först kunna valideras mot den färdiga anläggningen när den är i drift. Svaret på hur mycket förenklingarna som är gjorda i ekvationer och modeller påverkar resultatet och hur mycket modellen skiljer sig från verkligheten är därför svårt att redogöra för i denna rapport.

Beräkningarna för susphalten i filterhuset som i modellen förenklats för att minska på komplexiteten, visade sig i efterhand ha en ganska stor inverkan på flödet. Flödet genom filtren påverkas i mycket större grad av susphalten än av tryckskillnaden över filtret. Vid ett fortsatt arbete med modellen bör därför mer detaljerade beräkningar av susphaltens spridning i norra filterblocket implementeras för att få en verkligare bild över flödet genom filtrena.

Sammanfattningsvis presterar modellen överlag mycket bra för att agera verklighet för testning av styrsystemet. Gott resultat har uppnåtts ute hos Gryaab där vissa ändringar i det tilltänkta styrsystemet fått göras efter tester med modell och styrsystem. Arbetet har för ÅF:s del även resulterat i ett modellbibliotek för kanalströmning som kan återanvändas och utökas för framtida projekt och ligga till grund för åtaganden inom kanalströmning och modellering.

Källförteckning

- [1]. Gryaab AB. *Hydraulisk modell av ett skivfilter*. Göteborg. 2009-04
- [2]. Rydberg, Lars. *Fosforrening vid Ryaverket*. Institutionen för Geovetenskaper, oceanografi. Göteborgs Universitet. 2005.
- [3]. Fritzson, Peter. *Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 2.1*. New York; Wiley Interscience. 2004.
- [4]. ÅF AB [URL]. Göteborg [hämtat: 2009-07-10]. Tillgänglig: <http://www.afconsult.com>.
- [5]. Mattsson, Ann. *Skivfilteranläggning på Ryaverket*. Gryaab rapport 2005:4. 2005.
- [6]. Cegrell, Torsten och Sandberg, Ulf. *Industriella Styrsystem*. Borås; SIFU. 1994.
- [7]. Ljunggren, Olle. *Ryaverket – utbyggnad för kväverening. Hydrauliska beräkningar 1994*. Göteborg; Göteborgs vatten- och avloppsverk. 1995-09.
- [8]. Ljunggren, Olle. *Gryaab – Ryaverket. NP 2004 – Förbättra kväve- och fosforreduktion. Hydrauliska beräkningar*. Göteborg; Göteborgs vatten- och avloppsverk. 2007-10.
- [9]. Ljung, Lennart och Glad, Torkel. *Modellbygge och simulering*. Lund: Studentlitteratur. 2004.
- [10]. Dynasim AB [URL]. Lund [hämtat: 2009-06-10]. Tillgänglig: <http://www.dynasim.com>.
- [11]. Tiller, Michael M. *Introduction to Physical Modeling with Modelica*. Boston : Kluwer Academic Publishers. 2001.
- [12]. Brenan, K.E., Campbell, S.L. och Petzold, L.R. *Numerical Solution of Initial-Value Problems in Differential-Algebraic Equations*. New York: Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1989.
- [13]. Ascher, M. Uri och Petzold, R. Linda. *Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. 1998.
- [14]. Häggström, Steffen. *Hydraulik för V-teknologer*. Göteborg; Chalmers tekniska högskola. 2006.
- [15]. Crossley, Amanda Jane. *Accurate and efficient numerical solutions for the Saint Venant equations of open channel flow*. University of Nottingham. 1999-10.
- [16]. Gryaab AB [URL]. Göteborg [hämtat: 2009-03-04]. Tillgänglig: <http://www.gryaab.se>.