



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 17 016

Examensarbete 30 hp
Augusti 2017

Systemteknisk studie av pumpstyrning på Henriksdals nya reningsverk

Patrik Blomstrand
Rasmus Jemander

REFERAT

Systemteknisk studie av pumpstyrning på Henriksdals nya reningsverk

Patrik Blomstrand och Rasmus Jemander

Stockholms befolkning växer och med den även mängden avloppsvatten som behöver renas. För att kunna klara av kapacitetsökningen och samtidigt även möta de förväntade strängare reningskraven i framtiden byggs Henriksdals reningsverk ut med ny membranteknik emedan reningsverket i Bromma ska läggas ned. Det avloppsvatten som idag renas i Bromma reningsverk ska ledas i en 14 km lång tunnel belägen 30–90 m under marken till Henriksdal via en pumpstation i Sickla. I och med detta skapas möjligheten till magasinering av avloppsvatten i tunneln vid kraftiga regn så att bräddning kan undvikas. Även utjämning av dygnsvariationer blir möjlig vilket kan vara bra för de nya membranerna som ska ersätta de nuvarande eftersedimenteringsbassängerna. Utjämning kan även minska behovet av förbigång av biosteget i Henriksdals nya reningsverk vilket leder mindre utsläpp av näringsämnen och föroreningar till Östersjön.

För att utreda Brommatunnelns potential till utjämning gjordes modeller över tunneln, pumpstationer och bassänger i Sickla och Henriksdals nya reningsverk i programmeringsspråket C. Modellerna förenklades på olika sätt för att beräkningstiden skulle hållas nere. Dessa modeller kopplades sedan ihop till en större modell i Simulink där även regulatorer till pumpstationerna skapades så att vattenflödet genom reningsverket kunde simuleras. För att kunna simulera tänkbara flöden för 2040 skalades uppmätta flöden från det regniga året 2012 upp till att gälla för den förväntade befolkningens mängd 2040.

Utifrån simuleringar av torrt väder kunde det konstateras att det finns goda möjligheter till utjämning av dygnsvariationer med hjälp av smart styrning av pumpstationerna. Simulering av en typisk skyfallstopp visade att även dessa går att utjämna. Vid simulering av snösmältning eller långvariga regn visade det sig att bräddning går att undvika helt om den dämnda nivån i Brommatunneln tillåts överstiga 10 m. Med en strikt nivågräns på 10 m var det emellertid möjligt att dämna det initiala flödet, som innehåller mycket näringsämnen och föroreningar, men det registrerades en liten ökning av bräddningen och förbigången av biosteget.

Utjämning av flödet gör det lättare att hålla jämna nivåer i returslamlamtankarna vilket gör det möjligt att hålla nivåerna högre vilket i sin tur leder till minskad energianvändning. Vid en eventuell vidareutveckling av modellen finns möjligheten att lägga till uträkning av energianvändningen för varje simulering vilket skulle underlätta vidare optimering av regulatorer och regulatorparametrar.

Nyckelord: Modellering, Pumpar, Reglerteknik, Reningsverk, Avloppsrening, Flödesutjämning, Henriksdal, Stockholm Vatten och Avfall, Pumpstyrning, Membranfiltrering

Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet Box 337, SE-751 05 Uppsala, ISSN 1401-5765

ABSTRACT

Modeling and control of pumps in a WWTP with flow equalization – A system-specific study of pump control at Henriksdal's new WWTP

Patrik Blomstrand and Rasmus Jemander

The population of Stockholm is increasing and with it the amount of wastewater that needs treatment. To cope with the increase, Henriksdal wastewater treatment plant (WWTP) in Stockholm, Sweden, is currently being expanded into the worlds largest WWTP using membrane bioreactor (MBR) technology. The plant will be controlled to a greater extent by pumps and good control is therefore vital to maintain operational stability and an energy efficient process. To analyse the intricate system of pumps and equalisation in tunnels a dynamic model is required.

One reason for expanding Henriksdal WWTP is the decommissioning of Bromma WWTP. Wastewater from Bromma will be diverted to Henriksdal through a large tunnel which can be used for flow equalization. To examine whether flow equalization in the tunnel can even out diurnal variations and extreme rain events, water flow in the tunnel and throughout the WWTP was modelled. Models of the tunnel, pumps and basins were made in the programming language C and then merged with different controllers in Matlab/Simulink. To simulate different scenarios for the year 2040, data for the rainy year of 2012 was increased to match the expected population for 2040.

Based on simulations for a scenario with dry weather the possibility for flow equalization could be shown. It required a thought-out control strategy for the control of Bromma pumping station based on flow measurements from several other inflows to the WWTP. The control strategy also proved adequate in handling downpours by increasing the amount of waste water subjected to biological treatment. When simulating snow melt or heavy rain, damming in the Bromma tunnel could help to prevent overflow if no strict boundaries were used for the water level in the tunnel. With a maximum allowed water level of 10 m it was, however, possible to dam the first flush containing high concentrations of pollutants and nutrients.

Flow equalization makes it easier to maintain even levels in the basins for the return activated sludge (RAS), which in turn makes it easier to maintain high levels in said basins. Higher levels in the RAS-basins leads to reduced energy consumption. In the event of further development of the model, it is possible to add calculations of energy usage for the pumps, which would facilitate further optimization of controllers and their parameters.

Keywords: Modelling, Pumps, Automatic control, Wastewater treatment plant, flow equalization, Henriksdal, Stockholm Vatten och Avfall, Membrane bioreactor

Department of Information Technology, Uppsala University Box 337, SE-751 05 Uppsala, ISSN 1401-5765

FÖRORD

Detta är ett examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet utfördes på uppdrag av Stockholm Vatten och Avfall AB där våra handledare var Erik Lindblom och Jonas Grundestam. Ämnesgranskare var Bengt Carlsson vid institutionen för informationsteknologi och examinator var Anna Sjöblom vid institutionen för geovetenskap, båda vid Uppsala universitet.

Vi vill rikta ett stort tack till Alf Händevik för hjälp med simuleringar i MIKE URBAN och Ramesh Saagi och Ulf Jeppson för att vi fick tillgång till deras modeller.

Vi vill också tacka Bengt Carlsson som bidragit med tips och idéer samt kommit med bra synpunkter på rapporten.

Vi vill framförallt tacka Erik Lindblom och Jonas Grundestam som gett oss mycket av sin tid och kommit med många hjälpsamma förslag och synpunkter under hela projektet.

Slutligen vill vi tacka våra respektive sambos Frida Rombo och Olivia Sporre samt våra familjer och vänner för deras stöd och tålamod.

Patrik Blomstrand och Rasmus Jemander

Uppsala, juni 2017

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

En av samhällets viktiga, men ofta glömda, funktioner är rening av avloppsvatten. Utan denna funktion skulle avloppsvattnet, som innehåller mycket kväve, fosfor och föroreningar, bidra till övergödning, algblomningar och spridande av sjukdomar. I detta arbete kunde vi visa att man med hjälp av utjämning i den framtida Brommatunneln kan minska utsläppen från Henriksdals nya reningsverk och samtidigt spara energi. För att kunna förklara hur detta gick till måste vi börja från början.

Majoriteten av Sveriges befolkning är anslutna till ett kommunalt reningsverk. Dessa renar vattnet genom en kombination av mekanisk rening, som galler och filter, kemisk rening genom tillsatser av kemikalier och biologisk rening. Den biologiska reningen utnyttjar mikroorganismer som bakterier för att omvandla kvävet i vattnet till den harmlösa gasen kvävgas samt för att bryta ned organiskt material.

Sveriges största reningsverk ligger i Henriksdal i Stockholm och det renar avloppsvatten för cirka 780 000 människor. Trots detta räcker kapaciteten snart inte till då invånarna i Stockholm blir fler och fler. Då Henriksdals reningsverk till största del ligger insprängt i ett berg, kan det inte byggas ut mer till ytan. Istället har en annan lösning valts som går ut på att avloppsvattnet filtreras genom så kallade membranfilter. Membranfilter kan se olika ut men det som kommer användas i Henriksdal kan liknas vid ihåliga spagettin där vattnet sugas in genom små porer. Porerne är så små att endast det rena vattnet kan ta sig igenom och på så vis hålls smutsen på utsidan. Den nya tekniken är så effektiv att den kommer kunna rena mer än dubbelt så mycket som idag och dessutom blir vattnet ännu renare.

I samband med utbyggnaden av Henriksdals reningsverk ska det omoderna reningsverket i Bromma läggas ned. Avloppsvattnet som idag renas i Bromma reningsverk ska i framtiden ledas genom en 14 km lång tunnel 30–90 m under marken från Bromma till Henriksdals nya reningsverk och kallas Brommatunneln. Tunneln kommer att vara så pass stor att lagring av avloppsvatten blir möjlig. Vid perioder med kraftiga regn och snösmältning finns en risk att en del av avloppsvattnet inte renas alls eller bara delvis och lagring i tunneln kan jämna ut flödet så att andelen orenat vatten minskas. Utöver detta kan tunneln även användas till att jämna ut flödets dygnsvariationer och därmed underlätta reningen.

Från Brommatunneln måste avloppsvattnet pumpas upp till marknivå, ett lyft på över 50 m. Pumparna som utför detta måste på något sätt styras. För att kunna styra pumparna på ett bra sätt används regulatorer. Ett exempel på en vanlig regulator är en farthållare i en bil. Föraren bestämmer vilken hastighet bilen ska ha och farthållaren justerar motorns varvtal så att den hastigheten uppnås. På samma sätt justerar pumparnas regulatorer vilket varvtal pumparna ska hålla för att uppnå ett visst flöde. Valet av flöde görs antingen av en operatör eller ytterligare en regulator som utifrån information om till exempel vattennivå väljer ut det flöde som ska gälla. Utöver dessa pumpar finns många andra pumpar med liknande regulatorer inne i reningsverket.

Eftersom Henriksdals nya reningsverk inte är färdigbyggt än behövdes modeller över flödet genom reningsverket skapas. Detta gjordes så att simuleringar över olika styrsätt av pumparna kunde testas. Modellerna utgörs av ekvationer som beskriver hur flöden och pumpar fungerar. Modellerna skrevs i programmeringsspråket C och sammanfogades senare i programmet Matlab/Simulink.

Med hjälp av de framtagna modellerna simulerades flera olika styrsätt av pumparna för olika typer av flöden, såsom torrt väder, regnskurar och snösmältning. Simuleringarna visade att dygnsvariationer och regnskurar lätt kan utjämnas genom dämning i Brommatunneln. Vidare visade simuleringarna att de höga flöden som blir vid snösmältning eller långvariga regn inte går att utjämna helt. Däremot går det att hantera dessa fall på ett sådant sätt att reningen förbättras.

ARBETSFÖRDELNING - RAPPORT

Avsnitt	Patrik	Rasmus
Referat		X
Abstract	X	X
Förord	X	X
Populärvetenskaplig sammanfattning	X	X
1. INLEDNING		
1.1. INTRODUKTION		X
1.2. MÅL OCH SYFTE	X	X
2. BAKGRUND		
2.1. KOMMUNAL RENING AV AVLOPPSVATTEN		
2.1.1. Grovrening		X
2.1.2. Försedimentering		X
2.1.3. Biologisk rening		X
2.1.4. Eftersedimentering och membranfiltrering		X
2.2. SYSTEMBESKRIVNING AV HENRIKSDALS RENINGSVERK ÅR 2040		
2.2.1. Inlopp	X	
2.2.2. Grovrening och försedimentering	X	
2.2.3. Biologisk rening	X	
2.2.4. Membranfiltrering	X	
2.2.5. Recirkulation	X	
2.3. MODELLERING AV BASSÄNG MED SKIBORD	X	
2.4. FLÖDE I ÖPPEN KANAL		X
2.5. PUMPTEORI		
2.5.1. Pumphuvudgrupper	X	
2.5.2. Pumpkurvor, systemkurvor och affinitetslagarna	X	
2.6. FLÖDESUTJÄMNING I RENINGSVERK	X	
2.7. REGLERTEKNIK		
2.7.1. Grundläggande regler teknik		X
2.7.2. Lambdametoden	X	
2.7.3. Kaskadreglering	X	
2.7.4. Parameterstyrning	X	
2.7.5. Integratoruppvidning		X
3. DATAMATERIAL OCH METODER		X
3.1. FLÖDESDATA	X	
3.2. MODELLERING		
3.2.1. Modell över bassäng med skibord		X
3.2.2. Modellering av en pumpstation	X	
3.2.3. Modell över Brommatunneln		X
3.2.4. Modell över Bromma pumpstation		X
3.2.5. Modell över inloppspumparna till biosteget	X	
3.2.6. Modell över returslampumparna	X	
3.2.7. Modell över permeatpumparna	X	
3.3. REGLERING		
3.3.1. Generell reglerstrategi		X
3.3.2. Styrning av Bromma pumpstation		X
3.3.3. Styrning av inloppspumparna till biosteget	X	

3.3.4. Styrning av permeat- och returslampumparna	X	
3.4. UTJÄMNING I BROMMATUNNELN OCH DRIFTSFALL FÖR BROMMA PUMPSTATION		
3.4.1. Dygnsutjämning	X	
3.4.2. Tillfälligt förhöjt flöde	X	
3.4.3. Långvarigt förhöjt flöde		X
4. RESULTAT		
4.1. DYGNSUTJÄMNING		
4.1.1. Ingen utjämning i Brommatunneln	X	X
4.1.2. Flödesutjämning i Brommatunneln och nivåreglering av inloppspumparna till biosteget	X	X
4.1.3. Flödesutjämning i Brommatunneln och fast flöde till biosteget	X	X
4.2. TILLFÄLLIGT FÖRHÖJT FLÖDE		
4.2.1. Ingen utjämning i Brommatunneln	X	X
4.2.2. Flödesutjämning i Brommatunneln	X	X
4.3. LÅNGVARIGT FÖRHÖJDA FLÖDEN		
4.3.1. Ingen utjämning i Brommatunneln	X	X
4.3.2. Dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning	X	X
4.3.3. Dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning	X	X
5. DISKUSSION		
5.1. MODELLERING		
5.1.1. Tunnelmodell	X	X
5.1.2. Pumpmodell	X	X
5.1.3. Bassäng med skibord	X	X
5.2. SIMULERINGAR		
5.2.1. Dygnsutjämning	X	X
5.2.2. Tillfälligt förhöjt flöde	X	X
5.2.3. Långvarigt förhöjt flöde	X	X
6. SLUTSATSER	X	X

ARBETSFÖRDELNING – PRAKTISKA MOMENT

Moment	Patrik	Rasmus
Modellering av Brommatunneln		X
Modellering av generell pumpstation	X	
Modellering av Bromma pumpstation		X
Modellering av pumpstation för inloppspumpar till biosteget	X	
Modellering av permeatpumpstation	X	
Modellering av RAS-pumpstation	X	
Nivå- och flödesregering för Bromma pumpstation		X
Nivå- och flödesregering för inloppspumparna till biosteget	X	
Nivå- och flödesreglering av permeatpumpstation och RAS-pumpstation	X	X
Modellering av bassäng med skibord	X	X
Reglering med olika överordnade regulatorer för Bromma pumpstation	X	X
Sammankoppling av alla delmodeller	X	X
Simuleringar med sammansatt modell	X	X

ORDLISTA

Biosteg - Det reningssteg som med mikroorganismers hjälp renar kväve och kol

Bräddning - Tillfälligt utsläpp av orenat avloppsvatten

Börvärde - Det önskade värde som en regulator försöker hålla

Eftersedimentering - Reningssteg efter biosteget där partiklar och slam sjunker till botten (sedimenterar)

Försedimentering - Reningssteg innan biosteget där partiklar sjunker till botten (sedimenterar)

Linje - Reningsstegen är uppdelade i parallella linjer där en linje består av ett biosteg, membranbassänger och ett returslamflöde

Lågpassfilter - Ett frekvensfilter som filtrerar bort högfrekventa signaler och skickar vidare lågfrekventa signaler

Permeat - Det reade vatten som pumpas genom membranfilter

Personekvivalent (pe) - En genomsnittlig person, i samband med vattenanvändning brukar det anses att en pe gör av med ca 150 l/dygn

Pumpkurva - Kurva som beskriver sambandet mellan tryck och flöde för en pump

Returslam (RAS) - Det slam som återcirkuleras i biosteget

Skibord - Fast öppning i en bassäng där vattnet kan rinna över

Systemkurva - Kurva som beskriver systemet där en pump ska installeras. Beskriver statisk lyfthöjd och friktionsförluster i systemet

TB1 - De tunnlar som vattnet pumpas från in till biosteget

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	1
1.1. INTRODUKTION	1
1.2. MÅL OCH SYFTE	1
2. BAKGRUND	2
2.1. KOMMUNAL RENING AV AVLOPPSVATTEN	2
2.1.1. Grovrening	2
2.1.2. Försedimentering	2
2.1.3. Biologisk rening	2
2.1.4. Eftersedimentering och membranfiltrering	2
2.2. SYSTEMBESKRIVNING AV HENRIKSDALS RENINGSVERK ÅR 2040	3
2.2.1. Inlopp	3
2.2.2. Grovrening och försedimentering	4
2.2.3. Biologisk rening	4
2.2.4. Membranfiltrering	5
2.2.5. Recirkulation	5
2.3. MODELLERING AV BASSÄNG MED SKIBORD	5
2.4. FLÖDE I ÖPPEN KANAL	6
2.5. PUMPTEORI	7
2.5.1. Pumphuvudgrupper	7
2.5.2. Pumpkurvor, systemkurvor och affinitetslagarna	7
2.6. FLÖDESUTJÄMNING I RENINGSVERK	9
2.7. REGLERTEKNIK	9
2.7.1. Grundläggande reglerteknik	9
2.7.2. Lambdametoden	10
2.7.3. Kaskadreglering	12
2.7.4. Parameterstyrning	13
2.7.5. Integratoruppvridning	13
3. DATAMATERIAL OCH METODER	14
3.1. FLÖDESDATA	15
3.2. MODELLERING	16
3.2.1. Modell över bassäng med skibord	16
3.2.2. Modellering av en pumpstation	17
3.2.3. Modell över Brommatunneln	20

3.2.4. Modell över Bromma pumpstation	22
3.2.5. Modell över inloppspumparna till biosteget	23
3.2.6. Modell över returslampumparna	25
3.2.7. Modell över permeatpumparna	28
3.3. REGLERING.....	29
3.3.1. Generell reglerstrategi.....	29
3.3.2. Styrning av Bromma pumpstation	30
3.3.3. Styrning av inloppspumparna till biosteget	31
3.3.4. Styrning av permeat- och returslampumparna	33
3.4. UTJÄMNING I BROMMATUNNELN OCH DRIFTFALL FÖR BROMMA PUMPSTATION	35
3.4.1. Dygnsutjämning	36
3.4.2. Tillfälligt förhöjt flöde	38
3.4.3. Långvarigt förhöjda flöden	39
4. RESULTAT	42
4.1. DYGNSUTJÄMNING	42
4.1.1. Ingen utjämning i Brommatunneln	42
4.1.2. Flödesutjämning i Brommatunneln och nivåreglering av inloppspumparna till biosteget	44
4.1.3. Flödesutjämning i Brommatunneln och fast flöde till biosteget	45
4.2. TILLFÄLLIGT FÖRHÖJT FLÖDE	47
4.2.1. Ingen utjämning i Brommatunneln	47
4.2.2. Flödesutjämning i Brommatunneln.....	48
4.3. LÅNGVARIGT FÖRHÖJDA FLÖDEN	50
4.3.1. Ingen utjämning i Brommatunneln	50
4.3.2. Dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning	52
4.3.3. Dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning	54
5. DISKUSSION	56
5.1. MODELLERING	56
5.1.1. Tunnelmodell	56
5.1.2. Pumpmodell	57
5.1.3. Bassäng med skibord	57
5.2. REGLERING.....	57
5.2.1. Generell reglerstrategi.....	57

5.2.2. Dygnsutjämning och utjämning av tillfälligt förhöjt flöde	58
5.2.3. Utjämning av långvarigt förhöjda flöden.....	58
5.3. SIMULERINGAR	58
5.3.1. Dygnsutjämning	58
5.3.2. Tillälligt förhöjt flöde	59
5.3.3. Långvarigt förhöjt flöde	60
6. SLUTSATSER	62
REFERENSER.....	63
BILAGA A	65
BILAGA B	67

1. INLEDNING

1.1. INTRODUKTION

Stockholm är en av de snabbast växande städerna i Europa och befolkningen förväntas öka med 17% från 2014 till 2024 (Stockholm läns landsting, 2015). Befolkningsökningen ställer stora krav på avloppsreningen då reningsverken behöver rena avloppsvatten från ytterligare ca 100 människor, vilket motsvarar två busslaster, varje dag (Stockholm läns landsting, 2015). I dagsläget finns det två reningsverk i Stockholms kommun, Henriksdals reningsverk och Bromma reningsverk. Eftersom Bromma reningsverk behöver byggas ut, samtidigt som det ligger i ett tätbebyggt område har det beslutats att det ska läggas ned och dess avloppsvatten ledas om till Henriksdals reningsverk för rening. En ny tunnel (Brommatunneln) på 14 km ska sprängas 30–90 m under marken och under Mälaren mellan Bromma och Henriksdal via Sickla där avloppsvattnet ska genomgå en grovrening. Denna stora tillökning av avloppsvatten till Henriksdal gör att Henriksdals reningsverk behöver byggas ut. Det råder dock platsbrist i Henriksdal då större delen av verket är insprängt i berg vilket medför att kapacitetsökningen behöver uppnås på ett sätt som inte kräver större yta. Nya membranfilter ska därför installeras i Henriksdals reningsverk som därmed blir världens största anläggning för vattenrening med membranteknik (Stockholm Vatten och Avfall, 2015a). Membranen kan både rena mer vatten på liten yta och rena bättre. Förväntade skärpta reningskrav av kväve och fosfor till följd av Sveriges åtaganden enligt Baltic Sea Action plan (Naturvårdsverket 2008) och EU:s ramdirektiv för vatten kommer kunna tillgodoses i och med de nya membranen. Även rening av läkemedelsrester, mikroplaster och bättre rening av virus och bakterier kommer bli möjlig med membrantekniken (Stockholm Vatten och Avfall, 2015a). Brommatunneln möjliggör utjämning av flödesvariationer över dygnet vilket är bra för membranen. Även utjämning av flödesevent som regn och snösmältning kan komma att utjämnas i tunneln så att bräddning (tillfälligt utsläpp av orenat avloppsvatten) kan minskas eller undvikas.

De nya, högre flödena samt de nya membranen ska drivas med flertalet nya pumpar. Dessa pumpar behöver styras effektivt, stabilt och energieffektivt. För att kunna simulera pumpstyrning av hela systemet som reningsverket utgör behövs modeller av Brommatunneln, bassänger och pumpar. Med dessa modeller tillgängliga kan regulatorer anpassas för att klara av styrningen av pumparna med vald prestanda.

1.2. MÅL OCH SYFTE

Syftet med arbetet var att undersöka i vilken utsträckning flödesutjämning i Brommatunneln kan minska energianvändningen, minimera bräddning och förbiledning av biosteget samt öka systemets robusthet. Målet var att ta fram en dynamisk flödesmodell över Henriksdals nya reningsverk med vilken olika fall av flödesutjämning och pumpstyrning kunde undersökas. För att kunna uppnå målet sattes följande delmål upp:

- Ta fram modeller över de olika pumpstationerna
- Ta fram en modell över Brommatunneln
- Ta fram en reglerstrategi för respektive pumpstation

- Koppla samman modellerna till en övergripande modell över Henriksdals nya reningsverk

2. BAKGRUND

2.1. KOMMUNAL RENING AV AVLOPPSVATTEN

2.1.1. Grovrening

Det första steget som det orenade avloppsvattnet genomgår kallas grovrening. Grovreningen börjar med rensgaller som avskiljer större skräp som toalettpapper och plastpåsar från vattnet. Därefter leds vattnet vidare till sandfångsbassänger där grus, sand och kaffesump avskiljs genom sedimentation. Detta görs främst för att pumpar i efterföljande reningssteg inte ska sättas igen. Den avsatta sanden tvättas och återanvänds (Svenskt Vatten AB, 2013).

2.1.2. Försedimentering

Efter grovreningen leds avloppsvattnet vidare till försedimenteringsbassänger där en fällningskemikalie (t ex järnsulfat) tillsätts så att en del av fosfor faller ut och bildar flockar för att sedan sjunka till botten. Flockarna som sedimenterat bildar slam som kan användas för tillverkning av biogas (Stockholm Vatten och Avfall, 2017).

2.1.3. Biologisk rening

Nästa steg i reningsprocessen brukar kallas biosteget. Här utnyttjas mikroorganismer som bakterier och arkéer för att omvandla ammonium till nitrat och vidare till kvävgas. En del av biosteget består av oluftade bassänger. Här omvandlas nitrat, via nitrit och lustgas, till kvävgas, vilket kallas denitrifikation. De denitrifierande bakterierna är heterotrofa, dvs de bygger upp ny biomassa med organiskt kol som kolkälla. För att denitrifikationen ska fungera krävs det att miljön i bassängerna är anoxisk, då bakterierna annars skulle använda sig av syre istället för nitrat för att tillförskaffa sig energi. En annan del av biosteget består av luftade bassänger där autotrofa bakterier omvandlar ammonium till nitrat via nitrit. Om den första delen av biosteget består av oluftade zoner kallas det fördenitrifikation och om den första delen består av luftade zoner kallas det efterdenitrifikation. En stor del av bakteriernas energi går åt till att bygga upp celler med kol från koldioxid. Detta gör att nitrifierarna tillväxer långsammare än bakterier som använder organiskt kol för uppbyggnad av celler (Carlsson och Hallin, 2010).

2.1.4. Eftersedimentering och membranfiltrering

Efter biosteget leds vattnet vanligtvis vidare till eftersedimenteringsbassänger där slammet får sjunka till botten för att pumpas tillbaka till början av biosteget eller pumpas bort för slambehandling. En annan metod är att leda vattnet till bassänger med membranfilter som vattnet pumpas igenom och vidare till nästa steg. Slammet som avskiljs kan då ledas till en annan tank för vidare bruk. En stor del av det bildade slammet, som utgörs av mikroorganismer och organiskt material, pumpas tillbaka till de luftade bassängerna i biosteget. Detta kallas returslamflöde (RAS) och det görs för att nitrifierarna ska hinna utföra sin uppgift innan de förs vidare till nästa steg. Resten av slammet, dvs det som nettoproduceras, pumpas bort till slambehandling. Fördelen med membrantechnik kontra eftersedimenteringsbassänger är att både

högre slamhalt och högre flöden per yta kan upprätthållas (Stockholm Vatten och Avfall, 2015b).

2.2. SYSTEMBESKRIVNING AV HENRIKSDALS RENINGSVERK ÅR 2040

Henriksdals reningsverk är uppdelat i två anläggningar; Sicklaanläggningen och Henriksdalsanläggningen. Sicklaanläggningen består idag av galler och sandfång men kommer att byggas ut för att även innefatta försedimentering. Efter att det inkommande avloppsvattnet gått igenom reningsstegen i Sicklaanläggningen leds det med självfall till Henriksdalsanläggningen. Henriksdalsanläggningen består även den av galler, sandfång och försedimentering som avloppsvattnet renas igenom innan det blandas med det inkommande avloppsvattnet från Sicklaanläggningen. Vattnet får sedan genomgå ett biologiskt reningssteg följt av membranfiltrering.

2.2.1. Inlopp

Inloppen till Sicklaanläggningen kommer efter utbyggnaden att bestå av tre tunnlar. Från de södra förorterna och kommunerna Haninge och Tyresö leds avloppsvattnet genom en tunnel kallad Farstatunneln. Från de sydvästra förorterna och Huddinge kommun leds avloppsvattnet genom en tunnel kallad Årstatunneln.

Farsta- och Årstatunneln leds båda till en gemensam inloppspumpstation. Pumpstationen är dimensionerad för ett flöde på 5 m³/s men kan vid högflöden klara 7,5 m³/s. Pumpningen kommer utföras av tre pumpar av typen skruppump. Vid normal drift kommer två av dessa att användas och en vara i reserv.

Den tredje tunneln, kallad Brommatunneln, är ännu inte byggd men den kommer leda avloppsvatten från det nedlagda reningsverket Eolshäll samt Bromma reningsverk då det läggs ned.

Det inkommande avloppsvattnet från Brommatunneln kommer att pumpas upp till Sicklaanläggningen. Pumpstationen anläggs på nivån -43,7 m och den nya anläggningen i Sickla hamnar på nivån +7 m, vilket ger en total lyfthöjd på 50,7 m. Antal pumpar i pumpstationen är i dagsläget beräknat till tio stycken med en kapacitet på 0,86 m³/s per pump vid normalnivå i Brommatunneln. Pumparna är av typen centrifugalpump och kommer att varvtalsregleras med hjälp av en frekvensomriktare. Vid ordinarie drift beräknas sju av dessa att användas vilket ger en total kapacitet på 6,02 m³/s. Tillåts nivån i Brommatunneln att stiga leder detta till att lyfthöjden minskar varvid ett högre flöde kan uppnås. Vid en nivå på -34,2 m i Brommatunneln ökar pumpkapaciteten till 1,25 m³/s per pump.

Det maximala flödet som kommer kunna renas med galler, sandfång och försedimentering i Sicklaanläggningen efter utbyggnaden är 11 m³/s. Ytterligare 5,5 m³/s kommer bräddas vid högflödessituationer där det behandlas med silgaller för att sedan släppas ut till recipienten. Det dimensionerande flödet är beräknat till 4,3 m³/s och medelflödet är beräknat till 4,1 m³/s.

Inloppen till Henriksdalsanläggningen består idag av två tunnlar och kommer inte att förändras i och med ombyggnationen. Från de centrala delarna av Stockholm leds avloppsvattnet genom

en tunnel kallad Danvikstunneln. I slutet av tunneln sitter två skruvpumpar som lyfter avloppsvattnet som sedan rinner med självfall till Henriksdalsanläggningen.

Från Nacka kommun och det nedlagda Louddenverket leds avloppsvattnet genom en tunnel kallad Nackatunneln. Vattnet i Nackatunneln rinner in i Henriksdalsanläggningen med självfall samt pumpstationer i ledningsnätet och Louddenverket.

Det beräknade maximala sammanlagda inflödet år 2040 genom Nacka- och Danvikstunneln är $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Det dimensionerande flödet är beräknat till $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ och medelflödet är beräknat till $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.2.2. Grovrening och försedimentering

Avloppsvattnet som pumpas in till Sicklaanläggningen leds först till silgaller följt av ett luftat sandfång. Den totala ytan på sandfånget är 680 m^2 fördelat på sex bassänger. Utflödet från sandfånget sker via skibordslådor där varje sandfång har fem stycken med 5 m skibordskant vardera på en höjd av 4,9 m mätt från botten av bassängen. Efter sandfånget leds vattnet till försedimenteringen som består av tio bassänger med en area på $1\,040 \text{ m}^2$ per bassäng. Utflödet från försedimenteringsbassängerna sker via skibordslådor där varje bassäng har en total skibordslängd på 20 m på en höjd av 3,35 m mätt från botten av bassängen. Vattnet leds sedan med självfall till Henriksdalsanläggningen via tunnlar med en uppskattad volym på $2\,000 \text{ m}^3$.

I Henriksdalsanläggningen leds vattnet från Danvikstunneln och Nackatunneln till silgaller följt av sandfång. Sandfånget har en total yta på 340 m^2 fördelat på tre bassänger. Varje sandfång avslutas med fyra stycken skibordslådor med en längd på 6,6 m per skibord på en höjd av 5,11 m mätt från botten av bassängen. Vattnet leds därefter till försedimenteringen där det fördelas ut på 13 stycken bassänger med en total area på $8\,200 \text{ m}^2$. Bassängerna är byggda vid olika tillfällen och därför ser skiborden som utgör utloppen från bassängerna lite olika ut. Samtliga försedimenteringsbassänger har fyra skibordslådor på en höjd av 3,29 m mätt från botten men längden på skiborden skiljer sig mellan bassäng 1–9 och 10–13. Skibordslängden i bassäng 1–9 är 2,45 m per skibordslåda medan den är 2,75 m i bassäng 10–13.

2.2.3. Biologisk rening

Från försedimenteringen i Henriksdalsanläggningen leds vattnet via tunnlar till en bräddkanal, kallad TB1, dit även det försedimenterade vattnet från Sicklaanläggningen leds. Från TB1 leds vattnet via en trycksatt fördelningskanal till den biologiska reningen där avloppsvattnet måste lyftas cirka 3 m. Den biologiska reningen är uppdelad i sju linjer där varje linje består av en biobassäng, två membranbassänger och två sammankopplade RAS-tankar. Lyftet kommer att utföras av sju pumpstationer, en för varje linje, med tre centrifugalpumpar per station. Pumparna som installeras är av modellen Flygt PL 7040 ** 3~634 med en maximal frekvens på 50 Hz och de har en kapacitet på $0,611 \text{ m}^3/\text{s}$ vid den dimensionerade vattennivån (+0,4 m). Det maximala flödet till biosteget är $10 \text{ m}^3/\text{s}$ och om det försedimenterade inflödet överstiger detta kommer pumparna istället styras enbart på flöde för att hålla $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Resterande försedimenterat avloppsvatten utöver dessa $10 \text{ m}^3/\text{s}$ kommer att ledas till sandfilter för högflödesrening, samtidigt som extra fällningskemikalier tillsätts. Pumpstationerna har dimensionerats för att klara $10 \text{ m}^3/\text{s}$ med en biolinje ur drift vilket ger ett flöde på $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$ per

linje. Det dimensionerande flödet och medelflödet per linje med sex linjer i drift är 1,02 m³/s respektive 0,87 m³/s.

Biobassängerna består av sex olika zoner där den sammanlagda arean på bassängerna per linje är 2 400 m². Utloppen från biobassängerna sker via skibord med en längd på 60 m på en höjd av 11,89 m mätt från botten av bassängerna.

2.2.4. Membranfiltrering

Efter att avloppsvattnet gått igenom den biologiska reningen leds det till membranbassänger där två bassänger är kopplade till varje linje. I membranbassängerna finns ultrafilter av typen hålfiber (eng. Hollow Fibre). Bassängerna har en total gemensam area på 940 m² och utloppet från bassängerna går dels genom membranfiltrena som permeat, dels som returslamflöde via skibord med en längd på 34,8 m på en höjd av 3,35 m mätt från botten av bassängerna.

Membranen tillverkas av General Electric (GE) och går under namnet ZeeWeed[®] 500D-370. Varje linje består av fyra membranenheter med en permeatpump av modellen Sulzer SMD 400–350 A per enhet. Pumparna kan köras med ett varierande varvtal där det maximala varvtalet är 1 060 rpm (50 Hz). Pumparna kommer styras på inkommande flöde till linjen samt vattennivån i bassängen för returslamflödet.

Returslamflödet kommer att pumpas med pumpar av modellen Flygt PL 7040 ** 3~630 i linje 1–5 och Flygt PL 7040 ** 3~644 i linje 6 och 7. Att det är olika modeller på pumparna beror på att det är en högre lyfthöjd i linje 6 och 7 än i linje 1–5. Varje linje kommer ha åtta pumpar, fyra per membranbassäng, och de är dimensionerade för att klara tre gånger maximalt flöde till biosteget eller 5 m³/s per linje eller 0,625 m³/s per pump. Det dimensionerade flödet är 3 m³/s hanteras av fem av de åtta pumparna vilket ger ett flöde på 0,6 m³/s per pump. Utrymmet där returslamflödet pumpas ifrån uppmättes till ca 185 m² per linje. Returslamflödet pumpas tillbaka till bassängerna för den biologiska reningen där det blandas med det inkommande försedimenterade avloppsvattnet.

2.2.5. Recirkulation

Henriksdals reningsverk använder sig av fördenitrifikation i den biologiska reningen och därför behövs en recirkulation av det nitrifierade vattnet tillbaka till fördenitrifikationszonen. Recirkulationen utförs av tre pumpar per linje med en kapacitet på 1,17 m³/s per pump.

2.3. MODELLERING AV BASSÄNG MED SKIBORD

En enkel modell över hur vattennivån varierar i en bassäng där det finns ett inlopp och ett utlopp ges av

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(Q_{in} - Q_{ut})}{A} \quad (1)$$

där h är nivån, Q_{in} och Q_{ut} är in- respektive utflöde och A är ytarean. Denna grundmodell går sedan att utveckla genom att ha modeller för hur in- och utflödet varierar. Exempelvis kan utflödet vara ett pumpat utflöde och då kan en modell över en pump ersätta Q_{ut} i modellen för vattennivån. Utflödet kan också ske över ett skibord vilket är ett vanligt sätt att reglera nivån i

till exempel försedimenteringsbassängerna inom ett reningsverk. En vanligt använd ekvation som beskriver flödet över ett rektangulärt skibord togs fram av italienaren Giovanni Poleni år 1717 (Ruff, 2003). Ekvationen, kallad Polenis formel, ges av

$$Q_{skibord} = C_h L (h - h_{övf})^{3/2} \quad (2)$$

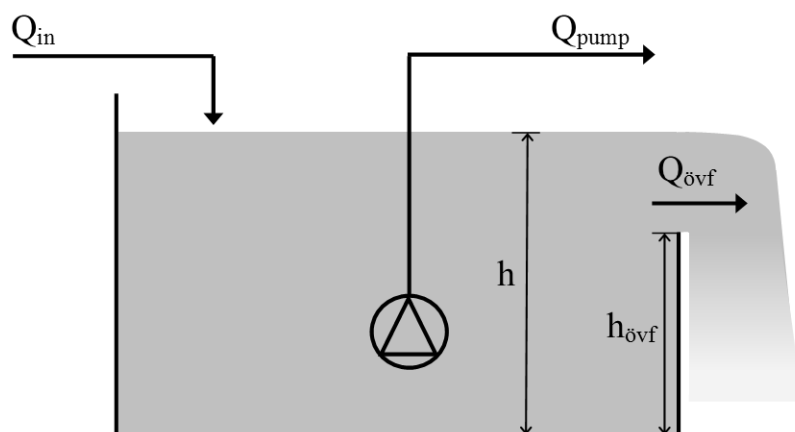
där L är längden på skibordet, h är den opåverkade vattennivån uppströms skibordet, $h_{övf}$ är höjden på skibordet och C_h är en konstant som beskrivs av

$$C_h = \mu \frac{2}{3} \sqrt{2g} \quad (3)$$

där g är gravitationskonstanten och μ är utströmningskoefficienten (Hager, 2010). Om denna ekvation för ett skibord används i en modell över en bassäng med ett pumpat utflöde och ett skibord kan modellen beskrivas av

$$\frac{dh}{dt} = \begin{cases} \frac{Q_{in} - Q_{pump}}{A}, & h < h_{övf} \\ \frac{Q_{in} - Q_{pump} - \mu \frac{2}{3} \sqrt{2g} L (h - h_{övf})^{3/2}}{A}, & h \geq h_{övf} \end{cases} \quad (4)$$

där Q_{pump} är det pumpade utflödet. En schematisk bild över modellen visas i figur 1.



Figur 1. En modell av en bassäng med skibord med ett pumpat utflöde där Q_{in} är inflödet, Q_{pump} är det pumpade utflödet, $Q_{övf}$ är flödet över skibordet, h är den opåverkade vattennivån uppströms skibordet och $h_{övf}$ är höjden på skibordet.

2.4. FLÖDE I ÖPPEN KANAL

Den största delen av Brommatunneln kommer vid normalflöden inte ha en vattennivå som når tunnelns tak. Därför kan tunneln, vid normalflöden, ses som en öppen kanal vars vattennivåer kan bestämmas med hjälp av Mannings formel,

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{S} \quad (5)$$

där v är vattnets hastighet i m/s, n är Mannings skrovlighetskoefficient, R_h är den hydrauliska radien och S är vattennivåns lutning som förutsätts vara lika med bottenlutningen (Chaudhry,

2007). Mannings skrovlighetskoefficient är en friktionskonstant som beror av bottenmaterialets skrovlighet och den hydrauliska radien är kvoten mellan våta tvärsnittsarean och våta perimeteren. Vid kombination av Mannings formel och massans bevarande fås ett uttryck för stationärt likformigt flöde,

$$Q = A \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{S} \quad (6)$$

där Q är vattenflödet i m^3/s och A är den våta tvärsnittsarean som i tunnelns fall, om den antas vara rektangulär, kan uttryckas som höjden gånger bredden. Med hjälp av ekvation (6) och kända vattenflöden in i tunneln kan vattendjupet (våta tvärsnittsarean/bredden) då räknas ut.

2.5. PUMPTEORI

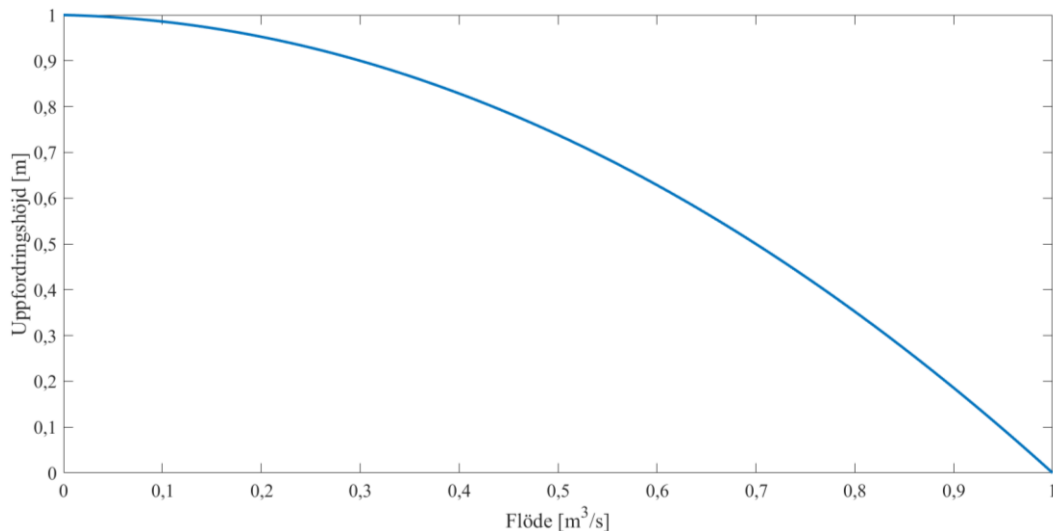
2.5.1. Pumphuvudgrupper

Pumpar kan delas in i två kategorier, tvingat flöde och icke tvingat flöde. I en pump av typen tvingat flöde beror inte flödet som genereras av mottrycket, utan pumpen genererar alltid samma flöde för varje varvtal eller pumps slag. Exempel på sådana pumpar är excenterpumpar och kolvpumpar. I reningsverk förekommer pumpar av typen tvingat flöde framförallt inom slamhanteringen (Olsson, 2008).

Flödet som genereras av en pump av typen icke-tvingat flöde beror dels på den statiska sughöjden (höjden vattnet måste lyftas upp till pumpen), dels på den dynamiska tryckhöjden (mottrycket). Den dynamiska tryckhöjden kan i sin tur delas upp i en statisk tryckhöjd (höjden vattnet måste lyftas från pumpen till utloppet) och friktionsförluster (Olsson, 2008). Ett exempel på en pump med icke-tvingat flöde är en centrifugalpump.

2.5.2. Pumpkurvor, systemkurvor och affinitetslagarna

En pumpkurva är en graf som visar förhållandet mellan det tryck (även kallat uppföringshöjd), H , och flöde, Q , som en pump genererar (figur 2). I figuren ses att uppföringshöjden minskar med ökat flöde vilket innebär att vattnet inte kan lyftas lika högt vid ett högt flöde som vid ett lågt.



Figur 2. Exempel på hur en pumpkurva kan se ut vid ett varvtal.

För att kunna styra flödet som pumpas mer exakt än att bara slå på och av en pump kan vissa pumpar köras med varierande varvtal. Pumpkurvan kommer då att ändras beroende på varvtal vilket kan beskrivas för centrifugalpumpar med de så kallade affinitetslagarna. Affinitetslagarna beskriver hur flödet, trycket och effektbehovet varierar med varvtal och diametern på impellern vid konstant effektivitet (Karassik et al., 2000). Om diametern på impellern hålls konstant kan flödet beskrivas med ekvationen

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (7)$$

där Q är flödet och n är varvtal. Uppfordringshöjden kan beskrivas med ekvationen

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (8)$$

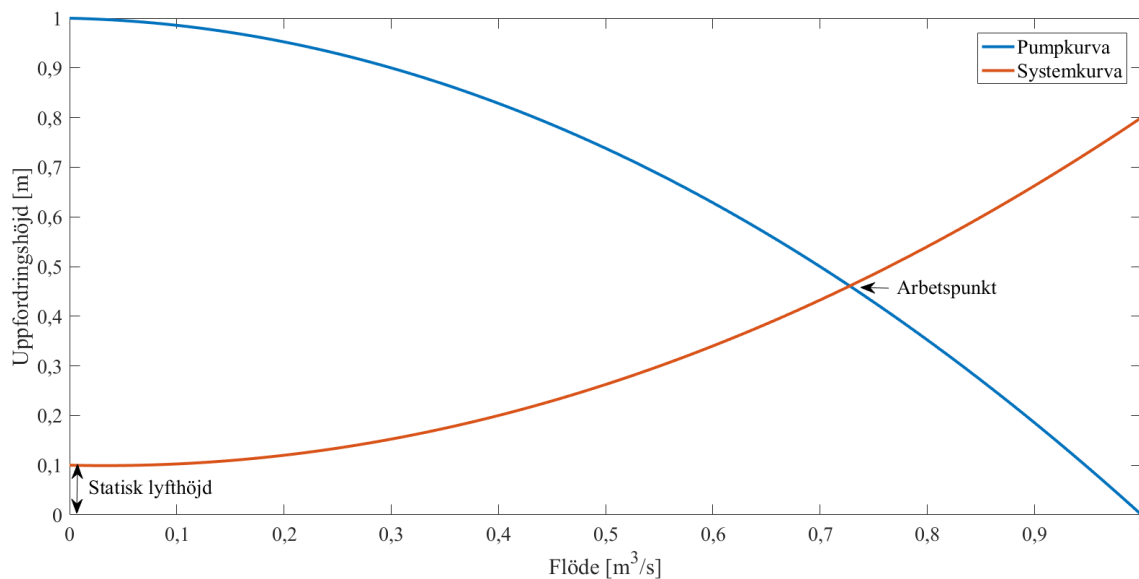
där H är uppfordringshöjden och n är varvtal. Effektbehovet kan beskrivas med ekvationen

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (9)$$

där P är effektbehovet och n är varvtal. Med dessa samband kan man, givet att man har uppgifter för vad trycket, flödet och effektbehovet för en pump är vid ett varvtal, beräkna dessa vid alla varvtal (Karassik et al., 2000).

Det flöde som en pump ger beror inte enbart på hur pumpkurvan ser ut, utan även på hur det system där pumpen installeras ser ut. Utifrån hur systemet ser ut kan en systemkurva konstrueras. Systemkurvan består av två delar: den statiska lyfthöjden och friktionsförlusterna i pump och ledningar. När pumpkurvan och systemkurvan placeras i samma graf fås en skärningspunkt mellan de båda kurvorna (figur 3). Denna punkt kallas för arbetspunkt och det är vid den punkten som det genererade flödet och trycket kan avläsas. För att ändra flödet måste alltså arbetspunkten flyttas vilket kan ske på flera olika sätt. Ett sätt är att ändra varvtalet vilket i sin tur ändrar pumpkurvan och en ny arbetspunkt uppnås. Ett annat sätt är att ändra på systemkurvan. Detta kan göras genom att till exempel höja vattennivån varifrån pumpen

pumpar och på så vis minska den statiska lyfthöjden. Det är även möjligt att öka friktionsförlusterna genom använda så kallad strypning, vilket ger en brantare lutning på systemkurvan (Olsson, 2009).



Figur 3. Exempel på en system- och pumpkurva. Arbetspunkten är de båda kurvornas skärningspunkt.

2.6. FLÖDESUTJÄMNING I RENINGSVERK

Det inkommande vattnet till kommunala reningsverk varierar över tid i flöde och dess sammansättning. Detta beror bland annat på (1) populationens dygnsrytm, (2) varierande industriell aktivitet och (3) varierande mängd och sammansättning av dagvatten. Att jämna ut det inkommande flödets storlek och koncentrationer av föroreningar är önskvärt då det kan leda till ökad effektivitet och robusthet (Ongerth, 1979). Det leder även till att styrningen av kemiska, fysiska och biologiska processer blir enklare att utföra och optimera (Ongerth, 1979; Wang, Hung & Shammass, 2005). Ytterligare fördelar med flödesutjämning är att det kan öka kvaliteten på det utgående renade vattnet genom att det:

- minskar flödet och belastningen vid flödestoppar och/eller minskar eller förhindrar förbigång av den biologiska reningen (Ongerth, 1979)
- minskar effekterna av den puls av föroreningar som uppstår vid det initiala flödet efter ett regn (eng. first flush) (Ongerth, 1979)
- ökar effektiviteten på sedimenteringen (Wang, Hung & Shammass, 2005)

2.7. REGLERTEKNIK

2.7.1. Grundläggande reglerteknik

I reningsverk finns många processer som behöver regleras på olika sätt. Exempel på detta är att ett visst luftflöde in i luftningsbassängerna ska upprätthållas beroende på utgående ammonium eller att rätt mängd fällningskemikalier ska tillsättas beroende på utgående totalfosfor. För att personal inte ska behöva styra dessa processer manuellt och för att regleringen ska bli mer effektiv kan regulatorer användas istället. Den allra enklaste typen av reglering är så kallad on-

off reglering. Vid on-off reglering kan regulatoren, som ofta bara är ett relä, anta endast två värden, här kallade styrsignaler, som av eller på (Carlsson & Hallin, 2010). Om till exempel ett visst vattenflöde ska upprätthållas med hjälp av en pump i en kanal, kan on-off reglering stänga av pumpen när vattenflödet överstiger ett visst värde och starta pumpen igen när flödet understiger ett annat värde. Detta skulle i medeltal kunna ge rätt vattenflöde, eller utsignal, men det är lätt att föreställa sig att systemet skulle bli svängigt. För att undvika svängig eller instabil reglering kan istället proportionell reglering, eller P-reglering användas enligt

$$u(t) = Ke(t) \quad (10)$$

där u är styrsignalen, K är regulatorns förstärkning och e är skillnaden mellan börvärdet och utsignalen kallad reglerfelet. Denna reglering har mindre problem med svängighet än on-off reglering men inför istället ett kvarstående reglerfel som kommer av att styrsignalen kräver ett reglerfel för att den inte ska bli noll. Ett högre K -värde gör att det kvarvarande reglerfelet minskar medan svängigheten ökar (Glad och Ljung, 2006).

För att bli av med det kvarstående reglerfelet kan en integrator tas med i regulatoren (PI-reglering) enligt

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt) \quad (11)$$

där T_i är integrationstiden. Integratorn räknar ut ytan mellan reglerfelet och tidsaxeln och kan därmed anta både positiva och negativa värden. Integratorn slutar alltså inte öka eller minska förrän reglerfelet är noll. Ett stort tal på integrationstiden ger en liten påverkan av den integrerande faktorn på styrsignalen och små tal på integrationstiden kan ge svängig reglering (Glad och Ljung, 2006). Om det inte går att få en tillräckligt snabb reglering utan att det blir svängigt med PI-reglering kan en deriverande term i regulatoren tas med så att PID-reglering erhålls, enligt

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (12)$$

där T_d är deriveringstiden. Den deriverande faktorn ändras beroende på hur snabbt reglerfelet förändras och förändringen beräknas genom att differensen mellan de två senaste reglerfelen delas med tidsskillnaden. Deriveringen gör att det kan gå att få en snabbare reglering med risken att mätbrusets inverkan förstärks (Glad och Ljung, 2006).

En grundläggande princip inom reglering är att använda utsignalen för att beräkna styrsignalen, så kallad återkoppling. Nackdelen med återkoppling är att då det sker en störning reagerar regulatoren först då störningen syns i utsignalen. Ett sätt att få regulatoren att reagera snabbare på störningar är att använda mätningar av störningen och då kunna reglera direkt när störningen sker. Denna princip kallas för framkoppling (Carlsson & Hallin, 2010).

2.7.2. Lambdametoden

Vid trimning av regulatorer finns det två olika angreppssätt för att ta fram regulatorparametrar. Antingen används en tumregel med enkla experiment så som stegsvar eller så beräknas regulatorparametrarna enligt en matematisk beskrivning av den aktuella processen.

Lambdametoden är en tumregelmetod som är vanlig inom processindustrin (Carlsson & Hallin, 2010). Metoden kan delas upp i fyra steg där det första steget är att koppla ur regulatorn som ska trimmas och sedan ändra styrsignalen i ett steg. Storleken på steget betecknas Δu .

Steg två är att mäta responsen i utsignalen från systemet. Det som behövs från utsignalen är eventuell döttid (betecknas L), tiden det tar för utsignalen att nå 63 % av slutvärdet (betecknas T), och storleken på stegsvaret (betecknas Δy). Processens förstärkning, K_s , kan därefter bestämmas enligt:

$$K_s = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (13)$$

Steg tre är att välja en konstant, p , som avgör hur snabb regleringen blir. Väljs p till över tre fås en långsam men stabil reglering, mellan två och tre blir regleringen medelsnabb, mellan ett och två blir regleringen snabb och väljs p till under ett blir regleringen aggressiv (Carlsson & Hallin, 2010). Med konstanten p och stigtiden T kan sedan lambda beräknas enligt:

$$\lambda = pT \quad (14)$$

Det sista steget är att beräkna regulatorparametrarna, K_p , T_i , och T_d . Konstanten K_p ges av

$$K_p = \frac{T}{K_s(\lambda + L)} \quad (15)$$

och tidskonstanten T_i ges av

$$T_i = T \quad (16)$$

Lambdametoden, som den beskrivs ovan, bygger på att systemet som ska styras är självreglerande, vilket innebär att om ett stegsvar utförs blir svaret begränsat. Om systemet istället består av en integrerande process måste andra ekvationer användas för att bestämma regulatorparametrarna. Ett exempel på en integrerande process är en tank med pumpat utflöde. Om tanken fylls på med lika stort flöde som pumpas ut kommer nivån att hållas konstant. Om det pumpade utflödet däremot skiljer sig från inflödet kommer nivån att börja rampa uppåt eller neråt.

Lambdametoden för en integrerande process bygger, precis som för en självreglerande process, på ett stegsvar. Det som behövs från svaret är den så kallade hastighetsförstärkningen, K_v , och eventuell döttid (Malmberg & Nyborg, 2004). Hastighetsförstärkningen ges av

$$K_v = \frac{\Delta y}{\Delta t \times \Delta u} \quad (17)$$

Utöver hastighetsförstärkningen och döttiden behövs lambda bestämmas. Lambda kan beräknas genom att bestämma hur stor den maximala regleravvikelsen, e_{max} , får bli vid en viss laständring (Malmberg & Nyborg, 2004). Lambda ges då av

$$\lambda = \frac{e_{max}}{K_v \times f_{ls}} \quad (18)$$

där f_{ls} är laststörningen i procent. Valet av hur stor laststörning som regulatören antas klara av gör hur snabb regulatören blir. Väljs f_{ls} stor (exempelvis 100 %) blir regleringen snabb och ger en stor marginal även vid extrema driftsfall. Vid normala laststörningar kan f_{ls} sättas till 50 % (Malmberg & Nyborg, 2004).

När parametrarna K_v , lambda och dötiden bestäms kan slutligen regulatorparametrarna beräknas. Tidskonstanten T_i ges av

$$T_i = 2\lambda + L \quad (19)$$

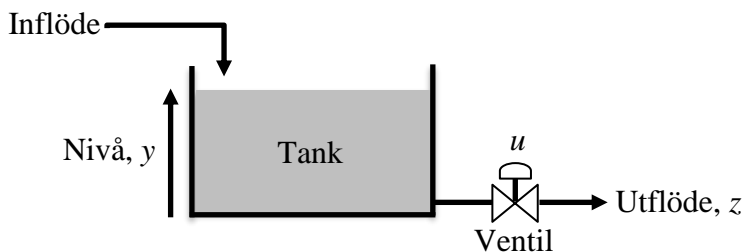
konstanten K_p ges av

$$K_p = \frac{T_i}{K_v(\lambda+L)^2} \quad (20)$$

Det är inte säkert att regleringen med de regulatorparametrar som bestäms enligt Lambdametoden har önskad prestanda utan parametrarna kan behövas justeras manuellt i efterhand.

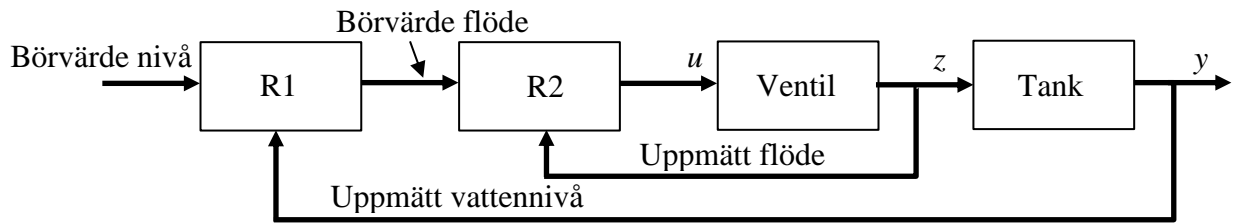
2.7.3. Kaskadreglering

När det system som ska regleras är uppbyggt av flera seriekopplade delsystem där signalerna mellan delsystemen är mätbara är kaskadreglering en bra reglerstrategi. Ett exempel på när kaskadreglering kan användas är vid nivåreglering i en tank där utflödet styrs med en ventil. Systemet består då av två seriekopplade processer: tanken och ventilen (figur 4).



Figur 4. Exempel på två seriekopplade processer där den ena är tanken och den andra är ventilen.

Regleringen utförs av två regulatorer där den överordnade regulatorn, $R1$, styr på nivån i tanken och skickar ett flödesbörvärde till den underordnade regulatorn, $R2$. Den underordnade regulatorn styr i sin tur på flödet och styr ventilläget (figur 5).

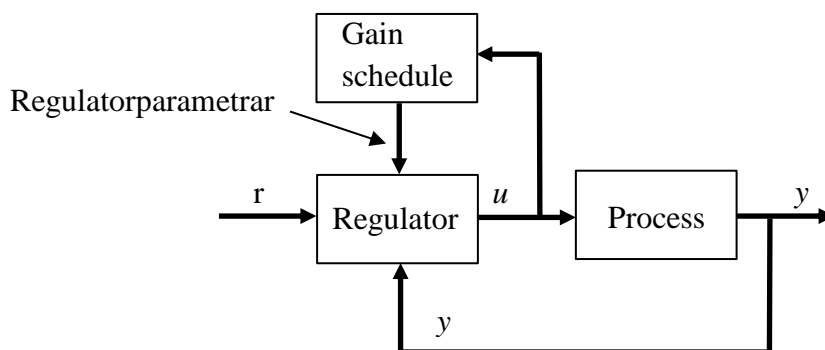


Figur 5. Blockschema som visar hur kaskadreglering fungerar. R1 är den överordnade regulatören och R2 är den underordnade regulatören.

En fördel med att använda sig av kaskadreglering istället för att bara ha en regulator är att störningar i utflödet snabbare kan regleras bort eftersom den underordnade regulatören reagerar direkt på ett ändrat flöde istället för att nivån i tanken ska ändras innan regulatören reagerar. En annan fördel är att en kaskadreglering bättre kan hantera olinjäriteter än en ensam regulator (Carlsson & Hallin, 2010).

2.7.4. Parameterstyrning

Att reglera en process som är olinjär med en vanlig regulator kan resultera i att regleringen blir svängig vid vissa belastningar medan den är långsam vid andra belastningar. Ett sätt att motverka dessa problem är att använda sig av olika regulatorparametrar vid olika belastningar, så kallad parameterstyrning (eng. gain scheduling) (Carlsson & Hallin, 2010). En vanlig typ av parameterstyrning är söndra och härskas metoden som går ut på att dela upp arbetsområdet i olika delsegment (Leith & Leithead, 2000). Varje delsegment kan då ha olika regulatorparametrar som tas fram så att regleringen får önskat beteende för just den belastningen. Vilken variabel som avgör vilket av de olika delsegmentens regulatorparametrar som ska användas kan variera. Det kan till exempel vara styrsignalen, utsignalen eller börvärdet. Ett exempel på hur parameterstyrning kan se ut med styrsignalen som sådan variabel ses i figur 6.



Figur 6. Blockschema över parameterstyrning baserat på styrsignalen u .

2.7.5. Integratoruppvridning

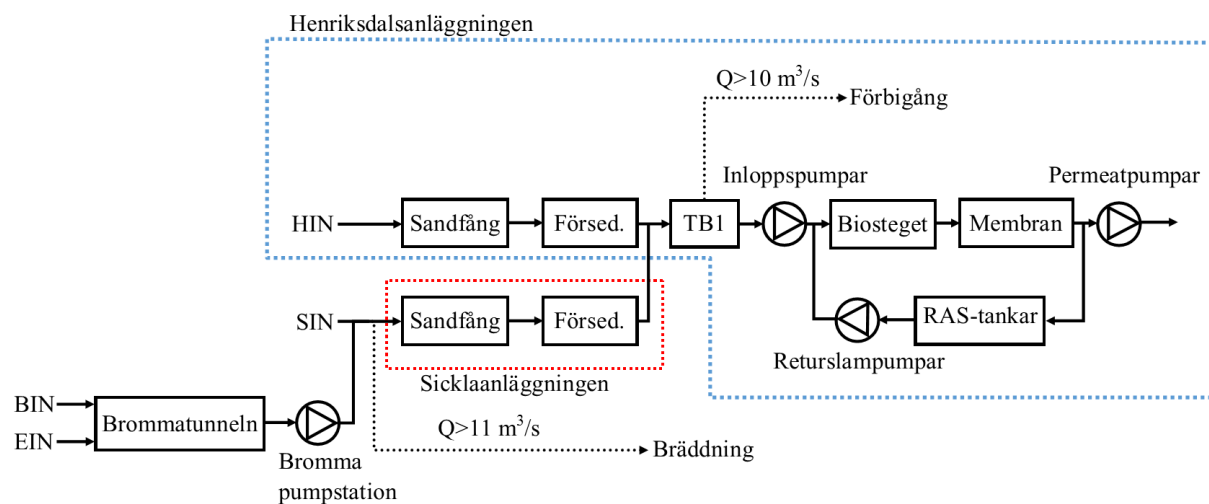
Alla ställdon har begränsningar, en ventil kan inte öppnas mer än till 100% och en pump kan inte pumpa mer än sitt maxflöde. När ett ställdon nått sin gräns kallas det att den mättats. Om en regulator skickar ett börvärde till ett ställdon och ställdonet redan mättats kommer reglerfelet inte minska och regulatören kan komma att skicka ett ännu högre börvärde. Detta kallas

integratoruppvridning (eng. windup) och det sker på grund av att den integrerande delen hos regulatorn integrerar reglerfelet över tid. Om då reglerfelet inte kan fås till noll på grund av att ett ställidon mättats kommer integratorvärdet öka så länge mätnaden kvarstår. För att undvika detta behöver regulatorn ha ett sätt att förhindra integratoruppvridning, dvs regulatorn behöver ha någon sorts anti-windup-design (AWD).

Det finns flera olika typer av AWD men vanligtvis fryser de integratorvärdet vid mätnad eller minskar det (Rundqwist, 1991). Den AWD som använts internt i alla PI-regulatorer i detta projekt kallas villkorlig integrering. Denna AWD fryser integratorn när mätnad uppstår och håller kvar det frysta värdet tills mätnaden upphör eller reglerfelet byter tecken. Vid kaskadreglering har även ett tillägg till AWD:n använts där den överordnade regulatorns integrator fryses antingen när den överordnade regulatorn själv mättas eller när alla de underordnade regulatorerna mättas samtidigt (Carlsson et al., 2017).

3. DATAMATERIAL OCH METODER

För att kunna simulera flödet genom Henriksdals nya reningsverk modellerades Brommatunneln, pumpar och bassänger. Dessa kopplades ihop till en större, övergripande modell så att samspelet mellan de olika modellerna kunde simuleras (figur 7). Recirkulationen som sker inom biosteget modellerades inte då det inte ansågs behövas för att uppfylla syftet med projektet. Från inloppspumparna och framåt simulerades enbart en linje. Då RAS-tankarna med pumpar ser olika ut för linje 1–5 jämfört med linje 6–7 valdes en linje från linje 1–5 ut för simulering då det är linje 1 som kommer tas i drift först. Hopsättningen av delmodellerna gjorde att reglerstrategier för styrning av pumpmodellerna kunde implementeras.



Figur 7. Flödesschema över de delar av Henriksdals nya reningsverk som modellerades. Förkortningarna definieras i tabell 1.

En befintlig Simulink-modell, med delmodeller skrivna i C, av Saagi et al. (2016) användes som grund för strukturen på huvudmodellen. Delmodellerna över Brommatunneln, pumpar och bassänger skrevs i C och de tolkades av huvudmodellen med hjälp av Simulinks S-funktion. Nödvändiga inparametrar för modellen sparades i Matlab. Vissa dimensioner på bassänger och

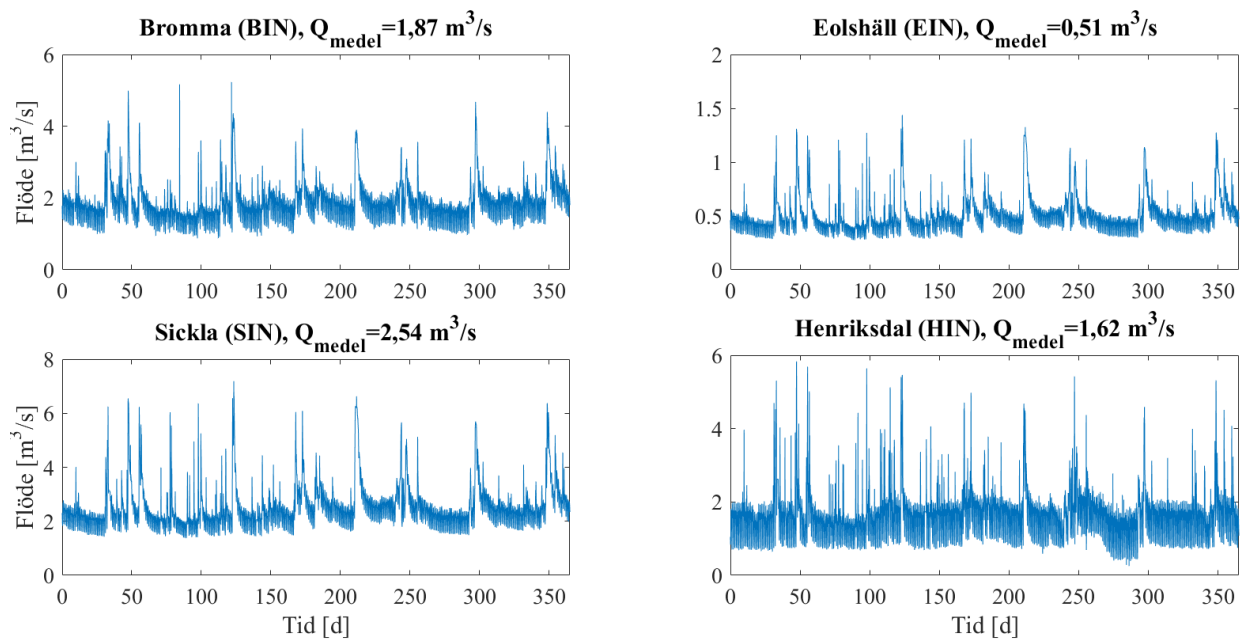
tunnlar togs fram genom mätningar i en 3D-modell över Henriksdals nya reningsverk i programmet Navisworks.

3.1. FLÖDESDATA

Som indata vid simuleringarna användes flöden vid de olika inloppen till reningsverket för år 2040. Framtagandet av flödesdata för år 2040 utgick från uppmätt flödesdata för det regniga året 2012 (SMHI, 2017) för Sicklaanläggningen, Bromma reningsverk och Henriksdalsanläggningen. Flödesdata från Eolshäll saknades och istället antogs den vara 20 % av inflödet till Sicklaanläggningen. Uppskattningen gjordes av Stockholm Vatten och Avfall. Till de uppmätta flödena adderades nya anslutningar, så kallade personekvivalenter (pe), som väntas tillkomma fram till år 2040. Flödet per anslutning och dag antogs enligt Stockholm Vatten och Avfall vara 150 l/d,pe. Vidare antogs mängden tillskottsvatten utöver dessa anslutningar vara oförändrad. Till Brommatunneln adderades även ett inläckage på 10 l/min och 100 m tunnel vilket motsvarar det konstruktionskrav Stockholm Vatten och Avfall ställt på byggandet av tunneln. Antal anslutningar som antogs tillkomma till år 2040 ses i tabell 1. Det beräknade flödet och medelflödet år 2040 med de tillagda anslutningarna visas i figur 8.

Tabell 1. Antal anslutningar till respektive inlopp som det såg ut 2012 och som det antas se ut år 2040. Sicklainloppet innefattar Årsta- och Farstatunneln. Henriksdalsinloppet innefattar Danvik- och Nackatunneln

Inlopp	Anslutningar år 2012 (pe)	Tillkomna anslutningar år 2040 (pe)	Totalt anslutna år 2040 (pe)
Bromma (BIN)	328 279	132 872	461 151
Eolshäll (EIN)	113 685	26 145	139 830
Sickla (SIN)	217 736	130 877	348 613
Henriksdal (HIN)	325 935	105 376	431 311



Figur 8. Beräknat inflöde år 2040 från de fyra inloppen Bromma, Eolshäll, Sickla och Henriksdal. Notera att skalan på y-axeln skiljer sig mellan de olika figurerna.

3.2. MODELLERING

3.2.1. Modell över bassäng med skibord

Då en bassäng med skibord modelleras är det den totala arean, skibordens längd och skibordens höjd från botten av bassängen som är av vikt (ekvation (4)). Sandfånget i Sickla modellerades som en bassäng där flödet skalades ned innan modellen och upp igen efter. På samma sätt modellerades försedimenteringsbassängerna i Sickla och sandfånget inne i Henriksdalsverket som en bassäng med ned- och uppskalning av flödet. Försedimenteringen i Henriksdal består av 13 bassänger men modellerades som två skilda volymer med varsina skibord då de fyra bassänger som tillkom under en utbyggnation är utformade på ett annat sätt än de första nio bassängerna. Innan försedimenteringen i Henriksdal skalades flödet ned proportionellt mot antal bassänger för att sedan gå igenom två bassänger, en av varje sort, för att sedan skalas upp igen till det totala flödet. Innan biosteget skalas flödet ned igen och endast en bassäng av biosteget modelleras. Flödet skalas upp igen först när det gått igenom membranen. Värden på modellernas area, utströmningskoefficient, skibordskantlängd och skibordshöjd visas i tabell 2. Värdet på utströmningskoefficienten valdes till 0,6 enligt uppgift från Stockholm Vatten och Avfall.

Tabell 2. Parametrar över sandfång och försedimentering i Sickla och Henriksdal samt biosteget i Henriksdal

	Area (m ²)	Längd skibordskant (m)	Höjd skibordskant (m)	Utströmnings- koefficient, μ (-)
SF Sickla	113	25	4,9	0,6
Försed. Sickla	1 040	20	3,35	0,6
SF Henriksdal	113	26,4	5,11	0,6
Försed. 1–9 Henriksdal	600	9,8	3,29	0,6
Försed. 10–13 Henriksdal	700	11	3,29	0,6
Biobassäng Henriksdal	2 400	60	11,89	0,6

3.2.2. Modellering av en pumpstation

Vid modelleringen av en generell pumpstation användes en befintlig modell av Saagi et al. (2016) som grund för att bygga vidare på. Målet var att konstruera en modell av en pumpstation till biosteget som sedan kan modifieras för att anpassas till de olika pumpstationerna i Henriksdals reningsverk.

En modell konstruerades av en pump vid konstant varvtal. Modellen utgick från en systemkurva som tillhandahölls av Xylem. Ett andragsgradspolynom anpassades med Matlab-funktionen *polyfit* så att det beskrev systemkurvan (figur 9). Data för de pumpar (Flygt PL 7040) som ska installeras vid inloppet till biosteget hämtades från Xylem via deras tjänst Xylect (<http://www.xylect.com>). Den data som hämtades bestod av pumpkurvor för ett flertal olika frekvenser. Frekvenser kan omvandlas till varvtal med sambandet

$$n = \frac{120f}{p} \quad (21)$$

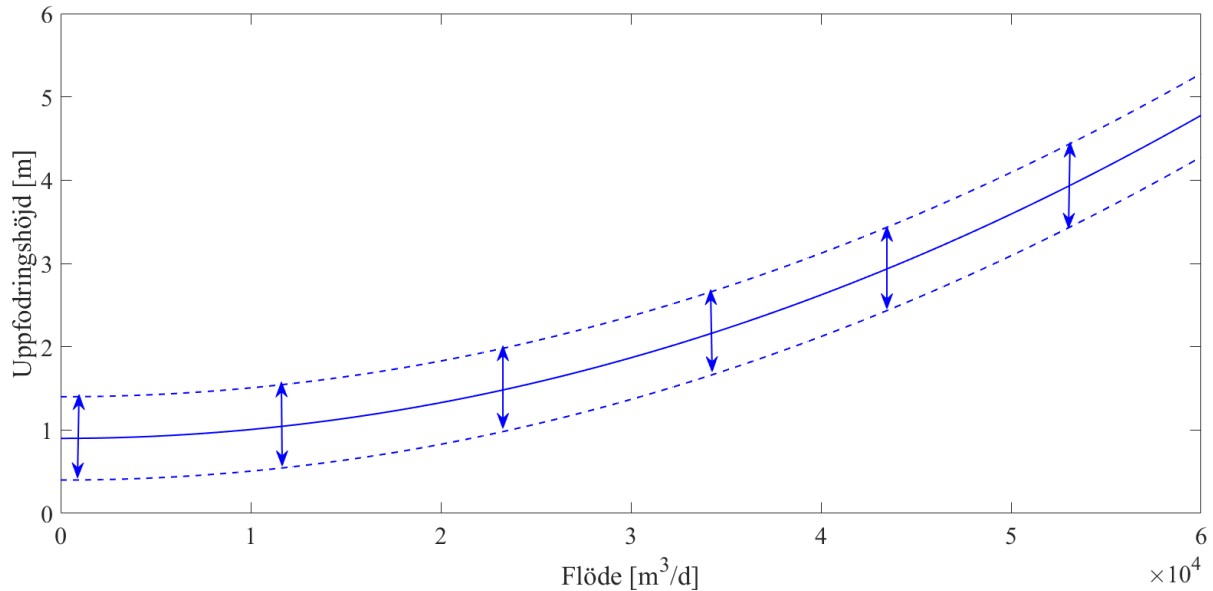
där n är varvtal i varv/min, f är frekvens i Hz och p är antalet poler. Ekvation (21) visar att varvtal och frekvens är proportionella vilket innebär att affinitetslagarna (ekvation (7) och (8)) även gäller för frekvens. Eftersom informationen om pumparna var givet i frekvens användes den informationen vid modelleringen utan att omvandla till varvtal. Då den första modellen enbart skulle modellera det pumpade flödet vid ett konstant varvtal valdes en frekvens som det fanns tillgänglig data för. Den frekvens som valdes var 37,5 Hz, som motsvarar 75 % av den maximala frekvensen för pumpen. Pumpkurvan antogs vara linjär kring skärningspunkten med systemkurvan och en rät linje anpassades till den. Detta antagande såg ut att vara rimligt vid en visuell jämförelse så länge den statistiska lyfthöjden inte avviker alltför mycket från 0,9 m som systemkurvan var konstruerad för.

För att modellera det pumpade flödet med varierande vattennivå i pumphuset användes det polynom som anpassats till systemkurvan och sedan sattes den sista termen till en variabel som

beror på avvikelsen från nivån där systemkurvan tagits fram. Polynomet för systemkurvan blev då

$$H = 1,08 \times 10^{-9}Q^2 + r \quad (22)$$

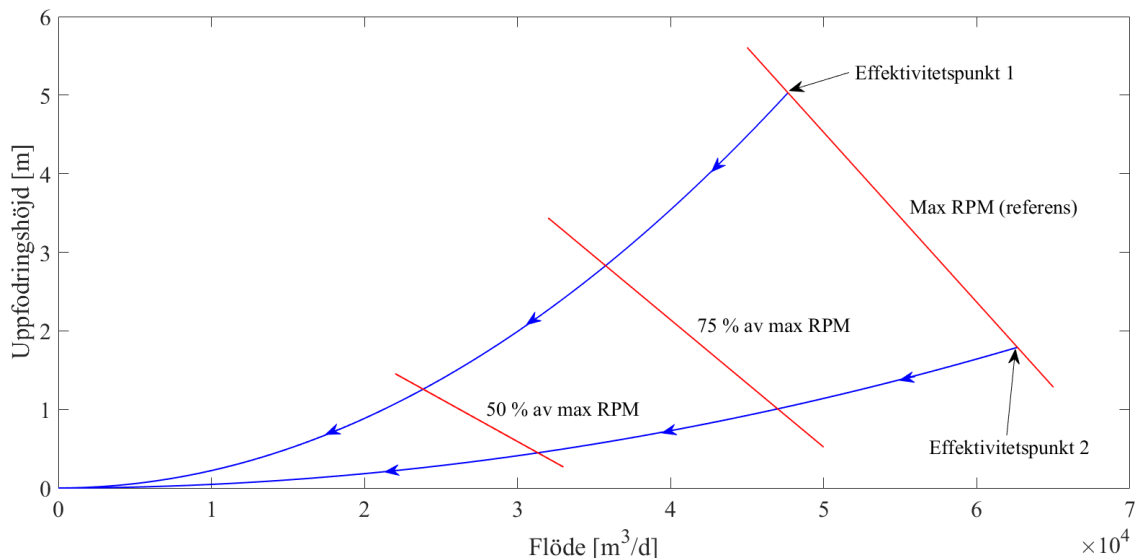
där H är uppfodringshöjden i m, Q är flödet i m^3/dygn och r är den varierande statistiska lyfthöjden i m. En illustration av en systemkurva med varierande statistisk lyfthöjd ses i figur 9.



Figur 9. Systemkurva för inloppet till biosteget med varierande statistisk lyfthöjd.

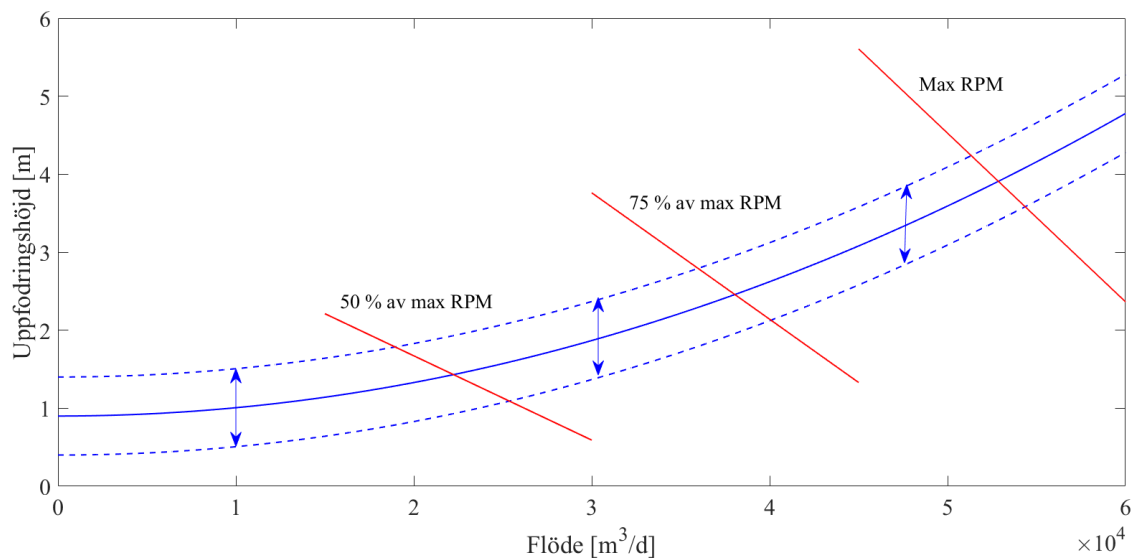
Ekvationen för den räta linjen som anpassades till pumpkurvan kombinerades med ekvation (22) för systemkurvan för att kunna ta fram skärningspunkten. Detta resulterade i en andragradsekvation som skulle lösas för att få ut ett flöde som var beroende av vattennivån i pumphuset.

Efter att modellen av en pump med konstant varvtal fungerade, utvecklades den för att kunna modellera flödet med ett varierande varvtal. Samma andragradspolynom för systemkurvan användes men nu behövdes en varierande pumpkurva som berodde på varvtal. För att modellera en varierande pumpkurva utnyttjades affinitetslagarna (ekvation (7) och (8)) för att, givet ett referensvarvtal, flöde och tryck, kunna beräkna nya flöden och tryck vid ett nytt varvtal vid samma effektivitet. Återigen approximerades pumpkurvorna som linjära och således behövdes flödet och trycket vid två effektivitetspunkter vid ett referensvarvtal för att kunna anpassa en rät linje (figur 10).



Figur 10. Illustration av hur pumpkurvan (rött) följer effektivitetspunkterna (blått) mot origo.

När sedan pumpkurvorna kunde beräknas vid olika varvtal kombinerades de med systemkurvan. Skärningspunkten mellan systemkurvan och pumpkurvan motsvarar arbetspunkten som uppnås vid ett givet varvtal (figur 11). Flödet vid denna arbetspunkt beräknades genom att lösa den andragradsekvation som beskriver skärningen.



Figur 11. Systemkurva med varierande statisk lyfthöjd kombinerad med pumpkurva med varierande varvtal.

De parametrar som behövdes för att sedan anpassa modellen till olika sorters pumpar och system inom reningsverket ses för pumpkurvorna i tabell 3 och för systemkurvan i tabell 4.

Tabell 3. Parametrar för att beräkna pumpkurvorna

Definition	Beteckning
Referensflöde vid effektivitetspunkt 1 (m ³ /d)	<i>qref1_pump</i>
Referensflöde vid effektivitetspunkt 2 (m ³ /d)	<i>qref2_pump</i>
Referens för uppfodringshöjd vid effektivitetspunkt 1 (m)	<i>href1_pump</i>
Referens för uppfodringshöjd vid effektivitetspunkt 2 (m)	<i>href2_pump</i>
Referensvarvtal (Hz eller varv/min)	<i>nref_pump</i>

Tabell 4. Parametrar för att beräkna systemkurvan

Definition	Beteckning
Statisk lyfthöjd (m)	<i>Static_h</i>
Referensflöde (m ³ /d)	<i>qref</i>
Referens för uppfodringshöjd vid referensflödet (m)	<i>href</i>
Referensnivå mätt från botten av pumpsump vid vilken den statiska lyfthöjden är beräknad (m)	<i>href_sump</i>

3.2.3. Modell över Brommatunneln

En befintlig modell över flödestransport i avloppsnätet används som grund till modellen över Brommatunneln (Saagi et al., 2016). I den befintliga modellen antogs flödet ske i rör och flödet modellerades som en linjär kaskad av tankar där flödet i varje tank antogs vara ”steady”. Flödet beräknades med volymen och en tidskonstant för varje delsegment. Dessa flödesberäkningar fungerar inte bra för flöden där pumpar nedströms påverkar flödet uppströms (Solvi, 2007). Därför gjordes modellen om så att flödet beräknades med Mannings formel (ekvation (6)) istället där flödet beror av parametrarna Mannings friktionskoefficient, lutningen och bredden samt variabeln höjden. Flödesförändringarna som tidigare räknades ut genom volymförändringar beräknades nu med höjdförändringar. Detta möjliggjorde att den varierande höjden kunde sparas för framtida regleringar av pumparna i Sickla pumphus.

Efter att en fungerande modell där utflödet alltid är detsamma som inflödet erhöles, gjordes försök att utöka modellen för att även kunna modellera bakåtströmmande flöden (dämningseffekter). I den tidigare modellen hade tunneln delats in i ett antal segment där varje segments flöden beräknades med samma funktion. Eftersom modellen nu skulle modellera ett begränsat utflöde fick det sista segmentet representeras av en egen funktion. Till att börja med sattes utflödet till ett konstant värde, dock mindre än inflödet, för att kunna se effekter av dämning.

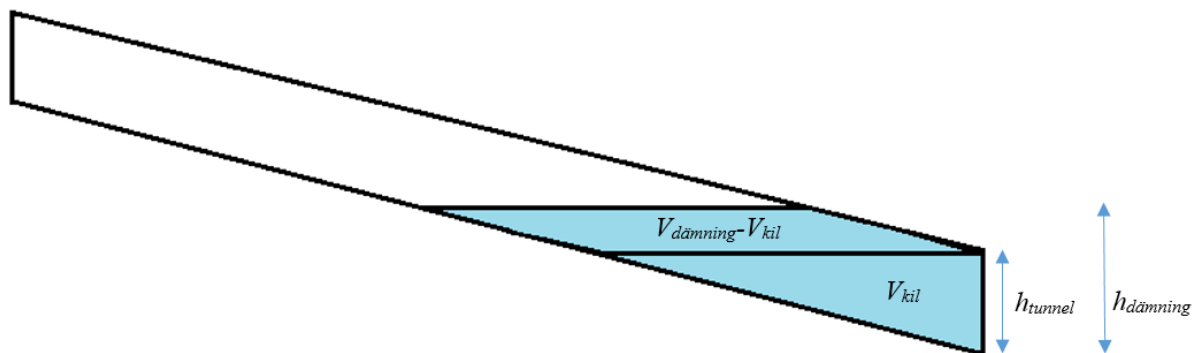
En enkel modell för att bestämma den utjämnande volymen utformades genom att $Q_{ut} - Q_{pump}$ sparades i en virtuell tank. Dämningsvolymen antogs anta formen av en kil tills vattendjupet i tunneln slog i taket vid utloppspunkten. Därefter antogs den övriga volymen anta formen av en parallelogram. Utifrån dessa antaganden och den dämnda volymen kunde då dämningens höjd, $h_{dämning}$, räknas ut enligt:

$$h_{dämning} = \sqrt{\frac{V_{dämning}}{\frac{1}{2} \times S \times b_{tunnel}}} \quad (23)$$

då vattendjupet understiger tunnelns höjd, h_{tunnel} , där $V_{dämning}$ är den dämnda volymen, S tunnelns lutning och b_{tunnel} tunnelns bredd och enligt:

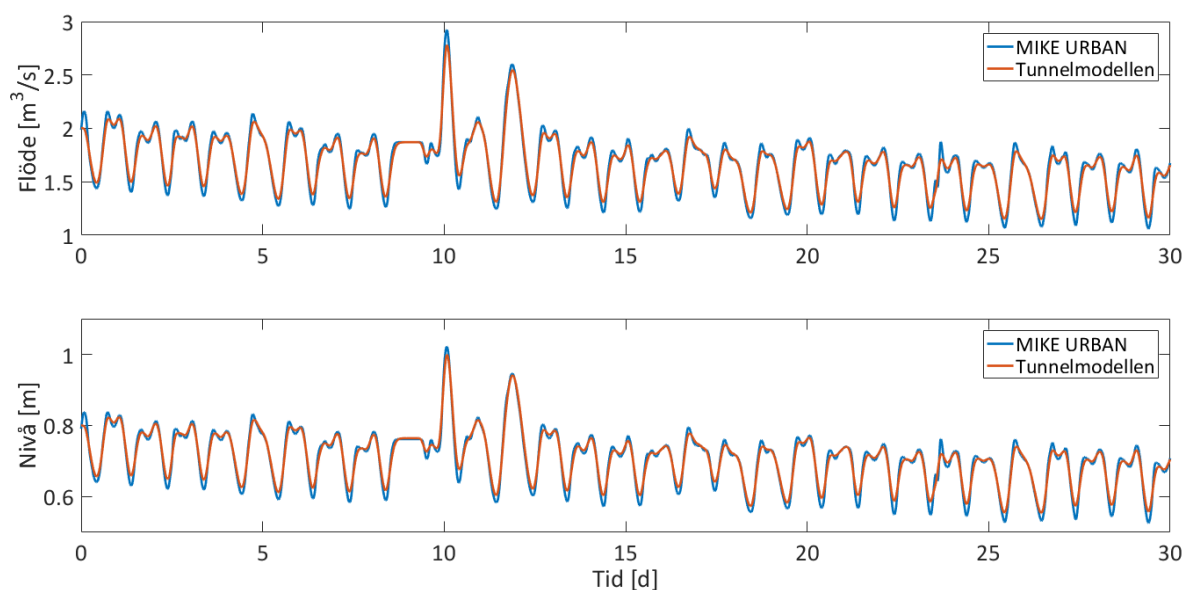
$$h_{dämning} = h_{tunnel} + \frac{V_{dämning} - V_{kil}}{\frac{h_{tunnel}}{S} \times b_{tunnel}} \quad (24)$$

då vattendjupet överstiger tunnelns höjd, där $V_{dämning} - V_{kil}$ är volymen på den del av dämningen som överstiger h_{tunnel} . En schematisk bild över den dämnda volymen i Brommatunneln visas i figur 12.



Figur 12. Schematisk bild över Brommatunneln där h_{tunnel} är tunnelns höjd, $h_{dämning}$ är dämningens höjd, $V_{dämning}$ är den dämnda volymen och V_{kil} är volymen på den del av den dämnda volymen som understiger h_{tunnel} .

Eftersom Brommatunneln inte ännu byggts än gick det inte att validera flödesmodellen mot verkligheten. Istället utfördes en validering mot modellen MIKE URBAN. MIKE URBAN är en hydraulisk, dynamisk modell som är GIS-baserad och används för att räkna ut flöden, vattenkvalitet och sedimenttransport i såväl dagvattensystem som avloppsvattenledningar. Trettio dagar simulerades med samma indata och dimensioner på tunneln i båda modellerna. Båda modellerna använder sig av Mannings formel vid uträkandet av flöden och vattendjup. För att kunna jämföra de båda modellernas resultat plottades flödet ut ur tunneln och nivån i den sista delen av tunneln (figur 13). Både flödet och nivån följer samma mönster men de varierar något mer i MIKE URBAN-modellen.



Figur 13. Flöde (överst) och nivå (underst) för tunnelmodellen och en MIKE URBAN-modell (blå) över Brommatunneln (röd).

3.2.4. Modell över Bromma pumpstation

Eftersom det saknades information om vilken typ av pumpar som ska användas vid Sickla pumpstation togs ett förslag på pumptyp fram med Xylect. Förslaget baserades på tillgänglig information om rörlängder, rördimensioner, antal ventiler och önskad uppfordringshöjd (tabell 5 och tabell 6).

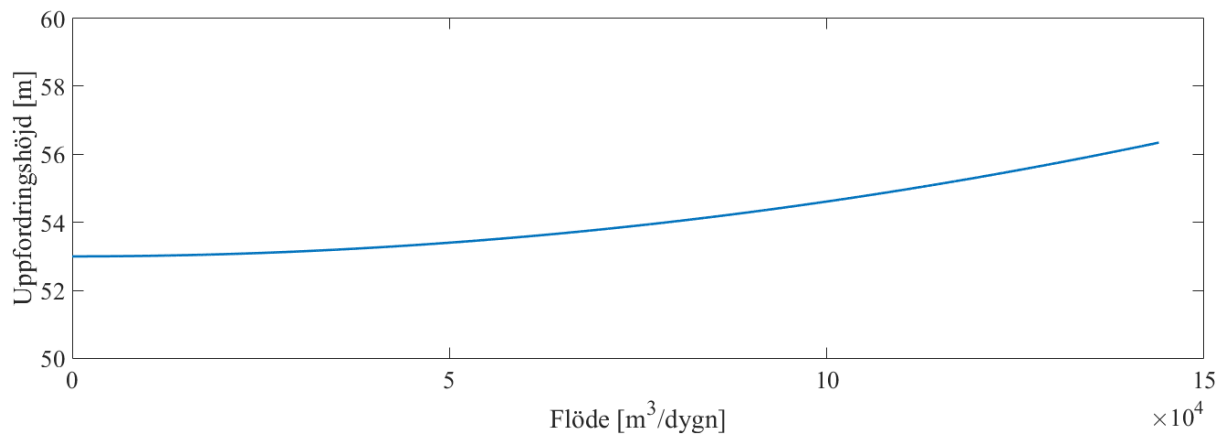
Tabell 5. Rördimensioner för pumpning av vatten från Brommatunneln

	Längd	Invändig dimension	Antal krökar	Antal ventiler
Sugledning	7 m	700 mm	2 st. 90°	1
Tryckledning 1	2 m	700 mm	-	1
Tryckledning 2	58,5 m	900 mm	3 st. 90°	2

Tabell 6. Parametervärden för uträkning av systemkurvan för Bromma pumpstation

Beteckning	Värde
<i>Static_h</i> (m)	53
<i>qref</i> (m ³ /d)	110 000
<i>href</i> (m)	45
<i>href_sump</i> (m)	0

Rörlängderna, rördimensionerna och antal ventiler utnyttjades till att räkna ut friktionsförlusterna som tillsammans med uppföringshöjden på 53 m användes för att ta fram en systemkurva (figur 14).



Figur 14. Systemkurva för Bromma pumpstation.

Utifrån denna systemkurva föreslog Xylect pumptypen Flygt NP 3531/965 3~ 670. Med hjälp av information om pumpen togs nödvändiga parametrar fram och med dessa samt systemkurvan skapades en pumpmodell enligt ekvation (7) och (8). Parametervärden för systemkurvan samt pumpkurvan visas i tabell 6 respektive 7. Denna pumpmodell kombinerades sedan med den redan framtagna modellen över Brommatunneln varvid en större modell över systemet Brommatunneln och Sickla pumphus skapades.

Tabell 7. Parametervärden för uträkning av pumpkurva för Bromma pumpstation

Beteckning	Värde
q_{ref1_pump} (m^3/d)	58 000
q_{ref2_pump} (m^3/d)	140 000
h_{ref1_pump} (m)	60,9
h_{ref2_pump} (m)	30,3
n_{ref_pump} (Hz)	50

3.2.5. Modell över inloppspumparna till biosteget

Pumparna som enligt Stockholm Vatten och Avfall kommer att installeras som inloppspumpar till biosteget är Flygt PL 7040 ** 3~634 och det kommer vara tre pumpar per linje. För att förenkla modellen och för att hålla nere simuleringstiden modellerades endast en linje där flödet från den linje som modellerades sedan skalades upp till det antal linjer som ska vara i drift.

Reningsverket är dimensionerat att klara maxflödet med en linje ur drift och det var även det som användes här.

Metoden som beskrivs i avsnitt 3.2.2. för att ta fram en generell modell av en pumpstation ledde till att ett antal parametrar behövdes som indata. Parametrarna beskrev hur systemkurvan (tabell 8) och pumpkurvan såg ut (tabell 9)

Tabell 8. Parametervärden för uträkning av systemkurvan för inloppspumparna till biosteget

Beteckning	Värde
<i>Static_h</i> (m)	0,9
<i>qref</i> (m ³ /d)	48 470
<i>href</i> (m)	3,43
<i>href_sump</i> (m)	3,47

Tabell 9. Parametervärden för uträkning av pumpkurva för inloppspumparna till biosteget

Beteckning	Värde
<i>qref1_pump</i> (m ³ /d)	47 665
<i>qref2_pump</i> (m ³ /d)	62 665
<i>href1_pump</i> (m)	5,03
<i>href2_pump</i> (m)	1,79
<i>nref_pump</i> (Hz)	50

Inloppspumparna till biosteget styrs mot nivån i TB1 och således behövdes en modell över hur nivån i TB1 varierar. Från försedimenteringen i Henriksdal och Sickla leds vattnet genom tunnlar. Storleken på tunnarna beräknades utifrån uppgifter och ritningar som tillhandahållits från Stockholm Vatten och Avfall (tabell 10). Att få till en exakt beskrivning av tunnarnas utseende och storlek bedömdes inte vara relevant för projektet, utan det viktiga var att storleksordningen stämde.

Tabell 10. Dimensionerna för de tunnlar som leder vattnet från försedimenteringen i Henriksdal och Sickla till TB1. Vissa dimensioner är uppskattade

Sektion	Bredd (m)	Längd (m)	Area (m ²)	Kommentarer
TS1	2,5	171	427,5	Längden uppskattades genom att jämföra med längden på TF1 och TB1
TS1-TF1	2,5	61	152,5	
TF1	2,5	152	380	
TF5	4	70	280	
TI2	3,5	70	245	
TS2	3,8	90	342	Bredden kan variera. Antas vara konstant
TF2	3,5	90	315	
TB1	2,5	70	175	Bredd okänd. Uppskattas till 2,5 m.
Sicklatunneln	-	-	2 000	
Totalt			4 317	

Bräddtunneln TB1 har ett skibord där förbigång av biosteget kan ske när inflödet överskrider 10 m³/s. Skibordet är 70 m långt och ligger på en höjd av 4 m mätt från botten av TB1. Värdet på utströmningskoefficienten, μ , valdes till 0,6 enligt uppgift från Stockholm Vatten och Avfall. Modellen över hur nivån varierar i TB1 skrevs i C och byggde på den struktur som tagits fram av Saagi et al. (2016) och som beskrivs i ekvation (4).

3.2.6. Modell över returslampumparna

De pumpar som, enligt Stockholm Vatten och Avfall, kommer installeras för att hantera returslamflödet är: Flygt PL 7040 ** 3~630 för linje 1–5 och Flygt PL 7040 ** 3~644 för linje 6–7. Varje linje kommer ha åtta stycken pumpar, fyra per membranbassäng. Returslampumparna modellerades på samma sätt som de övriga pumpstationerna och således behövdes de parametrarna som beskrivs i tabell 3 och 4 som indata till modellen (tabell 11–14).

Tabell 11. Parametervärden för uträkning av pumpkurva för returslampumpstationen linje 1–5

Beteckning	Värde
q_{ref1_pump} (m ³ /d)	52 000
q_{ref2_pump} (m ³ /d)	69 000
h_{ref1_pump} (m)	5,02
h_{ref2_pump} (m)	1,61
n_{ref_pump} (Hz)	50

Tabell 12. Parametervärden för uträkning av systemkurvan för returslampumpstationen linje 1–5

Beteckning	Värde
<i>Static_h</i> (m)	2,66
<i>qref</i> (m ³ /d)	52 000
<i>href</i> (m)	3,09
<i>href_sump</i> (m)	2,4

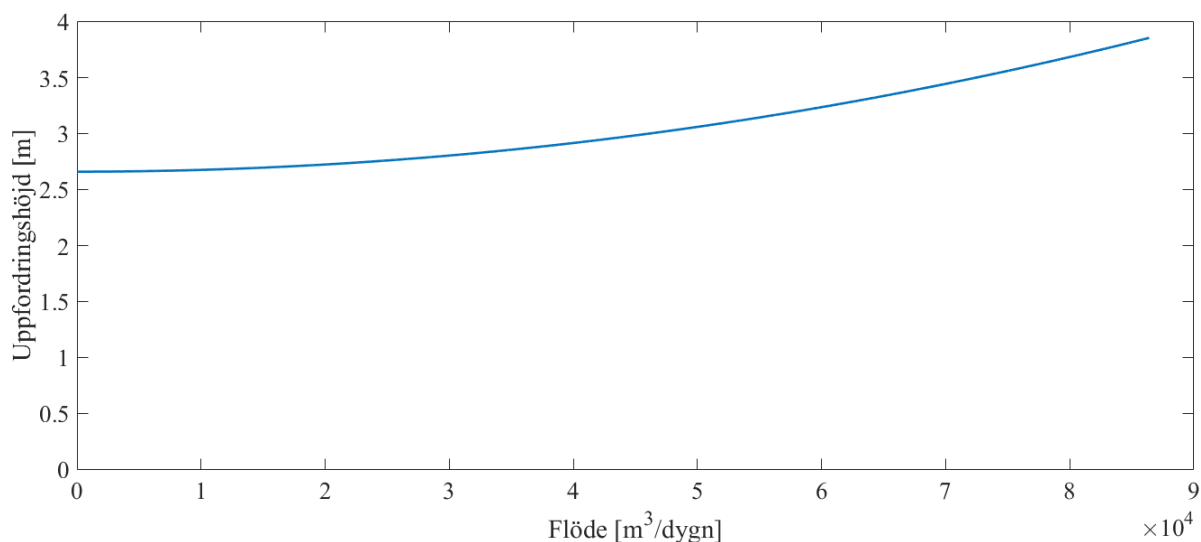
Tabell 13. Parametervärden för uträkning av pumpkurva för returslampumpstationen linje 6–7

Beteckning	Värde
<i>qref1_pump</i> (m ³ /d)	53 000
<i>qref2_pump</i> (m ³ /d)	76 000
<i>href1_pump</i> (m)	5,49
<i>href2_pump</i> (m)	0,97
<i>nref_pump</i> (Hz)	50

Tabell 14. Parametervärden för uträkning av systemkurvan för returslampumpstationen linje 6–7

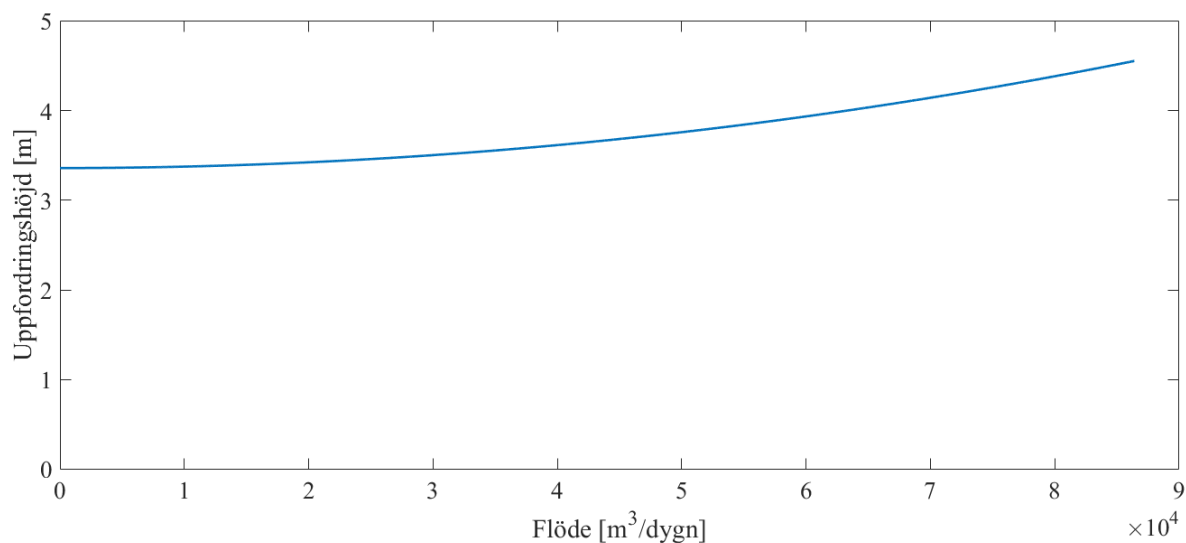
Beteckning	Värde
<i>Static_h</i> (m)	3,36
<i>qref</i> (m ³ /d)	52 000
<i>href</i> (m)	3,79
<i>href_sump</i> (m)	2,4

Den systemkurva som togs fram för returslampumparna för linje 1–5 ses i figur 15.



Figur 15. Systemkurva för returslampumpstationen linje 1–5.

Den systemkurva som togs fram för returslampumparna för linje 6–7 ses i figur 16.



Figur 16. Systemkurva för returslampumpstationen linje 6–7.

Inflödet till RAS-tankarna sker från skibord från membranbassängerna och utflödet är enbart det pumpade utflödet till början av biosteget. Dimensionerna på RAS-tankarna uppmättes i en 3D-modell av Henriksdals reningsverk i programmet Navisworks Freedom. RAS-tankarna består av fyra olika sammankopplade utrymmen per linje, en i varje ände av membranbassängerna. Det som behövdes som indata för den modell som satts upp för att modellera vattennivån i en bassäng är arean på bassängen. De utrymmen som antas alltid vara vattenfyllda togs inte med i beräkningen. Exempel på sådana utrymmen är rören som sammanbinder RAS-tankarna. Precis som för beräkningen av tunnlarna mellan

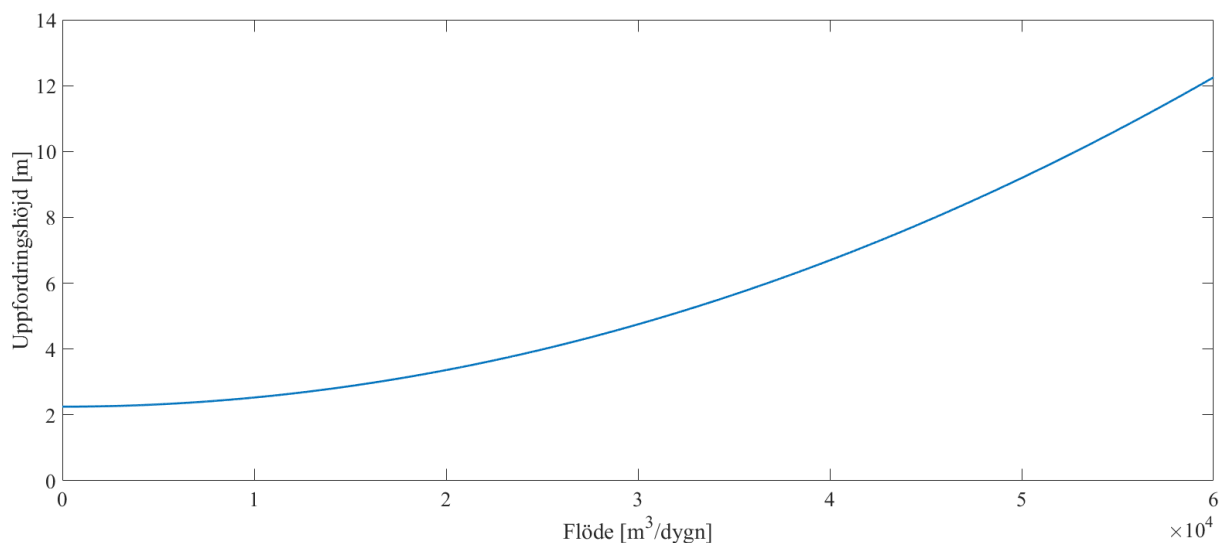
försedimenteringen och TB1 behöves endast en grov uppskattning av arean. Den totala arean per linje uppmättes till 185 m².

3.2.7. Modell över permeatpumparna

De pumpar som, enligt Stockholm Vatten och Avfall, kommer installeras för att hantera permeatflödet är Sulzer SMD 400–350 A. Varje linje kommer ha fyra pumpar, en per membranenhet. Pumparna kan varvtalsregleras och har ett maximalt varvtal på 1 060 rpm. Pumpkurvor för olika varvtal tillhandahålls av Stockholm Vatten och Avfall. Då mottrycket genom membranen varierar mycket över tid beroende på hur igensatta de är, fanns ingen vanlig systemkurva. Istället för en systemkurva fanns ett antal driftsfall markerade som punkter i ett diagram. För att modellen som byggts skulle kunna användas även för detta fall behövdes en systemkurva anpassas till dessa driftsfall. Två punkter som ansågs beskriva ett medel av driftfallen togs fram (tabell 15) och en systemkurva anpassades till dessa punkter (figur 17).

Tabell 15. Parametervärden för uträkning av systemkurvan för permeatpumpstationen

Beteckning	Värde
<i>Static_h</i> (m)	2,24
<i>qref1</i> (m ³ /d)	9 600
<i>qref2</i> (m ³ /d)	53 000
<i>href1</i> (m)	2,5
<i>href2</i> (m)	10
<i>href_sump</i> (m)	3,35



Figur 17. Systemkurva för permeatpumpstationen.

För att göra modellen så enkel som möjligt anpassades en linjär funktion till pumpkurvorna. För att göra den linjära anpassningen togs ett antal parametrar togs fram (tabell 16).

Tabell 16. Parametervärden för uträkning av pumpkurva för permeatpumpstationen

Beteckning	Värde
q_{ref1_pump} (m ³ /d)	38 000
q_{ref2_pump} (m ³ /d)	58 000
h_{ref1_pump} (m)	15
h_{ref2_pump} (m)	10
n_{ref_pump} (rpm)	1 060

Permeatpumparna pumpar det renade vattnet från membranbassängerna och returslammet rinner i sin tur över skibord till RAS-tankarna. Dimensionerna på membranbassängerna samt längden på skiborden uppmättes i en 3D-modell i programmet Navisworks Freedom. Arealen uppmättes till 1 000 m² och längden på skiborden uppmättes till 2,9 m per skibord på en höjd av 3,2 m mätt från botten av bassängen. Totalt finns tolv skibord per linje så den totala skibordslängden blev 34,8 m. Värdet på utströmningkoefficienten, μ , valdes till 0,6 enligt uppgift från Stockholm Vatten och Avfall. Membranbassängerna modellerades på samma sätt som övriga bassänger med skibord (se Kap. 3.2.1.).

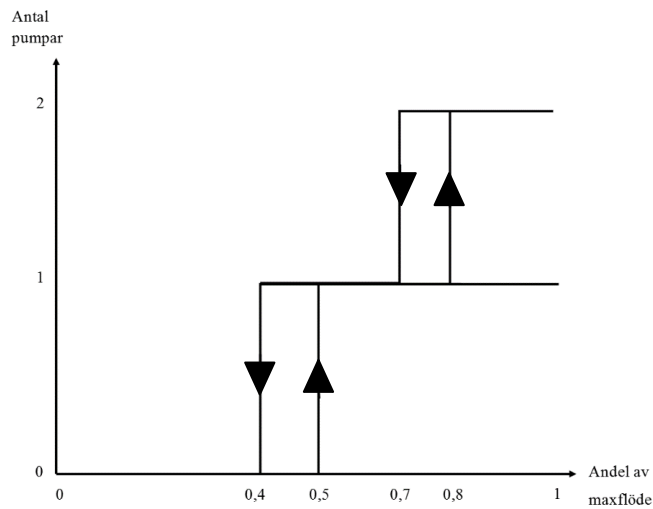
3.3. REGLERING

3.3.1. Generell reglerstrategi

Den generella regleringen som använts för pumpstyrning då en viss nivå i en tank ska hållas är en enkel kaskad med flera PI-regulatorer. Den överordnade nivåregulatorn är av PI-typ som utifrån uppmätt vattennivå skickar ett flödesbörvärde till de underordnade flödesregulatorerna som också är av PI-typ. Flödesregulatorerna skickar sedan vidare ett varvtal som motsvarar flödesbörvärdet till pumparna och utifrån varvtalet ändras förstärkningen i regulatorn, det vill säga regulatorn har parameterstyrning. Som en säkerhet mot integratoruppvridning har alla PI-regulatorer en intern AWD och i de fall då den överordnade regulatorn också är av PI-typ har den även en extern AWD som stänger av integratorn om alla underordnade regulatorer har mättats.

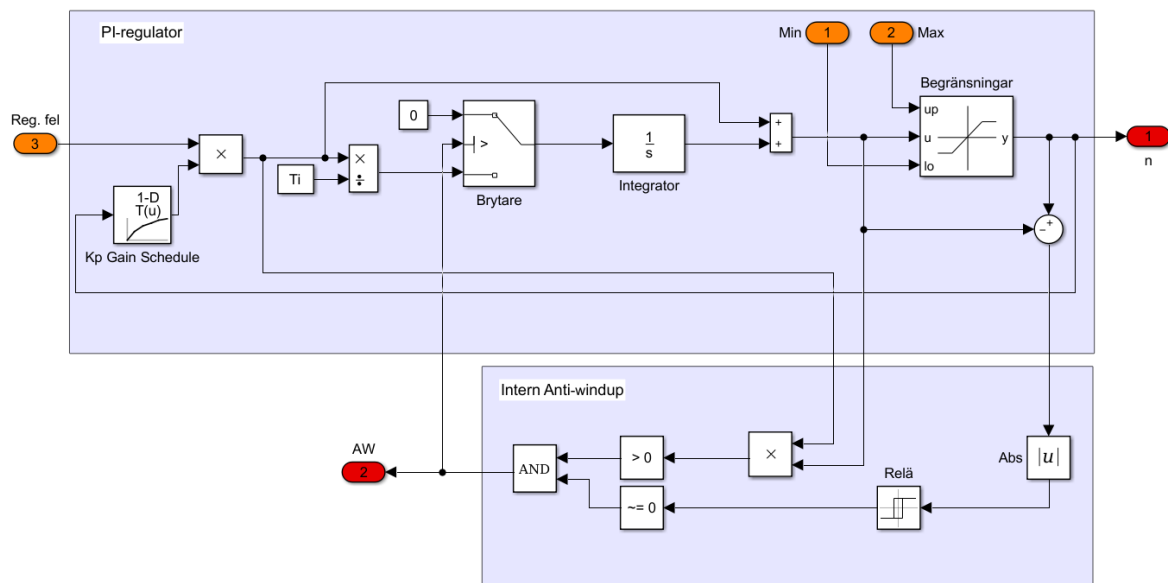
För att börvärdet ska nå rätt antal flödesregulatorer går det via en pumpväljare som räknar ut vilken andel av maxflödet som börvärdet är och den uträknade andelen går vidare till ett relä med användarvald hysteres. Med hysteres menas att det är olika på- och avslagningsnivåer. Ett exempel vid ökande flödesbörvärde skulle kunna vara att en pump går igång när andelen överskrider 0,5 och en till pump när andelen överskrider 0,8. När sedan flödesbörvärdet minskar stängs den andra pumpen av när andelen underskrider 0,7 och den första när andelen underskrider 0,4 enligt figur 18. När ett visst antal pumpar valts ut fördelas börvärdet ut jämnt över lika många flödesregulatorer. Flödesregulatorerna skickar i sin tur vidare varvtal,

motsvarande de mottagna flödesbörvärdena, till pumparna. Flödesregulatorerna återkopplas på det flöde som pumparna genererar och nivåregulatorn återkopplas på vattennivån i slutet av tunneln.



Figur 18. Exempel på hysteres vid val av antal pumpar.

Hur nivåregulatorn och flödesregulatorerna är uppbyggda i Simulink visas i figur 19.



Figur 19. Regulator av PI-typ med villkorlig integrering som intern anti-windup metod implementerat i Simulink.

3.3.2. Styrning av Bromma pumpstation

Vid styrning av pumparna i Bromma pumpstation används en kaskadreglering där den överordnade regulatorn antingen är en nivåregulator av PI-typ eller en typ av kombinerad nivå- och flödesregulator. Vilken överordnad regulator som användes berodde på vad som skulle uppnås med styrningen. De underordnade regulatorerna som styr själva pumparna är flödesregulatorer som även de är av PI-typ. Dessa saknar parameterstyrning på grund av att

systemkurvan för detta system är så pass flack. Det är nästan inga friktionsförluster utan det är i princip bara ett högt lyft på 53 m som ska övervinnas. På grund av begränsningar i varvtal och flöden infördes en intern AWD för flödesregulatorerna samt nivåregulatorn och för fallen med nivåregulator som överordnad regulator även en extern AWD. Regulatorparametrar för flödesregulatorerna samt nivåregulatorn togs fram med lambdametoden. Under konstant vattennivå skickades ett varvtalssteg till en isolerad pumpmodell och det utgående flödet sparades. Från detta stegsvar sparades regulatorparametrar som användes i flödesregulatorerna i alla simuleringar (tabell 17).

Tabell 17. Regulatorparametrar som togs fram med lambdametoden för flödesregulatorerna i Bromma pumpstation

Beteckning	Värde
Proportionell förstärkning $K_p \times 10^4$	0,47193
Integrationstid (d) T_i	0,0007

När flödesregulatorerna var inställda användes hela modellen över pumparna med tillhörande flödesregulatorer och pumpväljare samt Brommatunneln för att ställa in regulatorparametrarna i nivåregulatorn. Detta gjordes genom att ett flödessteg skickades in till systemet och den utgående nivån sparades. Från stegsvaret sparades sedan regulatorparametrar som senare användes i de fall den överordnade regulatorn var en nivåregulator (tabell 18).

Tabell 18. Regulatorparametrar som togs fram med lambdametoden för nivåregulatorn i Bromma pumpstation

Beteckning	Värde
Proportionell förstärkning, $K_p \times 10^6$	1,452837
Integrationstid (d), T_i	0,0652

Hur den överordnade regulatorn utformades för de fall utan nivåreglering beskrivs i kapitel 3.4 om utjämning i Brommatunneln.

3.3.3. Styrning av inloppspumparna till biosteget

För styrningen av inloppspumparna till biosteget användes kaskadreglering med en nivåregulator som överordnad och en flödesregulator per pump som underordnade. Nivåregulatorn och flödesregulatorerna som togs fram var PI-regulatorer (figur 19). Eftersom det finns begränsningar i både hur stora flödesbörvärden som nivåregulatorn kan skicka och maximala varvtal som pumparna klarar infördes en AWD. Då pumpmodellen inte är linjär användes parameterstyrning för flödesregulatorerna. För att ta fram regulatorparametrar till nivå- och flödesregulatorerna användes lambdametoden. Först isolerades pumpmodellen som tagits fram för inloppspumparna och ett steg i varvtalet in i pumpmodellen gjordes och flödet

registrerades. Under steget hölls vattennivån konstant. Parameterstyrningen kräver olika uppsättningar regulatorparametrar för olika arbetspunkter varför steg utfördes för flera olika varvtalsintervall mellan 20 Hz och 50 Hz (Bilaga A). Parametern p i ekvation (14) sattes till två för att få en medelsnabb regulator. Stegsvaren gav en uppsättning regulatorparametrar som sedan användes i de tre flödesregulatorerna för inloppspumparna till biosteget (tabell 19).

Tabell 19. Regulatorparametrar som togs fram med lambdametoden för flödesregulatorerna vid inloppet till biosteget

Arbetsområde (Hz)	$K_p \times 10^4$	T_i (d)
20–25	3,5162	0,0007
25–30	3,8285	0,0007
30–35	4,0064	0,0007
35–40	4,1322	0,0007
40–45	4,2088	0,0007
45–50	4,2735	0,0007

Efter att inställningen av flödesregulatorerna var klar behövdes regulatorparametrar för nivåregulatorn tas fram. Hela modellen över inloppspumpstationen med inloppspumpar och den tank som modellerar tunnlarna mellan försedimenteringen och TB1 användes. Ett konstant inflöde på 6 m³/s in till modellen över tanken användes. Därefter utfördes ett steg i flödesbörvärdet till flödesregulatorerna från 6 m³/s till 5 m³/s och nivån i tanken registrerades. Eftersom systemet är en integrerande process rampades nivån upp tills att den nådde skibordskanten och stabiliserades. Lutningen på nivåökningen, tidsfördröjningen och amplituden på steget användes sedan för att ta fram regulatorparametrar med lambdametoden (Bilaga A). De slutgiltiga parametrarna ses i tabell 20.

Tabell 20. Regulatorparametrar som togs fram med lambdametoden för nivåregulatorn vid inloppet till biosteget

Beteckning	Värde
Proportionell förstärkning, $K_p \times 10^4$	9,1402
Integrationstid (d), T_i	0,0314

För att snabbare kunna reglera bort störningar i det inkommande flödet och därmed kunna hålla nivån i TB1 jämnare och samtidigt ha en långsam regulator infördes en framkoppling. Framkopplingen var på det sammanlagda inflödet från Bromma pumpstation, Farsta/Årsta och Danviken/Nacka. Framkopplingen fick först gå igenom ett lågpasfilter för att filtrera bort de allra snabbaste variationerna i inflödet. Lågpasfiltret var av första ordningen och hade en

tidskonstant, τ , på 15 minuter ($\approx 0,01$ dagar). När framkopplingen införts modifierades regulatorparametrarna för att få en långsammare regulator. Det som gjordes var att minska den proportionella delen K_p och öka integrationstiden T_i . De slutgiltiga parametrarna ses i tabell 21.

Tabell 21. Regulatorparametrar för nivåregulatorn vid inloppet till biosteget efter att framkoppling införts

Beteckning	Värde
Proportionell förstärkning, $K_p \times 10^4$	1,0
Integrationstid (d), T_i	0,02

3.3.4. Styrning av permeat- och returslampumparna

För styrningen av permeat- och returslampumparna användes kaskadreglering med en överordnad regulator vars design tagits fram av GE och en flödesregulator per pump som underordnade. Den överordnade regulatorn byggde på att ett så kallat Plant Demand beräknas baserat på inkommande flöde till biosteget och nivån i RAS-tankarna. Plant Demand fungerar som ett flödesbörvärde till de underordnade regulatorerna. Permeatpumparna styrs direkt på Plant Demand medan det för returslampumparna är Plant Demand multiplicerats med en faktor tre enligt beskrivning av GE. De underordnade flödesregulatorerna var typen PI och parameterstyrning baserat styrsignalen infördes. För de underordnade regulatorerna infördes även en AWD men enbart internt då den överordnade regulatorn saknar en integrerande del.

De olika typerna av returslampumpar medförde att två olika uppsättningar regulatorparametrar för flödesregulatorerna behövdes tas fram. Metoden som användes vid framtagandet av parametrarna var lambdametoden. Återigen behövdes ett stegsvar utföras och amplituden på svaret samt stigtiden noterades (Bilaga A). Parametern p i ekvation (14) sattes till två för att få medelsnabba regulatorer. Stegsvaren gav två uppsättningar regulatorparametrar som sedan användes i de totalt 16 flödesregulatorerna (åtta per pumptyp) (tabell 22 och tabell 23).

Tabell 22. Regulatorparametrar som togs fram med lambdametoden för flödesregulatorerna till returslampumparna för linje 1–5

Arbetsområde (Hz)	$K_p \times 10^4$	T_i (d)
25–30	2,1	0,0007
30–35	2,4	0,0007
35–40	2,6	0,0007
40–45	2,8	0,0007
45–50	2,9	0,0007

Tabell 23. Regulatorparametrar som togs fram med lambdametoden för flödesregulatorerna till returslampumparna för linje 6–7

Arbetsområde (Hz)	$K_p \times 10^4$	T_i (d)
25–30	1,9	0,0007
30–35	2,2	0,0007
35–40	2,4	0,0007
40–45	2,5	0,0007
45–50	2,7	0,0007

Även för permeatpumparna användes lambdametoden för att ta fram regulatorparametrar. Eftersom permeatpumparna modellerades för att få en styrsignal med enheten rpm och inte Hz som de andra pumpmodellerna definierades även arbetsområdena i rpm. Utöver att styrsignalen hade en annan enhet än tidigare skiljde sig inte tillvägagångssättet mot tidigare framtagande av regulatorparametrar. Ett stegsvar utfördes och svarets amplitud och stigtid registrerades (Bilaga A). Lambdametoden gav en uppsättning regulatorparametrar som sedan användes i flödesregulatorerna för permeatpumparna (tabell 24).

Tabell 24. Regulatorparametrar som togs fram med lambdametoden för flödesregulatorerna till permeatpumparna

Arbetsområde (rpm)	$K_p \times 10^3$	T_i (d)
500–600	4,6	0,0007
600–700	5,0	0,0007
700–800	5,2	0,0007
800–900	5,4	0,0007
900–1 000	5,5	0,0007
1 000–1 060	5,6	0,0007

Den överordnade regulatorn som beräknar flödesbörvärden till både returslampumparna och permeatpumparna implementerades enligt den design som GE föreslagit. Grunden till regulatordesignen är att styra på ett flytande medelvärde av det inkommande flödet till biosteget. Sedan görs en trimning mot nivån i RAS-tankarna där flödesbörvärdet ökas om nivån är över det satta börvärdet för nivån och minskar om det är under. Designen kan liknas vid en P-regulator som styr på nivå med framkoppling av det inkommande flödet. Hur stor förstärkningen är beror dels på hur nära börvärdet är den maximalt tillåtna nivån, dels en användarvald förstärkning.

Reglerstrategin kan delas upp i två delar: en del som består av det inkommande flödet till biosteget och en del som tar hänsyn till nivån i RAS-tankarna. Mätningen av det inkommande flödet till biosteget filtrerades med ett första ordningens lågpasfilter som när det skrivs som en överföringsfunktion ges av

$$G(S) = \frac{1}{\tau S + 1} \quad (27)$$

där τ är en tidskonstant. Om nivån i RAS-tankarna håller sig inom ett användarbestämt intervall kring ett valt börvärde för nivån sker en kompensering för RAS-nivån enligt:

$$TRIM_{AVE} = \frac{Q_{in,Bio}}{Q_{max}} \times DB1 Flow SP \times (h - h_{ref}) \quad (28)$$

där $Q_{in,Bio}$ är en framkoppling av flödet in i biosteget, Q_{max} är det maximala flödet, $DB1 Flow SP$ är en användarvald förstärkning, h är den uppmätta nivån i RAS-tankarna och h_{ref} är börvärdet för nivån i RAS-tankarna. När nivån stiger över en användarvald nivå ($h > LCL_{HI}$) sker en annan kompensering för RAS-nivån enligt:

$$TRIM_{HI} = DB2 Flow SP \times \frac{(h - LCL_{HI})}{(LCH_{HI} - LCL_{HI})} \quad (29)$$

där $DB2 Flow SP$ är en användarvald förstärkning, LCL_{HI} är den undre nivån för $TRIM_{HI}$ och LCH_{HI} är den övre nivån för $TRIM_{HI}$. Då flödesbörvärdet endast beräknas enligt ekvation (29) då $h > LCL_{HI}$ blir täljaren positiv och eftersom LCH_{HI} alltid väljs som en högre nivå än LCL_{HI} blir hela nivåkorregeringen alltid positiv. Motsvarande händer när nivån i RAS-tankarna sjunker under en användarvald nivå ($h < LCH_{LO}$) och kompenseringen beräknas enligt:

$$TRIM_{LO} = DB2 Flow SP \times \frac{(h - LCH_{LO})}{(LCH_{LO} - LCL_{LO})} \quad (30)$$

där LCL_{LO} är den undre nivån för $TRIM_{LO}$ och LCH_{LO} är den övre nivån för $TRIM_{LO}$. Då flödesbörvärdet endast beräknas enligt ekvation (30) då $h < LCH_{LO}$ blir täljaren negativ och eftersom LCH_{LO} alltid väljs som en högre nivå än LCL_{LO} blir alltid hela nivåkorregeringen negativ. Den totala beräkningen av Plant Demand består alltså av det inkommande flödet till biosteget med en extra kompensering för nivån i RAS-tankarna. Vilken kompensering det blir beror på nivån i RAS-tankarna där Plant Demand ökas om nivån är hög och minskas om nivån är låg. En implementering av styrningen i Simulink samt de inställningar som användes kan ses i Bilaga B.

3.4. UTJÄMNING I BROMMATUNNELN OCH DRIFTFALL FÖR BROMMA PUMPSTATION

För att kunna utvärdera olika sätt att utjämna flödet i Bromma pumpstation användes nivåstyrning som referens för alla driftfall. Inspiration för de olika sätten att utjämna flödet i Bromma pumpstation för alla driftfall hämtades från ett PM från Stockholm Vatten och Avfall.

3.4.1. Dygnsutjämning

För att möjliggöra en utjämning av flödet över dygnet in till verket behöver det pumpade flödet från Brommatunneln vara det inverterade flödet från Danviken/Nacka och Farsta/Årsta kring ett önskat flöde till biosteget. En reglerstrategi sattes upp med syfte att försöka hålla flödet till biosteget så jämnt som möjligt utan att vattennivån i tunneln blir för hög. Reglerstrategin kan delas upp i två delar: en del som försöker hålla ett jämnt flöde till biosteget och en del som försöker hålla vattennivån i tunneln kring ett börvärde. Den största delen av flödesbörvärdet, $Q_{ref,utj}$, som ämnar att jämna ut flödet ges av

$$Q_{ref,utj} = Q_{Bio} - Q_{HIN} - Q_{SIN} \quad (31)$$

där Q_{Bio} är önskat flöde till biosteget, Q_{HIN} är uppmätta inflödet från Danviken/Nacka och Q_{SIN} är uppmätta inflödet från Farsta/Årsta. Delen av reglerstrategin som försöker hålla nivån vid ett visst börvärde lades sedan till. Om nivån är över börvärdet ökas flödesbörvärdet och om nivån är under minskas det. Flödesbörvärdet beräknas då enligt:

$$Q_{ref} = Q_{ref,utj} + K \frac{h-h_{ref}}{h_{max}-h_{ref}} \quad (32)$$

där K är en parameter som avgör hur mycket flödesbörvärdet påverkas av nivåändringar, h är den uppmätta nivån, h_{ref} är börvärdet för nivån och h_{max} är den eftersträlvade maximala nivån. Då syftet med styrningen är att försöka jämna ut flödet, måste nivån tillåtas att variera och parametern K valdes därför som ett relativt litet tal jämfört med den del som utjämnar flödet. Valet av ett litet K innebär att nivån kan stiga kraftigt vid större regnepisoder eller sjunka vid längre torrväder. Med inspiration från GE utökades reglerstrategin med en del som reglerar aggressivare när nivån stiger över eller sjunker under en vald nivå. När nivån blir hög ($h > h_{min,H}$) beräknas flödesbörvärdet enligt:

$$Q_{ref,H} = Q_{ref,utj} + K_H \frac{h-h_{min,H}}{h_{max,H}-h_{min,H}} \quad (33)$$

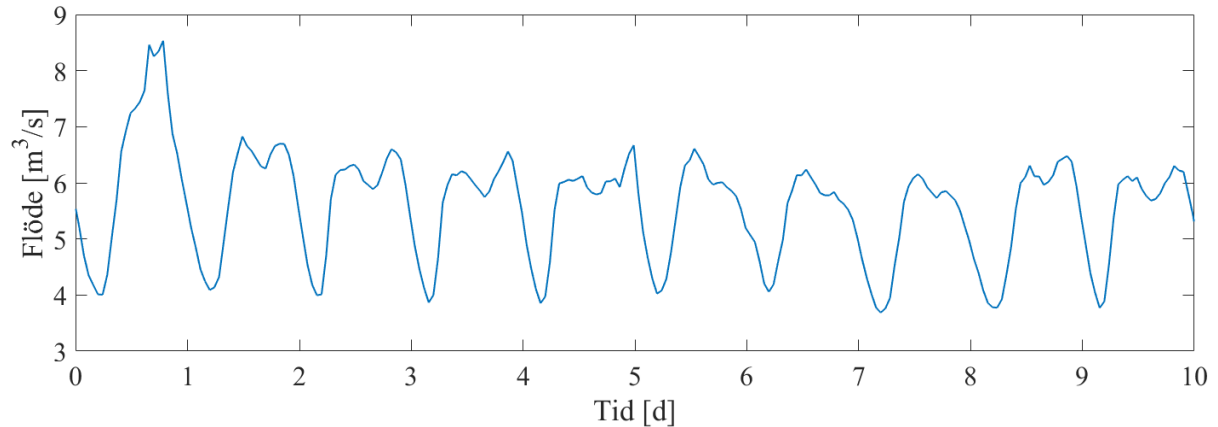
där K_H är förstärkningen, $h_{max,H}$ är den maximalt tillåtna nivån och $h_{min,H}$ är nivån där den aggressivare styrningen slår på. Då flödesbörvärdet endast beräknas enligt ekvation (33) då $h > h_{min,H}$ blir täljaren positiv och eftersom $h_{max,H}$ alltid väljs som en högre nivå än $h_{min,H}$ blir alltid hela nivåkorrigeringen positiv.

När nivån blir låg ($h < h_{max,L}$) beräknas flödesbörvärdet enligt:

$$Q_{ref,L} = Q_{ref,utj} + K_L \frac{h-h_{max,L}}{h_{max,L}-h_{min,L}} \quad (34)$$

där K_L är förstärkningen, $h_{min,L}$ är den minimalt tillåtna nivån och $h_{max,L}$ är nivån där den aggressivare styrningen slår på. Då flödesbörvärdet endast beräknas enligt ekvation (34) då $h < h_{max,L}$ blir täljaren negativ och eftersom $h_{max,L}$ alltid väljs som en högre nivå än $h_{min,L}$ blir alltid hela nivåkorrigeringen negativ. En implementering av styrningen för flödesutjämning kan ses i Bilaga B.

För att studera skillnaden mellan att nivåstyra Bromma pumpstation och att flödesutjämna behövdes simuleringar med den sammansatta modellen genomföras. Ett lämpligt indata valdes ut då dygnsvariationerna i det inkommande flödet var tydliga och inga större flödeshöjningar skedde (figur 20).



Figur 20. Totalt inflöde till Henriksdals reningsverk under tio dagar som representerar dygnsvariationer.

Två olika reglerstrategier för att flödesutjämna testades. Den ena använde den reglerstrategi som beskrivits ovan i ekvation (31)–(34). Parametrarna som behövdes i styrningen togs fram genom en iterativ process där simuleringar genomfördes och resultatet analyserades. Målet var att hålla en nivå i tunneln som var låg samtidigt som det fanns tillräckligt med spelrum för att kunna utjämna flödet. På grund av att det var högre flöde i början av perioden som valts ut än det var i slutet ändrades Q_{Bio} under simuleringen. Ändringen gjordes som ett steg vid den fjärde simuleringsdagen där flödesbörvärdet ändrades från $6 \text{ m}^3/\text{s}$ till $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Parametrarna som slutligen användes ses i tabell 25.

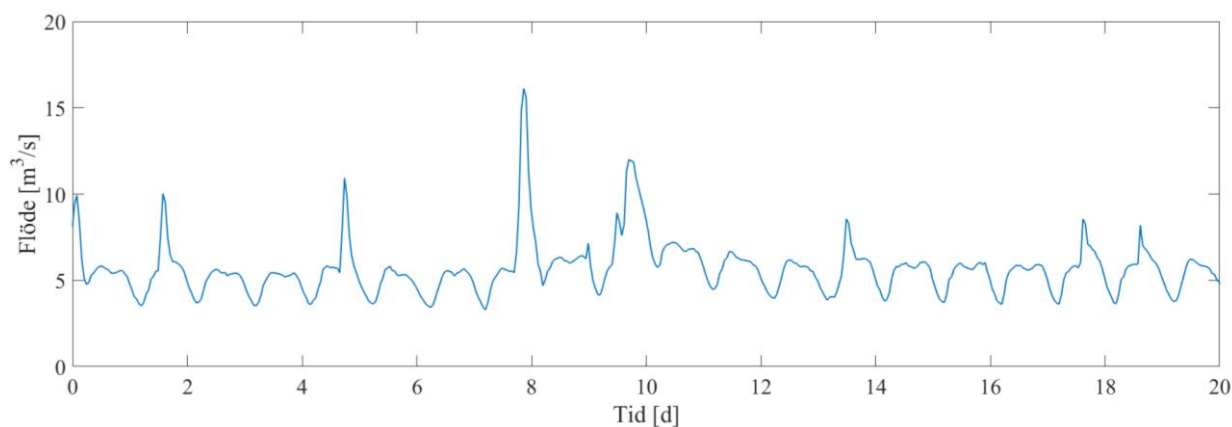
Tabell 25. Parametrar som användes vid utjämning dygnsvariationer

Beteckning	Värde
Q_{Bio} (dag 0–4) (m^3/d)	518 400
Q_{Bio} (dag 4–10) (m^3/d)	466 560
K (m^3/d)	207 360
K_L (m^3/d)	86 400
K_H (m^3/d)	172 800
h_{ref} (m)	2,5
h_{max} (m)	10
$h_{max,L}$ (m)	0,2
$h_{max,H}$ (m)	9
$h_{min,L}$ (m)	0
$h_{min,H}$ (m)	7

Den andra reglerstrategin som togs fram var en strategi som gick ut på att utjämna flödet så mycket att det gick att koppla ur den nivåregulator som annars styr inloppspumparna. När nivåregulatorn sedan kopplats ur sattes istället ett fast flöde till biosteget. Urkopplingen av nivåregulatorn innebar att nivån i TB1 fick variera fritt. För att variationen i nivån inte skulle bli allt för stor behövde det inkommande flödet vara maximalt utjämnat. Om korrigeringen för nivå i Brommatunneln användes vid styrningen av flödesbörvärdet till Bromma pumpstation blev inte flödet tillräckligt jämnt. Det som gjordes då var att koppla bort nivåkorrigeringen och enbart styra på $Q_{ref,utj}$ som beräknas enligt ekvation (31). För att detta skulle fungera behövdes den initiala volymen i tunneln vara tillräckligt stor så att tunneln inte blev tom, eftersom möjligheten att utjämna då minskar. Den överordnade styrningen av Bromma pumpstation krävde enbart en parameter och det var Q_{Bio} . Q_{Bio} sattes till samma som i den tidigare beskrivna reglerstrategin och eftersom styrningen av inloppspumparna till biosteget nu skulle ske med fast flöde sattes även det flödesbörvärdet till Q_{Bio} (tabell 25).

3.4.2. Tillfälligt förhöjt flöde

Ett scenario som var av intresse att undersöka var om det sker ett tillfälligt förhöjt flöde. Sådana tillfälligt förhöjda flöden kan uppstå vid till exempel ett skyfall. Flera sådana episoder fanns i det indata som skapats, varav en period valdes ut (figur 21).



Figur 21. Totalt inflöde till Henriksdals reningsverk under 20 dagar som representerar tillfälligt förhöjda flöden.

En reglerstrategi togs fram med syfte att dämna pulserna i Brommatunneln utan att nivån överskrider 10 m. Samma struktur på regleringen och mestadels samma parametrar användes som vid utjämning av dygnsvariationer. Den enda skillnaden var att flödesbörvärdet Q_{Bio} sänktes något då inflödet generellt var lägre under denna period jämfört med den som användes vid dygnsutjämning (tabell 26).

Tabell 26. Parametrar som användes vid utjämning av ett tillfälligt förhöjt flöde

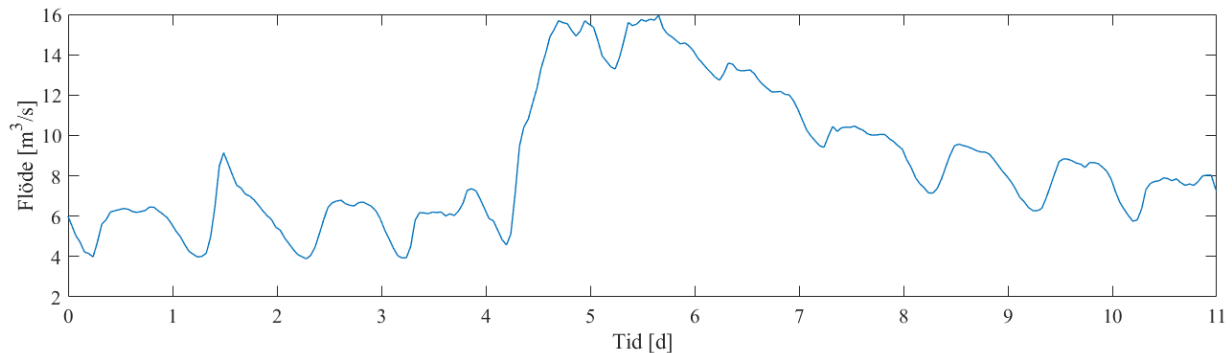
Beteckning	Värde
Q_{Bio} (m ³ /d)	414 720
K (m ³ /d)	207 360
K_L (m ³ /d)	86 400
K_H (m ³ /d)	172 800
h_{ref} (m)	2,5
h_{max} (m)	10
$h_{max,L}$ (m)	0,2
$h_{max,H}$ (m)	9
$h_{min,L}$ (m)	0
$h_{min,H}$ (m)	7

3.4.3. Långvarigt förhöjda flöden

Vid långvarigt förhöjda flöden är det viktigast att dämna det initiala flödet, det vill säga den första pulsen som drar med sig mycket näringsämnen och föroreningar. Om inflödet är så pass högt att förbigång av biosteget är oundvikligt efter att det initiala flödet dämmts borde

reningsverket ställas om till höglödesrening. Om så är fallet borde Bromma pumpstation styras så att bräddning vid Sickla undviks eller i alla fall minimeras.

Det inflöde som användes för simulering av långvarigt förhöjda flöden innehöll kraftigt förhöjda flöden som varade i flera dagar (figur 22). Detta inflöde var omöjligt att utjämna utan att orimligt höga nivåer i tunneln erhöles, varför även två andra sätt att utjämna flödet också utvärderades. Beskrivningar av dessa följer nedan.



Figur 22. Totalt inflöde till Henriksdals reningsverk under elva dagar som representerar långvarigt förhöjda flöden.

I driftfallet utjämning med maxnivå antogs att nivån i tunneln fick vara max 10 meter. För att under denna premiss undvika bräddning i så stor utsträckning som möjligt användes följande reglerstrategi. Från början styrdes pumparna på samma sätt som vid dygnsutjämning. Vid pulsen styrdes pumparna istället av en nivåregulator och när pulsen försvunnit gick regleringen tillbaka till att flödesreglera som vid dygnsutjämning igen. När nivåstyrning alterneras med flödesutjämning finns en risk att styrningen hoppar mellan de olika regleringarna så att det utgående pumpade flödet blir svängigt. Om till exempel en viss nivå i tunneln skulle utgöra gränsen för vilken reglering som ska aktiveras riskerar nivån att fastna runt detta värde för att regleringen byter styrning så fort nivån hamnar över eller under gränsen. För att undvika detta togs följande logik fram som bestämmer när respektive reglering ska vara aktiv. Flödesutjämningen är aktiv tills nivån i tunneln överstiger 9,5 meter och därefter nivåregleras pumparna så att nivån hålls runt 10 meter. Regleringen går tillbaka till flödesutjämning först när det finns utrymme att tömma tunneln utan att behöva förbilda vid biosteget enligt

$$Q_{max,bio} - SIN - HIN > Q_{ref} \quad (35)$$

där $Q_{max,bio}$ är det maximala flödet genom biosteget, SIN är inflödet från Farsta/Årsta, HIN är inflödet från Danviken/Nacka och Q_{ref} är flödesbörvärdet som skickas till de underordnade flödesregulatorerna.

Parametrarna för den överordnade flödesregulatorn liknar de som användes för dygnsvariationer med skillnaderna att flödesbörvärdet till biosteget ändrades beroende på ett nytt inflöde och de övre nivågränserna togs bort på grund av att en nivåregulator tog över styrningen vid höga nivåer (tabell 27). Parametrarna för nivåregulatorn var detsamma som togs fram tidigare (tabell 18).

Tabell 27. Parametrar som användes i den överordnade flödesregulatorn vid utjämning av långvarigt förhöjda flöden med maxnivå 10 m i Brommatunneln

Beteckning	Värde
Q_{Bio} (dag 0–5) (m ³ /d)	444 960
Q_{Bio} (dag 5–11) (m ³ /d)	570 240
K (m ³ /d)	207 360
K_L (m ³ /d)	86 400
h_{ref} (m)	0,5
h_{max} (m)	10
$h_{max,L}$ (m)	0,2
$h_{min,L}$ (m)	0

I fallet utjämning utan maxnivå prioriterades en minskning av bräddning över att hålla max 10 m i Brommatunneln. Nivåregulatorn kopplades bort helt och istället återställdes de övre nivågränserna i den överordnade flödesregulatorn. För att undvika bräddning i Sickla gjordes ett tillägg till den överordnade flödesregulatorn. Den begränsning som tidigare syftade till att minska förbigången av biosteget ändrades så att bräddning i Sickla kunde undvikas. Tömning begränsades så att maxflödet till försedimenteringen i Sickla inte överskreds enligt

$$Q_{max,Sickla} - SIN > Q_{ref} \quad (36)$$

där $Q_{max,Sickla}$ är maxflödet till försedimenteringen i Sickla, SIN är inflödet från Farsta/Årsta och Q_{ref} är flödesbörvärdet som skickas till de underordnade flödesregulatorerna.

Parametrarna för den överordnade flödesregulatorn liknar de som användes för långvarigt förhöjda flöden med maxnivå i tunneln med skillnaden att övre nivågränser lagts till (tabell 28).

Tabell 28. Parametrar som användes i den överordnade flödesregulatorn vid utjämning av långvarigt förhöjda flöden utan en maxnivå i Brommatunneln

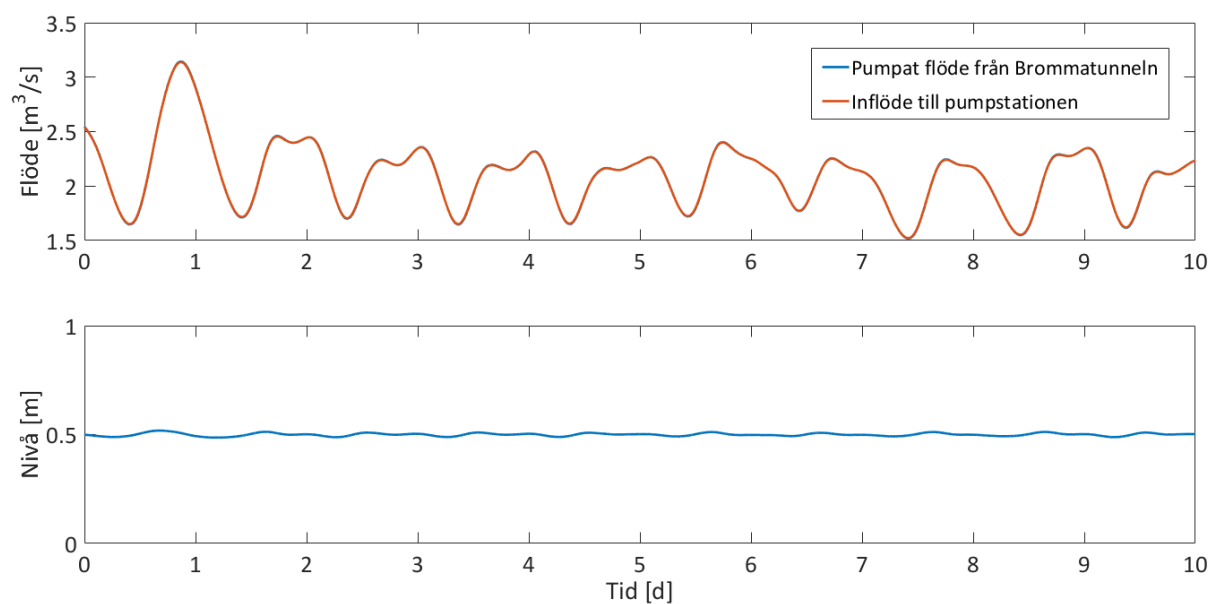
Beteckning	Värde
Q_{Bio} (dag 0–5) (m ³ /d)	444 960
Q_{Bio} (dag 5–11) (m ³ /d)	648 000
K (m ³ /d)	207 360
K_L (m ³ /d)	86 400
K_H (m ³ /d)	172 800
h_{ref} (m)	0,5
h_{max} (m)	10
$h_{max,L}$ (m)	0,2
$h_{max,H}$ (m)	7
$h_{min,L}$ (m)	0
$h_{min,H}$ (m)	5

4. RESULTAT

4.1. DYGNSUTJÄMNING

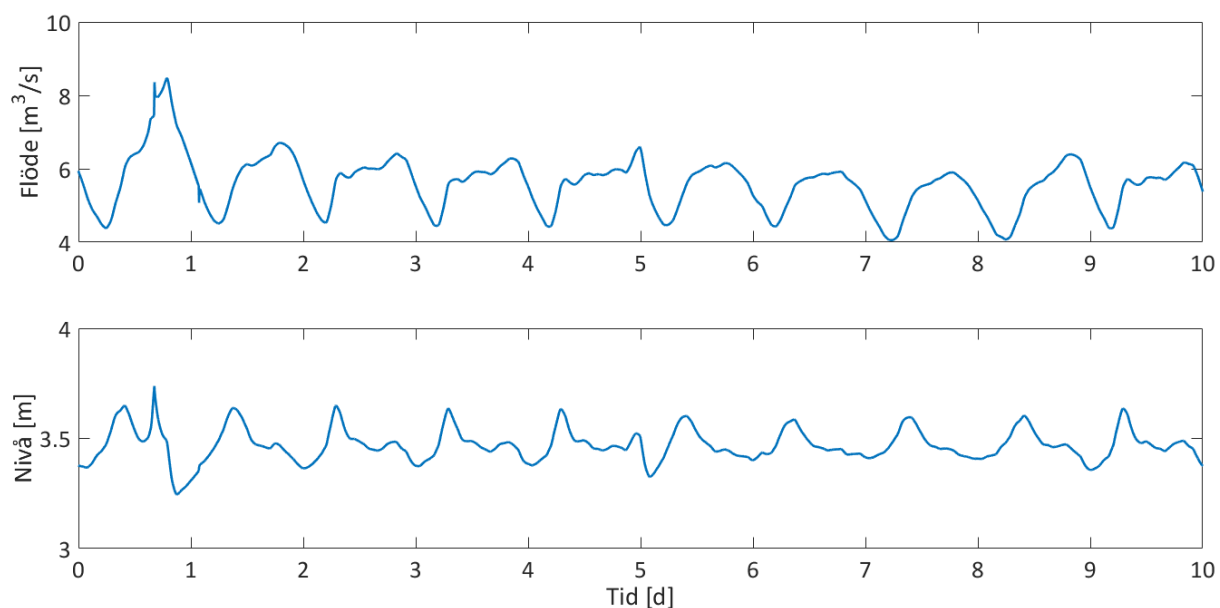
4.1.1. Ingen utjämning i Brommatunneln

Fallet då ingen utjämning i Brommatunneln användes resulterade i att Bromma pumpstation följer det inkommande flödets tydliga dygnsvariationer (figur 23). Nivån hålls jämnt vid sitt börvärde på 0,5 m (figur 23).



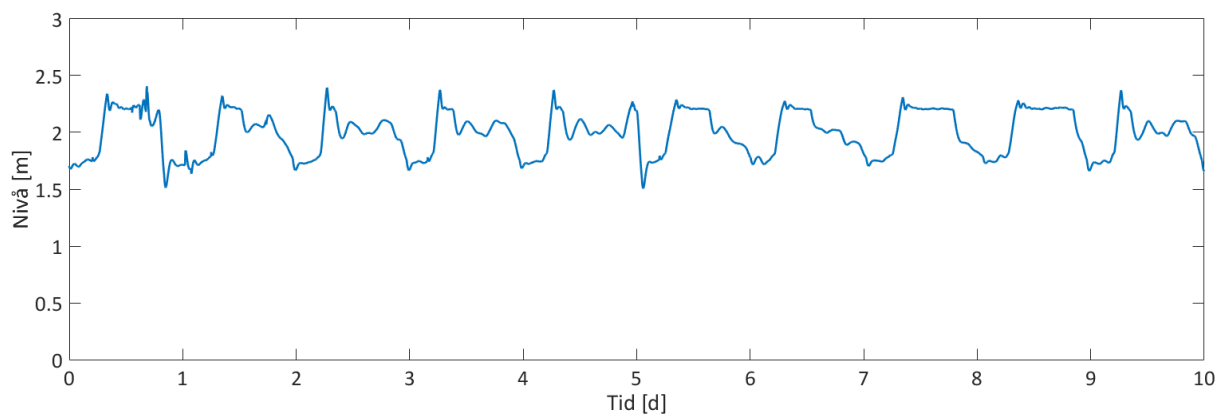
Figur 23. In- och utflödet från Bromma pumpstation (överst) och nivån i tunneln (underst) i fallet utan utjämning i Brommatunneln.

Flödet till biosteget följer det totala inflödets dygnsvariationer till reningsverket (jfr. figur 20) och nivån i TB1 varierar några decimeter kring sitt börvärde på 3,47 m (figur 24).



Figur 24. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet utan utjämning i Brommatunneln.

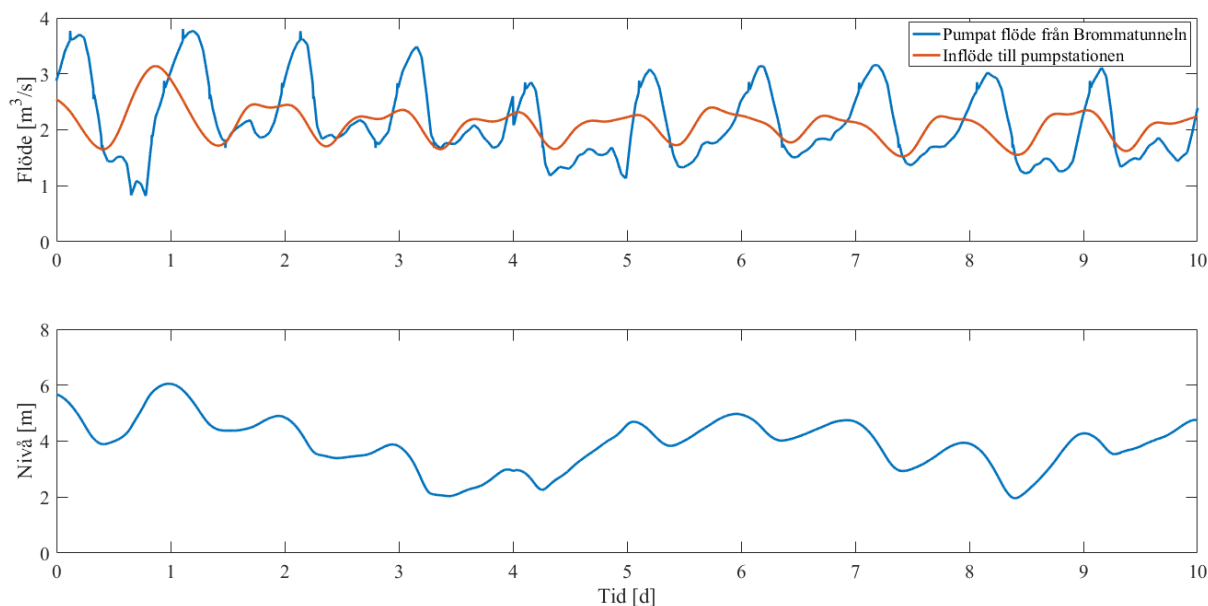
Nivån i RAS-tankarna varierar med några decimeter kring börvärdet på 2 m (figur 25). Även här syns tydliga dygnsvariationer.



Figur 25. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet utan utjämning i Brommatunneln.

4.1.2. Flödesutjämning i Brommatunneln och nivåreglering av inloppspumparna till biosteget

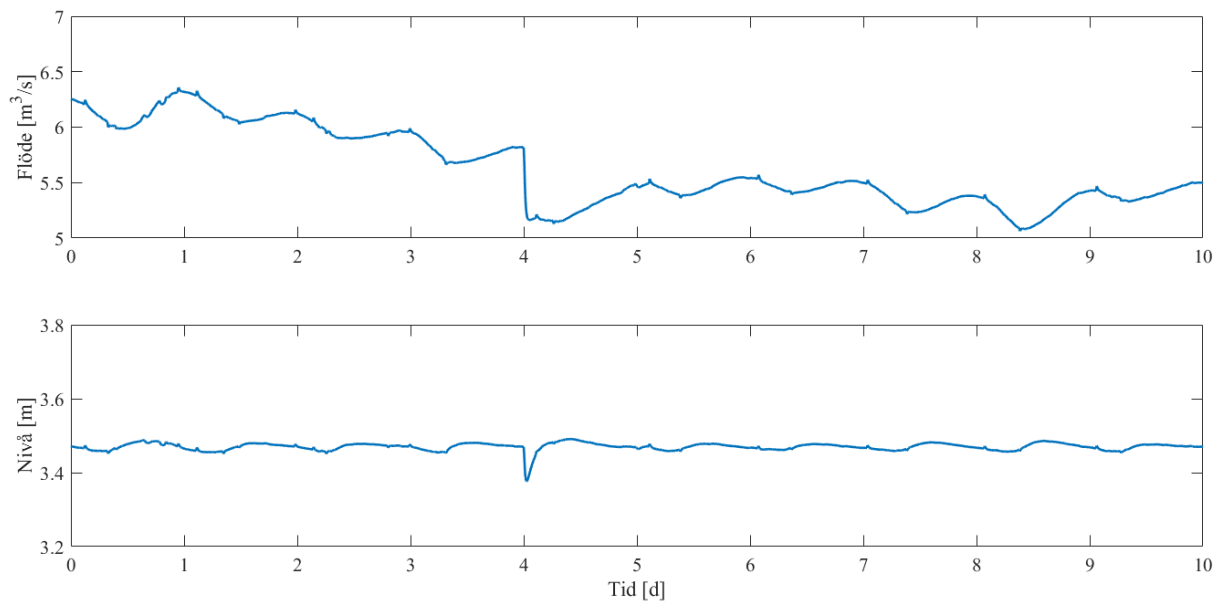
Vid utjämning av dygnsvariationer med nivåkorrigering i tunneln följer det pumpade flödet från Brommatunneln inversen av inflödena från Danviken/Nacka och Farsta/Årsta (figur 26). Det pumpade flödet varierar mer än det inkommande flödet till pumpstationen. När antalet pumpar som är i drift ändras resulterar det i små toppar i det pumpade flödet vilket exempelvis kan observeras på de tre första flödestopparna. De första fyra dagarna hålls ett högre flödesbörvärde vilket gör att nivån i tunneln har en sjunkande trend. Vid den fjärde simuleringsdagen sänks flödesbörvärdet vilket resulterar i en ökande vattennivå fram till den femte simuleringsdagen (figur 26). Efter den femte simuleringsdagen stabiliseras nivån kring 4 m.



Figur 26. In- och utflöde från Bromma pumpstation (överst) och nivån i tunneln (underst) i fallet med dygnsutjämning i Brommatunneln med nivåkorrigering i tunneln.

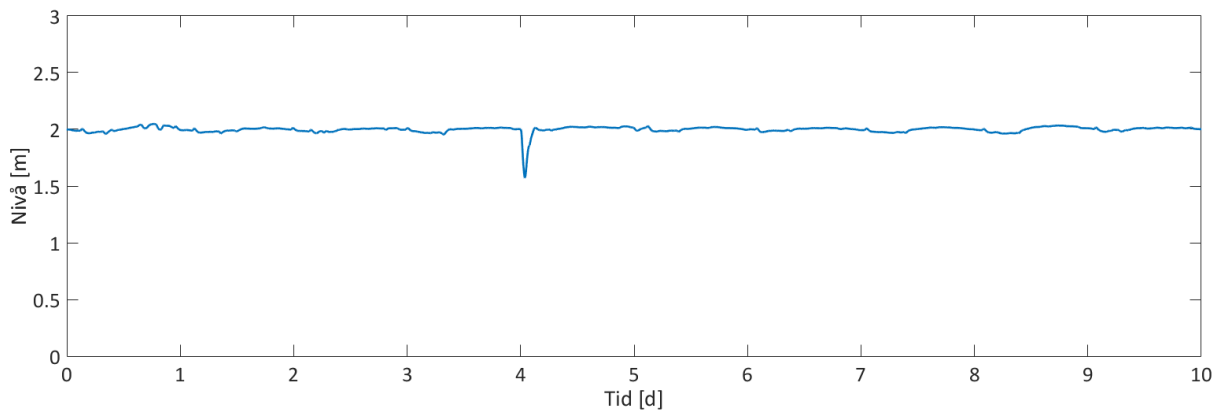
Inloppspumparna till biosteget styrs på nivå med ett börvärde på 3,47 m. Ändringen av flödesbörvärdet till styrningen av Bromma pumpstation syns tydligt som en sänkning av flödet

och nivån i TB1 vid den fjärde simuleringsdagen (figur 27). Utjämningen av flödet i Brommatunneln resulterar i ett jämnare flöde till biosteget och en stabilare nivå i TB1 (jfr. figur 24).



Figur 27. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet med dygnsutjämning i Brommatunneln med nivåkorrigering i tunneln och när inloppspumparna till biosteget nivåregleras.

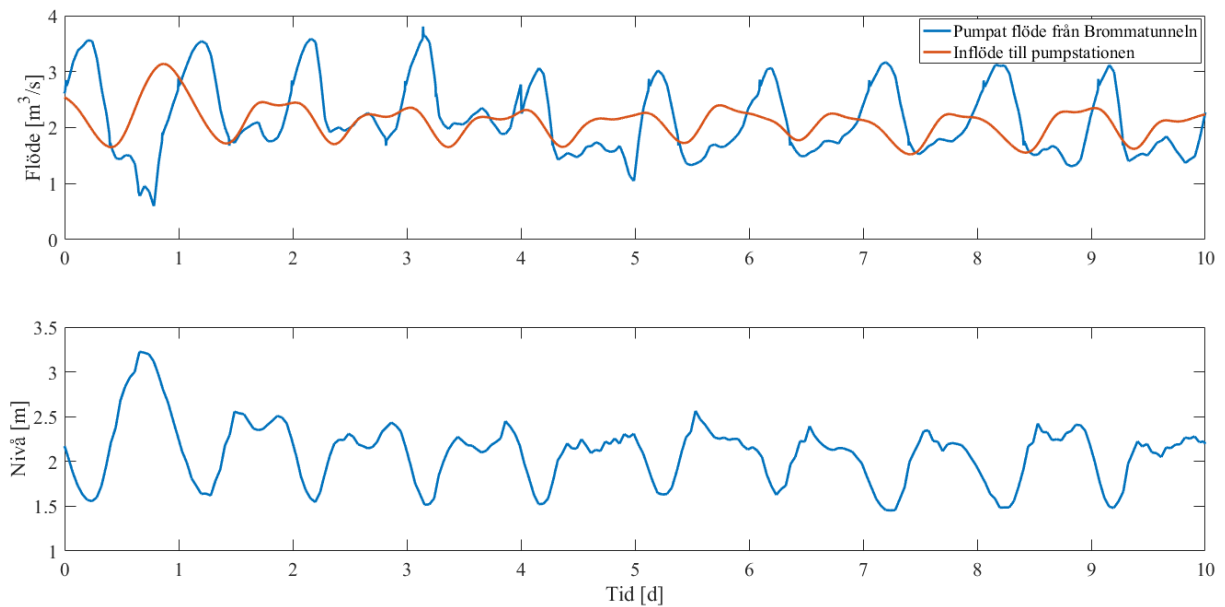
Nivån i RAS-tankarna varierar med några centimetrar runt börvärdet på 2 m med undantag för en nivåsenkning på några decimeter vid den fjärde simuleringsdagen (figur 28).



Figur 28. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet med dygnsutjämning i Brommatunneln med nivåkorrigering i tunneln och när inloppspumparna till biosteget nivåregleras.

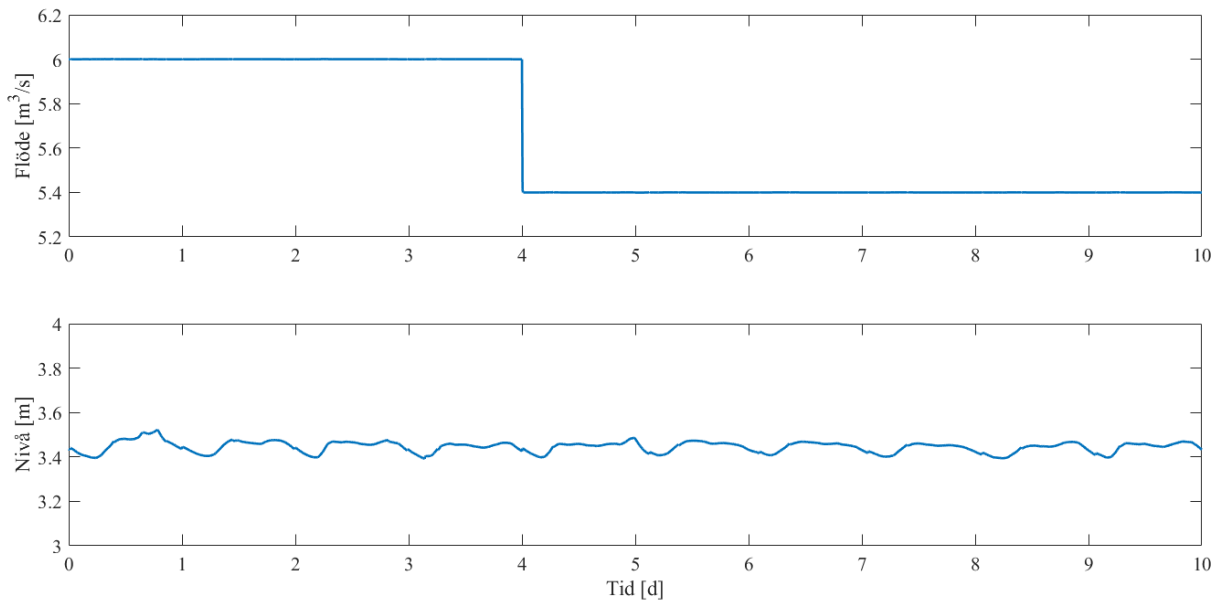
4.1.3. Flödesutjämning i Brommatunneln och fast flöde till biosteget

I fallet med dygnsutjämning utan nivåkorrigering i tunneln följer det pumpade flödet från Brommatunneln inversen av inflödena från Danviken/Nacka och Farsta/Årsta (figur 29). Nivån i tunneln följer ungefär inversen av det pumpade flödet från Brommatunneln och nivån varierar med 1–1,5 m.



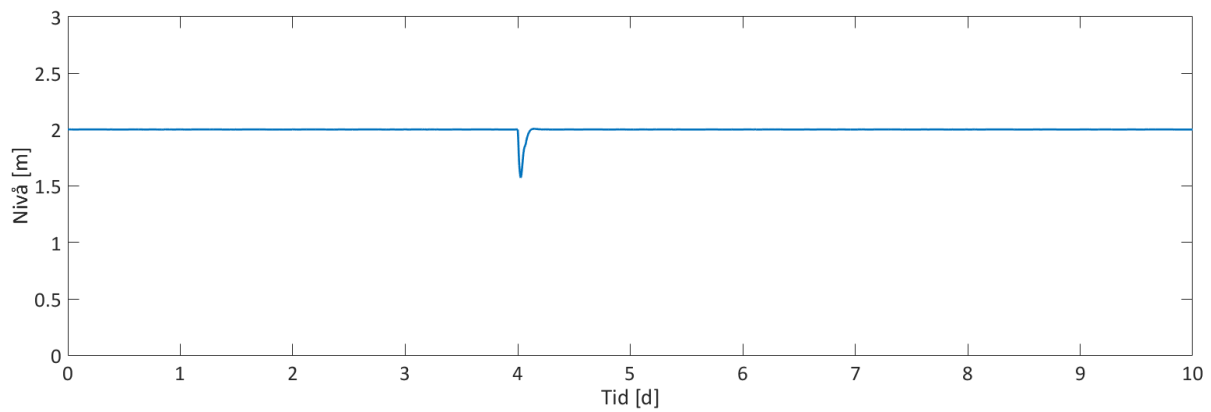
Figur 29. In- och utflöde från Bromma pumpstation (överst) och nivån i tunneln (underst) i fallet med dygnsutjämning i Brommatunneln utan nivåkorrigering i tunneln.

I fallet med dygnsutjämning utan nivåkorrigering i tunneln hålls flödet till biosteget helt jämnt vid börvärdet på $6 \text{ m}^3/\text{s}$ för att vid den fjärde simuleringsdagen hållas helt jämnt vid det nya börvärdet på $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (figur 30). Nivån i TB1 varierar med någon decimeter kring börvärdet på 3,47 m.



Figur 30. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet med dygnsutjämning i Brommatunneln utan nivåkorrigering i tunneln och inloppspumparna till biosteget styrs med fast flöde.

I fallet med dygnsutjämning utan nivåkorrigering i tunneln hålls nivån i RAS-tankarna helt jämnt på 2 m undantaget en nivåsänkning på några decimeter vid den fjärde simuleringsdagen (figur 31).

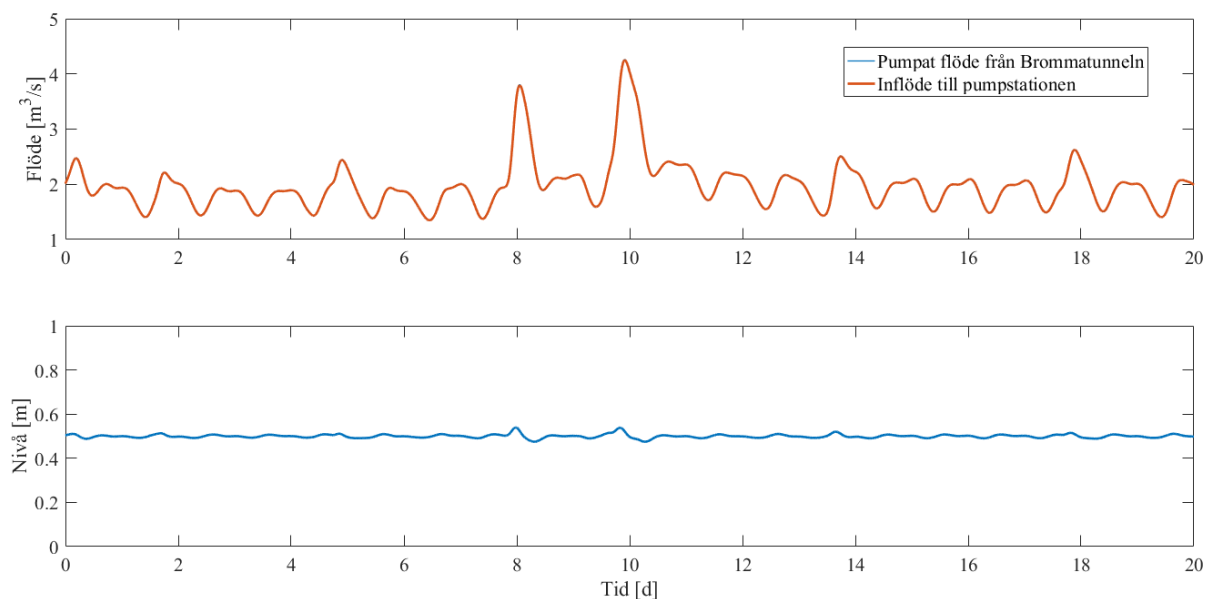


Figur 31. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet med dygnsutjämning i Brommatunneln utan nivåkorrigering i tunneln och inloppspumparna till biosteget styrs med fast flöde.

4.2. TILLFÄLLIGT FÖRHÖJT FLÖDE

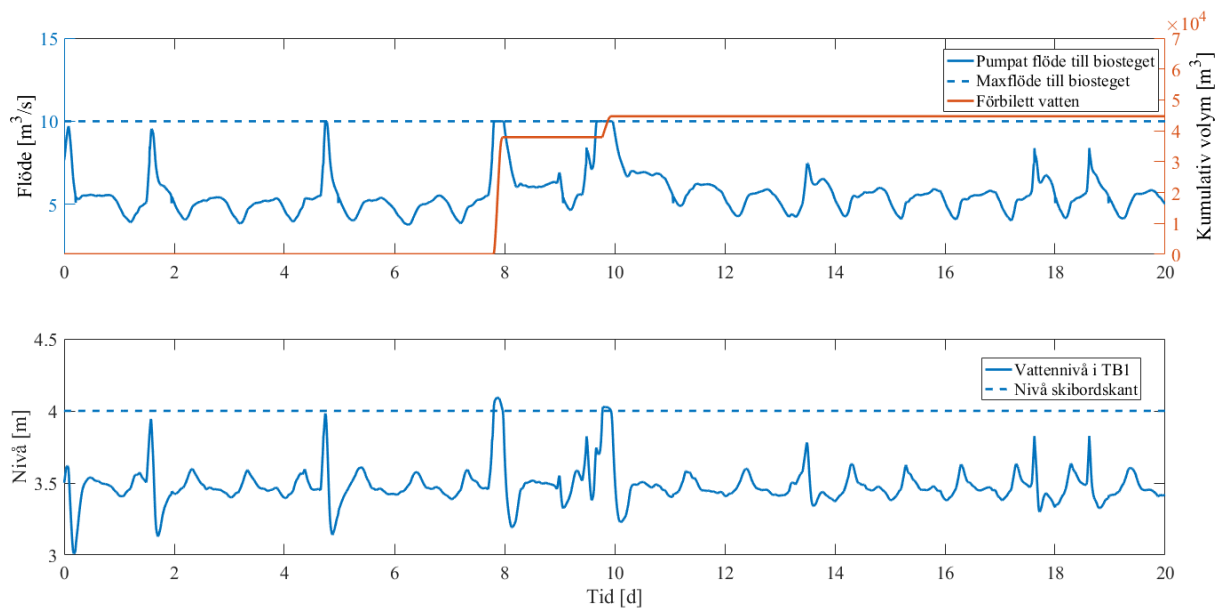
4.2.1. Ingen utjämning i Brommatunneln

I fallet med tillfälligt förhöjt flöde och ingen utjämning i Brommatunneln följer inflödet till Bromma pumpstation och det pumpade flödet från Brommatunneln varandra helt (figur 32). Nivån i tunneln varierar med några centimeter kring börvärdet på 0,5 m.



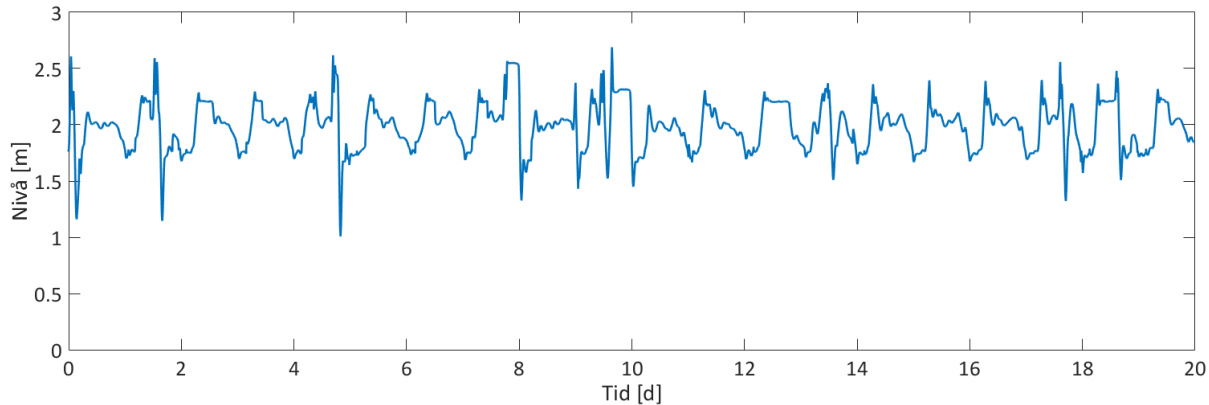
Figur 32. In- och utflödet från Bromma pumpstation (överst) och nivån i tunneln (underst) i fallet utan utjämning i Brommatunneln.

I fallet med tillfälligt förhöjt flöde och ingen utjämning i Brommatunneln överskrider det maximala flödet till biosteget vid två tillfällen, vid den åttonde simuleringsdagen och vid den tionde simuleringsdagen (figur 33). Det leder till att det vattenflöde som överskrider $10 \text{ m}^3/\text{s}$ förbiles till högflödesrening istället för biosteget. Den totala volymen som förbiles är cirka $45\,000 \text{ m}^3$. Nivån i TB1 varierar med flera decimeter vid flödestopparna och med någon decimeter under de normala dygnsvariationerna.



Figur 33. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet utan utjämning i Brommatunneln. När nivån överskrider 4 m förbiles vattnet via skibord till högflödesrening.

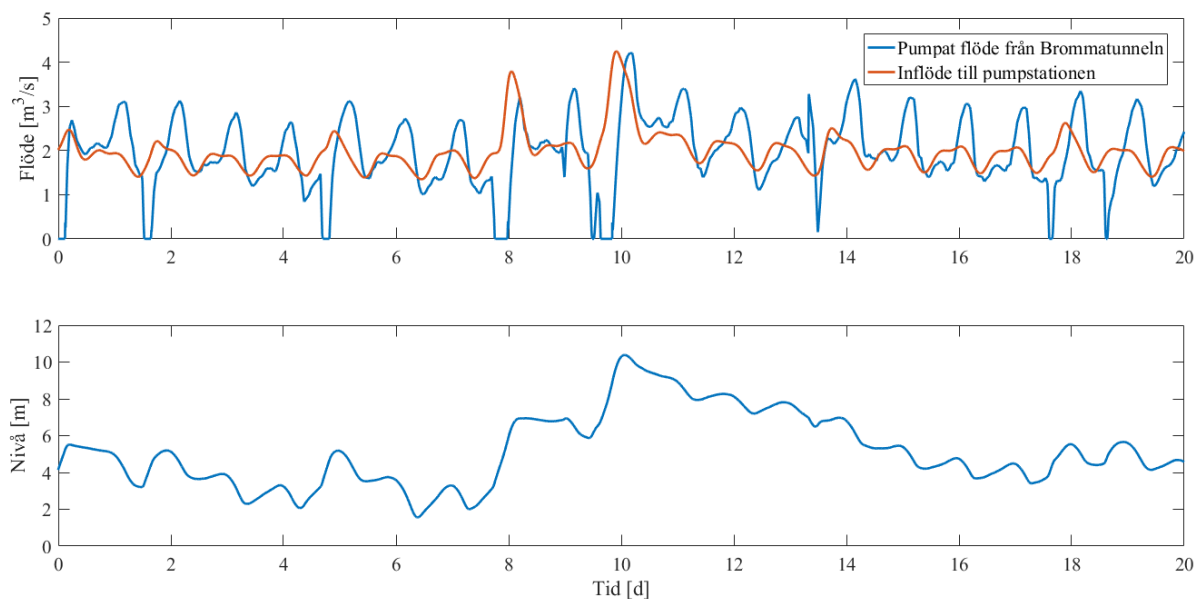
I fallet med tillfälligt förhöjt flöde och ingen utjämning i Brommatunneln varierar nivån runt börvärdet på 2 m i RAS-tankarna med 1–1,5 m vid flödestopparna och med några decimeter under normala dygnsvariationer (figur 34).



Figur 34. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet utan utjämning i Brommatunneln.

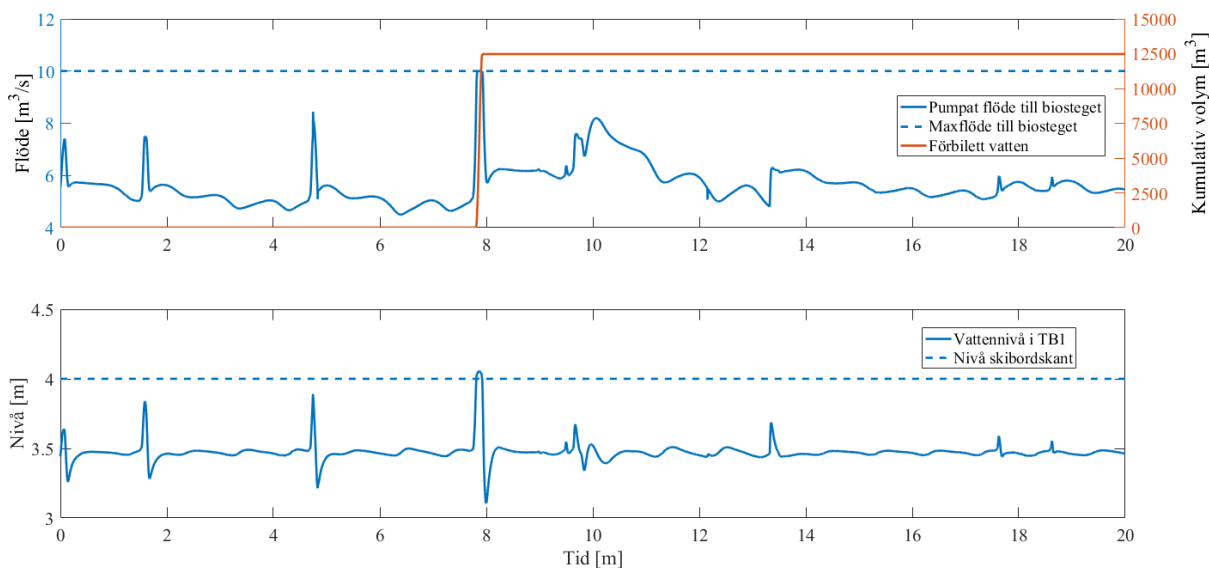
4.2.2. Flödesutjämning i Brommatunneln

I fallet med tillfälligt förhöjt flöde och utjämning i Brommatunneln styrs det pumpade flödet från Brommatunneln på inversen av inflödena från Danviken/Nacka och Farsta/Årsta. Eftersom det inte går att pumpa negativa flöden är pumparna i Bromma pumpstation avstängda då inversen blir negativ (figur 35). Styrningen gör att flödet från Bromma pumpstation varierar mer än vad inflödet till pumpstationen gör. Nivån i tunneln varierar mellan 2–10 m och de största nivåökningarna sker då det pumpade flödet från Brommatunneln är noll.



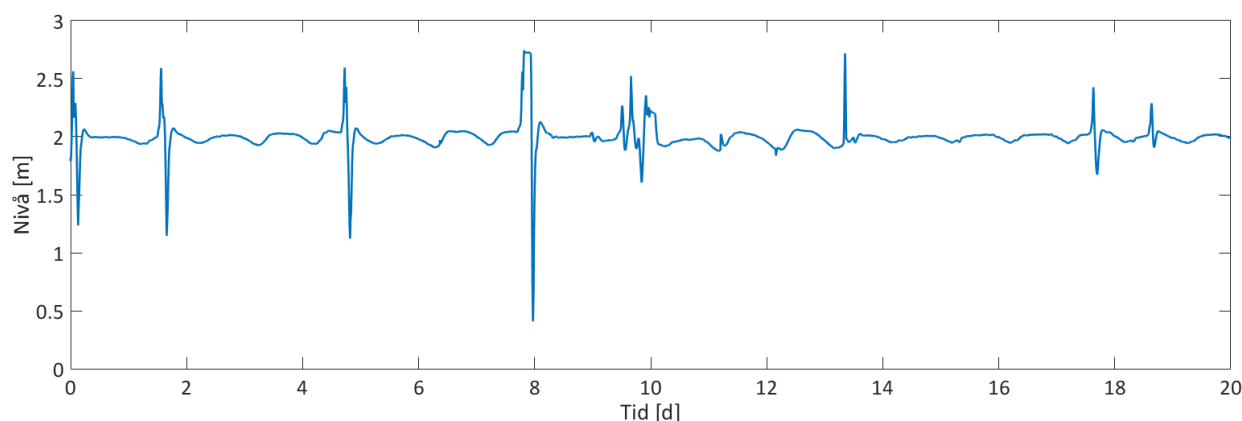
Figur 35. In- och utflödet från Bromma pumpstation (överst) och nivån i tunneln (underst) i fallet med utjämning av ett tillfälligt förhöjt flöde i Brommatunneln.

I fallet med tillfälligt förhöjt flöde och utjämning i Brommatunneln överskrider det maximala flödet till biosteget vid den åttonde simuleringsdagen med en förbiledd volym på 12 500 m³ som följd (figur 36).



Figur 36. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet med utjämning av ett tillfälligt förhöjt flöde i Brommatunneln. När nivån överskrider 4 m förbileddes vattnet via skibord till högflödesrening.

De toppar i flödet som inte gick att dämna bort resulterade i att nivån i RAS-tankarna avvek från sitt börvärde på 2 m med cirka en meter och vid den största pulsen var det över en meter (figur 37).

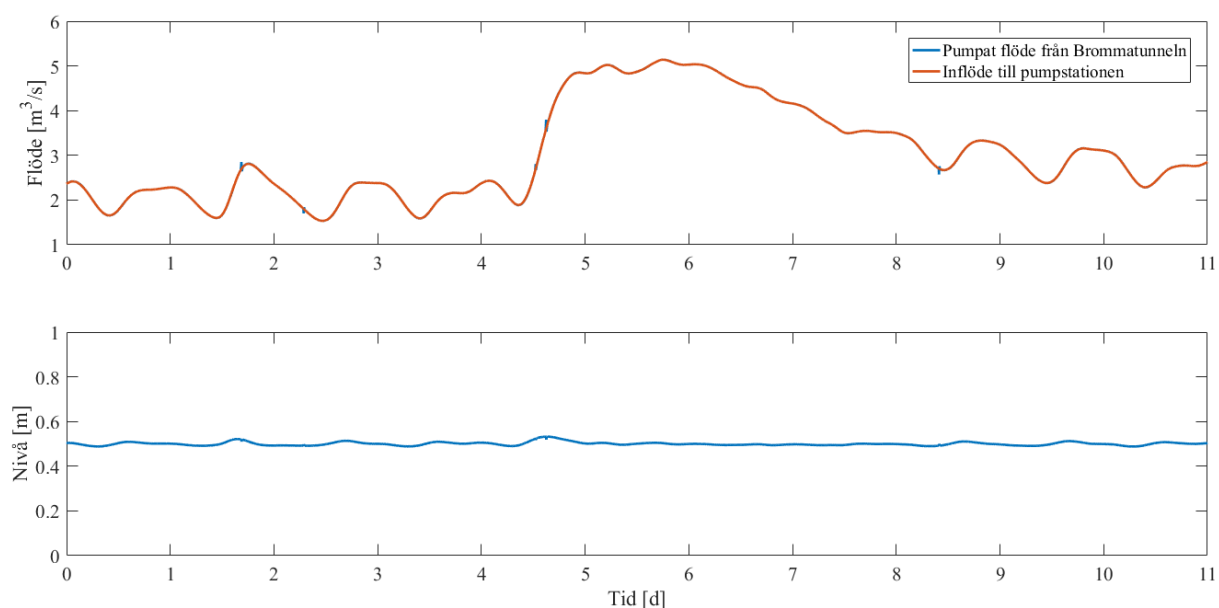


Figur 37. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet med utjämning av ett tillfälligt förhöjt flöde i Brommatunneln.

4.3. LÅNGVARIGT FÖRHÖJDA FLÖDEN

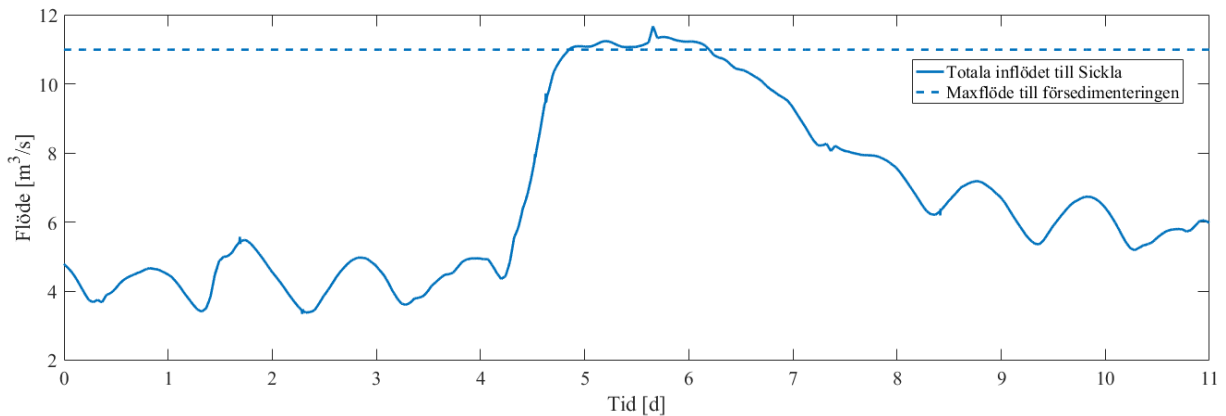
4.3.1. Ingen utjämning i Brommatunneln

I fallet med långvarigt förhöjda flöden och ingen utjämning i Brommatunneln följer inflödet till Bromma pumpstation och det pumpade flödet från Brommatunneln varandra helt (figur 38). Nivån i tunneln varierar med några centimeter kring börvärdet på 0,5 m.



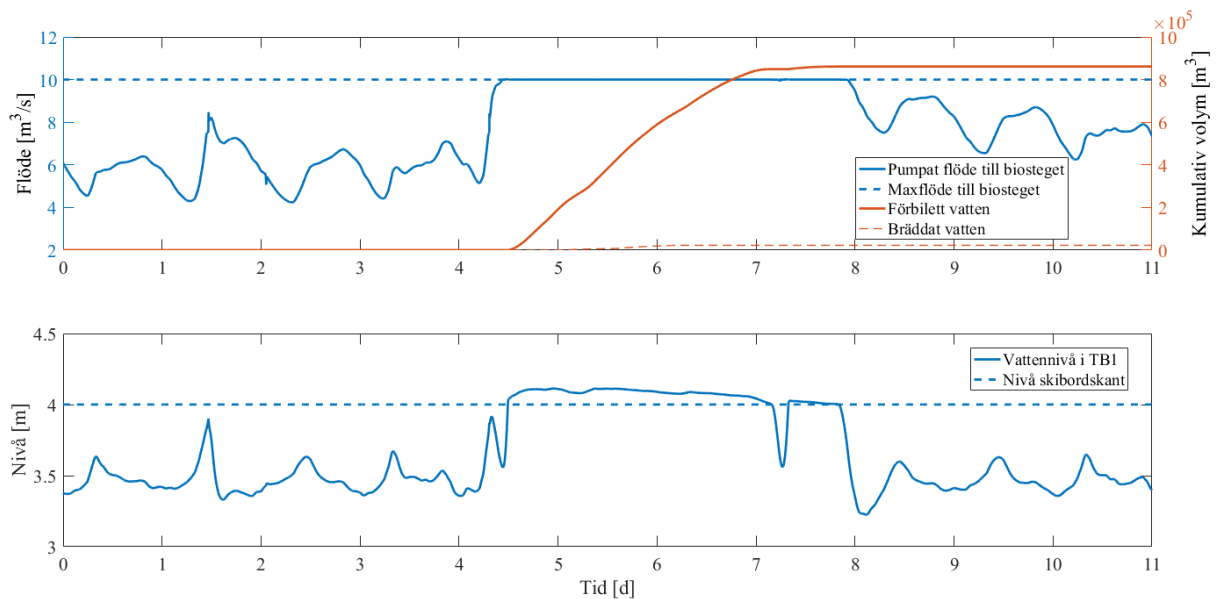
Figur 38. In- och utflödet från Bromma pumpstation (överst) och nivån i tunneln (underst) i fallet utan utjämning i Brommatunneln.

Det totala inflödet till Sicklaanläggningen överskred under en period det maximala flödet (11 m³/s) som kan hanteras av sandfånget och försedimenteringen (figur 39). Flödet som överskrider 11 m³/s bräddas.



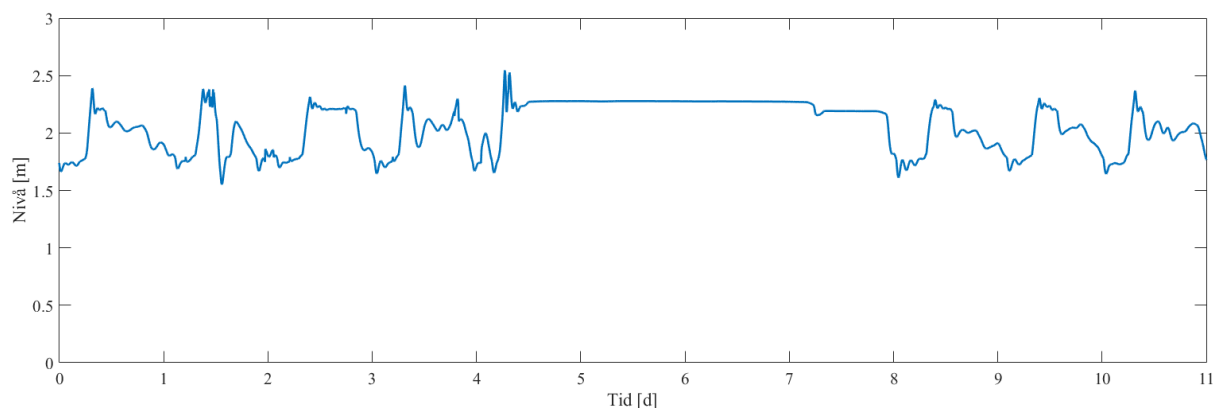
Figur 39. Totala inflödet till Sicklaanläggningen i fallet utan utjämning i Brommatunneln. Flödet som överskrider $11 \text{ m}^3/\text{s}$ bräddas.

I fallet med långvarigt förhöjda flöden och ingen utjämning i Brommatunneln överskrider det maximala flödet till biosteget under en period med start mellan den fjärde och den femte simuleringsdagen och slut vid den åttonde simuleringsdagen (figur 40). Det leder till att det vattenflöde som överskrider $10 \text{ m}^3/\text{s}$ förbileds till högflödesrening istället för biosteget. Den totala volymen som förbileds är cirka $850\,000 \text{ m}^3$. Även viss bräddning sker vilket sker i Sicklaanläggningen före sandfånget. Nivån i TB1 varierar med flera decimeter vid flödestopparna och med någon decimeter under de normala dygnsvariationerna.



Figur 40. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet utan utjämning i Brommatunneln. När nivån överskrider 4 m förbileds vattnet via skibord till högflödesrening. Bräddningen sker i Sicklaanläggningen.

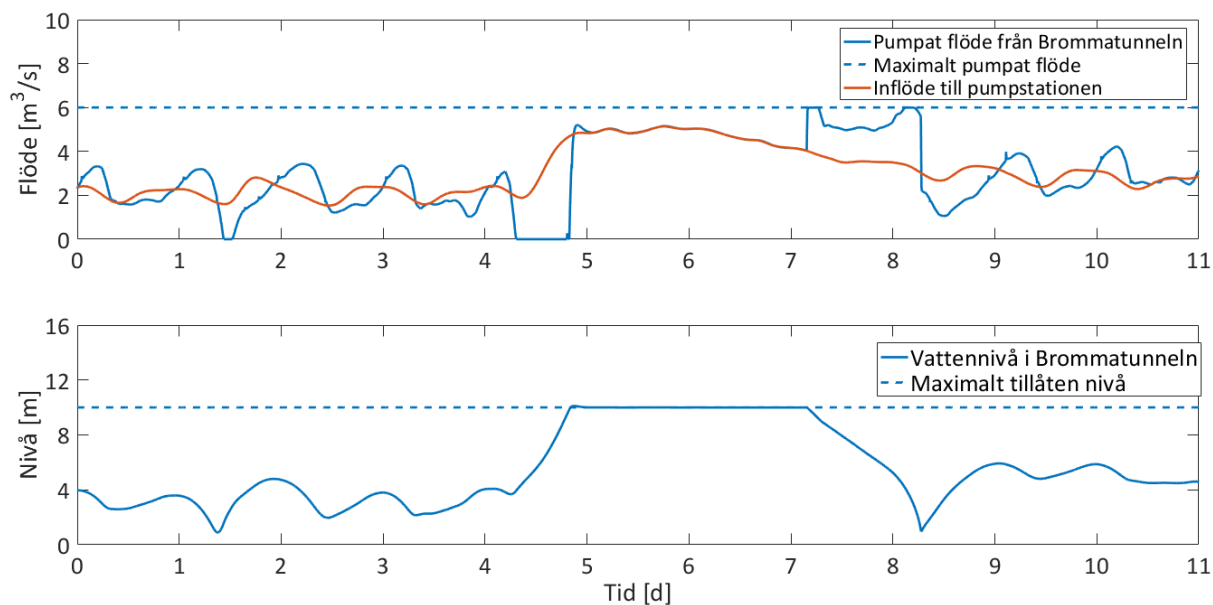
Nivån i RAS-tankarna varierar runt börvärdet på 2 m med några decimeter (figur 41). Under den period när inloppspumparna håller maxflödet ligger nivån i RAS-tankarna stabilt på cirka 2,2 m.



Figur 41. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet utan utjämning i Brommatunneln.

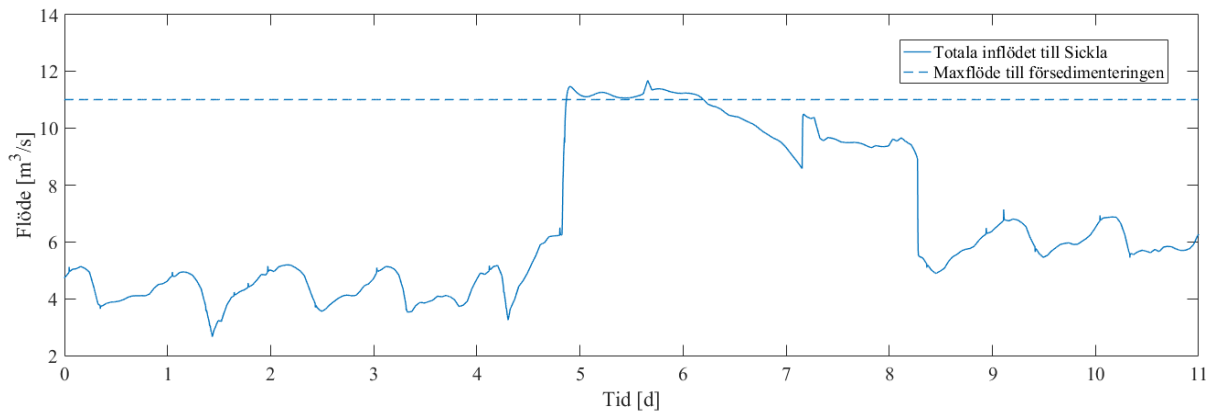
4.3.2. Dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning

I fallet med långvarigt förhöjda flöden och dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning i Brommatunneln styrs det pumpade flödet från Brommatunneln på inversen av inflödena från Danviken/Nacka och Farsta/Årsta så länge nivån i tunneln är under 10 m. När nivån stiger upp till 10 m i tunneln övergår styrningen till att hålla nivån (figur 42). Nivåstyrningen startar vid den femte simuleringsdagen och slutar vid den sjunde simuleringsdagen. Därefter höjs det pumpade flödet men inte mer än till $6 \text{ m}^3/\text{s}$ och nivån i tunneln sänks.



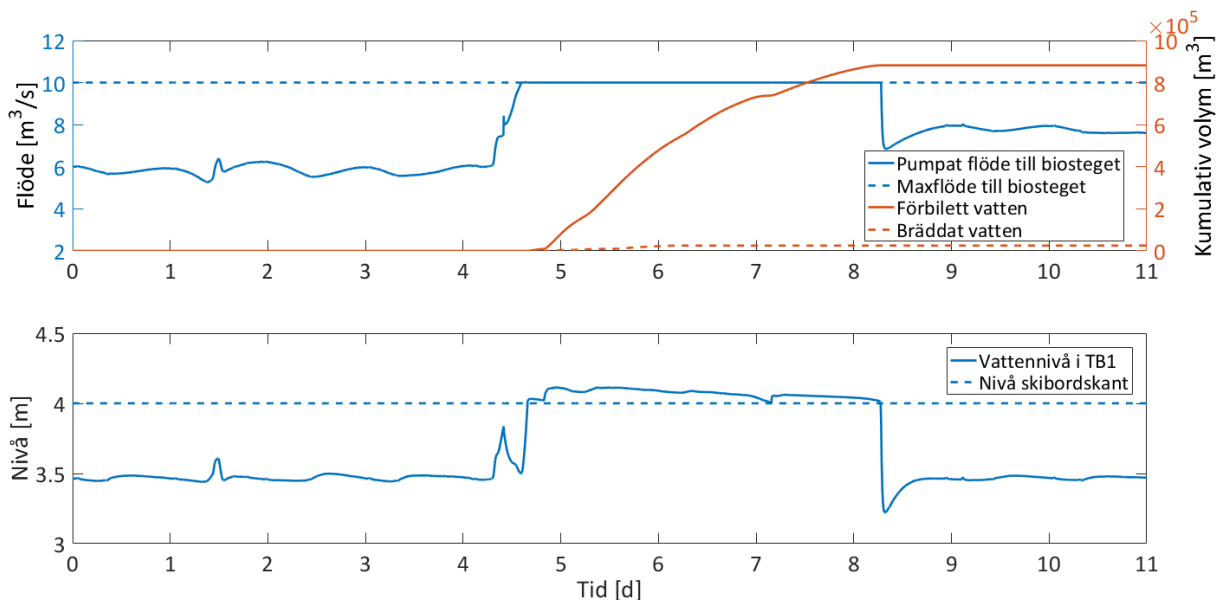
Figur 42. In- och utflöde från Bromma pumpstation (överst) samt nivån i tunneln (underst) i fallet med dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning.

Det totala inflödet till Sicklaanläggningen överskred under en period det maximala flödet ($11 \text{ m}^3/\text{s}$) som kan hanteras av sandfånget och försedimenteringen (figur 43). Flödet som överskrider $11 \text{ m}^3/\text{s}$ bräddas.



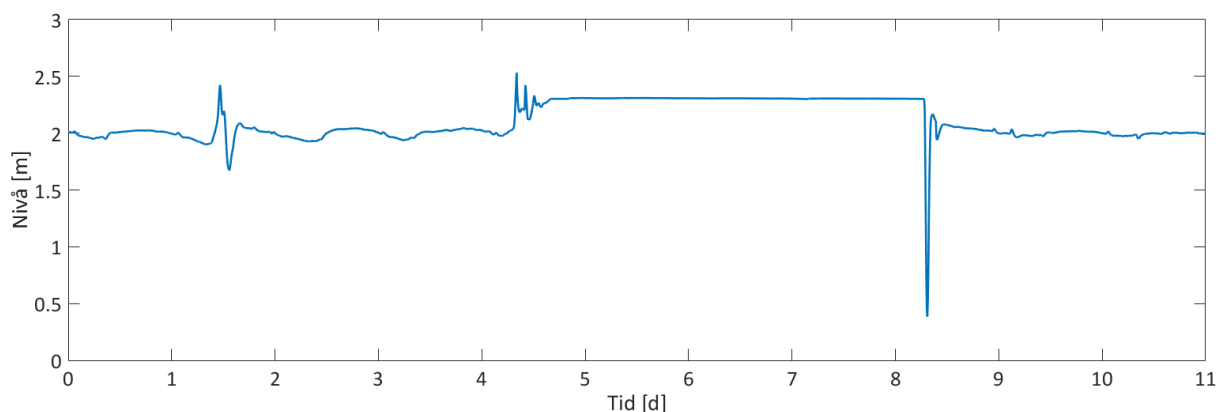
Figur 43. Totala inflödet till Sicklaanläggningen i fallet med dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning. Flödet som överskrider 11 m³/s bräddas.

Förbiledning av biosteget sker mellan den femte och den åttonde simuleringsdagen och den totala förbileda volymen uppgår till cirka 900 000 m³ och totalt bräddas cirka 12 500 m³ (figur 44 och tabell 29).



Figur 44. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet med dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning. När nivån överskrider 4 m förbileds vattnet via skibord till högflödesrening. Bräddningen sker i Sicklaanläggningen.

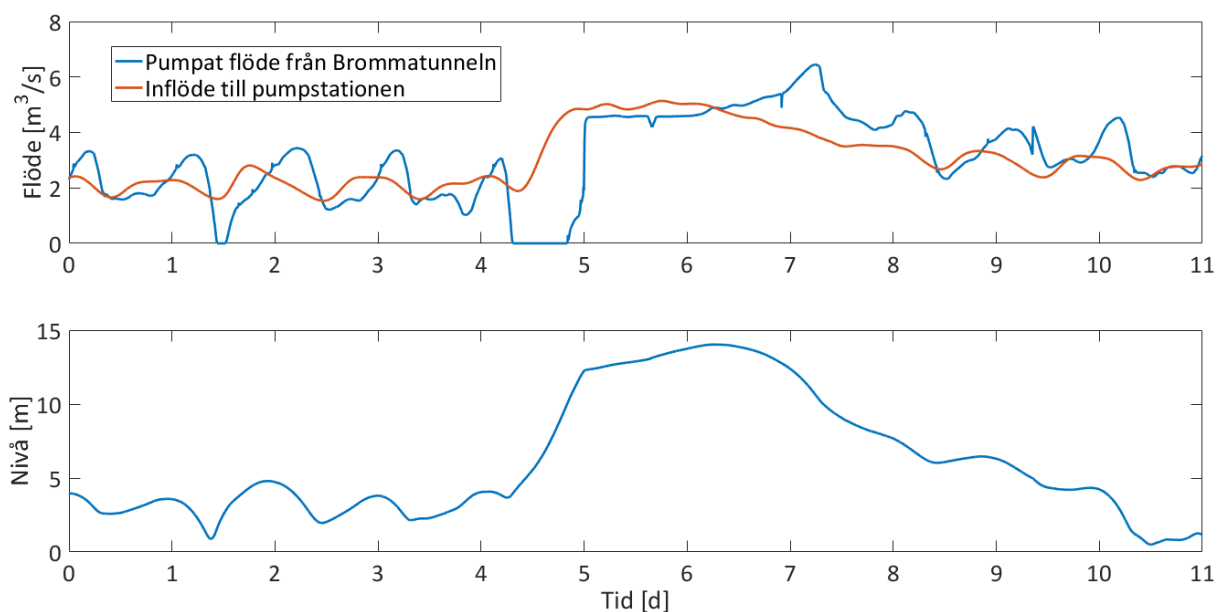
Nivån i RAS-tankarna varierar med några decimeter kring börvärdet på 2 m med undantag för en nivåsenka under den åttonde simuleringsdagen där nivån sänks till strax under 0,5 m (figur 45).



Figur 45. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet med dämning av det initiala flödet med nivåbegränsning.

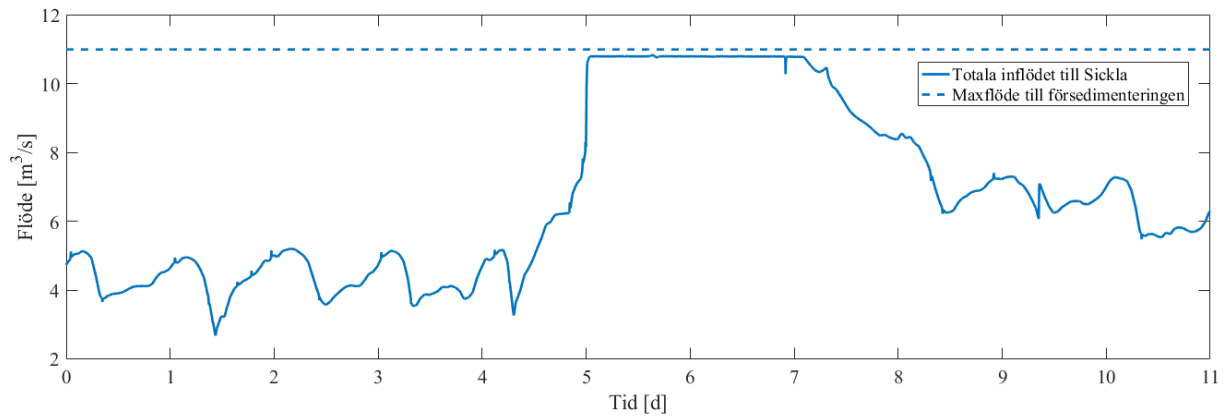
4.3.3. Dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning

I fallet med dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning varierar det pumpade flödet från Brommatunneln mer än inflödet till pumpstationen (figur 46). Nivån i Brommatunneln varierar mellan 1 och 5 m under de första fem dagarna och når en höjd på 14 m under perioden med höga flöden för att sedan sjunka till låga nivåer igen (figur 46).



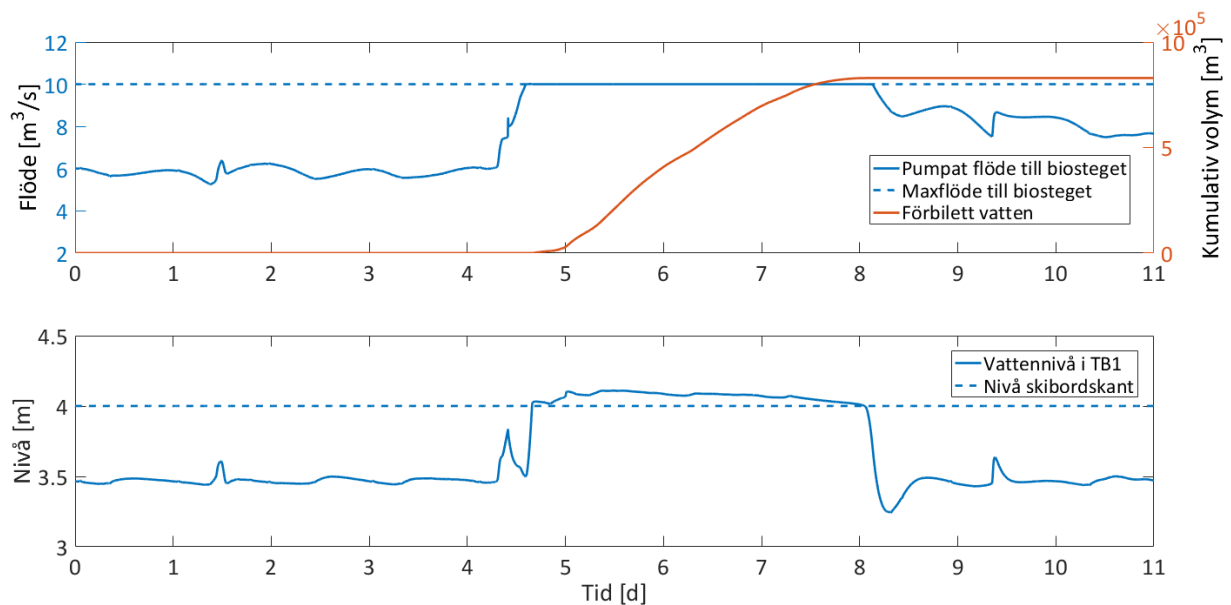
Figur 46. In- och utflöde från Bromma pumpstation (överst) samt nivån i tunneln (underst) i fallet med dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning.

Det totala flödet in till Sickla varierar mellan 1 och 5 m^3/s under de första fyra dagarna och håller sig strax under maxflödet på 11 m^3/s under perioden med höga flöden för att sedan sjunka till ungefär 6 m^3/s (figur 47).



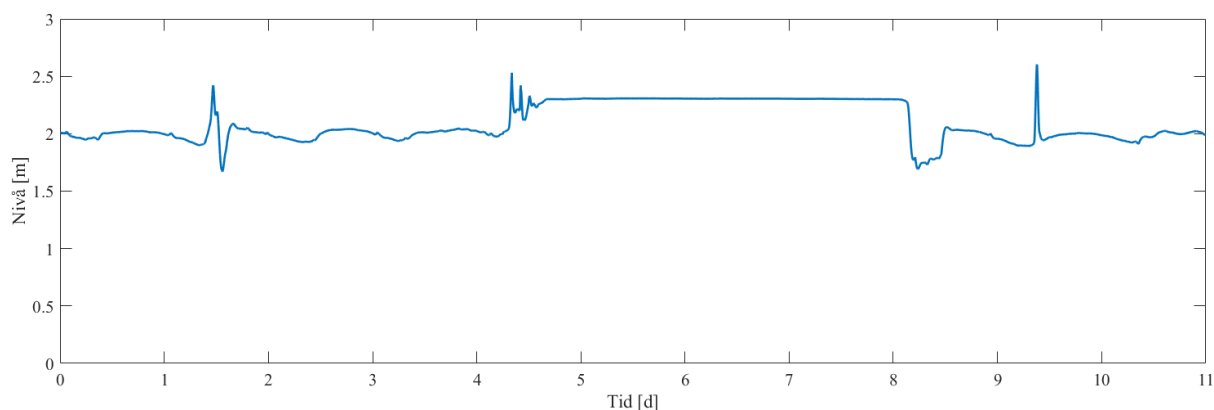
Figur 47. Totala inflödet till Sicklaanläggningen i fallet med dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning.

Cirka 800 000 m³ leds förbi biosteget mellan den femte och den åttonde simuleringsdagen (figur 48 och tabell 29).



Figur 48. Det pumpade flödet till biosteget (överst) samt vattennivån i TB1 (underst) i fallet med dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning. När nivån överskrider 4 m förbileds vattnet via skibord till högflödesrening.

Nivån i RAS-tankarna varierar med några decimeter kring börvärdet på 2 m (figur 49).



Figur 49. Vattennivån i RAS-tankarna i fallet med dämning av det initiala flödet utan nivåbegränsning.

Tabell 29. Totala volymen bräddat och förbilett vatten för långvarigt förhöjda flöden för fallen ingen dämning, dämning med maximal vattennivå på 10 m i Brommatunneln samt dämning utan maximal vattennivå i tunneln

	Ingen dämning	Dämning med maximal nivå i tunneln på 10 m	Dämning utan maximal nivå i tunneln
Bräddad volym i Sickla (m ³)	22 694	25 499	0
Förbiledd volym vid biosteget (m ³)	861 293	880 673	829 217

5. DISKUSSION

Resultaten visar på att en dämning i Brommatunneln leder till minskade variationer i flödet genom reningsverket och jämnare vattennivåer i flera pumpstationer. Det som även observerats är att det är möjligt att minska eller helt förhindra bräddning och förbiledning av biosteget genom att dämna en del av inflödet, något som även observerats av Ongerth (1979).

5.1. MODELLERING

5.1.1. Tunnelmodell

Det finns flera delar av modellen som hade kunnat göras mer lik verkligheten. Tunneln förenklades till att ha samma lutning längs hela tunneln, inga krökar och homogen skrovlighet längs botten och väggarna. Utan dessa förenklingar hade troligtvis vattendjupet och flödets hastighet påverkats i liten utsträckning men samtidigt hade beräkningstiden blivit betydligt längre.

En annan förenkling i tunnelmodellen är att dämningseffekten inte modellerats. Egentligen påverkas vattenflödet och nivån uppströms av en dämning vilket inte tagits hänsyn till. En avvägning gjordes mellan att ta hänsyn till detta mot att hålla modellen så enkel som möjligt så

att den sammansatta modellens simuleringstid hålls nere. Denna förenkling påverkar troligtvis vattennivån och flödet i tunneln men det är främst utjämningens effekt nedströms i processen som är intressant. Eftersom modellens massbalans stämmer borde den dämnda volymen också stämma. Hur långt upp i tunneln som dämningen påverkar vattennivån stämmer dock inte helt på grund av att dämningens effekt på vattennivå och flöde uppströms inte tagits med i modellen. Trots dessa förenklingar bedömdes modellen kunna bidra till att uppfylla syftet.

5.1.2. Pumpmodell

Vid modelleringen av pumparna approximerades pumpkurvorna som linjära. Denna förenkling medför att de varvtal som krävs för att uppnå ett visst flöde kan skilja sig från de verkliga. Det kan påverka de regulatorparametrar för flödesregulatorerna som togs fram med lambdametoden och eventuella framtida energiberäkningar. I detta projekt var flödet och regleringen av pumparna det som fokuserades på och inte att varvtalen var helt korrekta. Med hjälp av pumpmodellerna finns möjligheten att utföra energiberäkningar och optimera styrningen av pumpstationerna med avseende på antal pumpar i drift och vattennivå.

För att modellera permeatpumparna behövde vissa förenklingar, utöver att anta att pumpkurvorna var linjära, göras. Friktionsförlusterna över membranen antogs vara oförändrade över tid, något som inte stämmer. Vidare antogs friktionsförlusterna motsvara medelvärdet av de driftsfall som det fanns tillgänglig data för. Dessa antaganden påverkar endast varvtalen och regulatorparametrarna som krävs för att ett visst flöde ska erhållas.

5.1.3. Bassäng med skibord

Alla bassänger och tunnlar har modellerats enligt samma modell där vattennivån endast beror på in- och utflöde samt dess area. När inflödet är högre än utflödet stiger alltså nivån jämnt över hela arean. Detta är en förenkling av det verkliga förloppet. Det som sker är egentligen att nivån först stiger vid inflödet och höjningen rör sig sedan mot utloppet. Det sker därmed en fördröjning som inte fångas upp i den enkla modell som användes i detta projekt. Felet blir som störst när bassängen eller tunneln är lång (t ex för tunnarna mellan försedimenteringen och inloppspumparna till biosteget). För den tidsskala (dagar) som simulerades bör detta inte ha någon större inverkan, men om simuleringar utförs i kortare tidsskala (minuter) har det en betydligt större inverkan.

5.2. REGLERING

5.2.1. Generell reglerstrategi

Förutom att varje regulator har en intern AWD har även en extern AWD lagts till vid kaskadreglering där den överordnade regulatorn har en integrerande del (t ex en PID-regulator). Då alla pumpstationer är dimensionerade för att klara ett högre flöde än det maximala flöde som är tillåtet, kommer den interna AWD:n att stänga av integratorn innan alla underordnade regulatorer mättats och skickar en extern AW-signal. Detta gör den externa AWD:n överflödig, men om det maximalt tillåtna varvtalet skulle sänkas alternativt att flera pumpar skulle sluta fungera, så skulle den externa AWD:n kunna förhindra uppvridning av den överordnade regulatorns integrator. Eftersom den externa AWD:n är så pass enkel att implementera gör det inget om den aldrig skulle behövas.

Vid val av antal pumpar är det användarbestämda gränser för när varje pump slås på respektive av. Dessa gränser togs fram med trial-and-error-metoden. De valda gränserna kan därför hamnat en bit från de ur energisynpunkt optimala värdena. En annan potentiell förbättring av pumpväljarna skulle kunna vara en jämnare övergång mellan antal pumpar, exempelvis upp- och nedrampning. En sådan förbättring skulle förhoppningsvis minska de irregulärheter i det pumpade flödet som ibland uppstår (figur 27).

5.2.2. Dygnsutjämning och utjämning av tillfälligt förhöjt flöde

Målet med styrningen av Bromma pumpstation vid torrväder samt vid tillfälligt förhöjt flöde var att få ett jämnt flöde till biosteget genom att pumpa mycket på natten och lite på dagen. Den framtagna styrstrategin innehåller flertalet användarvalda parametrar som i stor utsträckning påverkar resultatet. Värdena på dessa togs fram genom flertalet simuleringar och det är inte säkert att de är optimala. En nackdel med denna metod är att det krävs bra och medvetna val av dessa parametrar. Att välja sådana parametrar att både dygnsutjämning och en låg nivå i tunneln (<1 m) erhålls var svårt. En avvägning får göras när parametervärden tas fram angående vad som är viktigast av utjämning och att hålla en låg nivå i tunneln. En annan nackdel med regleringen är att det är svårt att få nivån i tunneln att hålla sig kring det börvärde som sätts. Det uppstår lätt ett statistiskt fel som skulle kunna elimineras om en integrerande del läggs till.

5.2.3. Utjämning av långvarigt förhöjda flöden

Målet med styrningen av Bromma pumpstation vid långvarigt förhöjda flöden var att dämpa det initiala flödet för att sedan styra på nivå. När sedan flödet minskar igen töms tunneln. Denna styrning var svår att få att fungera som önskat. En automatiserad övergång mellan att utjämna flödet och sedan styra på nivå för att hålla 10 m i tunneln krävde flera tillägg till den redan befintliga regleringen. Dessa tillägg innebar ännu fler parametrar som skulle väljas och komplexiteten i regleringen ökade.

Styrningen av permeatpumparna och RAS-pumparna är framtagen av GE och i modellen implementerades den så som GE beskrivit den. De parametrar som behövdes var inte framtagna utan de fick tas fram genom simuleringar och trial-and-error-metoden. Det finns förbättringspotential gällande val av parametrar men den parameteruppsättning som togs fram fungerade för alla simuleringsfall vilket möjliggjorde jämförelser mellan dessa. En annan möjlig förbättring är att ta bort filtreringen av nivån i RAS-tankarna, som innebär en tidsfördröjning, alternativt minska tidskonstanten, för att på så sätt minska överslängarna.

5.3. SIMULERINGAR

5.3.1. Dygnsutjämning

För att kunna jämföra hur dygnsutjämning av flödet påverkar övriga pumpstationer och vattennivåer i reningsverket användes nivåstyrning av Bromma pumpstation som referens. Inställningen av regulatorparametrarna för nivåregulatorn i Bromma pumpstation var de som togs fram med lambdametoden. Den uppsättning regulatorparametrar som användes resulterade i att nivån i Bromma pumpstation endast avviker några centimeter från börvärdet

(figur 23). Nivåregulatorn kan göras långsammare så att flödet blir mer utjämnat men samtidigt håller nivån i tunneln kring 0,5 m.

En fördel med att ha endast nivåreglering jämfört med att utjämna är att styrningen blir relativt enkel (vanliga PI(D)-regulatorer) och antal parametrar som måste kalibreras blir färre. Nivåregleringen förlitar sig även på färre sensorer då endast nivån används som insignal. Fördelen med det är att systemet blir mindre känsligt för mätfel.

Utjämning resulterade i ett jämnare flöde till biosteget jämfört med nivåstyrning. För att möjliggöra ett fast flöde till biosteget behövdes nivåkorrigeringen i styrningen av Bromma pumpstation inaktiveras. Nivåkorrigeringen inaktiverades eftersom flödet in till reningsverket behövdes jämnas ut så mycket som möjligt för att nivåregleringen i TB1 skulle kunna kopplas ur. Ett mer realistiskt scenario skulle kunna vara att några av linjerna körs med fast flöde samtidigt som de andra linjerna styrs med nivåreglering. Detta var dock inte något som testades i det här projektet. En annan styrstrategi som inte testades kan vara att hålla fast flöde så länge nivån håller sig mellan två satta gränser. Stiger nivån över eller sjunker under de gränserna, går nivåregleringen på tills att nivån är sådan att fast flöde återigen kan upprätthållas.

Nivåstyrningen av Bromma pumpstation resulterade i att nivån i RAS-tankarna fluktuerar mellan cirka 1,5 m och 2,4 m (börvärde är 2 m) (figur 25). Jämförs detta med de fall där dygnsutjämning av det inkommande flödet utförs är skillnaden markant (jfr. figur 28). Om en jämnare nivå kan hållas i RAS-tankarna kan börvärdet för nivån hållas högre utan risk för att nivån blir för hög. Ett högre börvärde skulle innebära att lyfthöjden blir lägre och därmed minskar energiåtgången. Då det är stora flöden som pumpas (cirka tre gånger inflödet till biosteget) är nivån i just RAS-tankarna viktig att hålla hög.

På grund av att medelvärdet av inflödet var högre de första dagarna behövdes flödebörvärdet till Bromma pumpstation vara högre den perioden för att sedan sänkas. Detta gjordes med ett steg (6–5,4 m³/s) vilket fick till följd att sänkningen fortplantade sig genom verket och hamnade tillslut i RAS-tankarna (figur 28 och 31) Om steget istället byts ut till en mjukare övergång torde detta följaktligen ge en mindre drastisk sänkning.

En annan förbättringspotential är att nivån i Brommatunneln bör kunna hållas lägre i båda fallen av utjämning utan att den påverkas. Detta eftersom lägstanivån i båda fallen är 2 respektive 1,5 m (figur 26 och 29). Det man också ser i dessa figurer är att nivån behöver kunna fluktuera cirka 1–2 m för att en utjämning av dygnsvariationer ska kunna ske.

5.3.2. Tillälligt förhöjt flöde

Reglerstrategin för Bromma pumpstation vid tillfälligt förhöjda flöden är samma som vid dygnsutjämning med vissa skillnader i parametervärden. Utan dämning i Brommatunneln leddes 45 000 m³ förbi biosteget och med den framtagna regleringen sänktes volymen till 12 500 m³ (figur 33 och 36). Att undvika förbigång helt, för den puls som simulerades, är inte möjligt då de sammanlagda inflödena från Danviken/Nacka och Farsta/Årsta överstiger 10

m³/s. Även om Bromma pumpstation inte pumpar något alls under den pulsen måste alltså en viss del av inflödet ledas förbi biosteget.

Det finns saker som kan förbättras med reglerstrategins hantering av tillfälligt förhöjda flöden. Dels borde nivån i Brommatunneln kunna hållas lägre generellt, dels borde nivån direkt efter pulsen kunna sänkas genom att hålla kvar det höga pumpade flödet en tid efter pulsen gått ned igen. Detta underlättar hanteringen av eventuella kommande pulser eftersom det då finns större utrymme för dämning i tunneln. Ytterligare ett tillägg i regleringen som kan införas är att ha nivåreglering när nivån i tunneln stiger över en satt gräns. Detta tillägg försäkrar att nivån inte blir för hög (jfr. figur 42).

Den översläng som kan observeras i figur 36 efter att förbigången av biosteget skett borde kunna undvikas, eller iallafall dämpas, med bättre val av parametrar till nivåregulatorn vid inloppet till biosteget. Om ett jämnare flöde till biosteget hade uppnåtts hade inte nivån ändrats så drastiskt i RAS-tankarna som den gör i figur 37. En korrigerig av parametrarna för beräkningen av börvärde till permeat- och returslampumparna kan också förbättra resultatet genom att få mjukare övergångar när börvärdet ändras drastiskt. I försöket hålls börvärdet för nivån i RAS-tankarna konstant, något som inte nödvändigtvis måste gälla. Skulle istället börvärdet för nivån sänkas när tecken på att en puls är inkommande, kan säkerhetsmarginalen ökas ytterligare. Den informationen om att en puls är inkommande kan t ex komma från Bromma pumpstation. När Bromma pumpstation stänger av sina pumpar finns en tid innan pulsen når RAS-tankarna och nivån kan hinna sänkas.

5.3.3. Långvarigt förhöjt flöde

Vid långvarigt förhöjda flöden är det viktigast att dämna den första urspolningen av ledningsnät och tunnlar. När det initiala flödet dämms och reningsverket ställts om till högflödesrening går reningen redan på maxkapacitet och därför finns det ingen anledning att dämna mer. När inflödet sedan sjunker igen kan tunneln tömmas. Det finns olika sätt att hantera långvarigt förhöjda flöden varav två simulerades i detta projekt. I det ena fallet dämdes det initiala flödet tills nivån i tunneln blev 10 m och därefter nivåreglerades Bromma pumpstation. Först när det fanns utrymme att pumpa mer utan att överskrida maxkapaciteten för biosteget tömdes tunneln. I det andra fallet användes ingen nivåreglering efter dämningen av det initiala flödet utan istället användes samma reglerstrategi som vid dygnsutjämning och tillfälligt förhöjt flöde. För att undvika bräddning i Sicklaanläggningen togs även hänsyn till det totala inflödet till Sickla.

I båda fallen är nivån relativt hög (4 m) strax innan pulsen. Det vore bättre om nivån var lägre innan pulsen eftersom en större del av pulsen då skulle kunna däckas. I fallet utan ren nivåstyrning (figur 46) stiger nivån till 14 m. Om tunneln istället varit tom innan pulsen kom hade nivån även i detta fall kunnat hålla sig under 10 m. En lägre nivå i tunneln skulle kunna uppnås genom lämpligare parametrar för styrningen av flödesutjämningen. Ett annat tänkbart scenario är att nivån i tunneln sänks så fort det finns indikation på att flödet kommer att höjas. Denna indikation kan vara en ökning av uppmätt nederbörd eller risk för snösmältning.

Om en låg nivå i tunneln anses vara viktigare än att minimera förbigången av biosteget kan en snabbare tömning av tunneln ske. I fallet med nivåreglering sattes det maximala pumpade flödet till $6 \text{ m}^3/\text{s}$ men när nivån är 10 m i tunneln ökas kapaciteten på pumparna till $9 \text{ m}^3/\text{s}$, något som inte tagits hänsyn till. Hade pumparna tillåtit att hålla ett högre flöde än $6 \text{ m}^3/\text{s}$ skulle tunneln ha tömts fortare men med risk för bräddning i Sicklaanläggningen.

På grund av den snabba övergången mellan tömning av tunneln och dygnsutjämning i Bromma pumpstation blir det en drastisk flödessänkning som fortplantar sig genom hela reningsverket. Eftersom volymen i RAS-tankarna är så pass liten syns denna flödessänkning som mest här (figur 45). Ett sätt förhindra detta är att ha en mjukare övergång mellan styrsätten, till exempel genom att rampa ned flödesbörvärdet.

6. SLUTSATSER

Det finns goda möjligheter till att utjämna dygnsvariationer genom dämning i Brommatunneln. Dygnsutjämning ger:

- ett jämnare flöde till biosteget
- en jämnare nivå innan biosteget
- en jämnare nivå i returslamtankarna

Dygnsutjämningen klarar även av att dämna tillfälligt förhöjda flöden vilket minskar behovet av förbiledning vid biosteget. En jämnare nivå gör det möjligt att hålla en högre nivå i RAS-tankarna vilket leder till minskad energianvändning.

För de simulerade långvarigt förhöjda flödena är det möjligt att i Brommatunneln dämna den första urspolningen av ledningsnät och tunnlar. Därmed kan belastningsstöten hanteras i reningsverket. Styr Bromma pumpstation utan nivåbegränsning går det även att förhindra bräddning i Sickla helt.

För att implementera de föreslagna reglerstrategierna i fullskala kan regulatorinställningarna behöva fintrimmas. En vidare utveckling av modellerna kan göra det möjligt att räkna ut energianvändningen för varje simulering så att en mer energieffektiv reglerstrategi blir lättare att ta fram.

REFERENSER

Carlsson, B., Ahlström, M., Blomstrand, P., Halvarsson, L. & Jemander, R. (2017). Anti-windup design for supervisory ammonium controllers in nitrifying activated sludge processes. *12th IWA Specialized Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA)*. Québec City, Canada 11–14 juni.

Carlsson, B. & Hallin, S. (2010). *Tillämpad reglerteknik och mikrobiologi i kommunala reningsverk*. Stockholm: Svenskt Vatten AB

Chaudhry, H. (2007). *Open-Channel Flow*. 2. uppl. Heidelberg: Springer Science & Business Media

Glad, L. & Ljung, T. (2006). *Reglerteknik: grundläggande teori*. 4 uppl. Lund: Studentlitteratur AB

Hager, W.H. (2010). *Wastewater Hydraulics: Theory and Practice*. 2. uppl. Heidelberg: Springer Science & Business Media

Karassik, I., Messina, J., Cooper, P. & Heald, C. (2007). *Pump Handbook*. 4. uppl. New York: McGraw-Hill Education

Leith, D.J. & Leithead, W.E. (2000). Survey of gain-scheduling analysis and design. *International Journal of Control*, vol. 73, ss. 1001–1025

Malmborg, G. & Nyborg, K. (2004). *Praktisk processautomation*. Markaryd: Skogsindustrins utbildning i Markaryd

Naturvårdsverket (2008). *Sveriges åtaganden i Baltic Sea Action Plan – Delrapport*. Stockholm: Naturvårdsverket. (Rapport 5830)

Olsson, G. (2008). *Effektivare reningsverk. Några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (SV-Utveckling Rapport 2008–19)

Ongerth, J.E. (1979). *Evaluation of Flow Equalization in Mulicipal Wastewater Treatment Plants*. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Municipal Environmental Research Laboratory (EPA Rapport, 600/2-79-096)

Saagi, R., Flores-Alsina, X., Fu, G., Butler, D., Gernaey, K. & Jeppson, U. (2016). Catchment & sewer network simulation model to benchmark control strategies within urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, vol. 78, ss. 16–30

SMHI (2017). *Året 2012 – Mycket nederbördsrikt med nya rekord i nordöstra Norrland*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/klimat/2.1199/aret-2012-mycket-nederbordsrikt-med-nya-rekord-i-nordost-norrland-1.28148> [2017-04-11]

Solvi, A.-M. (2007). *Modelling the Sewer-Treatment-Urban River System in view of the EU Water Framework Directive*. Diss, Ghent University, Belgien

Ruff, J.F. (2003). Flow Measurements, History of. I: Stewart, B.A. & Howell, T.A. (red.), *Encyclopedia of water science*. New York: Marcel Dekker, Inc., ss. 307

Stockholm läns landsting (2015). *Befolkningsprognos 2015–2024/50 – Stockholms län, huvudrapporten – kort version*. Stockholm: Stockholm läns landsting. (Demografisk rapport 2015:11)

Stockholm Vatten och Avfall (2015a). *Information om Stockholms framtida avloppsrening*. Tillgänglig: <http://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/sfa/pdf/annonser---mitti/stockholm-vatten---december-.pdf> [2017-03-30]

Stockholm Vatten och Avfall (2015b). *Vattenrening med membran*. Tillgänglig: <http://www.stockholmvattenochavfall.se/framtidensavloppsrening/tunnel-och-reningsverk/modernare-vattenrening/vattenrening-med-membran/> [2017-05-17]

Stockholm Vatten och Avfall (2017). *Avloppsreningsverk - Reningsprocessen*. Tillgängligt: <http://www.stockholmvattenochavfall.se/vatten-och-avlopp/avloppsvatten/avloppsreningsverk/> [2017-05-03]

Svenskt Vatten AB (2013). *Avloppsteknik 2 – Reningsprocessen*. Stockholm: Svenskt Vatten AB

Wang, L., Hung, Y. & Shamma, N. (2005). *Physicochemical Treatment Processes*. New York: Humana Press

BILAGA A

Tabell A1. Parametrar som togs fram från stegsvar för olika varvtalsintervall för inloppspumparna till biosteget

Steg (Hz)	Δu (Hz)	Δy (m ³ /d)	T (d)	p (-)	L	$K_p \times 10^4$
20–25	5	7 110	0,0007	2	0	3,5162
25–30	5	6 530	0,0007	2	0	3,8285
30–35	5	6 240	0,0007	2	0	4,0064
35–40	5	6 050	0,0007	2	0	4,1322
40–45	5	5 940	0,0007	2	0	4,2088
45–50	5	5 850	0,0007	2	0	4,2735

Tabell A2. Parametrar som togs fram från stegsvar för olika varvtalsintervall för returslampumparna linje 1–5

Steg (Hz)	Δu (Hz)	Δy (m ³ /d)	T (d)	p (-)	L	$K_p \times 10^4$
25–30	5	11 748	0,0007	2	0	2,1280
30–35	5	10 392	0,0007	2	0	2,4057
35–40	5	9 584	0,0007	2	0	2,6085
40–45	5	9 059	0,0007	2	0	2,7597
45–50	5	8 699	0,0007	2	0	2,8739

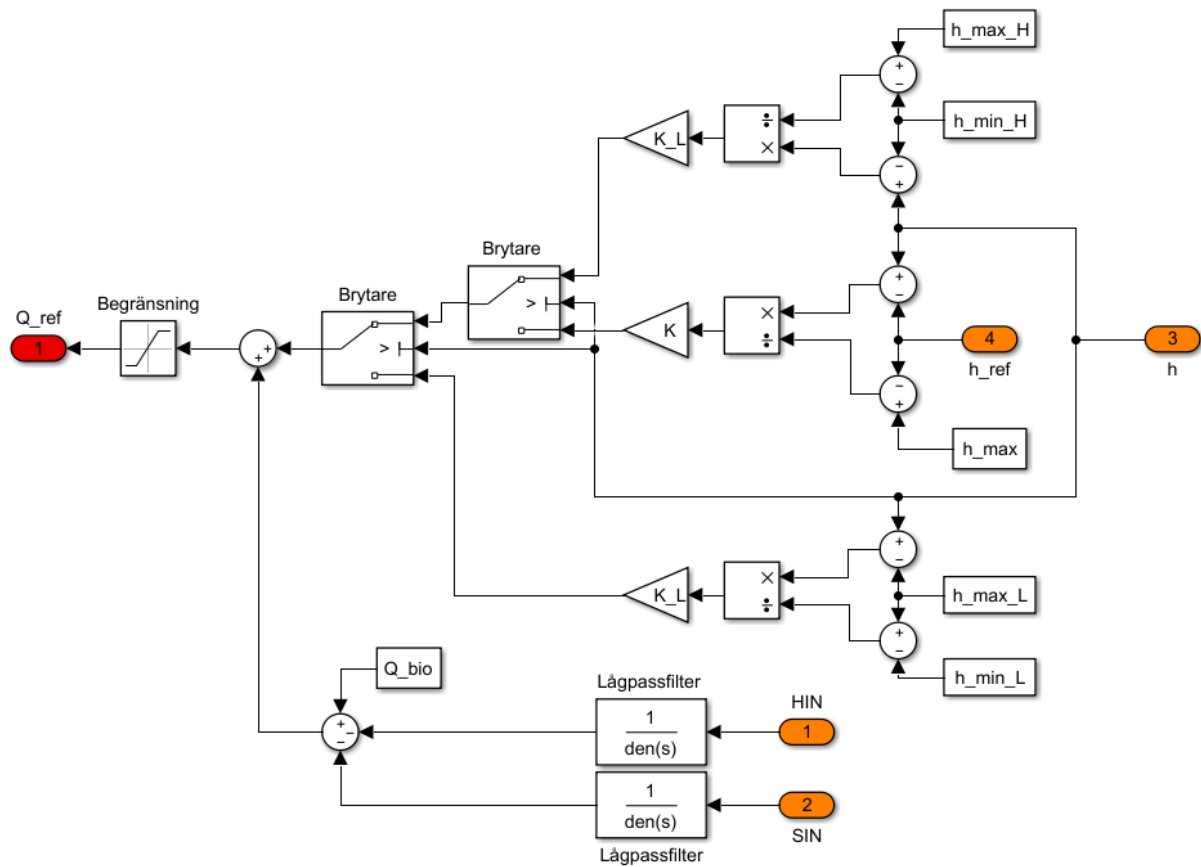
Tabell A3. Parametrar som togs fram från stegsvar för olika varvtalsintervall för returslampumparna linje 6–7

Steg (Hz)	Δu (Hz)	Δy (m ³ /d)	T (d)	p (-)	L	$K_p \times 10^4$
25–30	5	13 387	0,0007	2	0	1,8675
30–35	5	11 599	0,0007	2	0	2,1554
35–40	5	10 548	0,0007	2	0	2,3701
40–45	5	9 871	0,0007	2	0	2,5327
45–50	5	9 409	0,0007	2	0	2,6570

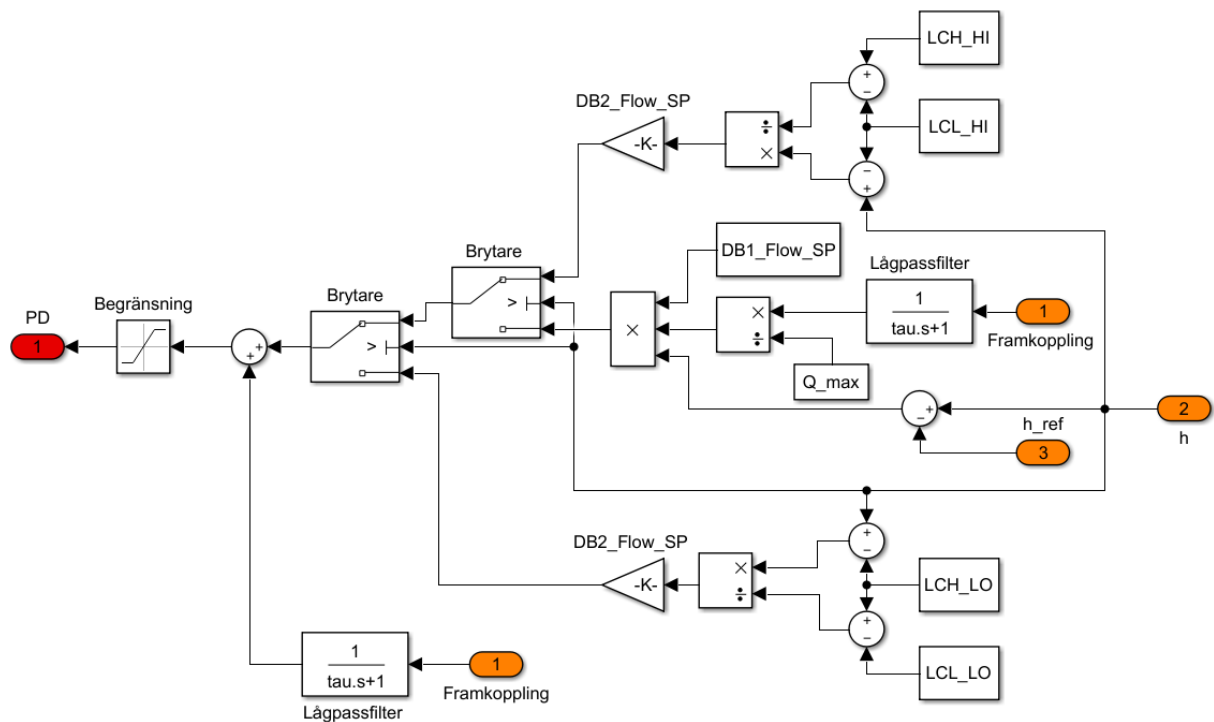
Tabell A4. Parametrar som togs fram från stegsvar för olika varvtalsintervall för permeatpumparna

Steg (rpm)	$\Delta\omega$ (rpm)	Δy (m ³ /d)	T (d)	p (-)	L	K_p
500–600	100	7 266	0,0007	3	0	0,0046
600–700	100	6 689	0,0007	3	0	0,0050
700–800	100	6 370	0,0007	3	0	0,0052
800–900	100	6 172	0,0007	3	0	0,0054
900–1 000	100	6 041	0,0007	3	0	0,0055
1 000–1 060	60	3 577	0,0007	3	0	0,0056

BILAGA B



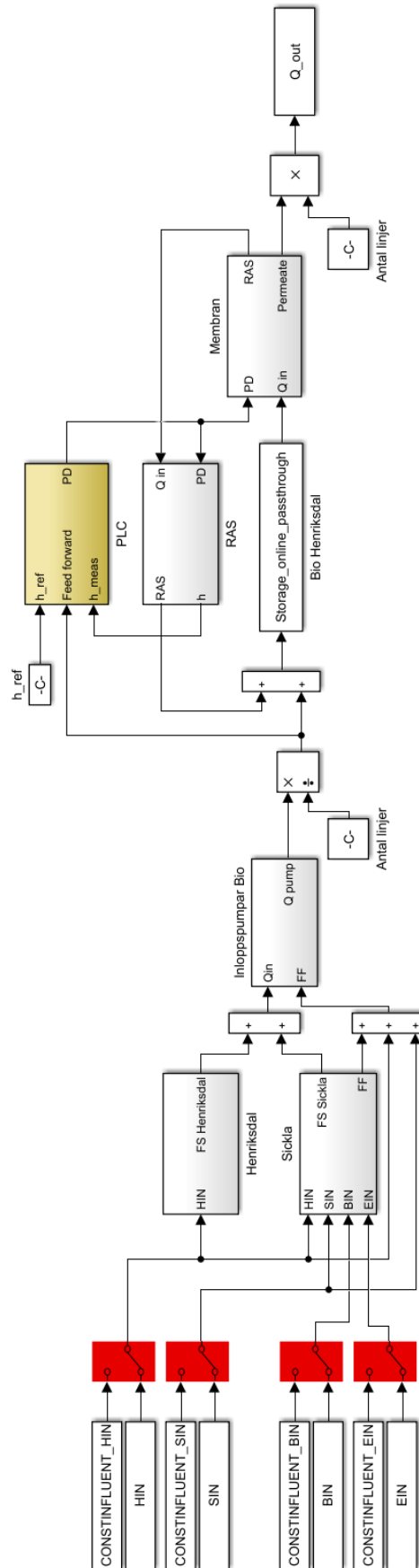
Figur B1. Implementering av en regulator i Matlab/Simulink som beräknar flödesbörvärde till Bromma pumpstation. Förklaringar av förkortningar ses i tabell 1 och ekvation (32)–(34).



Figur B2. Implementering av en regulator i Matlab/Simulink som beräknar Plant Demand till RAS- och permeatpumparna. Förklaringar av förkortningar ses i ekvation (28)–(30).

Tabell B1. Parametervärden som användes för beräkning av Plant Demand

Beteckning	Värde
Q_{max} (m ³ /d)	144 000
$DB1$ Flow SP (m ³ /d)	10 000
$DB2$ Flow SP (m ³ /d)	15 000
h_{ref} (m)	2,0
LCH_{LO} (m)	1,8
LCH_{HI} (m)	2,5
LCL_{LO} (m)	1,0
LCL_{HI} (m)	2,2
τ (min)	20



Figur B3. Den sammansatta modellen över flödet genom Henriksdals nya reningsverk gjort i Matlab/Simulink.