



UPPSALA
UNIVERSITET

W14007

Examensarbete 30 hp
Maj 2014

Modellering av avloppspumpstationer

En modelloptimering och känslighetsanalys
av pumpstationer i Uppsala och Västervik

Tove Lindblom

REFERAT

Modellering av avloppspumpstationer – En modelloptimering och känslighetsanalys av pumpstationer i Uppsala och Västervik

Tove Lindblom

För att utreda ärenden kopplade till bräddning och källaröversvämningar blir det allt vanligare att använda hydraulisk modellering. I hydrauliska modeller ingår flera olika beståndsdelar, bland annat ledningar, brunnar, bräddavlopp och pumpstationer. Pumpstationer är en beståndsdel som är ganska komplex att beskriva i dessa modeller och att ta fram den relativt stora mängd indata som krävs för att beskriva modellparametrarna kan vara mycket tidskrävande. Genom att veta vilka modellparametrar i pumpstationer som har störst betydelse för modellberäkningarna skulle mer vikt kunna läggas vid att beskriva dessa och därmed skulle modelleringen kunna bli mer tidseffektiv och beräkningsresultatet bli bättre kvalitetsmässigt. En modellparameter som tros vara av stor betydelse för modellberäkningarna är pumpkapacitet. Hur verklig pumpkapacitet skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet och hur detta påverkar modellberäkningarna är därför intressant att veta.

Syftet med det här examensarbetet var att genom kapacitetsmätning i avloppspumpstationer undersöka hur uppmätt pumpkapacitet skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet. Därtill var syftet att undersöka hur pumpstationer bäst beskrivs i modeller och hur variationer av utvalda modellparametrar påverkar beräkningsresultatet med avseende på flöde och bräddvolym. Pumpkapacitet mättes i totalt elva pumpstationer belägna i Uppsala och Västervik. Modeller av dessa pumpstationer konstruerades sedan i MIKE URBAN. Utgångspunkten var att beskriva pumpstationsmodellerna så verklighetsbaserat som möjligt och modellerna kalibrerades också mot uppmätt kapacitet. För modellparametrarna pumpkapacitet samt accelerations- och retardationstid genomfördes sedan en känslighetsanalys.

Resultaten visade att uppmätt pumpkapacitet ofta skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet och att skillnaderna kan bero på försämrad kondition hos både pump och tryckledning. Resultaten visade också på behovet att kalibrera modeller för att erhålla beräkningsresultat som i tillräcklig grad beskriver verkliga förhållanden vad gäller flöde. Enligt den här studien bör dessutom eventuella högpunkter före släpppunkt på tryckledningen beskrivas i modeller för att beräkningsresultatet bättre ska beskriva verkliga förhållanden vad gäller flöde. Resultaten av känslighetsanalysen visade att variation av modellparametern pumpkapacitet tydligt påverkar resultatet av modellberäkningar med avseende på både flöde och bräddvolym. Variation av modellparametrarna accelerations- och retardationstid påverkade resultatet från modellberäkningar med avseende på flöde medan påverkan på bräddvolym endast var marginell.

Nyckelord: Avloppspumpstationer, kapacitetsmätning, hydraulisk modellering, MIKE URBAN, känslighetsanalys

Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet

Box 337, SE-751 05 Uppsala

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

Modelling of sewer pumping stations – A model optimization and sensitivity analysis of pumping stations in Uppsala and Västervik

Tove Lindblom

In order to investigate incidents regarding sewer overflow and basement flooding the use of hydraulic models has become more common. Hydraulic models consist of a number of different elements such as links, manholes, overflow outlets and pumping stations. Describing pumping stations in these models is quite complicated and the work to collect the relatively large amount of input data needed to describe all model parameters can be a very time-consuming task. By knowing which of the model parameters in pumping stations that are most important for the model computations focus could be concentrated on describing these important parameters. This would make the modelling work more time effective and better computation results would be obtained. One model parameter that is considered to be important for the model computations is pump capacity. How real pump capacity differs from theoretical pump capacity would therefore be interesting to know.

The aim of this master thesis was to investigate how real pump capacity differs from theoretical pump capacity based on capacity measurements in pumping stations. In addition to this, the aim was to investigate how pumping stations are best described in models and how variations of selected model parameters affect the computation result with respect to discharge and overflow. Pump capacity was measured in eleven pumping stations located in Uppsala and Västervik. Models of these pumping stations were constructed in MIKE URBAN. The intention was to describe the pumping station models as reality-based as possible and the models were calibrated against measured capacity. For the model parameters pump capacity, acceleration time and deceleration time sensitivity analysis was also performed.

The results indicated that real pump capacity often differs from theoretical pump capacity and that the differences could be due to impaired conditions of both pump and pressure conduit. The results also indicated the importance of calibrating models in order to obtain computation results that sufficiently enough describe real conditions regarding discharge. According to this study a possible high point before the delivery point on the pressure conduit should be described in models to obtain computation results that better describe real conditions regarding discharge. The results of the sensitivity analysis indicated that variation of pump capacity affects the computation results with respect to both discharge and overflow. Variation of acceleration time and deceleration time affected the computation results with respect to discharge while the effect on overflow was marginal.

Keywords: Sewer pumping stations, capacity measurement, hydraulic modelling, MIKE URBAN, sensitivity analysis

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

FÖRORD

Detta examensarbete är den avslutande delen av civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och omfattar 30 hp. Arbetet har utförts på Tyréns AB i Stockholm för avdelningen VA-teknik.Handledare för examensarbetet har varit Hans Hammarlund på Tyréns. Bengt Carlsson på institutionen för informationsteknologi vid Uppsala universitet har varit ämnesgranskare och Allan Rodhe på institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet har varit examinator. Kopplingar finns mellan detta examensarbete och ett parallellt utfört examensarbete av Linnéa Fredriksson.

Först och främst vill jag tacka min handledare Hans Hammarlund för all den värdefulla hjälp och handledning jag har fått under arbetets gång. Jag vill också tacka alla på avdelningen VA-teknik på Tyréns för ett fint välkomnande.

Stort tack till Sara Eriksson på Uppsala Vatten för hjälp och trevligt sällskap vid mätningar i pumpstationer och tack för all pumpstationsdata du letat fram till mig i flera omgångar.

Tack också till Elisabet Larsson på Västervik Miljö och Energi för trevligt mottagande i Västervik och för all pumpstationsdata som du försett mig med.

Slutligen vill jag tacka Linnéa Fredriksson som tillsammans med mig har spenderat många timmar i pumpstationer, diskuterat modeller och till slut genomfört den sista delen av utbildningen. Tack för ditt sällskap.

Uppsala, mars 2014

Tove Lindblom

POPURLÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Modellering av avloppspumpstationer – En modelloptimering och känslighetsanalys av pumpstationer i Uppsala och Västervik

Tove Lindblom

Förorenat avloppsvatten från hushåll och industrier avleds via avloppssystem från samhället till reningsverk där vattnet renas innan det släpps tillbaka till naturen. Avloppsvatten ska avledas på ett sätt som säkrar en god och hygienisk miljö i området. I första hand avleds avloppsvatten från fastigheter i nedgrävda ledningar med hjälp av självfall. Det går dock oftast inte att bygga ut dessa självfallsledningar hur långt som helst. För att vattnet ska kunna avledas med självfall krävs nämligen en viss lutning på ledningen, och till slut kan ledningen behöva anläggas på ett orimligt stort djup för att denna lutning ska erhållas. Även markens karaktär kan vara begränsande för utbyggnad av självfallsledning, då det till exempel kan vara ohållbart att spränga bort stora bergsmassor för att möjliggöra anläggning av självfallsledning. Där självfallsledning av olika skäl inte längre kan byggas ut anläggs vanligtvis en avloppspumpstation. I avloppspumpstationen pumpas avloppsvatten och leds via en tryckledning till en högre punkt där det släpps och återigen kan avledas med självfall.

Avloppssystemet dimensioneras för att klara ett visst flöde av avloppsvatten. Dock kan situationer uppkomma då tillflödet av avloppsvatten till avloppssystemet är större än vad systemet har kapacitet att avleda. Sådana extrema situationer kan uppkomma till exempel vid stora nederbördstillfällen eller vid driftstopp av pumpstationer. I dessa nödfall avleds det orenade avloppsvattnet via ett så kallat bräddavlopp direkt ut till ett vattendrag, detta kallas bräddning. Bräddning av avloppsvatten är en nödlösning för att undvika att avloppsvatten däms upp i avloppssystemets ledningar vilket kan orsaka att till exempel källare som är belägna på en låg höjd översvämmas. Att orenat avloppsvatten via bräddning släpps ut direkt i naturen är naturligtvis inte önskvärt då det kan leda till allvarlig förorening av området. Till vattendrag som är extra känsliga mot föroreningar är det viktigt att bräddning inte sker. Bräddavlopp är ofta anslutna till avloppspumpstationer och möjligheten till bräddning är därmed en viktig aspekt att ta i beaktande när anläggning av avloppspumpstationer planeras.

För att utreda problem med bräddning och källaröversvämningar kan matematiska modeller användas. En matematisk modell beskriver verkligheten så bra det går men är ändå en förenkling av verkligheten. När avloppssystem beskrivs i en matematisk modell handlar det om en hydraulisk modell. Syftet med hydrauliska modeller är att undersöka vilka följderna blir för avloppssystemet vid ett visst flödesförlopp. Hydrauliska modeller består av flera olika delar såsom brunnar, självfallsledningar, pumpstationer, tryckledningar och bräddavlopp. Dessa delar beskrivs i sin tur av ett antal modellparametrar som så långt som möjligt ska återge verkliga förhållanden. Exempel på parametrar är ledningsdimensioner, nivåer, och olika pumpegenskaper för pumpar i avloppspumpstationer. För att ange vilka värden dessa parametrar ska beskrivas med krävs en stor mängd indata, det vill säga verkliga värden. Att samla ihop all indata kan vara ett mycket tidskrävande arbete. När modellen är färdigkonstruerad görs en kalibrering mot verkliga värden för att bekräfta att modellen beskriver de verkliga förhållandena så bra som möjligt. För att kunna göra beräkningar av modellen krävs sedan att ett inflöde av avloppsvatten beskrivs. Detta inflöde kan grundas på

samhällets vattenförbrukning, men även det vatten som tillkommer avloppssystemet via nederbörd kan beskrivas i modellen.

Pumpstationer är som sagt en av beståndsdelarna i hydrauliska modeller. Pumpstationer är relativt komplexa att beskriva i modeller då förhållandevis mycket indata krävs för att beskriva dess modellparametrar. Olika modellparametrar kan dock ha olika stor betydelse för resultatet av modellberäkningar. Att veta vilka modellparametrar i pumpstationsmodeller som har störst betydelse för beräkningsresultatet skulle vara värdefullt. Då skulle störst vikt kunna läggas vid att beskriva just dessa modellparametrar vilket skulle göra arbetet mer tidseffektivt. Dessutom skulle ett bättre resultat kunna erhållas om fokus låg på att beskriva de viktigaste parametrarna noggrant. Resultat i hydrauliska modeller kan utgöras av beräknat flöde, beräknade nivåer och beräknad bräddning.

Vilka modellparametrar som har störst betydelse för beräkningsresultatet kan undersökas genom att en känslighetsanalys genomförs. Känslighetsanalys kan utföras på många olika sätt men ett sätt är att variera en modellparameter i taget medan resterande parametrar hålls konstanta och notera påverkan på beräkningsresultatet av denna variation. Då variation av en modellparameter medför stor påverkan på beräkningsresultatet är parametern känslig. En modellparameter i avloppspumpstationer som antogs vara känslig var pumpkapacitet. Pumpkapacitet beskriver pumpens förmåga att pumpa vatten och anger för det pumpade vattnet vilket flöde som erhålls vid vilket tryck. Att veta hur verklig, det vill säga uppmätt, pumpkapacitet skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet (den kapacitet som pumpleverantören garanterar för en ny pump) skulle därför vara intressant.

Syftet med det här examensarbetet var att genom kapacitetsmätningar (det vill säga mätning av flöde och tryck) i avloppspumpstationer undersöka hur uppmätt pumpkapacitet skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet. Det undersöktes även hur pumpstationer bäst beskrivs i en hydraulisk modell och hur variationer av utvalda parametrar i pumpstationsmodeller påverkar beräkningsresultatet vad gäller flöde och bräddning. Kapacitetsmätningar utfördes i totalt elva stycken pumpstationer belägna i Uppsala och Västervik. Modeller av dessa pumpstationer konstruerades sedan och kalibrerades mot uppmätt pumpkapacitet. Därefter gjordes en känslighetsanalys för modellparametrarna pumpkapacitet samt accelerations- och retardationstid.

Resultaten visade att uppmätt pumpkapacitet ofta skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet. Resultaten visade också att det är viktigt att kalibrera modeller för att de resultat som erhålls från modellberäkningar ska överensstämma med verkliga förhållanden vad gäller flöde. Slutligen visade resultaten från känslighetsanalysen att variation av modellparametern pumpkapacitet gav tydlig påverkan på beräkningsresultatet vad gäller både flöde och bräddning. Variation av modellparametern accelerations- och retardationstid påverkade beräkningsresultatet vad gäller flöde men påverkade bräddningen endast marginellt.

ORDLISTA

Accelerationstid	Tid för pump att från pumpstart nå full kapacitet
Avloppsvatten	Förorenat vatten som kan bestå av spillvatten, dagvatten, dränvatten, processvatten och kylvatten
Avrinningskoefficient	Andelen av nederbörden som skapar ytavrinning på en viss yta
Bräddning	Avledning av orenat avloppsvatten till recipient vid överskridande av avloppsystemets avledningskapacitet
CDS-regn	<i>Chicago Design Storm</i> , typregn sammansatt av blockregn med olika varaktigheter och intensiteter
Dagvatten	Vatten från nederbörd, avrinner ytligt
Driftpunkt	Beskriver vid vilket tryck och flöde en pump arbetar
Dränvatten	Vatten från dränering
Duplikat system	Avloppssystem där spillvatten och dagvatten avleds i separata rörledningar
Gångtid	Tiden en pump är igång
Kombinerat system	Avloppssystem med gemensam ledning för spillvatten, dagvatten och dränvatten
Koncentrationstid	Tiden det tar för vattnet från regn att rinna till den punkt dagvattnet avleds från
Känslighetsanalys	Analys som undersöker hur beräkningsresultatet i modeller påverkas då olika modellparametrar varierar
Maxdygnfaktor	Förhållandet mellan spillvattenavrinning för ett dygn med maxavrinning och ett dygn och medelavrinning
Maxtimfaktor	Förhållandet mellan spillvattenavrinning för den timme med maxavrinning och timme med medelavrinning under årsmedeldygn
Mannings tal (M)	Tal som anger skrovligheten för ett material, ju skrovligare yta desto lägre Mannings tal (M)
Pumpcykel	En hel pumpning, från pumpstart tills flödet återigen är noll
Pumpkapacitet	Pumpens förmåga att pumpa

Pumpsump	Magasineringsvolym i pumpstation för vatten som ska pumpas
Retardationstid	Tid för pump att nå flödet noll vid avstängning av pump
Separat system	Avloppssystem där spillvatten avleds i rörledning medan spillvatten avleds i dike eller rännsten
Separerade system	Innefattar duplikat system och separat system
Spillvatten	Förorenat vatten från hushåll, industrier och allmänna byggnader
Startnivå	Anger vid vilken vattennivå i pumpsumpen som pumpen startas
Statiskt tryck	Tryck som erhålls i pumpsystem och fås av höjdskillnaden mellan vattennivå i pumpsump och släppnivå, kan även uttryckas som <i>statiskt tryckhöjd</i>
Stoppnivå	Anger vid vilken vattennivå i pumpsumpen som pumpen stängs av
Systemkurva	Beskriver systemets förmåga att avleda pumpat vatten och erhålls genom att addera statiskt tryck och tryckförluster i tryckledning vid olika flöden
Teoretisk pumpkurva	Beskriver en pumps teoretiska förmåga att pumpa vatten
Återkomsttid	Statistiskt mått på tiden mellan tillfällena för inträffande av ett regn med en viss intensitet och varaktighet

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING.....	1
1.1 SYFTE.....	2
1.2 AVGRÄNSNINGAR	2
2. TEORI.....	3
2.1 AVLOPPSSYSTEM.....	3
2.1.1 Avloppspumpstationer	4
2.1.2 Pumpsystem	8
2.2 KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER.....	10
2.3 MODELLERING AV AVLOPPSPUMPSTATIONER.....	11
2.3.1 Mike Urban	11
2.4 KÄNSLIGHETSANALYS	13
3. MATERIAL OCH METODER	15
3.1 OMRÅDESBESKRIVNING.....	15
3.1.1 Uppsala.....	15
3.1.2 Västervik	15
3.2 KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER.....	16
3.2.1 Databehandling.....	19
3.3 MODELLERING	21
3.3.1 Modellbygge.....	21
3.3.2 Statiskt tryck.....	26
3.3.3 Kalibrering	28
3.3.4 Instabilitet.....	30
3.3.5 Känslighetsanalys.....	30
4. RESULTAT	33
4.1 KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER.....	33
4.2 MODELLERING	38
4.2.1 Statiskt tryck.....	38
4.2.2 Kalibrering	40
4.2.3 Instabilitet.....	43
4.2.4 Känslighetsanalys.....	45
4.2.5 Vattenhastighet.....	49
5. DISKUSSION.....	51

5.1	KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER.....	51
5.2	MODELLBYGGE.....	53
5.3	STATISKT TRYCK.....	54
5.4	KALIBRERING	55
5.5	INSTABILITET	56
5.6	KÄNSLIGHETSANALYS	57
6.	SLUTSATSER.....	60
7.	REFERENSER	61
	BILAGA A - DYGNSVARIATION VATTENFÖRBRUKNING.....	63
	BILAGA B - PUMPSTATIONSDATA	64
	BILAGA C - MÄTVÄRDEN	66
	BILAGA D - RESULTAT KÄNSLIGHETSANALYS	67

1. INLEDNING

För att uppnå en god och hygienisk miljö ska avloppsvatten på ett säkert sätt avledas från samhället till reningsverk där vattnet renas till den grad att det kan släppas ut till recipient. Avloppssystemet bygger först och främst på att avloppsvattnet avleds med självfall men där självfallsledningar inte längre kan byggas ut på grund av topografiska, ekonomiska eller andra skäl anläggs avloppspumpstationer som pumpar avloppsvattnet upp till en högre nivå varifrån det återigen kan avledas med självfall (Svenskt Vatten, 2004). Ett pumpsystem består av själva avloppspumpstationen och den tryckledning i vilken det trycksatta avloppsvattnet leds. I anslutning till pumpstationen finns ofta bräddavlopp som vid extrema flöden nödvänder avloppsvattnet till recipient för att undvika uppdamning av avloppsvatten i ledningssystemet vilket kan orsaka källaröversvämningar (Svenskt Vatten, 2004). Bräddning av avloppsvatten kan dock vara ett stort problem eftersom orenat avloppsvatten leds rakt ut i recipient vilket kan medföra allvarlig kontaminering.

För att utreda risken för bräddning och källaröversvämningar har det blivit allt vanligare att använda hydraulisk modellering. Ett annat syfte med hydraulisk modellering kan vara att i planeringssyfte utvärdera effekter av planerade åtgärder på avloppssystemet (Granlund och Nilsson, 2000). Det vanligaste modelleringsverktyget i Sverige är MIKE URBAN. För att konstruera en hydraulisk modell krävs en hel del indata. Först ska avloppssystemets uppbyggnad beskrivas med hjälp av till exempel ledningsdimensioner, nivåer och pumpstationsdata. För att kunna göra simuleringar behövs därutöver indata som kan beskriva avrinning till systemet, dessa indata innefattar bland annat det anslutande avrinningsområdets egenskaper, klimatdata och spillvattenflödets dygnsvariationer (Granlund och Nilsson, 2000). Omfattningen av tillgänglig indata och kvaliteten på dessa avgör hur väl resultaten från modellberäkningarna går att lita på. För att vara säker på att beräknade flöden och nivåer är tillräckligt lika uppmätta förhållanden bör modellen kalibreras mot uppmätta värden.

I hydrauliska modeller ingår flera olika beståndsdelar såsom ledningar, brunnar och pumpstationer. Pumpstationer är en beståndsdel som är förhållandevis komplex att beskriva i dessa modeller och för att kunna beskriva de modellparametrar som ingår i pumpstationer krävs en stor mängd indata, vilket kan vara mycket tidskrävande att samla in. Genom att veta vilka av parametrarna i pumpstationsmodeller som har störst påverkan på beräkningsresultatet skulle mer vikt kunna läggas vid att beskriva dessa jämfört med övriga parametrar. Därmed skulle modelleringsarbetet bli mer tidseffektivt och beräkningsresultaten skulle också komma att vara av bättre kvalitet.

En modellparameter som beskriver pumpstationer i hydrauliska modeller är pumpkapacitet. Det enklaste sättet är att pumpkapaciteten beskrivs med ett skattat konstant flöde. Denna parameter kan dock beskrivas på ett mer avancerat sätt genom att pumpkurva för den pump som ska beskrivas i modellen importerar. Teoretisk pumpkurva erhålls från pumptillverkaren och anger pumpens kapacitet vid nyinstallation. Den teoretiska pumpkapaciteten behöver dock inte överrensstämma med den verkliga pumpkapaciteten med tiden och om skillnaden är stor kan detta medföra betydande fel i modellberäkningarna med avseende på till exempel flöden och bräddvolymer (Granlund och Nilsson, 2000). Verklig pumpkapacitet beror delvis

på pumpens aktuella kondition men även på tryckledningens kondition. Har till exempel sediment bildats i tryckledningen kan detta medföra att flödet begränsas och att en mycket större bräddvolym än den som beräknats erhålls i verkligheten (Granlund och Nilsson, 2000). Att ha uppgifter om hur verklig pumpkapacitet skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet kan därmed vara mycket värdefullt. En annan modellparameter som beskriver pumpstationer är pumpens accelerations- och retardationstid. Uppgifter om denna parameter saknas ofta så om denna parameter skulle kunna konstateras ha liten betydelse för beräkningsresultaten skulle det vara ett värdefullt resultat.

1.1 SYFTE

Syftet med det här examensarbetet var att genom mätning av flöde och tryck i avloppspumpstationer undersöka hur uppmätt pumpkapacitet skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet. Ett annat syfte var att undersöka hur avloppspumpstationer bäst beskrivs i en MIKE URBAN-modell. Slutligen var syftet att undersöka hur variationer av utvalda modellparametrar påverkar beräkningsresultatet genom att göra en känslighetsanalys. De frågeställningar som projektet avsågs besvara var följande:

Kapacitetsmätningar

- Hur skiljer sig uppmätt pumpkapacitet från teoretisk pumpkapacitet?
- Är det värdefullt att göra kapacitetsmätningar ur modelleringsperspektiv?

Modellering

- Hur skiljer sig uppmätt pumpkapacitet från beräknad pumpkapacitet?
- Bör eventuell högpunkt före släppunkt införas i pumpstationsmodeller?
- Hur kan problem med instabilitet i pumpstationsmodeller lösas?
- Hur kan problem med icke representativa flödestoppar i början av varje pumpcykel för beräknat flöde lösas?

Känslighetsanalys

- Hur påverkar variationer av modellparametrarna pumpkapacitet samt accelerations- och retardationstid beräkningsresultatet?
- Hur beskrivs bäst modellparametern pumpkapacitet?
- Hur beskrivs bäst modellparametrarna accelerations- och retardationstid?

1.2 AVGRÄNSNINGAR

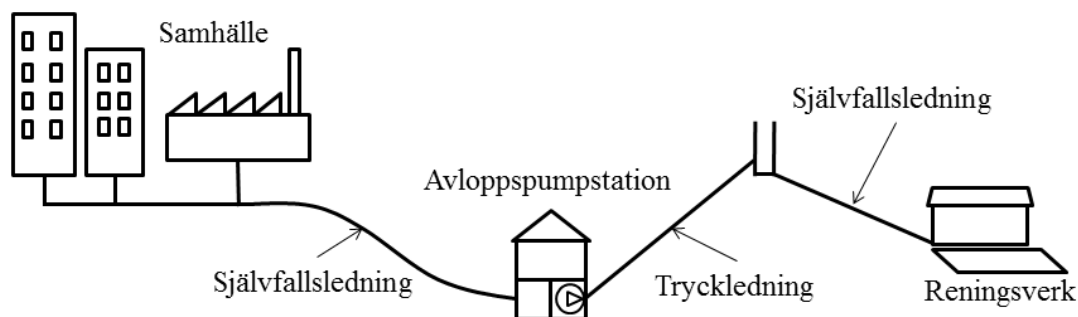
Examensarbetet avgränsades genom att endast en lokal känslighetsanalys gjordes där en parameter i taget varierades medan övriga hölls konstanta. Dessutom gjordes känslighetsanalysen endast för ett urval av parametrar för pumpstationsmodeller då syftet var att först och främst beskriva modellerna så bra som möjligt.

2. TEORI

2.1 AVLOPPSSYSTEM

Syftet med ett avloppssystem är att avleda avloppsvatten på ett sätt som säkrar en god och hygienisk miljö i avrinningsområdet (Svenskt Vatten, 2004). Avloppsvatten är ett samlingsnamn för förorenat vatten som kan bestå av till exempel spillvatten, dagvatten och dränvatten. Spillvatten i sin tur är förorenat vatten från till exempel hushåll, industrier eller serviceanläggningar (Svenskt Vatten, 2004). Avloppssystem delas upp i två olika typer av system utifrån vilken sorts avloppsvatten som avleds i dem, vilket beskrivs av Svenskt Vatten (2004). I kombinerade system avleds spillvatten i samma ledning som dagvatten och dränvatten. I separerade system avleds spillvatten i en egen ledning medan dagvatten antingen avleds i en egen ledning (duplikat system) eller i dike (separat system). Dränvatten avleds i separerade system antingen tillsammans med spillvatten eller tillsammans med dagvatten, och avledningen av dränvatten kan i ett och samma område variera mellan dessa två sätt.

I ett avloppssystem bör avloppsvattnet i första hand avledas från fastigheterna med självfall. Där självfallsledningar inte längre kan byggas ut av topografiska eller andra skäl anläggs en pumpstation som lyfter vattnet till en högre punkt varifrån avloppsvattnet kan fortsätta avledas med självfall (Svenskt Vatten, 2004). Avloppsledningsnät består av en kombination av självfallsledningar och trycksatta ledningar från pumpstationer som leder avloppsvattnet till ett reningsverk där vattnet renas för att sedan kunna släppas ut i recipient, se figur 1. Situationer kan uppkomma, till exempel vid stora nederbördstillfällen samt vid driftstopp av pumpstation eller ledning, då tillflödet till avloppssystemet överskrider systemets avledningskapacitet. Avloppsvattnet måste då nödvändigtvis avledas via bräddavlopp till recipient för att undvika uppdämning av avloppsvatten i ledningssystemet vilket kan orsaka källaröversvämningar. Risken för extrema flödesbelastningar är större i kombinerade system än i separerade system eftersom dagvattnet där är direkt anslutet till ledningssystemet. Svenskt Vatten (2004) rekommenderar att avloppssystem bör utformas som separerade system vid nybyggnation. Dock kan problemet med extrema flödesbelastningar vara svårt att helt undvika även med separerade system då oönskat inläckage av dagvatten till ledningarna kan förekomma (Svenskt Vatten, 2004). För att minska risken för bräddning och medförande kontaminering av recipient kan magasin i anslutning till avloppsledningssystemet utnyttjas till magasinering och därmed utjämning av flödet (Svenskt Vatten, 2004). Även om det inte finns risk för bräddning kan det finnas fördelar med flödesutjämning på grund av att ojämnt flöde in till reningsverket kan medföra en försämrad rening av vattnet.



Figur 1. Förenklad bild av avloppssystem. Oftast leds avloppsvattnet i längre serier av självfallsledningar och tryckledningar om vartannat innan det når reningsverket.

Spillvattenförbrukningen har både en dygnsvariation, veckovariation och årsvariation. På liknande sätt varierar spillvattenavrinningen såvida det inte sker något oväntat som en vattenläcka eller ifall vattenförbrukningen är kopplad till bevattning (Svenskt Vatten, 2004). I det här projektet beskrevs vattenförbrukningens dygnsvariation av det exempel som kan hittas i figur 4.1 Svenskt Vatten (2004). Denna dygnsvariation återges även i bilaga A. För att beräkna det största flödet till avloppsnätet, det vill säga det dimensionerande spillvattenflödet (Q_{dim}), justeras dygnsmedelflödet ($Q_{d\ medel}$) med en maxdygnsfaktor ($c_{d\ max}$) och en maxtimfaktor ($c_{t\ max}$) och dimensionerande spillvattenflöde fås av

$$Q_{dim} = Q_{d\ medel} \cdot c_{d\ max} \cdot c_{t\ max} \quad (1)$$

Svenskt Vatten (2004) anger att maxdygnsfaktorn kan variera mellan 2,3 och 1,5 och maxtimfaktorn mellan 3,0 och 1,7. Ett vanligt antagande är dock att ansätta produkten av maxtimfaktorn och maxdygnsfaktorn till 5 enligt Hammarlund (2013, pers. kontakt), så länge det inte gäller mycket små eller mycket stora områden.

Oavsett om avloppssystemet är kombinerat eller separerat förekommer påverkan av nederbörd vad gäller flöde. Det flöde som erhålls via avrinning från nederbörd beskrivs av avrinningsområdets storlek, avrinningskoefficient, nederbördens intensitet och koncentrationstid. Avrinningskoefficienten anger andelen av nederbörden som skapar ytavrinning på en viss yta och beror därmed av bland annat vilken sorts yta avrinningsområdet utgörs av (Svenskt Vatten, 2004). Koncentrationstiden, även kallad rinntid, är den tid det tar för vattnet från regn att rinna till den punkt varifrån dagvattnet avleds. Typregn av typen CDS (Chicago Design Storm) har tagits fram för dimensionering och analys av avloppssystem (Ahlman, 2011). Ahlman (2011) påpekar att en fördel med CDS-regn är att det innehåller medelintensiteten för alla varaktigheter av regn upp till den varaktighet som väljs. På så sätt innehåller CDS-regnet alla sorters regn och inkluderar därmed det regn som är värst för avloppssystemet ur översvämningssynpunkt.

2.1.1 Avloppspumpstationer

Med pumpstationer åsyftas i den här rapporten avloppspumpstationer, det vill säga pumpstationer som pumpar avloppsvatten. Där självfallsledningar inte längre kan byggas ut i ett avloppssystem anläggs en pumpstation som kan lyfta vattnet till en högre nivå (Svenskt Vatten, 2004). Förutom nivåförhållandena i området måste också möjligheten att kunna

avleda bräddat vatten till lämplig recipient tas i beaktande vid valet av utbyggnad av självfallsledning alternativt anläggning av pumpstation (VAV, 1984). Pumpstationer kan utformas på en mängd olika sätt men vissa beståndsdelar förekommer alltid i pumpstationer och dessa presenteras nedan.

Pumpar

Vid pumpning av avloppsvatten finns två val av pumpar, lyftande pumpar eller tryckande pumpar (VAV, 1984). Lyftande pumpar används i öppna system och de vanligaste sorterna är snäckpumpen och propellerpumpen. Snäckpumpen har hög kapacitet och är okänslig för större föroreningar men har en begränsad lyfthöjd (VAV, 1984). Snäckpumpens används främst på reningsverk (Hammarlund, 2013, pers. kontakt). Propellerpumpen är mer känslig för föroreningar och används oftast för att pumpa dagvatten (VAV, 1984). I avloppspumpstationer ute på avloppsledningsnätet är det nästan alltid tryckande pumpar som installeras och den vanligaste sorten är centrifugalpumpen (VAV, 1984). Centrifugalpumpen består av en hydrauldel och en motordel (Malmgren, u.d.). Huvuddelarna av centrifugalpumpens hydrauldel är pumphuset med in- och utlopp samt pumphjulet. Med motorns drivkraft börjar pumphjulet rotera vilket medför att även vattnet inuti pumphuset börjar rotera. Vattnet förflyttas mot pumphjulets ytterkant på grund av centrifugalkraften, ett undertryck uppstår vid hjulets centrum och nytt vatten sugas in (Malmgren, u.d.). Val av pumphjul påverkar pumpens kapacitet och det finns en mängd olika sorters pumphjul, i avloppspumpar är kanalhjul och friströmshjul två vanligt förekommande sorter. Kanalhjul används främst vid högre flöden och större tryckhöjder medan friströmshjul, som har en lägre verkningsgrad, används vid lägre tryckhöjder då vattnet är starkt förorenat och risken för igensättning stor (VAV, 1984). Val av centrifugalpump görs utifrån den kapacitet och tryckhöjd som önskas för pumpstationen samt hur starkt förorenat avloppsvattnet är (VAV, 1984). Begreppen kapacitet och tryckhöjd beskrivs i avsnitt 2.1.2. Hur många pumpar som bör installeras i en pumpstation beror på hur stor stationen är och vilken säkerhet mot driftstopp som önskas (VAV, 1984). Ofta installeras en extra pump utöver det antal pumpar som krävs för att klara av det dimensionerade flödet för att säkerställa full kapacitet även om en av pumparna skulle sluta fungera. Pumpar i en pumpstation kan antingen vara torruppställda eller våtuppställda. Våtuppställda pumpar är placerade direkt i vattnet nere i pumpsumpen och är vanligt förekommande i mindre pumpstationer medan större pumpstationer oftast har torruppställda pumpar som står i ett särskilt pumprum med anslutning till pumpsumpen via rörledningar (VAV, 1984). Med avseende på driftteknik, säkerhet och hygien är torruppställda pumpar att föredra men med avseende på kostnad och platstillgänglighet är däremot våtuppställda pumpar att föredra (VAV, 1984).

Pumpsump

Pumpsumpen är det utrymme i en avloppspumpstation dit avloppsvattnet rinner till från en uppströms självfallsledning och magasineras innan det pumpas vidare i systemet. Den magasineringsvolym som krävs bestäms utifrån skillnaden mellan tillrinningen av avloppsvatten och pumpens kapacitet (VAV, 1984). I pumpsumpen finns minst en ledning för inkommande vatten och eventuellt ett bräddutlopp (detta kan alternativt vara placerat i en brunn i anslutning till pumpsumpen). Därutöver finns oftast någon sort av mätutrustning för

att mäta vattennivån i pumpsumpen. Utseendet på pumpsumpen kan variera mycket beroende på pumpstationens storlek och rådande förutsättningar men generellt utformas den på ett sätt som ger en effektiv pumpning av avloppsvattnet och som minimerar risken för slamavlagring på pumpsumpens botten och sidor.

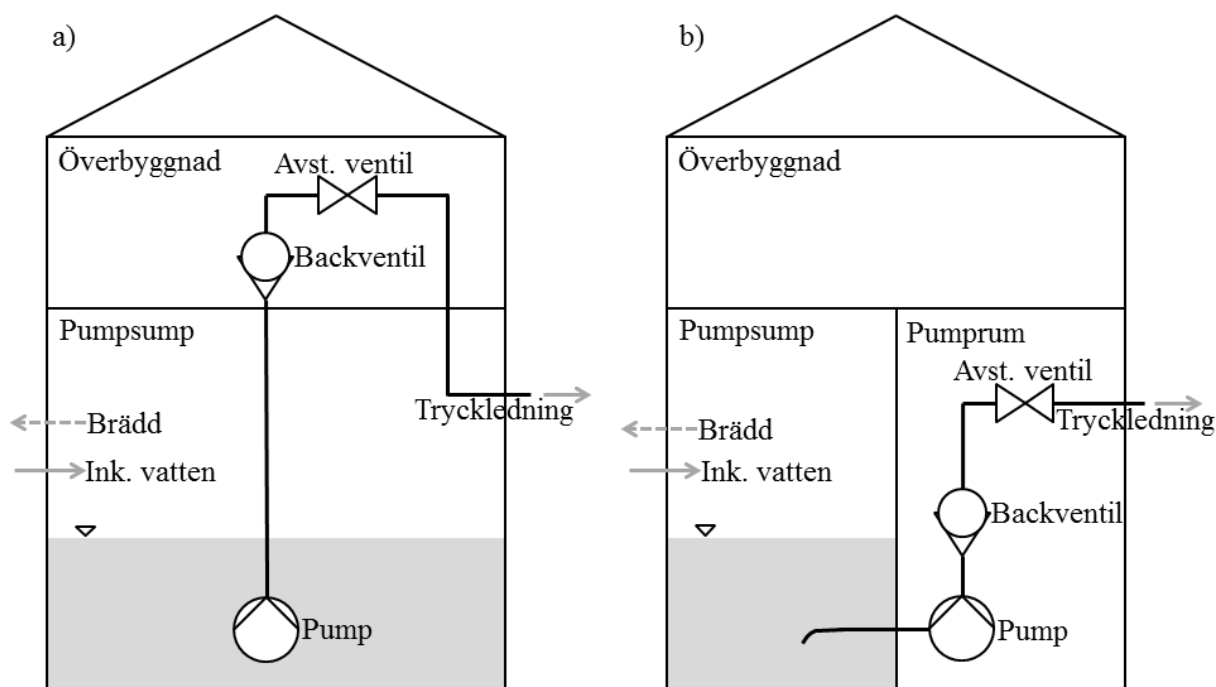
Tryckledning

Tryckledningen leder avloppsvatten från pumparna inne i pumpstationen vidare ut och upp till den punkt där avloppsvattnet återigen kan avledas med självfall, släppunkten. Vid val av material för tryckledningen tas i beaktande kostnad, möjlighet till ombyggnad, tryckhöjd och risk för tryckslag (VAV, 1984). Begreppet tryckslag innebär att trycket varierar kraftigt då vattenhastigheten ökar eller minskar i en ledning vid till exempel pumpstart och pumpstopp. Särskilt vid pumpstopp finns det en risk att stora undertryck eller övertryck orsakade av tryckslag skadar tryckledningen eller andra delar av pumpsystemet (VAV, 1984). Dimension på tryckledningen inom pumpstationen bör normalt väljas så att hastigheten vid normal pumpning ligger mellan 0,6 och 1,2 m/s och vid pumpning med maxkapacitet högst 1,5 till 2 m/s (VAV, 1984). Dimension på tryckledningen utanför pumpstationen bör väljas så att hastigheten ger självrensning i ledningen vilket brukar ske vid cirka 0,6 m/s (VAV, 1984). Av detta framgår att tryckledningens dimension kan ändras i en och samma ledning. Vid en dimensionsändring uppstår en tryckförlust i ledningen vilket det även gör till exempel då ledningen kröker och där det sitter olika sorters ventiler (Hammarlund, 2013, pers. kontakt). Tre typer av ventiler är vanligt förekommande i pumpstationer: avstängningsventiler, backventiler och styrda ventiler (VAV, 1984). Avstängningsventiler används för att strypa flödet i en ledning, backventiler hindrar det avloppsvattnet som finns i tryckledningen att rinna tillbaka till pumpstationen då pumpen stängs av och styrda ventiler används för att minska tryckslag vid stora flöden eller tryckhöjder (VAV, 1984). Tryckledningar i plast har en tendens att expandera och kan efter en tid ha en dimension runt 5 % större än den ursprungliga (Johansson, 2014, pers. kontakt).

Överbyggnad

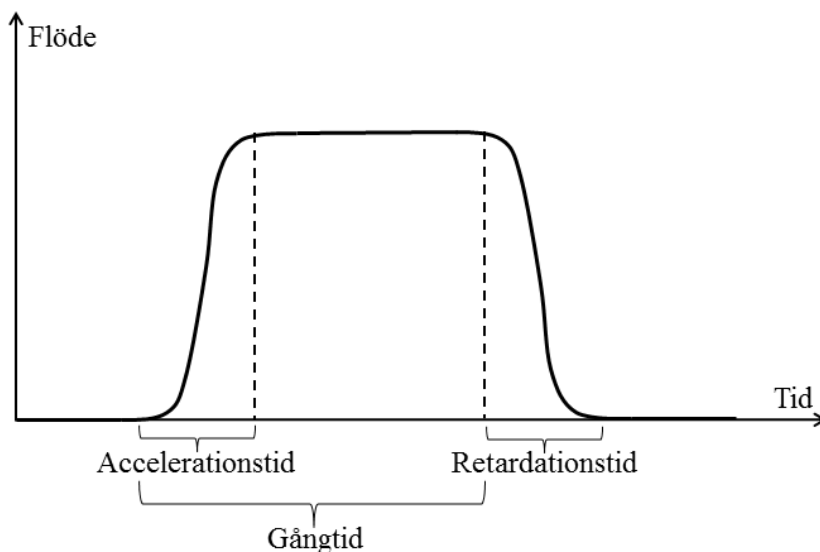
Av arbetsmiljömässiga skäl bör pumpstationen vara försedd med någon form av överbyggnad. Överbyggnaden ska vara tillräckligt stor för den verksamhet som ska bedrivas där, till exempel reparation och underhåll av pumpar (VAV, 1984). Den innehåller dessutom i de flesta fall elcentral, någon form av övervakningsutrustning, vatten och tvättställ.

Figur 2 nedan visar hur en pumpstation kan se ut. I figur 2a) är pumparna våtuppställda och i figur 2b) är de torruppställda.



Figur 2. Förenklad bild av avloppspumpstationers uppbyggnad. I figur 2a) är pumparna våtuppställda och i figur 2b) är pumparna torruppställda.

Ett vanligt sätt att styra pumpar i en pumpstation är att använda start-stopp reglering. Detta innebär att pumpen startar då vattennivån stigit till en viss nivå i pumpsumpen (startnivån) och pumpar bort vatten tills nivån sjunkit till en viss nivå (stoppnivån) då pumpen stängs av. Vid stora inflöden till pumpstationen kan vattennivån stiga snabbare än vad en pump klarar av att pumpa bort. VAV (1984) beskriver olika driftföljder för pumpar och en av dessa innebär att pump 1 startar vid en viss startnivå och om vattnet fortsätter stiga startar pump 2 vid en andra startnivå (i större pumpstationer med flera pumpar finns också en tredje startnivå och så vidare). Tillsammans pumpar de två pumparna tills vattennivån i pumpsumpen når stoppnivå. Om vattennivån stiger snabbare än vad alla pumpar i pumpstationen tillsammans hinner pumpa bort kan vattnet nå en eventuell bräddnivå där bräddledning leder vattnet ut till recipient. Nivå i pumpsump kan mätas med olika instrument, till exempel vippor, ekolod, och kapacitiva mätare (VAV, 1984). En hel pumpning mellan start- och stoppnivå kallas för en *pumpcykel* och den tid pumpen är igång kallas för *gångtid*. Från det att pumpen startats tar det en tid innan dess fulla kapacitet uppnås vilket kallas *accelerationstid*, och från det att pumpen stoppas tar det en tid innan flödet helt gått ner till noll vilket kallas *retardationstid*. Figur 3 visar exempel på en pumpcykel med accelerations- och retardationstid.

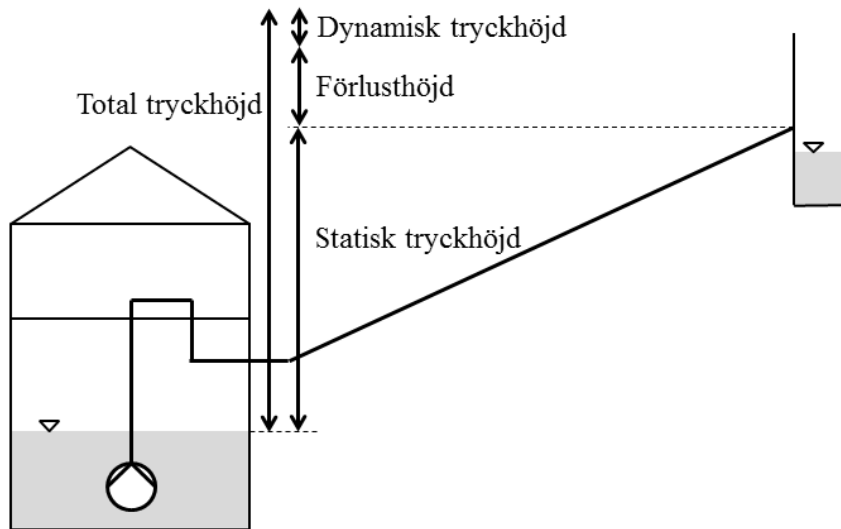


Figur 3. Pumpcykel med gångtid samt accelerations- och retardationstid utmärkt.

2.1.2 Pumpsystem

Syftet med en pumpstation är normalt sett att transportera vatten från en lägre nivå till en högre (Malmgren, u.d.). För att detta ska fungera måste pumpen för det första klara av att trycka upp vattnet från vattennivån i pumpsumpen till vattennivån i den släppbrunn där avloppsvattnet släpps, det vill säga där tryckledningen slutar och en självfallsledning tar vid. Höjdskillnaden mellan dessa två vattennivåer kallas *geodetisk tryckhöjd* och mäts i meter vattenpelare (mvp) (Grundfos, u.d.). Observera att detta gäller om pumpen sitter i nivå med eller under vattenytan i pumpsumpen och om tryckledningen utmynnar i botten av brunnen, det vill säga om utloppet är dränkt. Är fallet så att tryckledningens utlopp utmynnar ovanför vattenytan i släppbrunnen så är istället den geodetiska tryckhöjden nivåskillnaden mellan vattennivån i pumpsumpen och utloppets nivå i släppbrunnen. *Statisk tryckhöjd* (eller statiskt tryck) erhålls om hänsyn tas till det eventuella övertryck som bildas vid tryckledningens utlopp då släppbrunnen är tätt försluten. Om släppbrunnen är öppen mot atmosfären är den geodetiska tryckhöjden densamma som statiska tryckhöjden (Malmgren, u.d.). När det gäller avloppspumpstationer är så alltid fallet. Pumpen arbetar mot det statiska trycket just i det ögonblick som den sätts igång. När vattnet börjar röra sig i ledningarna uppstår sedan strömningsförluster på grund av friktionen mellan vattnet och rörväggarna (Malmgren, u.d.). Ledningens längd och rörmaterialets skrovlighet påverkar hur stora dessa strömningsförluster blir. Därutöver tillkommer engångsförluster orsakade av bland annat krökar, ventiler och dimensionsändringar på tryckledningen (Malmgren, u.d.). Tillsammans orsakar dessa olika tryckförluster ett tryck som kan uttryckas i mvp och kallas *förlusthöjd*. Den statiska tryckhöjden och förlusthöjden bildar den *manometriska tryckhöjden* vilken är det tryck som är mätbart med en tryckmätare vid till exempel pumpens utlopp då pumpen är igång (Malmgren, u.d.). Förutom att pumpen ska klara av att komma över den manometriska tryckhöjden ska den ge vattnet en hastighet. Uttryckt som ett tryck kallas detta *dynamisk tryckhöjd* men eftersom det inte är ett verkligt tryck så kan det inte mätas med en tryckmätare. Den *totala tryckhöjden* (eller det totala trycket) som pumpen måste klara av att jobba emot erhålls genom

att addera den dynamiska tryckhöjden till den manometriska tryckhöjden (Malmgren, u.d.). De beskrivna trycken illustreras i figur 4.



Figur 4. Figur som illustrerar det totala tryck en pump arbetar mot i en pumpstation.

För en icke viskös, icke komprimerbar vätska med stationärt flöde längs en strömningslinje gäller *Bernoullis ekvation*:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_{förlust} = \text{konstant}, \quad (2)$$

där z är höjd över valt referensplan, p är tryck, ρ är vätskans densitet, g är tyngdaccelerationen, v är vätskans hastighet och $h_{förlust}$ är tryckförluster på grund av friktion (Pumpportalen, u.d.). Alla termer i ekvation 2 kan uttryckas i enheten mvp och uttryckt i ord säger denna att summan av höjdpotential, tryckpotential och dynamisk potential är konstant längs en strömningslinje.

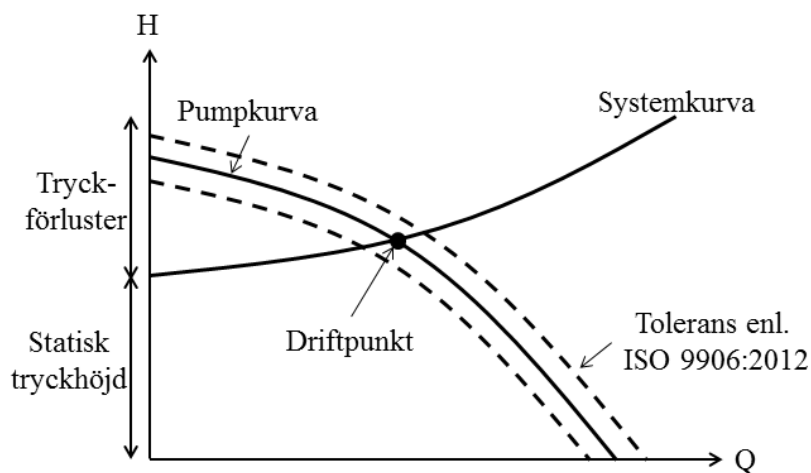
De tryckförluster som uppkommer då vätska flödar i ett rör består dels av strömningsförluster, dels av engångsförluster på grund av krökar, ventiler och dimensionsförändringar på tryckledningen. De totala tryckförlusterna ($h_{förlust}$) kan beskrivas enligt

$$h_{förlust} = \sum_{\text{strömningsförluster}} f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum_{\text{engångsförluster}} K \frac{v^2}{2g}, \quad (3)$$

där f är en friktionsfaktor, L är ledningens längd, D är ledningens diameter, v är vattenhastigheten, g är tyngdaccelerationen och K är en koefficient för engångsförluster (Crowe m.fl., 2010). Koefficienten K har olika värden beroende på om engångsförlusten orsakas av en krök, ventil eller dimensionsförändring och beskriver även utseendet på dessa.

Kapaciteten för en pump beskrivs av en *pumpkurva*, även kallad *teoretisk pumpkurva*. Denna teoretiska pumpkurva som gäller vid nyinstallation för en viss modell av pump och pumpjul

erhålls från pumpstillverkaren som genom tester av pumpen har fastställt kurvans utseende (Grundfos, u.d.). En pumpkurva beskriver relationen mellan tryck (H) och flöde (Q) men kan även innehålla information om till exempel effekt relativt flöde. Ett minskat tryck medför ett ökat flöde vilket kan ses i figur 5. Tryckledningens egenskaper beskrivs av en *systemkurva*. I avloppspumpsystem är alltid pumpsump och släppbrunn öppna mot atmosfären vilket medför att systemkurvan enbart beskrivs av statisk tryckhöjd och tryckförluster (Grundfos, u.d.). Tryckförlusterna uppkommer på grund av strömningsförluster och engångsförluster orsakade av bland annat krökar, ventiler och dimensionsändringar på tryckledningen, som beskrivet ovan. Där pumpkurva och systemkurva korsas ligger *driftpunkten*, det vill säga det är denna kapacitet som enligt teorin erhålls för en viss pump i ett visst system. Många pumpar är certifierade enligt en standard som heter ISO 9906:2012. Denna standard garanterar vid nyinstallation att för små pumpar (<10 kW) ska avvikelser från den teoretiska pumpkurvan vara högst $\pm 8\%$ vad gäller flöde och $\pm 5\%$ vad gäller tryck, och att för större pumpar (mellan 10 kW och 100 kW) ska avvikelser från den teoretiska pumpkurvan vara högst $\pm 10\%$ vad gäller flöde och $\pm 8\%$ vad gäller tryck (Flachmeyer, 2013, pers. kontakt). I figur 5 illustreras den teoretiska pumpkurvan, systemkurvan och driftpunkten. Toleranser enligt ISO 9906:2012 illustreras även i figuren.



Figur 5. Teoretisk pumpkurva, dess toleranser enligt ISO 9906:2012, systemkurva och driftpunkt.

Då pumpen föråldras kan dess kondition bli sämre vilket kan medföra att pumpkurvan får ett annat utseende. Pumpkurvan för en pump med försämrade kondition kan då för ett visst tryck ge ett lägre flöde än vid nyinstallation. Även systemkurvan kan få ett förändrat utseende om systemets kondition försämras. Systemets kondition kan försämrans genom att tryckförlusterna blir större vilket medför att systemkurvan får en brantare lutning (Hammarlund, 2013, pers. kontakt). På så sätt kan verklig pumpkapacitet skilja sig från teoretisk pumpkapacitet.

2.2 KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER

Kapacitetsmätningar i avloppspumpstationer innebär mätning av flöde och tryck vid pumpning och kan utföras i syfte att undersöka verklig pumpkapacitet, vilken inte behöver överensstämja med teoretisk pumpkapacitet. I dagsläget är det dock inte särskilt vanligt att sådana mätningar utförs. I avloppspumpstationer används med fördel utanpåliggande flödesmätare för mätning av flöde. I det här projektet användes flödesmätare av typerna

ultraljudsmätare och elektromagnetisk mätare vilka båda fungerar för mätning på avloppsvatten. En ultraljudsmätare består av två stycken givare och en signalomvandlare. Ultraljudsvågor skickas mellan de två givarna (som monterats utanpå röret i vilket flöde mäts) och löptiden för ultraljudsvågorna, som blir något snabbare då vågen färdas medströms och något långsammare då vågen färdas motströms, registreras. Utifrån löptiden kan sedan flödet beräknas (Panametrics, u.d.). En elektromagnetisk flödesmätare består av ett mätrör och en signalomvandlare. Mätningen av flöde grundas här på Faradays princip för elektromagnetisk induktion. Ett konstant magnetfält skapas i mätröret (som monterats på röret i vilket flöde mäts) och den vätska som flödar genom det konstanta magnetfältet fungerar som en elektrisk ledare vilket medför att en elektrisk spänning induceras. Denna spänning är proportionell mot vattenhastigheten och utifrån den inducerade spänningen kan vattenhastigheten och därmed flödet beräknas (Siemens, 2006).

De tryckgivare som användes i det här projektet var av typen töjningsgivare. Töjningsgivare består av ett antal resistorer som sitter i en krets. Dessa resistorer påverkas av tryckförändringar genom att de sträcks ut och komprimeras vilket medför att deras resistans förändras. Förändringen av resistans är proportionell mot tryckändringen och utifrån detta kan trycket beräknas (Wika, 2009). Då trycket mäts med en tryckmätare på en viss punkt måste den dynamiska potentialen (se ekvation 2), även kallat det dynamiska trycket, adderas till det uppmätta trycket för att det totala trycket ska erhållas. Då vattenytan i pumpsumpen väljs som referensplan måste det uppmätta trycket även justeras för höjden z (se ekvation 2) som är höjdskillnaden mellan tryckmätaren och vattennivån i pumpsumpen (Flachmeyer, 2013, pers. kontakt).

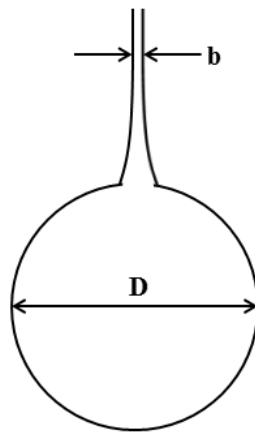
2.3 MODELLERING AV AVLOPPSPUMPSTATIONER

Hydraulisk modellering blir allt vanligare för analys av avloppssystem och används främst i syfte att utreda riskområden för översvämning eller bräddning (Granlund och Nilsson, 2000). Hydraulisk modellering används även i planeringssyfte där effekter av planerade åtgärder analyseras. Det finns ett antal modellprogram som används för hydraulisk men Granlund och Nilsson (2000) skriver att MOUSE i Sverige är det vanligaste programmet. MOUSE är själva beräkningsmotorn tillhörande ett modelleringsverktyg som heter MIKE URBAN (Mike by DHI, 2012a). För att det ska vara möjligt att göra hydrauliska modellberäkningar krävs att avloppssystemets egenskaper beskrivs med fysisk indata såsom nivåer, ledningsdimensioner och pumpstationsdata, men även att det anslutna avrinningsområdet beskrivs med hjälp av till exempel avrinningsområdets storlek och egenskaper, spillvattenflöden och dess dygnsvariationer (Granlund och Nilsson, 2000). Granlund och Nilsson (2000) påpekar vidare att mätdata krävs dels som indata för beskrivning av modellparametrar och dels för kalibrering av modellen. Den mätdata som krävs innefattar bland annat uppmätt tryck och flöde i systemet samt nederbördsdata. Kvaliteten på mätdata påverkar i sin tur kvaliteten på resultaten från modellberäkningarna.

2.3.1 Mike Urban

Modelleringsverktyget MIKE URBAN är utvecklat av Dansk Hydraulisk Institut (DHI) och kan användas till att modellera vattendistributionssystem samt spill- och dagvattensystem. MIKE URBAN är baserat på en databas som lagrar både nätverksdata och data för hydraulisk

modellering. Denna databas är i sin tur baserad på ESRI:s geodatabas (Mike by DHI, 2012a). ESRI är leverantör av geografiska informationssystem (GIS) med produkter som till exempel ArcGIS. Till MIKE URBAN hör ett flertal olika beräkningsmotorer för hydraulisk simulering. För spillvattensystem och modellering av flöde och vattennivåer i ledningar används beräkningsmotorn MOUSE (Mike by DHI, 2012a). MOUSE tillåter simulering av icke stationärt flöde i ledningar både med fri vattenyta och vid trycksatta förhållanden (DHI, u.d.). Beräkning av icke stationärt flöde i MOUSE bygger på lösning av Saint Venant ekvationerna, det vill säga lagarna om bevarande av massa och rörelsemängd. Ekvationerna som beskriver dessa lagar gäller endast för flöde med fri vattenyta. Genom att ledningarna i MIKE URBAN beskrivs med en fiktiv spalt överst på ledningen (se figur 6) så kan dock även flödet i ledningar som går fulla (till exempel trycksatta ledningar) beräknas av ekvationerna (DHI, u.d.). Bredden på den fiktiva spalten har en standardinställning i MIKE URBAN men kan ändras manuellt till önskat värde. Standardinställningen på spaltbredden (b) är för självfallsledningar 0,01 gånger ledningens diameter (D) och för trycksatta ledningar 0,00001 gånger ledningens diameter.



Figur 6. Genomskäring av ledning med diametern D i MIKE URBAN och fiktiv spalt med bredden b .

Modelleringsprocessen består av att definiera nätverksdata, ange randvillkor, simulera modellen och sedan analysera resultaten. Beståndsdelarna i en modell är elementen noder, ledningar, överfall, utlopp, dagvatteninlopp, pumpar och ventiler (Mike by DHI, 2012b). De beståndsdelar som användes i detta projekt och vilka parameter som beskrevs presenteras närmare nedan.

Noder

Noder kan i MIKE URBAN beskrivas som cirkulära brunnar, bassänger, utlopp eller lagringsvolymmer (Mike by DHI, 2012b). Brunnar och bassänger är öppna mot atmosfären som standard men kan även beskrivas som tillslutna. För tillslutna noder finns (precis som för ledningarna) en fiktiv spalt. Dess spaltbredd har standardinställningen 0,01 gånger nodens diameter men kan ändras manuellt i filen dhiapp.ini (fil som tillåter tilläggsinställningar av parametrar) som medföljer MIKE URBAN (DHI, u.d.2). Nodens placering beskrivs med x- och y-koordinater och dess storlek beskrivs med diameter om noden är en cirkulär brunn, alternativt med yt- och tvärsnittsareor för olika nivåer om noden är en bassäng. Ifall

energiförluster över noden ska uppkomma och i så fall med vilken metod dessa ska beräknas anges också vid beskrivning av noden (Mike by DHI, 2012b).

Ledningar

Ledningar dras mellan två noder och kopplas om inte annat anges till nodernas bottennivåer. Om ledningen ska beskriva en tryckledning i kryssas rutan "Pressure main" (Mike by DHI, 2012b). Bredden på ledningens fiktiva spalt har en standardinställning men kan ändras manuellt i en *.adp fil (fil som tillåter tilläggsinställningar av parametrar) som tillhör MIKE URBAN (DHI, u.d.2). Ledningen beskrivs med längd, innerdiameter och material. Om ingen längd anges används automatiskt längden utifrån hur ledningen ritats i koordinatsystemet, men längden kan även anges manuellt. Ledningens material kan antingen beskrivas genom att välja något av de i MIKE URBAN inbyggda förbeskrivna materialen eller så kan skrovlighetskoefficienter så som Mannings tal anges manuellt (Mike by DHI, 2012b).

Pumpar

Trots att pumpar i verkligheten troligen är belägna i en brunn eller bassäng (vilka representerar en pumpstation) beskrivs de i MIKE URBAN som en funktion mellan två noder. Pumpfunktionen fungerar därmed som förbindelsen av flödet mellan de två noderna och flera pumpfunktioner kan kopplas mellan samma två noder (Mike by DHI, 2012b). De två noderna måste ha ett visst avstånd mellan sig. Ligger de ovanpå varandra kan nämligen inte beräkningsmotorn avgöra flödesriktningen (Mike by DHI, 2012b). Pumpens kapacitet kan beskrivas på olika sätt. Det enklaste sättet att beskriva denna är med ett konstant flöde. Ett annat sätt är att pumpens kapacitet beskrivs med en Q-dH kurva (pumpkurva som beskrevs i avsnitt 2.1.2) där flödet är en funktion av trycket. Implementeras pumpkurva i MIKE URBAN tillåts flödet variera inom pumpkurvans intervall (Mike by DHI, 2012b). Det finns fler sätt att beskriva pumpkapaciteten men dessa tas inte upp här. Utöver pumpkapaciteten beskrivs pumpen i MIKE URBAN med start- och stoppnivå samt accelerations- och retardationstid.

Överfall

Ett överfall beskrivs i MIKE URBAN som en funktion som implementeras antingen mellan två noder eller endast från en nod (Mike by DHI, 2012b). Överfall beskrivs i MIKE URBAN med beräkningsmetod, typ av överfall, nivå, bredd och placering.

Resultat från modellberäkningar gjorda i MIKE URBAN med beräkningsmotorn MOUSE kan utvärderas visuellt i programmet MIKE View. Med programmet m11extraWin kan värden från modellberäkningar plockas ur beräkningsfilen för vidare analys i till exempel Excel.

Instabilitet kan uppkomma i modellberäkningar i MIKE URBAN. Det finns olika sätt att lösa problem med instabilitet i modeller, till exempel kan tidssteget för beräkningar minskas, accelerations- och retardationstiderna justeras eller storleken på slutna noder anslutna till pumpfunktioner ökas (Hammarlund, 2013, pers. kontakt).

2.4 KÄNSLIGHETSANALYS

Att undersöka hur modelleringsresultatet påverkas då olika modellparametrar i en modell varieras är att göra en känslighetsanalys. En känslig parameter är en parameter som har stor inverkan på resultatet från modellberäkningar. Detta beskriver Hamby (1994) i en

undersökning av ett antal tekniker för känslighetsanalys av parametrar i miljömodeller. Hamby (1994) nämner några olika anledningar till att göra känslighetsanalys, till exempel behovet av att veta för vilka parametrar det behövs ytterligare kunskapsunderlag, vilka parametrar som är obetydliga i modellen och kan tas bort och hur en ändring av en given parameter påverkar ändringen av modelleringsresultatet. En känslighetsanalys kan vara antingen lokal eller global, där en global känslighetsanalys undersöker modellbeteende för en stor uppsättning av olika parametrar medan en lokal känslighetsanalys koncentreras vid en specifik parameteruppsättning (Ingalls, 2008). Vidare skriver Ingalls (2008) att en fördel med att göra en lokal analys är att den kan göras helt analytiskt och att resultatet är relativt lätt att tolka. Däremot får man vid en lokal analys ingen information om hur beräkningsresultatet kan variera då alla parametrar tas hänsyn till och varieras samtidigt vilket man får vid en global analys (Hamby, 1994). Det lättaste tillvägagångssättet, menar Hamby (1994), är att göra en så kallad "One-at-a-time" känslighetsanalys vilket är en lokal analys där utgångspunkten är en specifik parameteruppsättning, ett grundscenario, från vilken en parameter i taget varieras medan övriga parametrar hålls konstanta. Ett sätt att göra detta på är att med en given procentsats variera en parameter i taget från grundscenariot och mäta ändringen i beräkningsresultatet. Hamby (1994) påpekar dock att ett mer effektivt sätt är att individuellt variera varje parameter med en faktor av sin egen standardavvikelse eftersom hänsyn då tas till parametrarnas varians och hur det påverkar beräkningsresultatet.

Studier där känslighetsanalys utförts på modellparametrar från pumpstationsmodeller har inte varit möjliga att hitta. Detta pekar på bristen av kunskap inom området.

3. MATERIAL OCH METODER

3.1 OMRÅDESBESKRIVNING

3.1.1 Uppsala

Uppsala kommun ligger i Uppsala län och har över 200 000 invånare (Uppsala kommun, 2013). Mätningar i avloppspumpstationer utfördes för detta projekt i tätorterna Uppsala (centralort) och Almunge i samarbete med Uppsala Vatten och Avfall AB. Spillvattennätet i Uppsala inkluderar totalt 45 avloppspumpstationer som leder avloppsvattnet till avloppsreningsverket Kungsängsverket. Spillvattennätet i Almunge inkluderar totalt fem avloppspumpstationer som leder avloppsvattnet till Länna avloppsreningsverk. Till detta reningsverk inkommer även avloppsvatten från pumpstationer i tätorten Länna. Spillvattensystemet i Uppsala kommun är ett separerat system men dagvatten kan tillkomma i okänd utsträckning på grund av inläckage och felkopplingar. Tabell 1 sammanfattar i vilka pumpstationer mätningar av tryck och flöde gjordes och var dessa pumpstationer ligger. Tabellen anger även antalet pumpar i varje pumpstation och vilka mätningar som gjordes för dessa.

Tabell 1. Pumpstationer och pumpar för vilka kapacitetsmätningar utfördes i Uppsala.

Tätort	Pumpstation	Antal pumpar	Pump	Tryckmätning utförd?	Flödesmätning utförd?
Uppsala	Djurgårdsbacken	3	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
			P3	Ja	Ja
Uppsala	Stenhagen	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
Uppsala	Södra Gottsunda	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
Uppsala	Musikparken	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
Uppsala	Kohagen	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
Uppsala	Malma Södra	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
Almunge	Garaget	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja

Från Uppsala kommun erhöles för varje pumpstation sammanställd data som dels underlättade utförandet av mätningarna, dels krävdes för att det skulle vara möjligt att konstruera pumpstationsmodeller i MIKE URBAN senare i projektet. Sammanställningen av pumpstationsdata hittas i bilaga B.

3.1.2 Västervik

Västerviks kommun ligger i Kalmar län och har cirka 36 000 invånare (Västerviks kommun, 2013). Mätningar i avloppspumpstationer utfördes för detta projekt i tätorterna Västervik (centralort) och Gamleby i samarbete med Västervik Miljö och Energi AB. Spillvattennätet i

Västervik inkluderar totalt 57 avloppspumpstationer som leder avloppsvattnet till Lucerna avloppsreningsverk. I Västervik är cirka 21 % av spillvattennätet kombinerat och resten separerat. Spillvattennätet i Gamleby inkluderar totalt 21 avloppspumpstationer som leder avloppsvattnet till Gamleby avloppsreningsverk. I Gamleby är cirka 35 % av spillvattennätet kombinerat och resten separerat. Tabell 2 nedan sammanfattar i vilka pumpstationer mätningar av tryck och flöde gjordes och var dessa pumpstationer ligger. Tabellen anger även antalet pumpar i varje pumpstation och vilka mätningar som gjordes för dessa.

Tabell 2. Pumpstationer och pumpar för vilka kapacitetsmätningar utfördes i Västervik.

Tätort	Pumpstation	Antal pumpar	Pump	Tryckmätning utförd?	Flödesmätning utförd?
Västervik	P10	3	P1	Ja	Nej
			P2	Ja	Ja
			P3	Ja	Nej
Västervik	P14	3	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
			P3	Ja	Nej
Västervik	Jenny	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja
Gamleby	Björnsholm	2	P1	Ja	Ja
			P2	Ja	Ja

Tryckledningen i pumpstationen Jenny rensas regelbundet på grund av problem med igensättning av slam vilket gav möjligheten att göra mätningar båda före och efter rensning av tryckledning.

Från Västerviks kommun erhöles för varje pumpstation sammanställd data som dels underlättade utförandet av mätningarna, dels krävdes för att det skulle vara möjligt att konstruera pumpstationsmodeller i MIKE URBAN senare i projektet. Sammanställningen av pumpstationsdata hittas i bilaga B.

3.2 KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER

Kapacitetsmätningar i pumpstationer utfördes i Uppsala kommun under två perioder där den första mätperioden var från 24 till 27 september och den andra mätperiodens var från 8 till 10 oktober. Mätningar utfördes i Västerviks kommun från 30 september till 4 oktober. Totalt mättes flöde och tryck i 11 pumpstationer för totalt 22 pumpar. Ett syfte med mätningarna var att mäta flöde och tryck i ett antal pumpstationer för att sedan kunna använda mätdata till att jämföra uppmätt kapacitet med teoretisk kapacitet. Ett annat syfte var att använda mätdata som indata till modeller och att sedan kalibrera modellerna mot uppmätt kapacitet. Förutsättningarna för att mätningar skulle vara möjliga att göra var att det på tryckledningen i pumpstationen fanns ett uttag med avstängningsventil där tryckmätaren kunde fästas och en raksträcka på minst 60 cm där flödesmätaren kunde fästas. Utöver detta behövdes ett eluttag i pumpstationen. Vid samtliga mättillfällen var det ingen eller mycket begränsad nederbörd.

Den utrustning som användes bestod av fyra stycken olika flödesmätare och fem stycken olika tryckmätare. Anledningen till att mätningarna gjordes med flera olika mätare var att det gav

möjlighet till parallella mätningar och därmed tidseffektivisering samt på grund av att tillgängligheten av mätarna varierade. Fyra stycken av de fem flödesmätare som användes i projektet var portabla utanpåliggande ultraljudsmätare av olika fabrikat. Den femte flödesmätaren var en stationär elektromagnetisk flödesmätare som satt installerad i pumpstationen Garaget. Tabell 3 presenterar de flödesmätare som användes. De portabla flödesmätarna monterades utanpå det rör i vilket flöde skulle mätas genom att två stycken givare placerades på ett visst avstånd ifrån varandra. Hur stort detta avstånd skulle vara beräknades automatiskt utifrån indata om rörets material, diameter och tjocklek samt typ av vätska i röret. För att ultraljudet obehindrat skulle gå igenom röret ströks fett på givarnas undersidor innan de spändes fast ordentligt på röret. Givarna monterades på mitten av en raksträcka på tryckledningen. Om givarna monterades på en tryckledning som var horisontell placerades de på sidan av ledningen för att undvika störningar från eventuell luft som samlats vid ovasidan inuti ledningen. Flödesmätaren var kopplad till en datalogger där mätvärdena sparades. Vissa av flödesmätarna krävde kalibrering mot maxflöde. I dessa fall krävdes en startgissning på vad maxflödet var och i vissa fall kunde kommunerna ge en gissning, annars fick maxflöde gissas baserat på tryckledningens och pumpstationens storlek.

Tabell 3. Flödesmätare som användes och deras egenskaper vad gäller mätprincip, mätfel och behov av kalibrering.

Fabrikat	Modell	Mätprincip	Mätfel	Krävs kalibrering?
Nivus	VM 9021	Ultraljud	$\leq \pm 1 \%$	Ja
Panametrics	6068	Ultraljud	$\leq \pm 2 \%$ ($> 300 \text{ mm}$)* $\leq \pm 5 \%$ ($< 300 \text{ mm}$)*	Ja
Fuji Electric	Portaflow-X	Ultraljud	$\leq \pm 1 \%$ ($> 0,3 \text{ m/s}$) $\leq \pm 2 \%$ ($< 0,3 \text{ m/s}$)	Nej
Siemens	MAG 5000/ MAG 5100W	Elektromagnetisk	$\leq \pm 0,5 \%$	Nej (stationär flödesmätare)

*Vid låga hastigheter kan mätfelet vara större

Samtliga tryckmätare som användes var av sorten töjningsgivare av samma fabrikat men av två olika modeller. Tabell 4 presenterar de tryckgivare som användes. I projektet användes fyra mätare av modellen ECO-1 och en mätare av modellen S-10. Tryckmätaren monterades för mätning genom att skruvas fast i uttag som fanns på den tryckledning i vilken trycket skulle mätas. För att garantera att monteringen av tryckmätaren blev tät användes gängtejp. Tryckmätaren var kopplad till en datalogger där mätvärdena sparades. För att räkna bort inverkan av atmosfärstrycket kalibrerades tryckmätarna för detta.

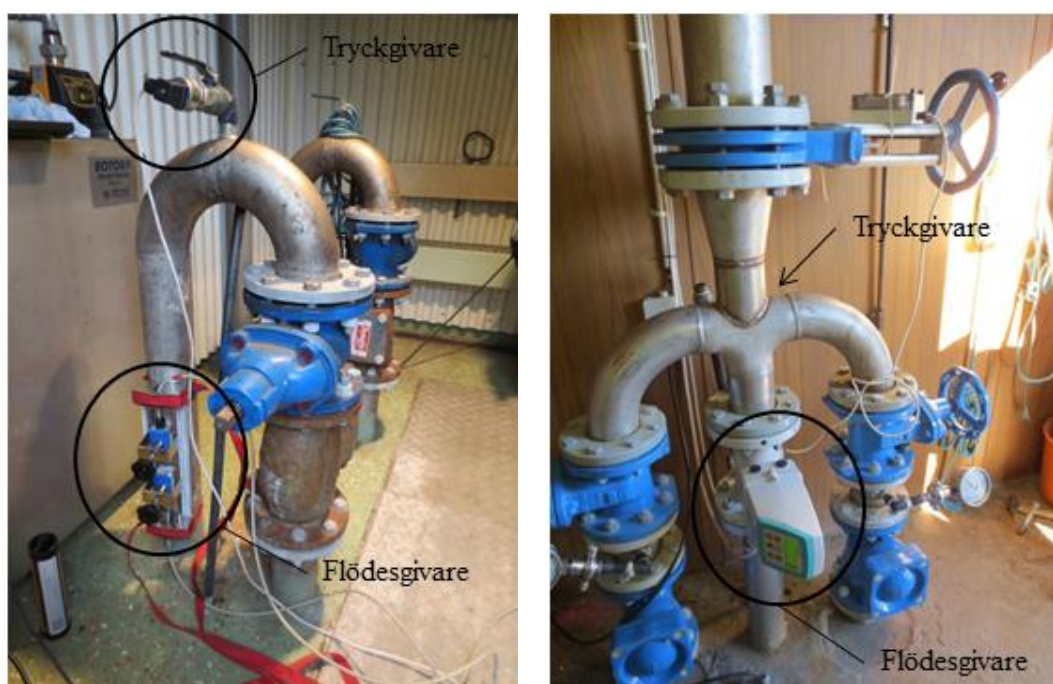
Tabell 4. Tryckmätare som användes och deras egenskaper vad gäller mätprincip, mätfel och behov av kalibrering.

Fabrikat	Modell	Mätprincip	Mätfel	Krävs kalibrering?
Wika	ECO-1	Töjningsgivare	$\leq \pm 1 \%$	Ja
Wika	S-10	Töjningsgivare	$\leq \pm 0,5 \%$	Ja

I tabell 5 visas vilken mätutrustning som användes för kapacitetsmätning i de olika pumpstationerna. Figur 7 visar exempel på hur det kunde se ut då mätutrustningen var monterad i pumpstation.

Tabell 5. Mätutrustning som användes vid kapacitetsmätning i respektive pumpstation.

Pumpstation	Flödesmätare	Tryckmätare
Djurgårdsbacken	Nivus VM 9021	Wika ECO-1
Stenhagen	Nivus VM 9021	Wika ECO-1
Södra Gottsunda	Panametrics 6068	Wika S-10
Musikparken	Nivus VM 9021	Wika ECO-1
Kohagen	Nivus VM 9021	Wika ECO-1
Malma Södra	Nivus VM 9021	Wika ECO-1
Garaget	Siemens MAG 5000/MAG 5100W	Wika ECO-1
P10	Nivus VM 9021	Wika ECO-1
P14	Fuji Electric Portaflow-X	Wika ECO-1
Jenny	Nivus VM 9021	Wika ECO-1
Björnsholm	Nivus VM 9021	Wika ECO-1



Figur 7. Mätutrustning för kapacitetsmätning monterad i pumpstation. Till vänster: portabel ultraljudflödesmätare Nivus VM 9021 och tryckmätare Wika ECO-1. Till höger: stationär elektromagnetisk flödesmätare Siemens MAG 5000/MAG 5100W och tryckmätare Wika ECO-1 (syns ej i bild).

Tillvägagångssättet för kapacitetsmätningarna var detsamma i samtliga pumpstationer. Mätproceduren såg ut så här:

1. Montera mätutrustningen.
2. Kalibrera tryck- och flödesmätaren där det var nödvändigt.
3. Mäta flöde och tryck vid körning av en pump i taget. Pumpen kördes mellan start- och stoppnivå ett antal gånger. Detta gjordes för alla pumpar i pumpstationen bortsett från de där det med tanke på mätutrustningens placering inte var möjligt att mäta på.
4. Mäta tryck vid avstängd pump (vilket gav mätvärden på statiskt tryck om tryckgivaren var monterad efter backventil)

Under hela mätningarna registrerades och sparades uppmätt flöde och tryck i dataloggrar. I vissa fall kunde inte denna mätprocedur helt följas på grund av att tillflödet av avloppsvatten till pumpsumpen var mycket litet vilket medförde att det inte var praktiskt möjligt att vänta tills pumpsumpen helt fyllts upp. I dessa fall spolades extra vatten i pumpsumpen för att snabba på tillflödet. Då tillflödet trots spolning var för litet fick pumparna köras mellan andra vattennivåer än start- och stoppnivå.

Det var önskvärt att mäta upp hela pumpkurvan för pumparna. För att göra detta krävdes att det fanns en avstängningsventil och att uttag för tryckgivaren var placerad före denna avstängningsventil. Pumpkurva kan då mätas genom att stänga avstängningsventilen helt, starta pumpen och köra den mot stängd ventil och sedan succesivt öppna ventilen. På så sätt mäts ett ökande flöde och samtidigt minskande tryck. Förutsättningarna var dock inte sådana att pumpkurva gick att mäta i någon av de pumpstationer där kapacitetsmätningar gjordes i det här projektet. Det hade även varit önskvärt att mäta pumpkapacitet vid samkörning av två eller fler pumpar men på grund av flödesmätarens placering var inte heller detta möjligt för flertalet pumpstationer i det här projektet.

I pumpstationen Jenny gjordes kapacitetsmätning både före och efter rensning av tryckledning.

På plats i pumpstation mättes även höjdskillnaden mellan vattennivån i pumpsumpen och den nivå där tryckmätaren var placerad. Denna höjdskillnad behövdes senare för att kunna räkna ut det totala trycket som pumpen arbetade mot.

3.2.1 Databehandling

Mätvärdena sparades ner från dataloggrarna i Excel-format eller text-format. Mätvärdena för flöde erhöles i enheten l/s vilket var den önskade. Mätvärdena för tryck erhöles i enheten bar och fick omvandlas till den önskade enheten mvp genom att multiplicera det uppmätta trycket med tio. För att erhålla det totala trycket (det tryck som pumpen jobbar mot vid pumpning) justerades dessutom det uppmätta trycket för nivåskillnaden mellan tryckmätaren och vattennivån i pumpsumpen och det dynamiska trycket adderades. Det dynamiska trycket ($h_{dynamisk}$) beräknades utifrån det uppmätta flödet (Q) enligt

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

$$h_{dynamisk} = \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

där v är vattenhastigheten, A är rörets tvärsnittsarea och g är tyngdaccelerationen. Två av tryckmätarna som användes i projektet visade sig efter att mätningarna var gjorda ha ett systematiskt mätfel och mätvärden från dessa mätare kompenserades därför för de upptäckta mätfelen.

För samtliga pumpstationer beräknades medelflöde och medeltryck vid full kapacitet för varje pump som var möjliga att mäta på. Därmed beräknades pumpens driftpunkt. Tanken var att i fält mäta pumpkurvan för pumparna men då ingen av pumpstationerna i det här projektet hade rätt förutsättningar för detta gjordes istället en approximerad uppmätt pumpkurva utifrån den uppmätta driftpunkten och pumpkurvan från pumpleverantören (den teoretiska pumpkurvan). Grundat på de resultat från mätning av pumpkurva som Fredriksson (2014) erhöll gjordes antagandet att pumpkurvan för en åldrad pump parallellförskjuts nedåt från den teoretiska pumpkurvan. Genom att parallellförskjuta den teoretiska pumpkurvan tills den skar den uppmätta driftpunkten erhöles därmed den approximerade uppmätta pumpkurvan. I två stycken pumpstationer (P10 och P14) kunde flödet inte mätas för alla pumpar, trycket kunde dock mätas. I pumpstationen P10 kunde flödet inte mätas för pump 1 och pump 3. Dock var de uppmätta trycken ganska lika för alla tre pumpar i pumpstationen och dessutom var pumparna av samma sort. Detta tydde på att driftpunkten för alla tre pumpar låg nära varandra och därmed antogs den approximerade uppmätta pumpkurvan för pump 2 även kunna användas för pump 1 och pump 3. I pumpstationen P14 kunde flödet inte mätas för pump 3. Dock var det uppmätta trycket för pump 3 ganska likt det uppmätta trycket för pump 2 och dessutom var pumparna av samma sort. Detta tydde på att driftpunkten för de två pumparna låg nära varandra och därmed antogs den approximerade uppmätta pumpkurvan för pump 2 även kunna användas för pump 3. I de fall där endast en pump i pumpstationen var känd antogs att resterande pumpar i stationen var av samma sort och den kända pumpens teoretiska pumpkurva användes för att skapa samtliga approximerade uppmätta pumpkurvor i pumpstationen. Vilka pumpdata som fanns tillgänglig framgår av bilaga B.

För att kunna jämföra de uppmätta driftpunkterna med teoretisk pumpkapacitet plottades de i samma graf som den teoretiska pumpkurvan, den teoretiska pumpkurvas gränser enligt ISO 9906:2012 och den teoretiska systemkurvan. Den teoretiska systemkurvan beräknades genom att tryckförluster i tryckledningen beräknades utifrån ekvation 3 och adderades till det statiska trycket. I det här fallet försumrades de tryckförluster som i tryckledningar orsakas av krökar, ventiler, dimensionsförändringar med mera på grund av att effekterna från dessa engångsförluster är små för låga vattenhastigheter. Vattenhastigheterna för pumpstationerna i det här projektet ansågs vara låga.

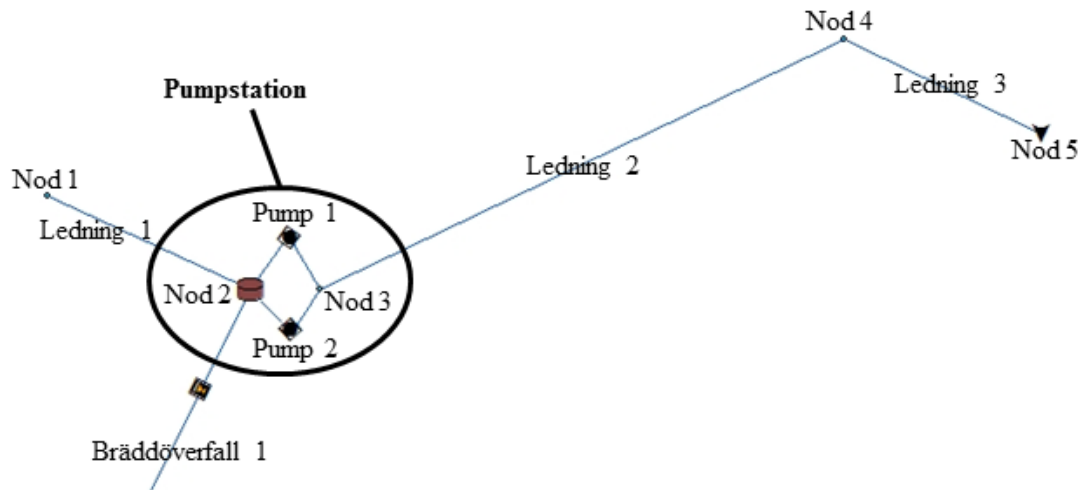
3.3 MODELLERING

När kapacitetsmätningar i pumpstationer hade utförts påbörjades modelleringen. Till att börja med konstruerades pumpstationsmodeller i MIKE URBAN vilka beskrevs med verklig data så långt det var möjligt. Sedan kalibrerades modellerna mot uppmätt kapacitet. Syftet med modelleringen var att undersöka hur pumpstationer bör beskrivas i modeller för att bäst likna verkliga förhållanden samt att med de kalibrerade modellerna som utgångsläge genomföra en känslighetsanalys av utvalda modellparametrar i pumpstationsmodeller.

3.3.1 Modellbygge

För varje pumpstation där mätningar gjordes skapades en enkel pumpstationsmodell i MIKE URBAN, det vill säga elva stycken pumpstationsmodeller skapades totalt. Grunden för varje modell utgjordes av fem stycken noder, tre stycken ledningar, ett antal pumpar och ett nödutlopp. För att beskriva verkligheten så bra som möjligt så kunde i specialfall ytterligare noder och ledningar förekomma. Detta var ett förenklat sätt att beskriva pumpstationerna på eftersom de egentligen ingick i ett större system med anlutande ledningar, brunnar och pumpstationer med mera, både uppströms och nedströms. Dock var en förenklad beskrivning i det här projektet tillräcklig då syftet var att för varje *enskild* pumpstation undersöka den beräknade kapaciteten.

Den första noden (nod 1) representerade en brunn varifrån en inkommande självfallsledning (ledning 1) utgick. Den inkommande ledningen utmynnade i pumpsumpen (nod 2). Den tredje noden (nod 3) var en fiktiv brunn som lades in för att pumpfunktioner sedan skulle vara möjliga att implementera i modellen. Nod 2 och 3 representerade tillsammans själva pumpstationen. Från den fiktiva brunnen utgick en tryckledning (ledning 2) som utmynnade i en släppbrunn (nod 4). Från denna brunn utgick den sista ledningen (ledning 3) vilket var en självfallsledning som utmynnade i den sista noden (nod 5) som representerade ett utlopp. Mellan pumpsumpen och den fiktiva brunnen lades pumpfunktioner in, lika många som antalet pumpar i pumpstationen var. Från pumpsumpen lades även in ett bräddutlopp i form av ett överfall. Figur 8 är ett exempel på hur en enkel pumpstationsmodell i MIKE URBAN med två stycken pumpar kan se ut.



Figur 8. Exempel på pumpstationsmodell i MIKE URBAN. Modellen består av noder, ledningar, pumpar och bräddöverfall. I detta projekt konstruerades elva sådana här pumpstationsmodeller, en för varje pumpstation där kapacitetmätningar gjordes.

Varje nod, ledning, pump och bräddöverfall beskrevs med ett antal modellparametrar. I första hand beskrevs parametrarna med verkliga värden, det vill säga uppmätta eller av kommunerna angivna värden. Tillgängligheten av data kunde variera kraftigt, i vissa fall fanns detaljerade ritningar över både pumpstation och tryckledning, ibland kunde endast enstaka värden erhållas och ibland kunde data saknas helt. När verklig data saknades skattades parametervärdena. Nedan presenteras mer i detalj hur modellparametrarna valdes för de olika beståndsdelarna i modellen.

Noder

Tabell 6 visar hur parameterinställningarna gjordes för de noder som ingick i pumpstationsmodellen. Därefter förklaras för varje nod hur de parametrar som inte kunde erhållas från kommunen eller mätas i fält beskrevs i modellen.

Tabell 6. Parameterinställning för noder i MIKE URBAN.

	Typ av nod	Bottennivå	Marknivå	Diameter	Energiförlust?	Tillsluten?
Nod 1	Brunn	Beräknas	2 m över bottennivå	1 m	Ja	Nej
Nod 2	Bassäng	Av kommunen angivet värde	Av kommunen angivet värde	-	Nej	Nej
Nod 3	Brunn	Av kommunen angivet värde	0,5 m över bottennivå	0,5 m	Nej	Ja
Nod 4	Brunn	Av kommunen angivet värde	2 m över bottennivå	1 m	Ja	Nej
Nod 5	Utlopp	Beräknas	Samma som för nod 4	-	-	Nej

- Nod 1 representerade en brunn. För denna saknades data så ett antagande gjordes att brunnens diameter var 1 m och att den var 2 m hög. Bottennivån för brunnen fick beräknas. Eftersom nivån för inkommande ledning i pumpsumpen (det vill säga

nedströmsnivån för ledning 1) var känd och genom att anta att ledning 1 var cirka 40 m lång med en lutning på 10 ‰ kunde bottennivån för nod 1 beräknas (det vill uppströmsnivån för ledning 1). Detta antagande baserades på att en lutning på 10 ‰ är vanligt för självfallsledningar och valet av längd hade inte så stor betydelse. I brunnar uppkommer energiförluster vilket angavs i modellen.

- Nod 2 representerade pumpsumpen. Noden beskrevs som en bassäng och sumpens geometri angavs genom att för olika höjder i sumpen ange tvärsnittsarea och yta. I pumpsumpar antogs det inte uppkomma några energiförluster.
- Nod 3 representerade en fiktiv brunn till vilken vattnet pumpades. Denna finns inte i verkligheten utan infördes i modellen endast för att det skulle vara möjligt att sedan kunna införa pumpfunktioner. Eftersom den fiktiva brunnen inte finns i verkligheten bör den påverka modellen så lite som möjligt och därmed ha en så liten volym som möjligt. För den fiktiva brunnen valdes en diameter på 0,5 m och en höjd på 0,5 m och den beskrevs som en tillsluten brunn. Bottennivån för den fiktiva brunnen var nivån för utgående tryckledning (ledning 2). I fiktiva brunnar antogs det inte uppkomma några energiförluster.
- Nod 4 representerade en brunn till vilken vattnet pumpades. Denna beskrevs på samma sätt som nod 1. Dock var bottennivån för denna brunn känd.
- Nod 5 representerade ett utlopp. Bottennivån för utloppet fick beräknas. Eftersom nivån för nod 4 var känd och genom att anta att ledning 3 var 40 m lång med en lutning på 10 ‰ kunde bottennivån för nod 5 beräknas. Marknivån antogs vara samma som för nod 4. För utlopp är inställning av energiförluster inte av betydelse och därför kunde standardinställningen i MIKE URBAN användas.

Ledningar

Tabell 7 visar hur parameterinställningarna gjordes för de ledningar som ingick i pumpstationsmodellen. Därefter förklaras för varje ledning hur de parametrar som inte kunde erhållas från kommunen eller mätas i fält beskrevs i modellen.

Tabell 7. Parameterinställning för ledningar i MIKE URBAN.

	Nivå uppströms	Nivå nedströms	Längd	Innerdiameter	Material
Ledning 1	Bottennivå nod 1	Nivå inkommande ledning i pumpsumpen	40 m	Av kommunen angivet värde alt. minst 0,2 m större än för ledning 2	Av kommunen angivet värde alt. betong
Ledning 2	Bottennivå nod 3	Bottennivå nod 4	Av kommunen angivet värde	Av kommunen angivet värde	Av kommunen angivet värde
Ledning 3	Bottennivå nod 4	Bottennivå nod 5	40 m	Av kommunen angivet värde alt. minst 0,2 m större än för ledning 2	Av kommunen angivet värde alt. betong

- Ledning 1 representerade en självfallsledning. För denna saknades delvis eller helt data. Antagande gjordes att ledningen var 40 m lång. Där information om innerdiametern saknades antogs att den var minst 0,2 m större än tryckledningens (ledning 2) innerdiameter. Där information om materialet saknades antogs det vara betong.
- Ledning 2 representerade tryckledningen. Att ledningen var trycksatt fick anges i modellen och den beräkningsmetod för tryckförluster i tryckledningen som valdes var ”Manning explicit”.
- Ledning 3 representerade en självfallsledning. Samma antagande som för ledning 1 gjordes.

Pumpar

Tabell 8 visar hur parameterinställningarna gjordes för de pumpar som ingick i pumpstationsmodellen. Därefter förklaras för varje pump hur de parametrar som inte kunde erhållas från kommunen eller mätas i fält beskrevs i modellen.

Tabell 8. Parameterinställning för pumpar i MIKE URBAN.

	Pumpkapacitet	Startnivå	Stoppnivå	Accelerations- och retardationstid
Pump 1	Approximerad uppmätt pumpkurva	Av kommunen angivet värde	Av kommunen angivet värde	Uppmätt alt. 10 s
Pump 2	Approximerad uppmätt pumpkurva	Av kommunen angivet värde alt. 10 cm över startnivå pump 1	Av kommunen angivet värde alt. 10 cm över stoppnivå pump 1	Uppmätt alt. 10 s
Pump 3	Approximerad uppmätt pumpkurva	Av kommunen angivet värde alt. 10 cm över startnivå pump 2	Av kommunen angivet värde alt. 10 cm över startnivå pump 2	Uppmätt alt. 10 s

- Pump 1 är i MIKE URBAN den pump som startar först, det vill säga har den lägsta startnivån. Ifall data för accelerations- och retardationstid saknas användes standardinställningen i MIKE URBAN vilket är 10 s.
- Pump 2 är i MIKE URBAN den pump som startar näst efter pump 1, det vill säga har den näst lägsta startnivån. Accelerations- och retardationstid beskrevs på samma sätt som pump 1. Ifall data för startnivån saknades antogs den vara 10 cm över startnivån för pump 1. Ifall stoppnivån saknades antogs den vara 10 cm över stoppnivån för pump 1.
- Pump 3 är i MIKE URBAN den pump som startar näst efter pump 2, det vill säga har den tredje lägsta startnivån. En tredje pump fanns endast i ett fåtal av pumpstationsmodellerna. Accelerations- och retardationstiden beskrevs som för pump 1 och pump 2. Ifall data för startnivån saknades antogs den vara 10 cm över startnivån

för pump 2. Ifall stoppnivån saknades antogs den vara 10 cm över stoppnivån för pump 2.

Bräddöverfall

Tabell 9 visar hur parameterinställningarna gjordes för det överfall som ingick i pumpstationsmodellen. Därefter förklaras hur de parametrar som inte kunde erhållas från kommunen eller mätas i fält beskrevs i modellen. I de flesta fall var bräddutloppets karaktär (om det var till exempel en ledning eller ett överfall) okänt men samtliga bräddutlopp beskrevs som överfall med resonemanget att det var själva nivån från vilken bräddning skedde som var det viktigaste att beskriva. I de fall bräddutloppet var en ledning angavs ledningens diameter som överfallets bredd.

Tabell 9. Parameterinställning för bräddöverfall i MIKE URBAN.

	Bräddnivå	Överfallets bredd
Bräddöverfall 1	Av kommunen angivet värde	Av kommunen angivet värde alt. minst 0,2 m större än innerdiameter ledning 2

- Bräddöverfall 1 representerade bräddavlopp eller nödavlopp från pumpsumpen. Ifall data för överfallets bredd saknades antogs ett värde som var minst 0,2 m större än innerdiametern för tryckledningens (ledning 2) innerdiameter.

I vissa pumpstationer ändrades tryckledningens innerdiameter och/eller material en eller flera gånger längs tryckledningen. Eftersom det i MIKE URBAN endast går att beskriva en parameter med ett enda värde så beskrevs i dessa fall tryckledningen med flera separata ledningar efter varandra. I övergången mellan dessa ledningar implementerades en fiktiv brunn vilken beskrevs på samma sätt som nod 3. Bottennivån för den fiktiva brunnen valdes så att en konstant lutning erhöles längs hela tryckledningen.

För att kunna göra beräkningar av modellen krävdes en flödesbelastning, det vill säga ett inflöde av vatten till modellen. Tre olika scenarion av flödesbelastning användes för modellberäkningar:

- Scenario 1: Två dygn med normalflöde (medelspillvattenavrinningen)
- Scenario 2: Två dygn med högt flöde (dubbla medelspillvattenavrinningen)
- Scenario 3: Tre dygn med normalflöde och regn

Medelspillvattenavrinningen ($Q_{d\ medel}$) beräknades baserat på ekvation 1 och erhöles genom att utgå från det uppmätta flödet ($Q_{uppmätt}$) i respektive pumpstationen och dividera det med produkten av maxtimfaktorn ($c_{t\ max}$) och maxdygnfaktorn ($c_{d\ max}$). Vid beräkningen ansattes produkten av maxtimfaktorn och maxdygnfaktorn till 5 och medelspillvattenavrinningen beräknades enligt

$$Q_{d\ medel} = \frac{Q_{uppmätt}}{c_{t\ max} \cdot c_{d\ max}} = \frac{Q_{uppmätt}}{5} \quad (6)$$

Den dygnsvariation av vattenförbrukningen som togs upp i avsnitt 2.1 användes då flödesbelastningen till pumpstationsmodellerna skapades, se även bilaga A. När flödesbelastningen hade skapats i MIKE URBAN kopplades denna till nod 1 och blev därmed inflödet till modellen. Observera att den medelspillvattenavrinningen som användes i detta projekt inte baserades på riktig data över vattenförbrukning utan endast var en uppskattning baserad på de uppmätta medelflödena i varje pumpstation.

För att kunna göra modellberäkningar med avrinning från regn som inflöde skapades ett avrinningsområde till varje pumpstationsmodell. Avrinningsområdet var en shape-fil som skapades i Arc GIS och sedan importerades i MIKE URBAN-modellen. Avrinningsområdet (A_{avr}) dimensionerades utifrån uppmätt flöde enligt

$$A_{avr} = \frac{Q_{uppmätt}}{q_s}, \quad (7)$$

där q_s är specifik avrinning. I projektet användes en specifik avrinning på 12,5 l/s per hektar (ha).

Avrinningsområdets yta fördelades mellan tre olika områden:

- 0,02 ha med 10 min koncentrationstid
- 0,04 ha med 30 min koncentrationstid
- 0,02 ha med 60 min koncentrationstid

Som avrinningskoefficient för hårdgjord yta och delvis kombinerat avloppssystem användes ett värde på 0,4 (Larsson, 2010). När avrinningsområdet var konstruerat och importerat i modellen kopplades det till nod 1. Observera att storlek och egenskaper för avrinningsområden i det här projektet inte bygger på verklig data utan endast är en skattning utifrån vad som skulle kunna vara rimligt enligt Hammarlund (2013, pers. kontakt).

Regnet som användes för modellberäkningarna var CDS-regn med tre olika återkomsttider som skapades med Dahlströms formel med hjälp av mjukvara framtagen av Hammarlund (2013). Scenario 3 delades upp efter dessa tre återkomsttider enligt:

- Scenario 3a: CDS-regn med 0,1 år återkomsttid (första dygnet)
- Scenario 3b: CDS-regn med 1 års återkomsttid (andra dygnet)
- Scenario 3c: CDS-regn med 10 års återkomsttid (tredje dygnet)

De pumpstationsmodeller som tillhörde Uppsala lades i ett gemensamt MIKE URBAN-dokument och de pumpstationsmodeller som tillhörde Västervik lades i ett gemensamt MIKE URBAN-dokument. Detta medförde att modellberäkningarna gjordes samtidigt för samtliga pumpstationsmodeller tillhörande Uppsala respektive Västervik.

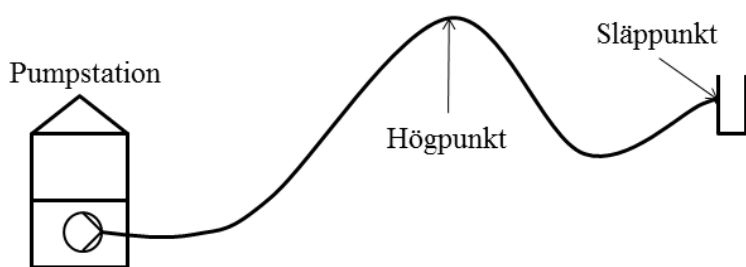
3.3.2 Statiskt tryck

Vid jämförelse av det uppmätta medelvärdet av det statiska trycket med statiskt tryck enligt underlag erhållet från kommunerna kunde för vissa pumpstationer ses vissa skillnader. Ifall skillnaderna var större än 5 % så justerades modellparametrar för att kompensera för detta.

Anledningen till att dra gränsen vid 5 % var att osäkerheten för mätningarna beräknades vara åtminstone så stor. Beroende på om det beräknade statistiska trycket var högre eller lägre än det uppmätta statistiska trycket så justerades modellparametrarna på olika sätt. Då det beräknade statistiska trycket var *högre* än det uppmätta statistiska trycket antogs förhållandet mellan nivån på vattenytan i pumpsumpen och nivån på släppunkten vara felaktigt beskrivet i modellen. I dessa fall sänktes nivån för släppunkten, det vill säga nod 4, för att kompensera för detta. Eftersom nivån på nod 5 beräknades utifrån nivån på nod 4 ändrades även denna. Då det beräknade statistiska trycket var *lägre* än det uppmätta statistiska trycket antogs det kunna bero på att det i verkligheten inte är släppunkten som är den högsta punkten på tryckledningen utan att det någonstans längs ledningen finns en högre punkt, se figur 9. Då det var okänt var på tryckledningen denna eventuella högpunkt skulle vara belägen så antogs den först vara belägen mitt på tryckledningen. En fiktiv brunn som beskrevs på samma sätt som nod 3 lades in i modellen på den nivå som kompenserade för skillnaden mellan uppmätt och enligt kommunen angivet statistiskt tryck. Detta innebar att från denna punkt (högpunkten mitt på tryckledningen) sluttade tryckledningen nedåt. Dock kan det vara så att tryckledningen i verkligheten inte sluttar nedåt hela vägen från högpunkten till släppunkten eftersom denna sträcka av ledningen i så fall borde vara en självfallsledning. För att räkna med de extra tryckförluster som skulle uppkomma om ledningen återigen efter högpunkten sluttar uppåt mot släppunkten så placerades i modellen högpunkten efter två tredjedelar av tryckledningen istället för efter halva tryckledningen. Detta ansågs ge en rimligare skattning av de verkliga förhållandena. För att undersöka betydelsen av var på tryckledningen högpunkten placerades gjordes dessutom modellberäkningar där högpunkten placerades på fyra olika ställen:

- Efter en tredjedel av tryckledningen
- Efter halva tryckledningen
- Efter två tredjedelar av tryckledningen
- I slutet av tryckledningen

Detta gjordes för de pumpstationsmodeller där en högpunkt på tryckledningen antogs finnas utifrån jämförelse mellan uppmätt och beräknat statistiskt tryck, vilket var modellerna Stenhagen och Malma Södra. Samma sak gjordes även för en pumpstationsmodell där en känd högpunkt enligt ritning fanns, vilket var modellen Björnsholm. För denna modell gjordes även en beräkning med den kända placeringen av högpunkten, vilket också var den beskrivning som användes i den slutgiltiga modellen. Ledningen efter högpunkten beskrevs i modellerna som en självfallsledning eftersom det i MIKE URBAN blev orimliga beräkningsresultat då en nedåtsluttande ledning beskrevs som en tryckledning. Att beskriva delar av tryckledningen som en självfallsledning på det här sättet skulle dock kunna ge ett missvisande beräkningsresultat med avseende på tryck och flöde. För att bättre likna denna självfallsledning vid en tryckledning ändrades i modellen storleken på självfallsledningens spaltbredd så att den var av samma storlek som för en tryckledning och därmed mer liknade en tryckledning. Beräkningar gjordes med dessa två olika inställningar av spaltbredden (0,01 gånger ledningens diameter för beskrivning som självfallsledning och 0,00001 gånger ledningens diameter för beskrivning som tryckledning) och resultatet med avseende på tryck och flöde noterades.



Figur 9. Illustration av högpunkt före släppunkt på tryckledning.

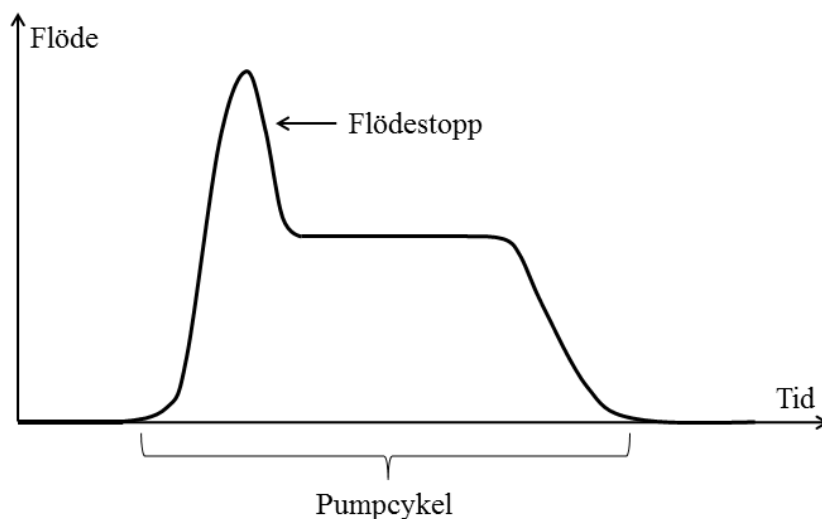
3.3.3 Kalibrering

För att få ett utgångsläge där pumpstationsmodellerna till så stor del som möjligt beskrev verkliga förhållanden så kalibrerades modellerna mot uppmätt kapacitet. Justeringar av statistiskt tryck hade gjorts för de pumpstationsmodeller där skillnaden mellan uppmätt statistiskt tryck och statistiskt tryck enligt underlag erhållet från kommunerna var större än 5 %. Pumpstationen Jenny kalibrerades mot uppmätt kapacitet efter rensning av tryckledning. Modellberäkningarna gjordes för scenario 1 i kalibreringen.

En modellberäkning gjordes och för pump 1 jämfördes det beräknade medelflödet med det uppmätta medelflödet för varje pumpstationsmodell. De beräknade medelvärdena avlästes i MIKE View som medelvärdet av flöde under ett antal pumpcykler där eventuella tryck-och flödestoppar uppkomna på grund av tryckslag inte inkluderades. Ifall skillnaden mellan beräknat och uppmätt flöde var större än 5 % så justerades modellparametrar för att kompensera för detta. Anledningen till att dra gränsen vid 5 % var även här att osäkerheten för mätningarna beräknades vara åtminstone så stor samt att det var svårt att kalibrera modellerna närmare än så. Beroende på om det beräknade flödet var större eller mindre än det uppmätta så justerades modellparametarna på olika sätt. Då det beräknade flödet var *större* än det uppmätta antogs det bero på att det i verkligheten fanns tryckförluster i tryckledningen på grund av till exempel ventiler och krökar som inte beskrevs i modellen och/eller att tryckledningens kondition i verkligheten var sämre än vad som beskrevs i modellen. För att kompensera för detta sänktes Mannings tal för tryckledningen i modellen tills det att skillnaden mellan beräknat och uppmätt flöde var mindre än 5 %. Då det beräknade flödet var *mindre* än det uppmätta antogs det bero på att tryckledningar av plast i verkligheten expanderar upp till 5 %. För att kompensera för detta ökades tryckledningens innerdiameter i modellen med upp till 5 % tills det att skillnaden mellan beräknat och uppmätt flöde var mindre än 5 %. Ifall en ökning av tryckledningens innerdiameter med 5 % inte var tillräckligt för att skillnaden mellan beräknat och uppmätt flöde skulle vara mindre än 5 % antogs att tryckledningens kondition i verkligheten var bättre än vad som beskrevs i modellen. För att kompensera för detta höjdes Mannings tal för tryckledningen i modellen tills det att skillnaden mellan beräknat och uppmätt flöde var mindre än 5 %.

I de beräknade medelflödena som beskrevs ovan inkluderades inte de höga maxflöden (flödestoppar) i början av varje pumpcykel som visade sig uppkomma för flera stycken av pumpstationsmodellerna. Figur 10 visar ett exempel på hur det kan se ut med en flödestopp i

början av pumpcykeln. Eftersom resultatet för de uppmätta flödena inte visade sådana flödestoppar så var det heller inte önskvärt att resultatet för de beräknade flödena skulle göra det. I MIKE URBAN kunde antingen det beräknade flödet i pumpen eller det beräknade flödet i början av tryckledningen utvärderas. Hittills var det flödet i pumpen som utvärderats. Det undersöktes om utvärdering av beräknat flöde i början av tryckledningen istället för i pumpen skulle kunna lösa problemet med höga flödestoppar. Dessutom undersöktes om storleken på spaltbredden i de fiktiva brunnarna (nod 3) påverkade flödestopparnas storlek. För samtliga modeller gjordes först en beräkning med standardinställningen för spaltbredden i de fiktiva brunnarna (0,01 gånger brunnens diameter) och resultatet med avseende på maxflöde i pump och början av tryckledning noterades. Därefter gjordes en beräkning där spaltbredden i de fiktiva brunnarna minskades till 0,0001 gånger brunnens diameter och resultatet med avseende på maxflöde i pump och början av tryckledning noterades. På grund av att det beräknade trycket blev för högt för en pumpstation i Uppsala då spaltbredden minskades till 0,0001 gånger brunnens diameter så kunde inte en sådan beräkning göras. Istället gjordes en beräkning av modellerna som tillhörde Uppsala med en spaltbredd på 0,001 gånger brunnens diameter.



Figur 10. Pumpcykel med icke representativ flödestopp i början av pumpcykel.

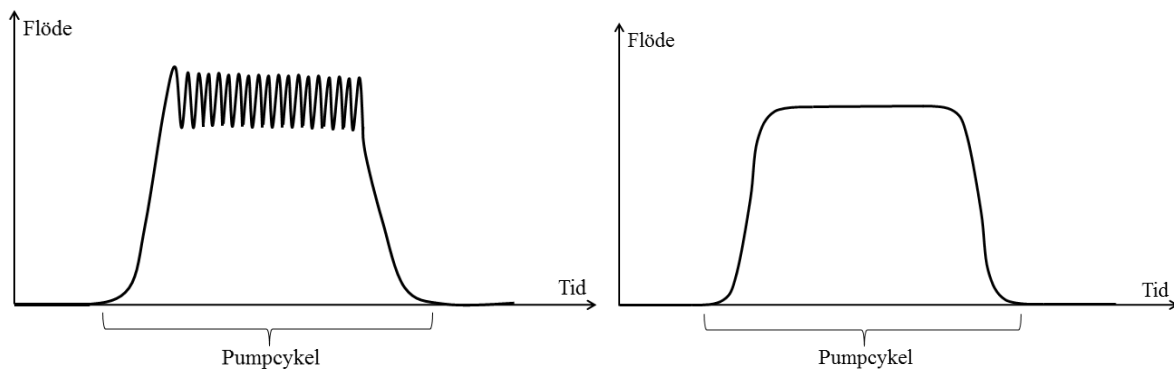
I fortsättningen valdes att för de fiktiva brunnarnas spaltbredd använda standardinställningen 0,01 gånger brunnens diameter. Beräkningsresultatet med avseende på flöde utvärderades härnäst i tryckledningen för alla pumpstationsmodeller förutom Stenhagen där det utvärderades i pumpen. Att det beräknade flödet inte kunde utvärderas i tryckledningen för pumpstationsmodellen Stenhagen berodde på att pumpcyklerna var för täta vilket medförde att det beräknade flödet i tryckledningen inte var representativt.

Med storleken 0,01 gånger brunnens diameter på spaltbredden gjordes modellberäkningar för scenario 3 (hittills var alla beräkningar gjorda för scenario 1). För att kontrollera att det inte uppkom några stora skillnader beroende av var resultatet med avseende på flöde utvärderades jämfördes det totala beräknade medelflödet i pump med det totala beräknade medelflödet i tryckledning. Med det totala medelflödet menas medelflödet för hela scenario 3, det vill säga det sammanlagda medelflödet för scenario 3a, 3b och 3c. För några av

pumpstationsmodellerna blev beräkningarna för scenario 3 instabila, läs mer om detta i avsnitt 3.3.4. Därför kunde jämförelsen mellan utvärdering av flöde i pump respektive tryckledning endast utföras för de pumpstationsmodeller som gav stabila beräkningsresultat och som dessutom inte hade några tydliga flödestoppar.

3.3.4 Instabilitet

De kalibrerade pumpstationsmodellerna beräknades till att börja med för de tre olika scenarierna 1, 2 och 3. Det visade sig att vissa flödesberäkningar blev instabila särskilt för scenario 3. Figur 11 visar på ett förenklat sätt hur ett instabilt beräkningsresultat skiljer sig från ett stabilt. För att undersöka hur storleken på den fiktiva brunnen (nod 3) påverkade simuleringsresultatet med avseende på instabilitet gjordes till att börja med en simulering av pumpstationsmodellerna med den ursprungliga beskrivningen av den fiktiva brunnen (nod 3), det vill säga med 0,5 m diameter och 0,5 m höjd, för de tre olika scenarierna. Notering gjordes om beräkningarna var stabila eller inte. Därefter ökades diametern för den fiktiva brunnen (nod 3) till 1 m och nya simuleringar gjordes för de tre olika scenarierna. Notering gjordes om beräkningarna var stabila eller inte. Eftersom problemen med instabila beräkningar visade sig vara störst för scenario 3 så undersöktes resultaten från dessa beräkningar vidare. Detta gjordes genom att jämföra beräkningsresultaten med avseende på medelflöde i tryckledning samt bräddvolym för de två olika beskrivningarna av den fiktiva brunnen (nod 3) storlek. Jämförelsen kunde endast göras för de stabila pumpstationsmodellerna. Det noterades även hur maxflödet (det vill säga storleken på eventuell flödestopp) i både pump och tryckledning påverkades då den fiktiva brunnen storlek varierades.



Figur 11. Exempel på instabil flödesberäkning kontra stabil flödesberäkning. De två bilderna visar samma pumpcykel men bilden till vänster är för instabila beräkningar och bilden till höger är för stabila beräkningar.

I fortsättningen valdes att beskriva den fiktiva brunnen (nod 3) med en diameter på 1 m och en höjd på 0,5 m för samtliga pumpstationsmodeller. Pumpstationsmodellen P10 gav dock fortfarande instabila beräkningar vid denna beskrivning av den fiktiva brunnen vilket löstes genom att göra beräkningarna för pumpstationsmodellerna i Västervik med ett mindre tidssteg. Tidssteget minskades från 1 s till 0,2 s. För pumpstationsmodellerna i Uppsala gjordes dock beräkningarna även i fortsättningen med tidssteget 1 s.

3.3.5 Känslighetsanalys

I examensarbetet gjordes en så kallad "One-at-a-time" känslighetsanalys för ett antal modellparametrar i pumpstationsmodeller. Vilka modellparametrar som undersöktes i detta

projekt redovisas i tabell 10. I tabellen redovisas även vilka modellparametrar som undersöktes i parallellt examensarbete (Fredriksson, 2014).

Tabell 10. Modellparametrar som känslighetsanalys gjordes för i detta examensarbete och parallellt examensarbete.

Modellparameter	Undersöks i detta examensarbete	Undersöks i parallellt examensarbete
Pumpkapacitet	X	X
Accelerations- och retardationstid pump	X	
Geometri pumpsump		X

Samtliga pumpstationsmodeller som skapades i projektet användes vid utförandet av känslighetsanalysen. För varje kalibrerad pumpstationsmodell var utgångsläget en parameteruppsättning som skulle motsvara de verkliga förhållandena i pumpstationen, ett grundscenario. I detta grundscenario var modellparametrar ansatta till uppmätta eller av kommunerna angivna värden som så bra som möjligt beskrev hur pumpstationen såg ut i verkligheten, detta beskrevs i avsnitt 3.3.1. I de fall där parametervärden inte kunde mätas och saknades från kommunerna användes skattade värden. En beräkning av modellerna gjordes för grundscenariot för scenario 1, 2 och 3 och resultatet med avseende på flöde och bräddvolym noterades. Därefter varierades en modellparameter i taget varefter en ny beräkning gjordes för scenario 1, 2 och 3 och resultatet med avseende på flöde och bräddvolym noterades. Hur modellparametrarna varierades från grundscenariot ses i tabell 11.

Tabell 11. Hur modellparametrarna pumpkapacitet samt accelerations- och retardationstid varierades vid känslighetsanalys.

Modellparameter	Variation av modellparameter
Pumpkapacitet	Beskrevs med: <ol style="list-style-type: none"> 1) Teoretisk pumpkurva 2) Teoretisk pumpkurva med avvikelse enligt ISO 9906:2012 3) Konstant kapacitet (uppmätt medelflöde)
Accelerations- och retardationstid	Beskrevs med konstanta tider: <ol style="list-style-type: none"> 1) 10 s 2) 30 s 3) 60 s

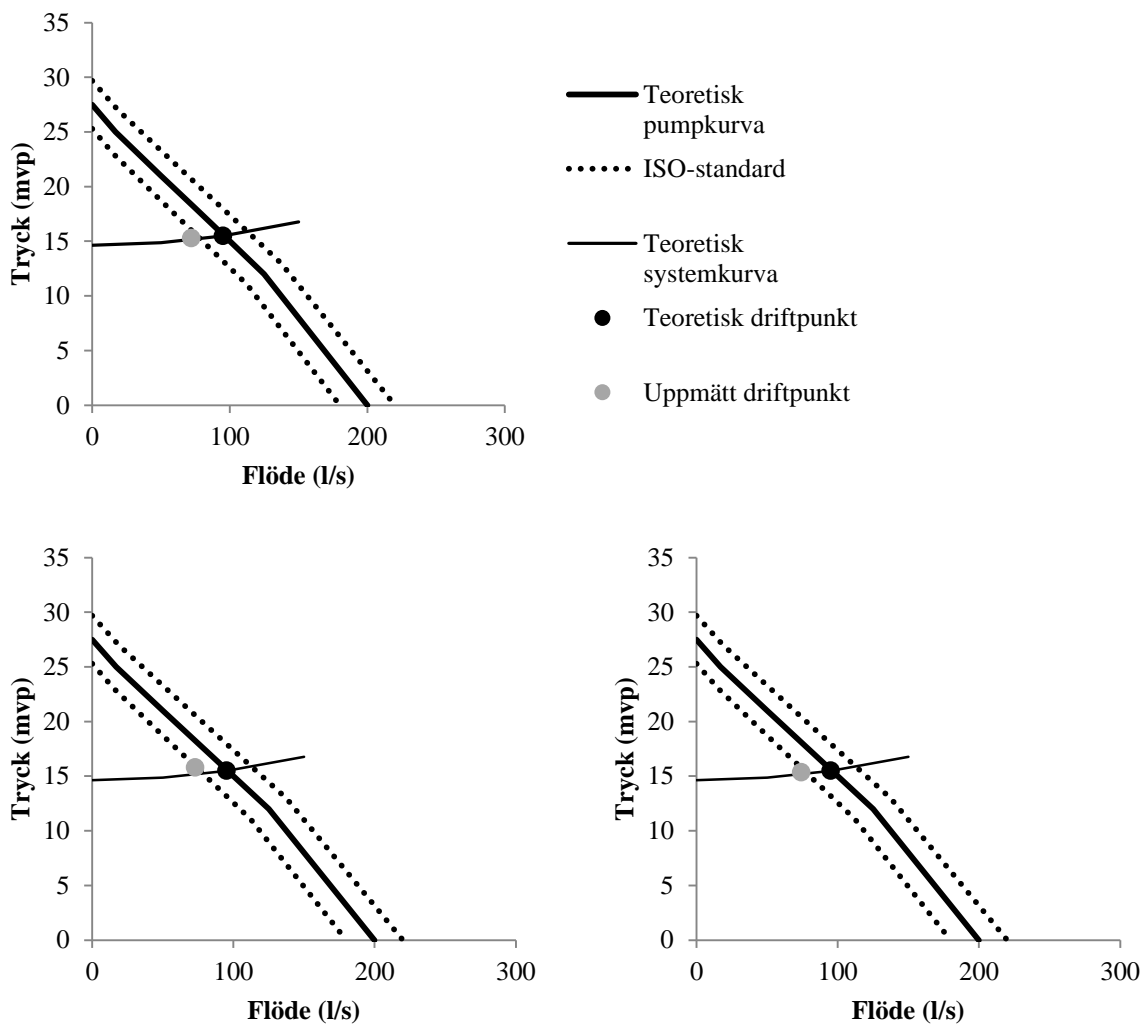
Pumpkapaciteten troddes vara en parameter med stor påverkan på beräkningsresultatet vilket gjorde den intressant att undersöka. Anledningen till att variera pumpkapaciteten enligt tabell 11 var att det gav möjlighet att undersöka vilka skillnaderna i beräkningsresultat kunde bli när uppmätt pumpkurva användes för att beskriva pumpens kapacitet istället för teoretisk pumpkurva. Det gav även möjlighet att kontrollera hur stora skillnaderna i beräkningsresultatet kunde bli när kapaciteten avvek från den teoretiska pumpkurvan men låg inom den standard som garanteras enligt ISO 9906:2012. Gränserna för ISO 9906:2012

beskrevs med ± 10 % av trycket och ± 8 % av flödet enligt den teoretiska pumpkurvan. I verkligheten har man dock ofta bara tillgång till en uppskattning av den konstanta kapaciteten för en pump och därför undersöktes även hur beräkningsresultatet påverkades när pumpkapaciteten beskrevs med ett konstant flöde, här dock baserat på uppmätt flöde. Accelerations- och retardationstiden är parametrar som kan justeras för att uppnå stabilitet i modeller. Det saknas dessutom ofta information om dessa tider så det är parametrar som brukar sättas till grundinställningen, vilken är 10 s. Att se hur denna parameter påverkade beräkningsresultatet ansågs därför intressant att undersöka. Anledningen till att variera accelerations- och retardationstid med de värden som beskrivs i tabell 11 var att det ansågs intressant eftersom det är dessa värden som vanligtvis används för att beskriva dessa parametrar då verklig information ofta saknas (Hammarlund, 2013, pers. kontakt).

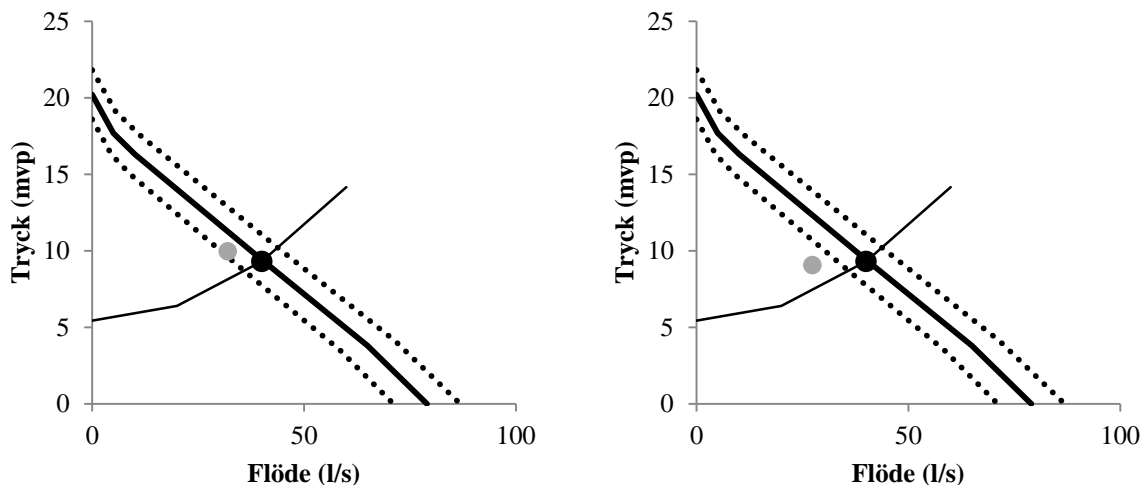
4. RESULTAT

4.1 KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER

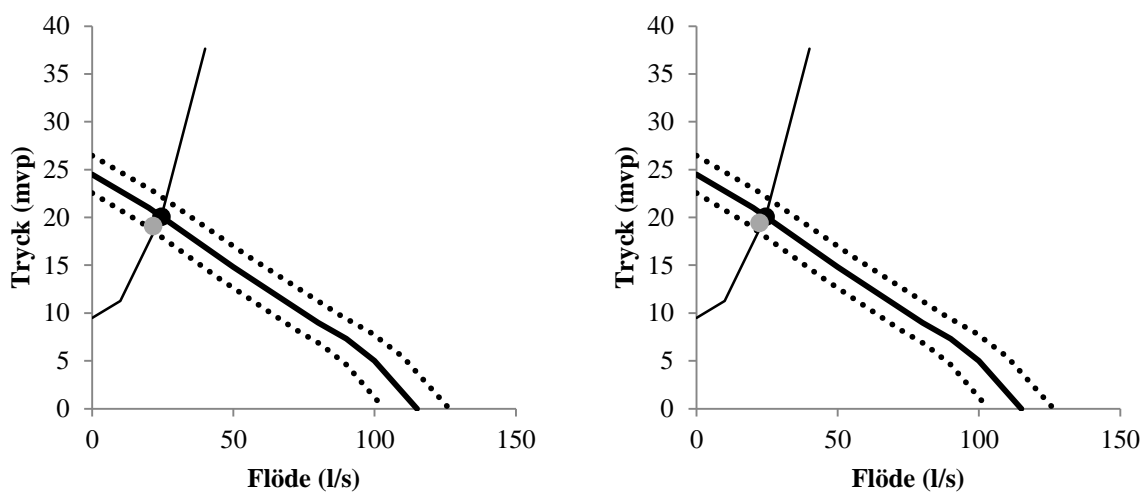
I figurerna 12 till 22 redovisas resultatet från mätningarna av flöde och tryck i pumpstationer. Uppmätt driftpunkt för samtliga pumpar där mätningar av tryck och flöde gjordes presenteras tillsammans med teoretisk pumpkurva från pumptillverkaren, teoretisk systemkurva beräknad i examensarbetet och teoretisk driftpunkt. Gränserna för inom vilket område den teoretiska driftpunkten garanteras ligga enligt ISO 9906:2012 är även utmärkta. Observera att förklaringen i den första figuren även gäller för alla efterföljande figurer. Uppmätta driftpunkter hittas även i bilaga C.



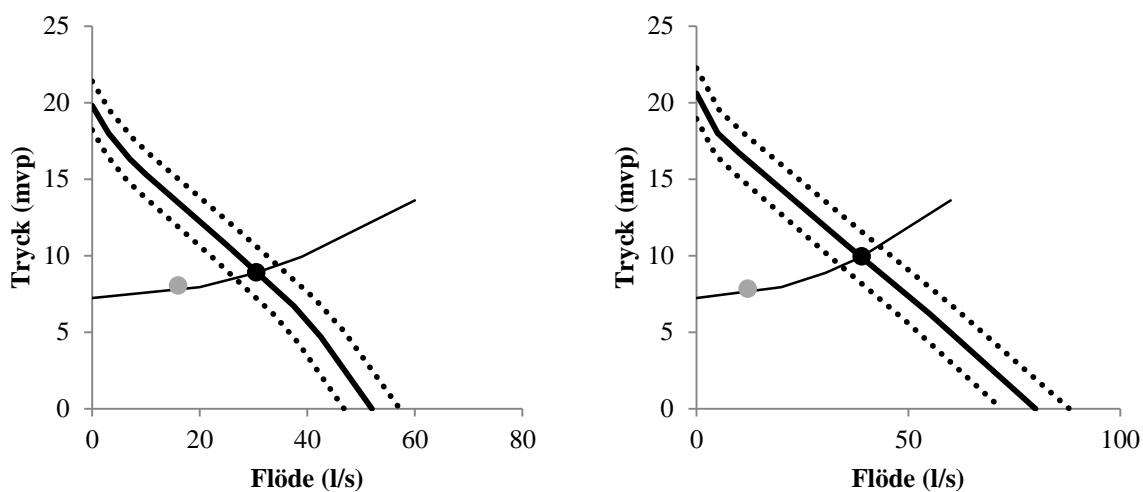
Figur 12. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Djurgårdsbacken. Överst pump 1, nederst till vänster pump 2 och nederst till höger pump 3.



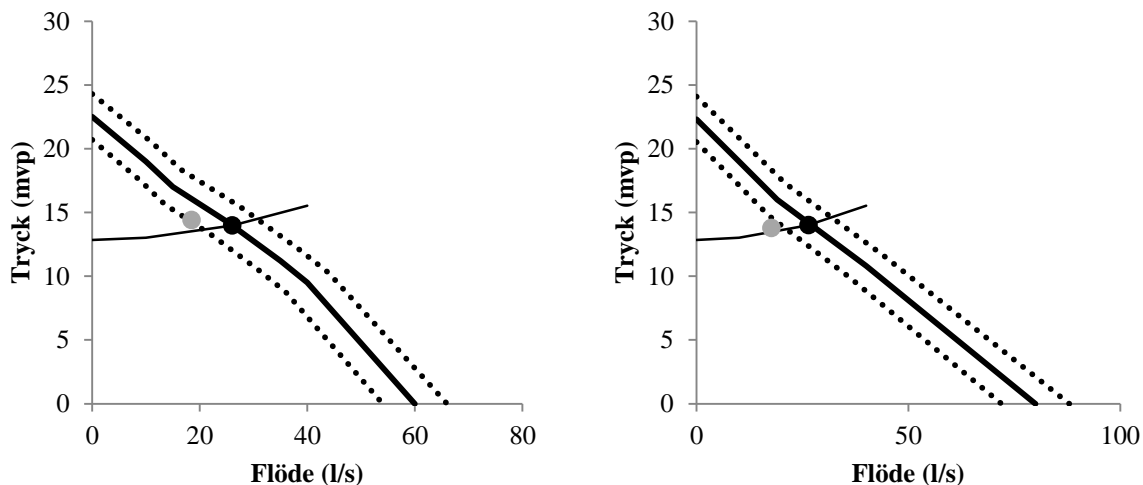
Figur 13. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Stenhagen. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.



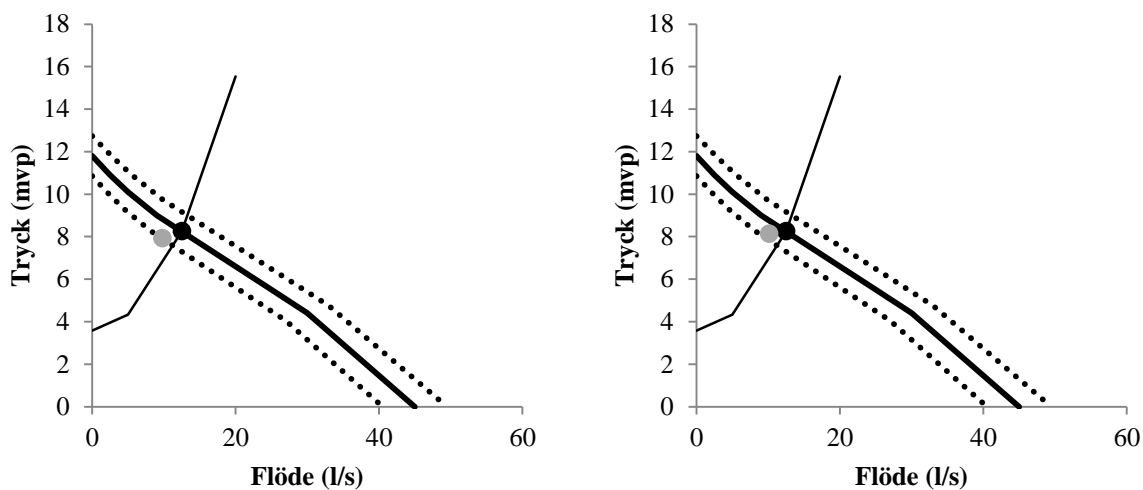
Figur 14. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Södra Gottsunda. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.



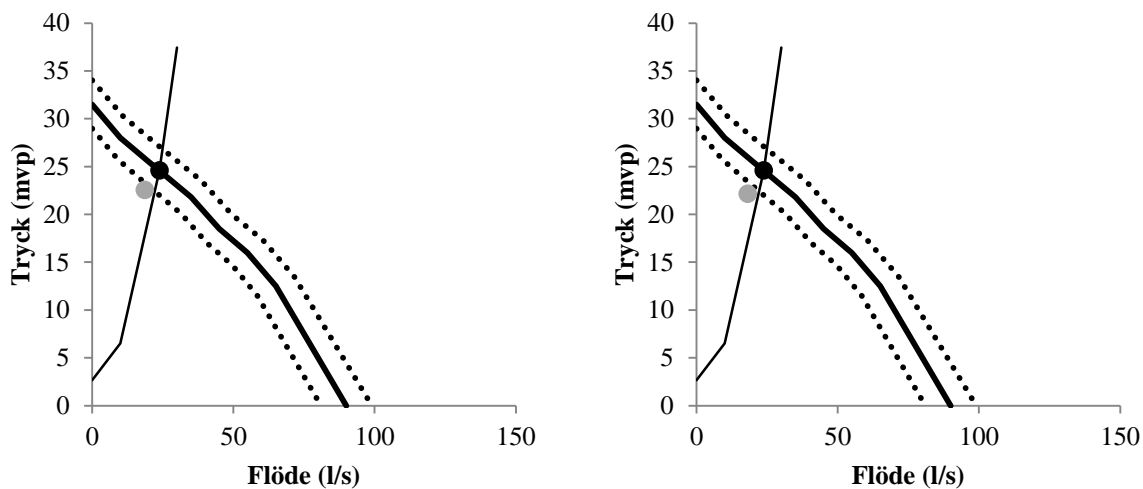
Figur 15. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Musikparken. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.



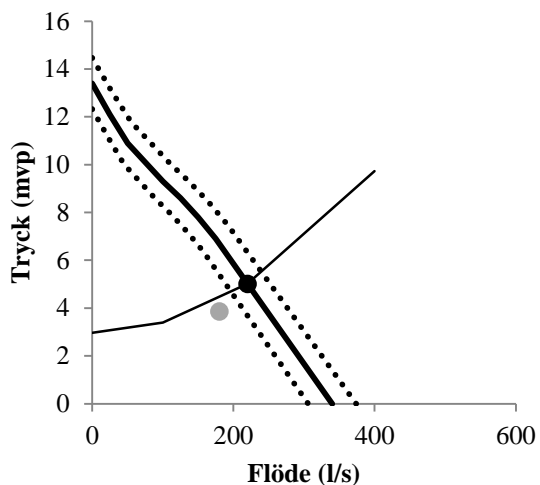
Figur 16. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Kohagen. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.



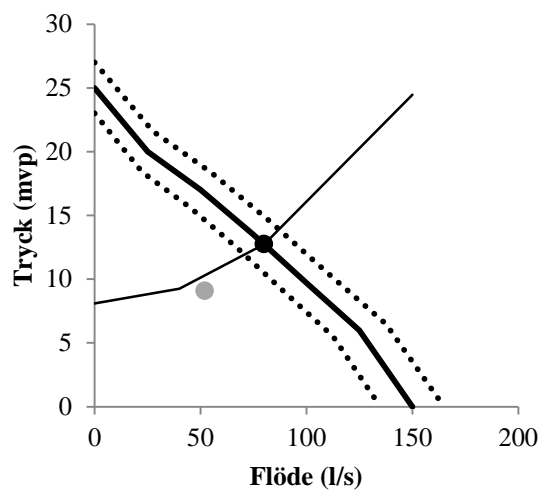
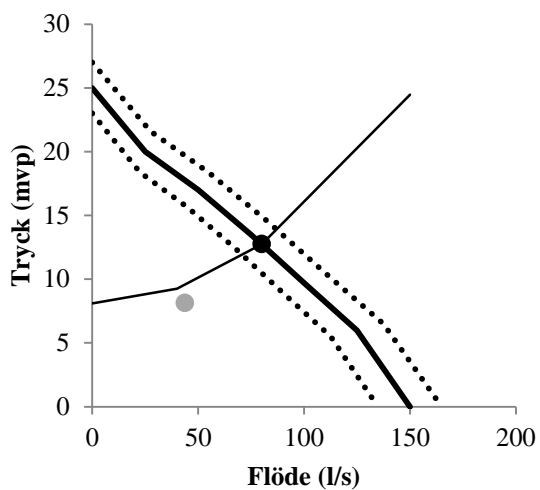
Figur 17. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Malma Södra. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.



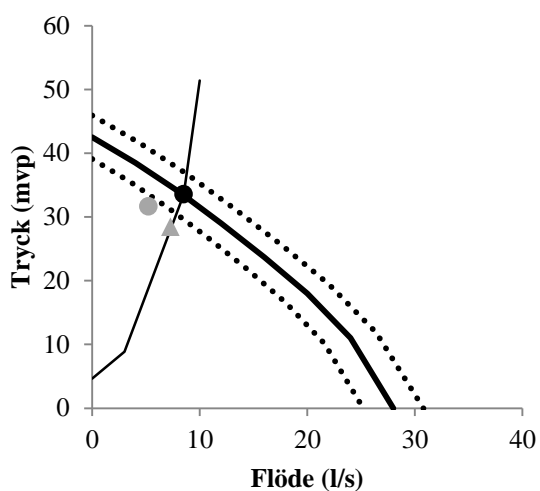
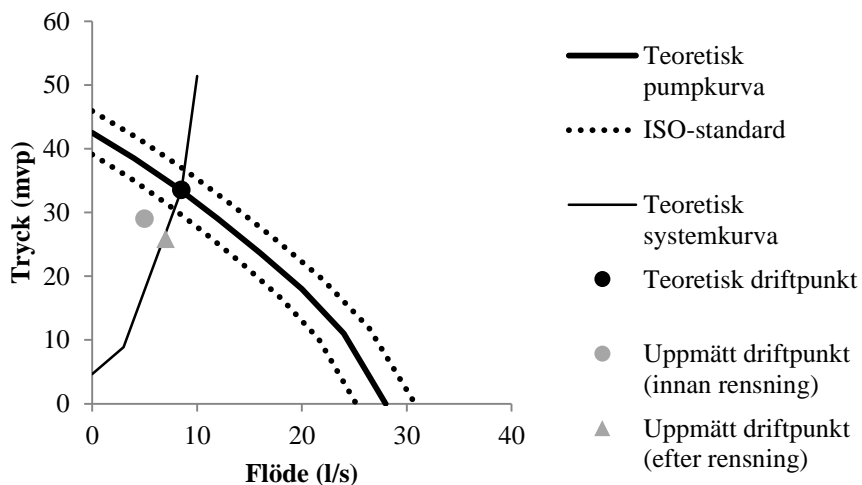
Figur 18. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Garaget. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.



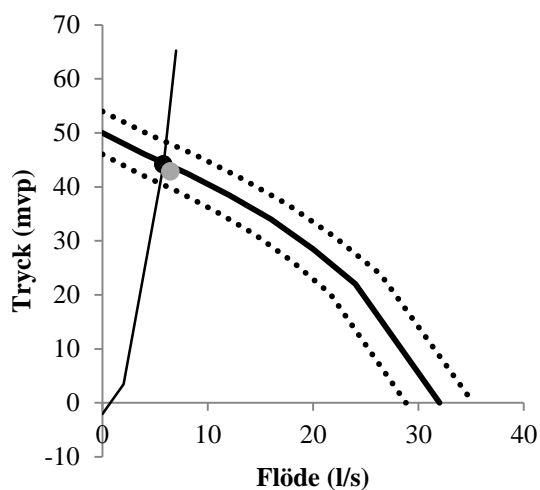
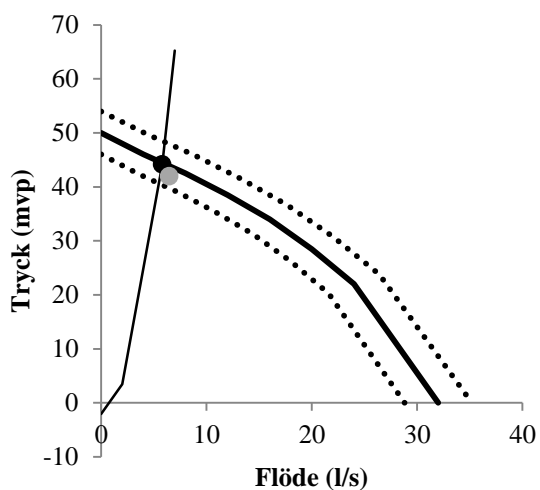
Figur 19. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen P10 pump 2.



Figur 20. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen P14. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.



Figur 21. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Jenny. Överst pump 1 och nederst pump 2.



Figur 22. Teoretisk pumpkurva med gränser enligt ISO 9906:2012, teoretisk driftpunkt och uppmätt driftpunkt för pumpstationen Björnsholm. Till vänster pump 1 och till höger pump 2.

I tabell 12 redovisas uppmätta accelerations- och retardationstider för de pumpar där mätningar av flöde och tryck gjordes. I vissa fall kunde inte accelerations- och retardationstid avläsas ur mätdata och i dessa fall anges inget värde i tabellen.

Tabell 12. Uppmätta accelerations- och retardationstider.

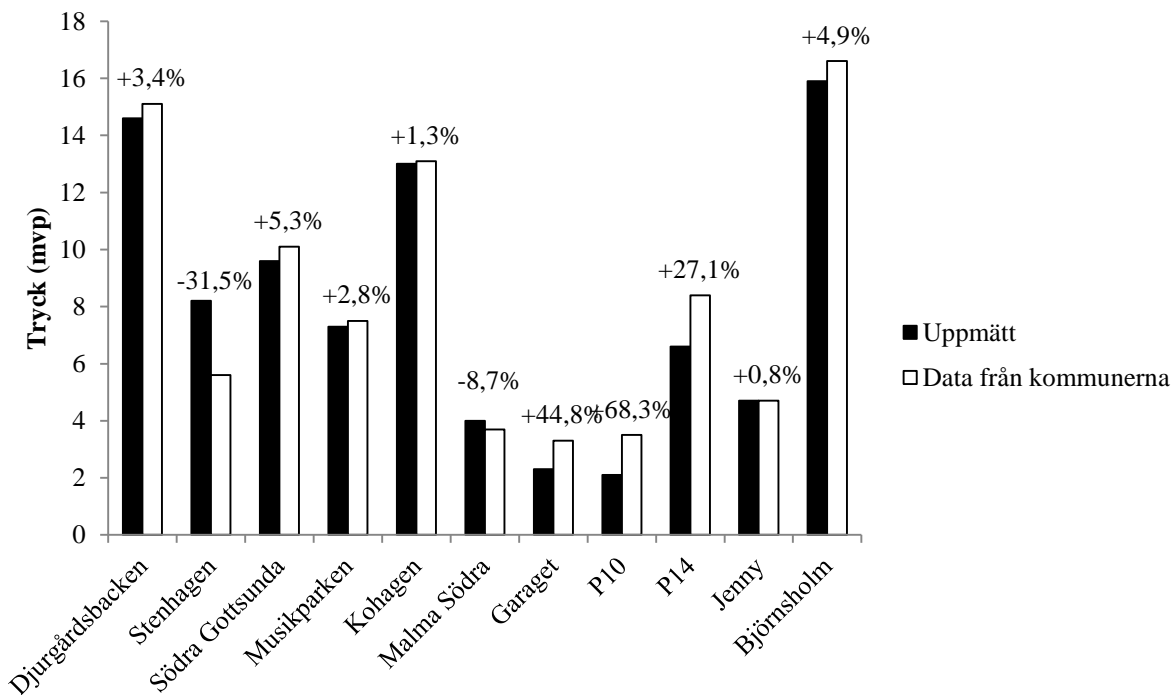
Pumpstation	Pump	Uppmätt accelerationstid (s)	Uppmätt retardationstid (s)
Djurgårdsbacken	P1	30	22
	P2	31	22
	P3	31	28
Stenhagen	P1	-	-
	P2	30	18
Södra Gottsunda	P1	20	5
	P2	-	-
Musikparken	P1	45	22
	P2	25	17
Kohagen	P1	35	23
	P2	35	20
Malma Södra	P1	26	17
	P2	23	16
Garaget	P1	-	-
	P2	-	-
P10	P2	-	-
P14	P1	23	12
	P2	20	17
Jenny	P1	35	30
	P2	35	30
Björnsholm	P1	25	15
	P2	25	18

4.2 MODELLERING

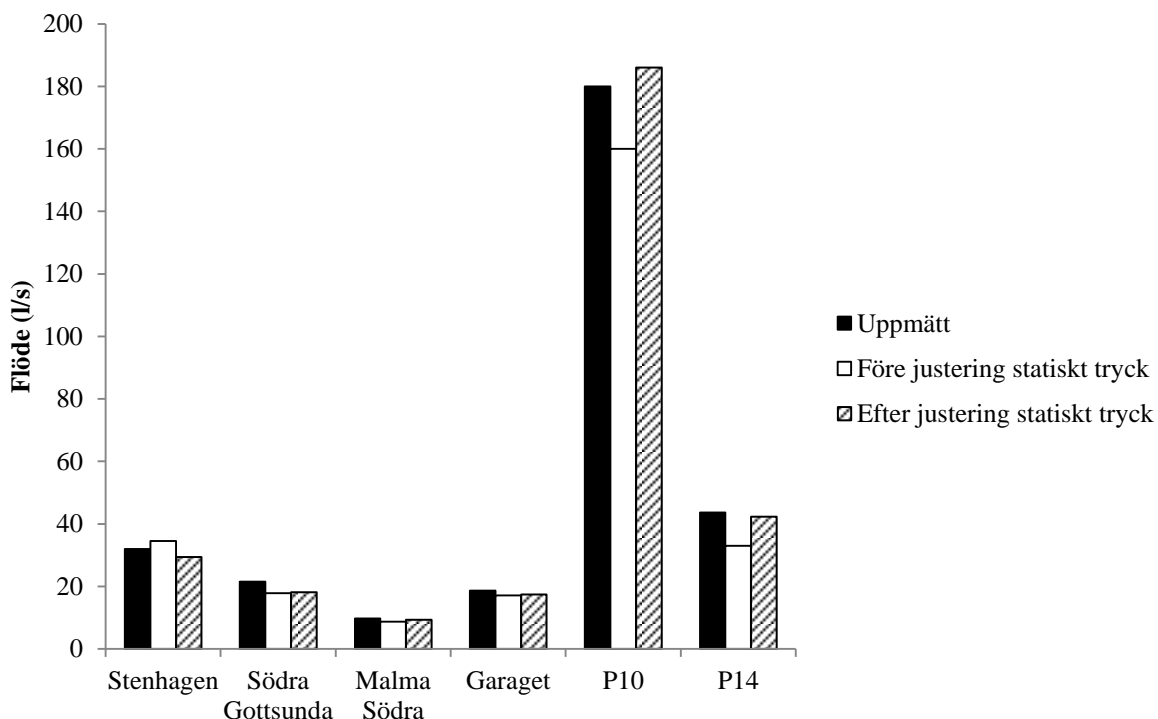
Resultaten från modellberäkningarna utvärderades på olika sätt. I de fall resultatet avlästes i MIKE View anges detta. Om inget annat anges utvärderades resultaten från modellberäkningarna genom att de beräknade värdena plockades ur beräkningsfilen med programmet m1lextraWin och analyserades vidare i Excel.

4.2.1 Statiskt tryck

I figur 23 presenteras medelvärde av uppmätt statiskt tryck samt statiskt tryck enligt underlag erhållet från kommunerna. Den procentuella skillnaden mellan dessa tryck redovisas också. De pumpstationsmodeller där den procentuella skillnaden var mer än 5 % justerades för detta. I figur 24 presenteras det uppmätta medelvärdet av maxflöde och det beräknade medelvärdet av flöde vid full kapacitet avläst i MIKE View före och efter justering av statiskt tryck för de pumpstationsmodeller där justering gjordes. Det statistiska trycket justerades för Stenhagen och Malma Södra genom införande av en högpunkt efter 2/3 av tryckledningen. Resterande modeller i figur 24 justerades genom att den statistiska höjden minskades. Diagrammet redovisar medelvärde av beräknat flöde vid full kapacitet för pump 1, vilket avlästes i MIKE View. Modellberäkningarna gjordes för scenario 1.



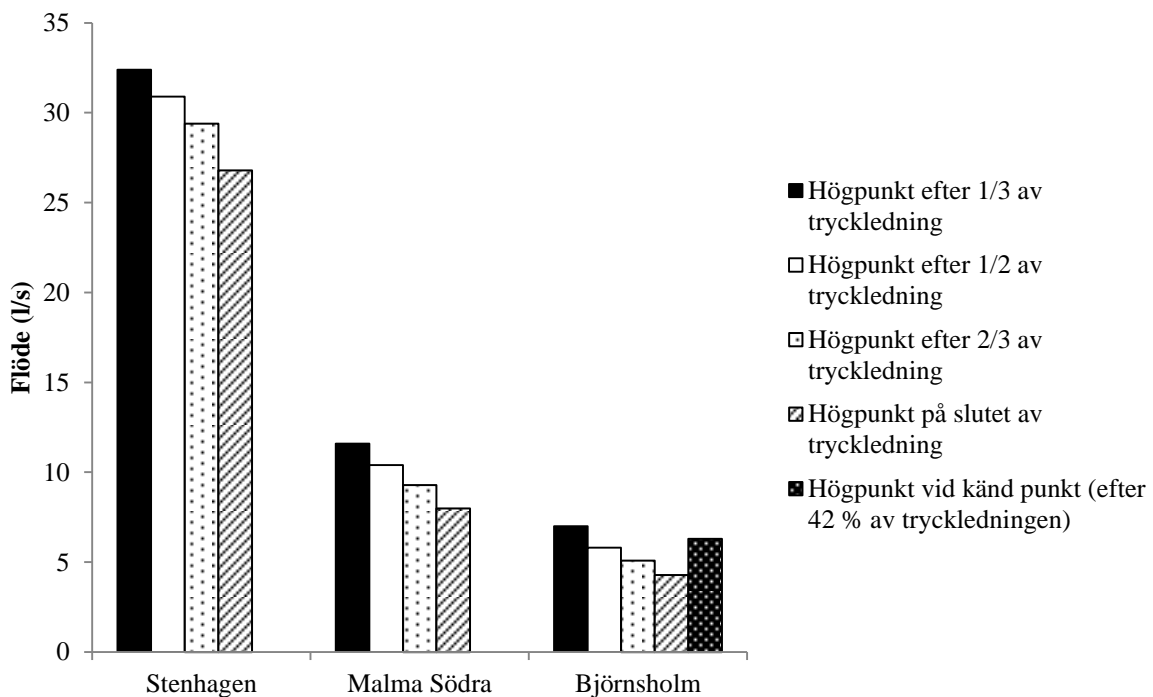
Figur 23. Medelvärde av uppmätt statistiskt tryck och statistiskt tryck enligt underlag erhållet från kommunerna.



Figur 24. Uppmätt medelvärde av flöde vid full kapacitet samt medelvärde av beräknat flöde vid full kapacitet före och efter justering av statistiskt tryck.

Figur 25 visar beräkningsresultat med avseende på flöde vid placering av en högpunkt på olika delar av tryckledningen i tre stycken pumpstationsmodeller (Stenhagen, Malma Södra och Björnsholm). Diagrammet redovisar medelvärde av beräknat flöde vid full kapacitet för pump 1, vilket avlästes i MIKE View. Storleken på spaltbredden för den självfallsledning som

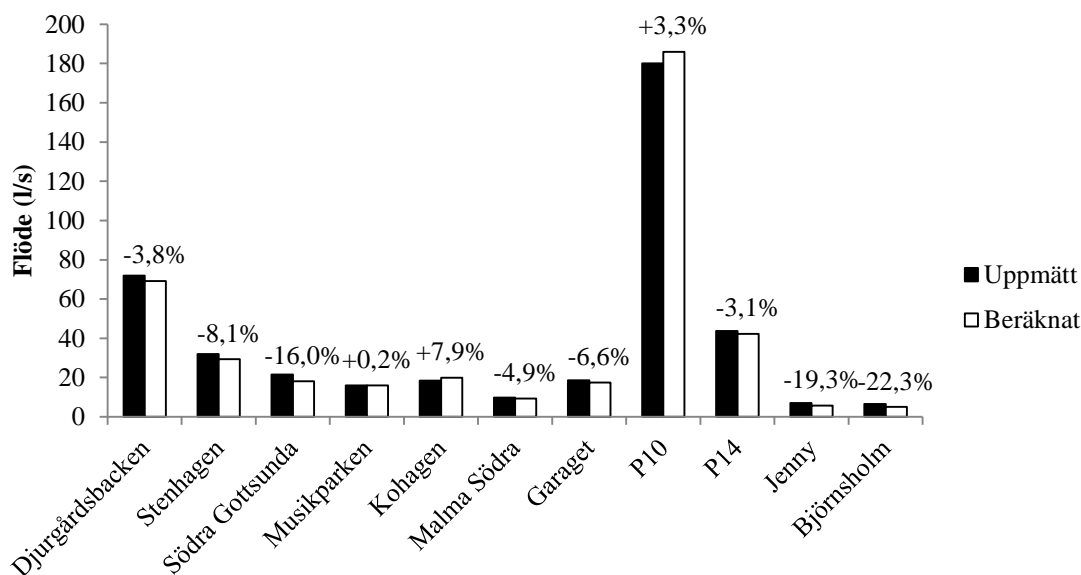
efter högpunkten beskrev tryckledningen var 0,01 gånger ledningens diameter. Beräkningsresultatet med inställningen 0,00001 gånger brunnens diameter var detsamma som i figur 25. Modellberäkningarna gjordes för scenario 1.



Figur 25. Beräknat medelvärde av flöde vid full kapacitet för olika placering av högpunkt på tryckledningen.

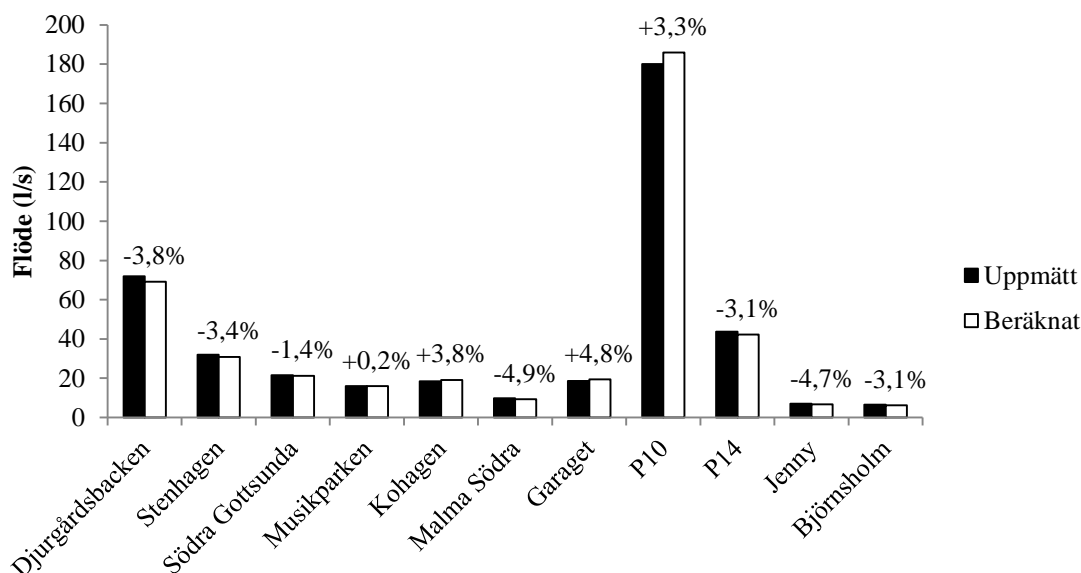
4.2.2 Kalibrering

Figur 26 visar resultatet av uppmätt och beräknat flöde samt den procentuella skillnaden mellan dessa flöden för samtliga pumpstationsmodeller. Justeringar i modellerna var gjorda för kompensation av skillnad mellan uppmätt statistiskt tryck och från kommunerna angivet statistiskt tryck för de modeller där denna skillnad var större än 5 %, se figur 23. I pumpstationsmodellerna Stenhagen och Malma Södra var högpunkten placerad efter två tredjedelar av tryckledningen. Angivna flöden är medelvärden vid full kapacitet för pump 1 (pump 2 för pumpstationen P10) under ett antal pumpcykler där eventuella tryck- och flödestoppar orsakade av tryckslag inte inkluderades. Beräknade medelvärden vid full kapacitet avlästes i MIKE View. Modellberäkningarna gjordes för scenario 1.



Figur 26. Medelvärde av uppmätt och beräknat flöde vid full kapacitet och den procentuella skillnaden mellan dessa flöden.

Figur 27 visar resultatet av uppmätt och beräknat flöde efter kalibrering av pumpstationsmodellerna samt den procentuella skillnaden mellan dess flöden. Angivna flöden är medelvärden vid full kapacitet för pump 1 (pump 2 för pumpstationen P10) under ett antal pumpcykler där eventuella tryck- och flödestoppar orsakade av trycks slag inte inkluderades. Beräknade medelvärden vid full kapacitet avlästes i MIKE View. Modellberäkningarna gjordes för scenario 1. Tabell 13 visar hur var och en av pumpstationsmodellerna hade kalibrerats. Kalibrering hade gjorts för de pumpstationsmodeller där beräknat flöde skiljde sig mer än 5 % från uppmätt flöde, se figur 26.



Figur 27. Medelvärde av uppmätt och beräknat flöde vid full kapacitet efter kalibrering av modellerna och den procentuella skillnaden mellan dessa flöden.

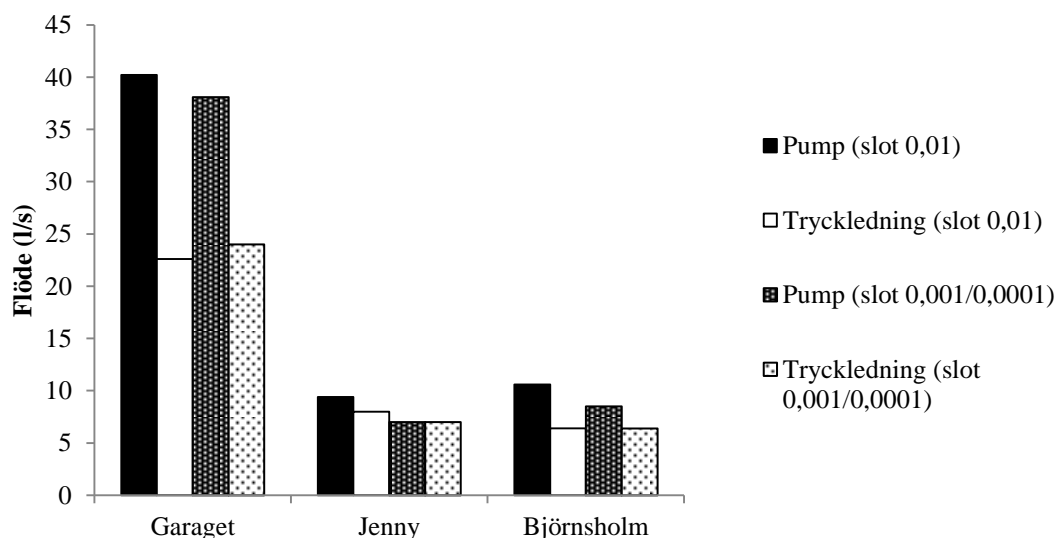
Tabell 13. Vilka modeller som kalibrerades och hur detta gjordes.

Pumpstation	Justeringar i modell
Djurgårdsbacken	-
Stenhagen	5 % ökning av tryckledningens diameter
Södra Gottsunda	5 % ökning av tryckledningens diameter, ökning av Mannings tal med 5
Musikparken	-
Kohagen	Minskning av Mannings tal med 10
Malma Södra	-
Garaget	5 % ökning av tryckledningens diameter
P10	-
P14	-
Jenny	5 % ökning av tryckledningens diameter, ökning av Mannings tal med 5
Björnsholm	5 % ökning av tryckledningens diameter, ökning av Mannings tal med 10

Nedan presenteras beräkningsresultatet då de fiktiva brunnarnas (nod 3) spaltbredd var 0,01 gånger brunnens diameter (standardinställning i MIKE URBAN) respektive 0,001 gånger brunnens diameter för de modeller som tillhör Uppsala och 0,0001 gånger brunnens diameter för de modeller som tillhör Västervik. Tabell 14 anger för varje pumpstationsmodell ifall en tydlig flödestopp fanns i början av varje pumpcykel. Då värde saknas beror det på att beräkningen blev instabil och inget resultat kunde erhållas. Figur 28 visar det beräknade maxflödet i pump och tryckledning för de pumpstationer där en tydlig flödestopp kunde ses vilket var Garaget, Jenny och Björnsholm. Beräkningsresultaten är för drift av pump 1 (pump 2 för P10) och modellberäkningarna gjordes för scenario 1.

Tabell 14. Angivelse om tydlig flödestopp kunde ses i beräkningsresultaten då beräknat flöde utvärderades i pump och tryckledning. Detta anges för två inställningar av spaltbredd för fiktiva brunnar (nod 3).

Pumpstation	Spaltbredd 0,01·brunnsdiameter (m)		Spaltbredd 0,001/0,0001·brunnsdiameter (m)	
	Tydlig flödestopp pump?	Tydlig flödestopp tryckledning?	Tydlig flödestopp pump?	Tydlig flödestopp tryckledning?
Djurgårdsbacken	Nej	Nej	Nej	Nej
Stenhagen	Nej	Nej	Nej	-
Södra Gottsunda	Nej	Nej	-	-
Musikparken	Nej	Nej	Nej	Nej
Kohagen	Nej	Nej	Nej	Nej
Malma Södra	Nej	Nej	-	-
Garaget	Ja	Ja (liten)	Ja	Ja (liten)
P10	Nej	Nej	Nej	Nej
P14	Nej	Nej	Nej	Nej
Jenny	Ja	Ja (liten)	Ja (liten)	Ja (liten)
Björnsholm	Ja	Nej	Ja	Nej



Figur 28. Beräknade maxflöde utvärderat i både pump och tryckledning. Maxflödet anges för två inställningar av spaltbredd för fiktiva brunnar.

Tabell 15 visar beräknat medelflöde i pump respektive tryckledning. Modellberäkningarna gjordes för scenario 3 och de fiktiva brunnarnas (nod 3) spaltbredd var 0,01 gånger brunnens diameter. Beräkningsresultat redovisas för de pumpstationsmodeller som gav stabila beräkningar och som dessutom inte hade någon tydlig flödestopp i början av varje pumpcykel.

Tabell 15. Tabell som anger beräknat medelflöde utvärderat i både pump och tryckledning.

Pumpstation	Medelflöde pump (l/s)	Medelflöde tryckledning (l/s)
Djurgårdsbacken	65,15	65,14
Musikparken	12,93	12,93
Kohagen	18,64	18,65

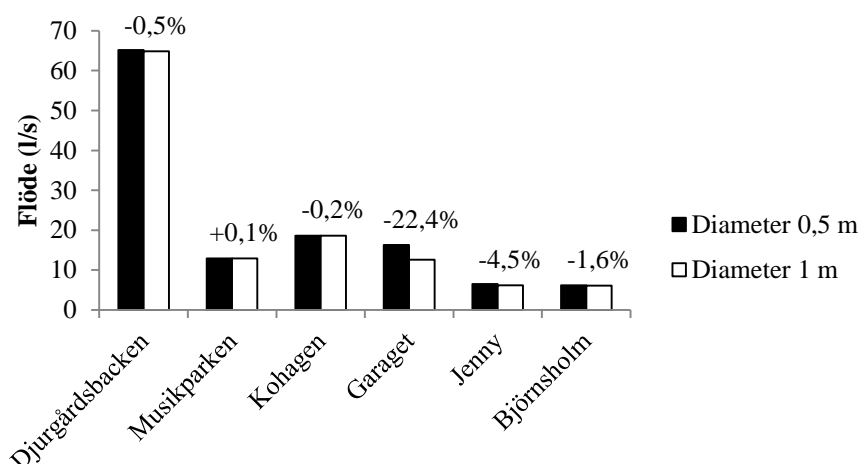
4.2.3 Instabilitet

Tabell 16 redovisar för vilka av pumpstationsmodellerna som beräkningarna blev stabila respektive instabila med diametern 0,5 m respektive 1 m på den fiktiva brunnen (nod 3). Modellberäkningarna gjordes för scenario 3.

Tabell 16. Vilka modeller som var instabila respektive stabila för olika beskrivning av den fiktiva brunns storlek.

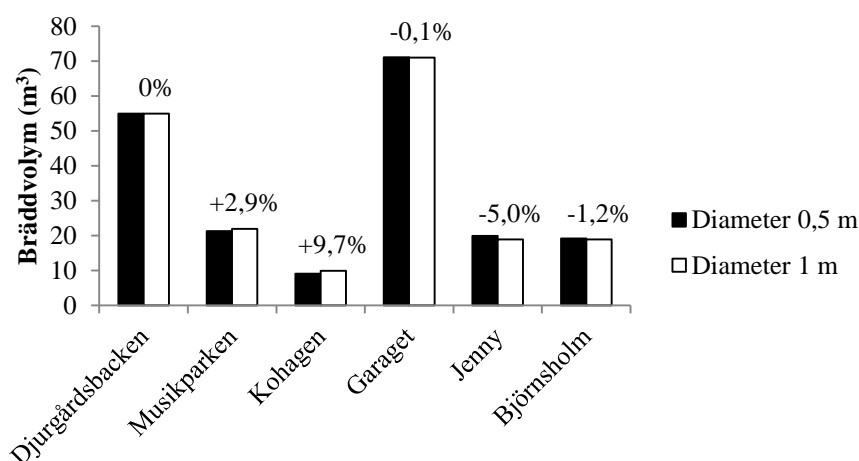
Pumpstation	Fiktiv brunn diameter 0,5 m Stabil beräkning?	Fiktiv brunn diameter 1 m Stabil beräkning?
Djurgårdsbacken	Ja	Ja
Stenhagen	Nej	Ja
Södra Gottsunda	Nej	Ja
Musikparken	Ja	Ja
Kohagen	Ja	Ja
Malma Södra	Nej	Ja
Garaget	Ja	Ja
P10	Nej	Nej
P14	Nej	Ja
Jenny	Ja	Ja
Björnsholm	Ja	Ja

I figur 29 presenteras det beräknade medelflödet med diametern 0,5 m respektive 1 m för den fiktiva brunnen (nod 3). Modellberäkningarna gjordes för scenario 3 av de pumpstationsmodeller som gav ett stabilt beräkningsresultat vid den ursprungliga beskrivningen av den fiktiva brunnen (det vill säga med diametern 0,5 m). Procenttalen anger vilken skillnaden blev då diametern ökades från 0,5 m till 1 m.



Figur 29. Beräknat medelflöde för olika beskrivning av den fiktiva brunns storlek.

I figur 30 presenteras den beräknade bräddvolymen med diametern 0,5 m respektive 1 m för den fiktiva brunnen (nod 3). Beräkningarna är gjorda för scenario 3 av de pumpstationsmodeller som gav ett stabilt beräkningsresultat vid den ursprungliga beskrivningen av den fiktiva brunnen (det vill säga med diametern 0,5 m). Den bräddvolym som anges i diagrammet är den totala bräddvolymen. Procenttalen anger vilken skillnaden blev då diametern ökades från 0,5 m till 1 m.



Figur 30. Beräknad bräddvolym för olika beskrivning av den fiktiva brunns storlek.

Tabell 17 redovisar beräknat maxflöde med diametern 0,5 m respektive 1 m för den fiktiva brunnen (nod 3). Maxflödet är för pump1 när endast denna pump är i drift.

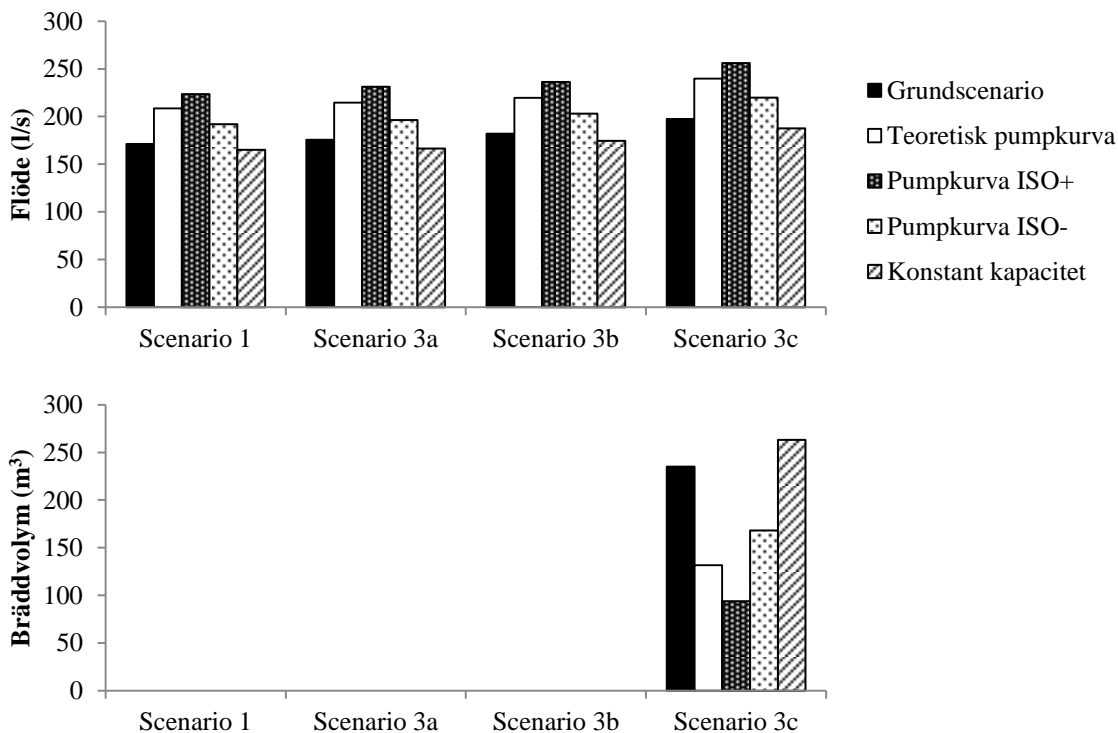
Tabell 17. Beräknat maxflöde utvärderat i både pump och tryckledning för olika beskrivning av den fiktiva brunnens storlek.

Pumpstation	Maxflöde pump (l/s)		Maxflöde tryckledning (l/s)	
	Fiktiv brunn diameter 0,5 m	Fiktiv brunn diameter 1 m	Fiktiv brunn diameter 0,5 m	Fiktiv brunn diameter 1 m
Djurgårdsbacken	71	71	71	71
Stenhagen	32	32	32	32
Södra Gottsunda	23	26	22	22
Musikparken	17	17	17	17
Kohagen	20	20	20	20
Malma Södra	10	10	10	10
Garaget	40	49	23	21
P10	215	215	214	213
P14	46	46	45	45
Jenny	9	12	8	8
Björnsholm	11	15	6	6

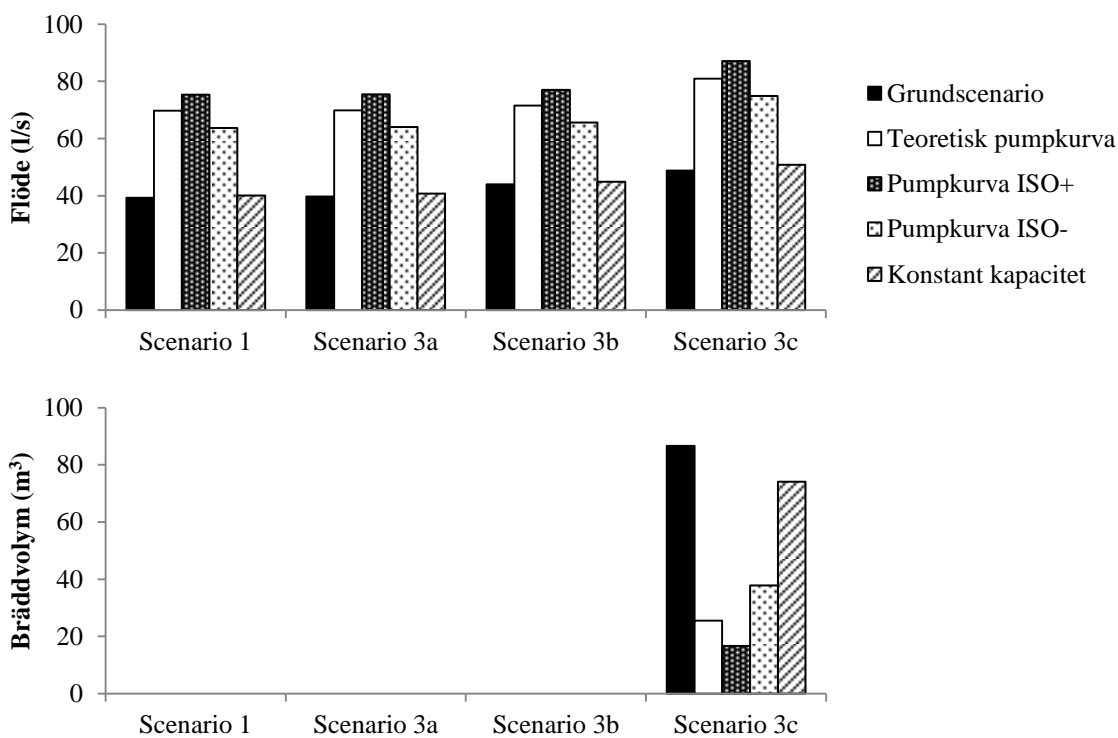
4.2.4 Känslighetsanalys

I figur 31 och 32 visas ett urval av resultaten för den känslighetsanalys som gjordes för modellparametern pumpkapacitet. Pumpkapaciteten beskrevs enligt grundscenariot (approximerad uppmätt pumpkurva), med teoretisk pumpkurva, med den teoretiska pumpkurvans övre gräns enligt ISO 9906:2012 (Pumpkurva ISO+), med den teoretiska pumpkurvans nedre gräns enligt ISO 9906:2012 (Pumpkurva ISO-) och med konstant kapacitet. Beräknat medelflöde och beräknad bräddvolym presenteras för två utvalda pumpstationsmodeller som sammanfattar hur resultatet såg ut överlag. Modellberäkningarna gjordes för samtliga scenarion av flödesbelastning men eftersom resultatet för scenario 1 och scenario 2 blev precis det samma redovisas inte resultat från scenario 2. Observera att resultaten (särskilt bräddvolymerna) som presenteras här inte är representativa för hur det ser ut i verkligheten eftersom vattenförbrukning och avrinningsområden i modellerna endast är antagna.

I figur 31 redovisas beräkningsresultatet från pumpstationsmodellen P10. I stapeldiagrammet kan ses att beräknat flöde för konstant kapacitet ganska väl överensstämde med beräknat flöde för grundscenariot men att den beräknade bräddvolymen blev större för konstant kapacitet jämfört med grundscenariot. Näst efter konstant kapacitet låg beräknat flöde för den teoretiska pumpkurvans nedre gräns enligt ISO 9906:2012 (Pumpkurva ISO-) närmast beräknat flöde enligt grundscenariot. När pumpkapaciteten beskrevs med olika pumpkurvor (det vill säga i samtliga fall förutom konstant kapacitet) medförde ett högre beräknat flöde en lägre beräknad bräddvolym. Resultat liknande detta kunde ses för fyra pumpstationsmodeller till, nämligen Djurgårdsbacken, Stenhagen, Musikparken, och Kohagen. Dessa resultat kan ses närmare i bilaga D. I figur 32 redovisas beräkningsresultatet från pumpstationsmodellen P14. Detta resultat skiljde sig från det som ses i figur 31 endast genom att den beräknade bräddvolymen för konstant kapacitet var lägre än för grundscenariot. Resultat liknande detta kunde ses för fem pumpstationsmodeller till, nämligen Södra Gottsunda, Malma Södra, Garaget, Jenny och Björnsholm. Dessa resultat kan ses närmare i bilaga D.



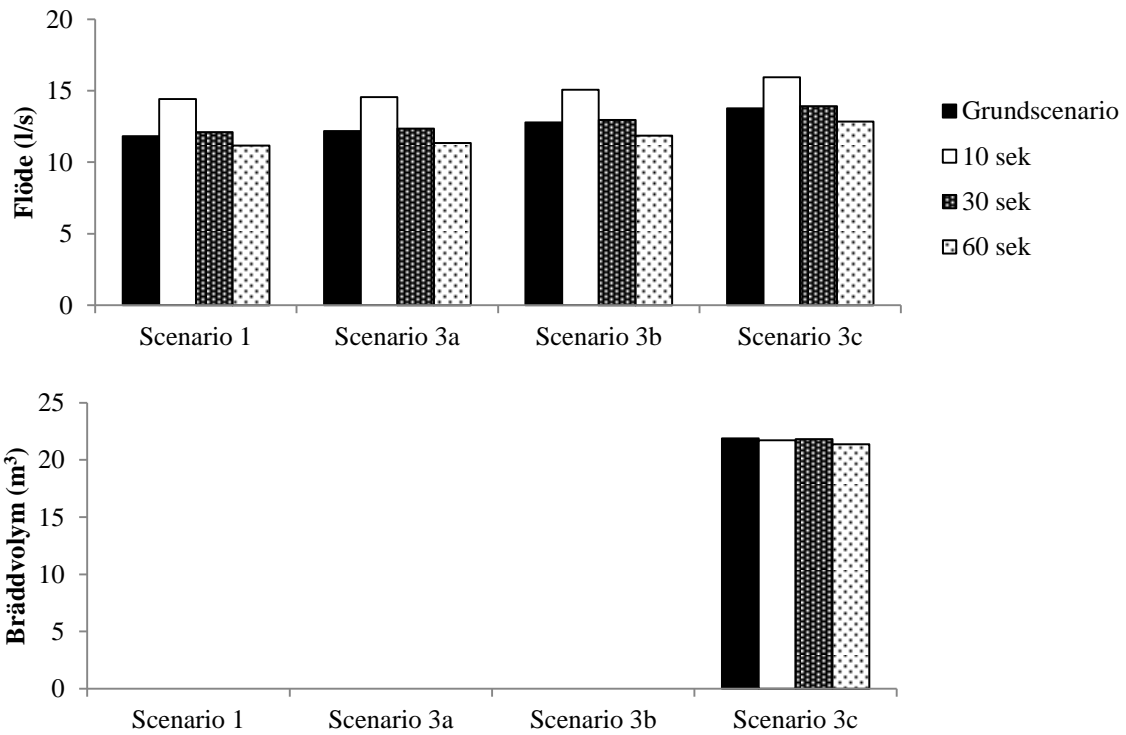
Figur 31. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen P10 vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



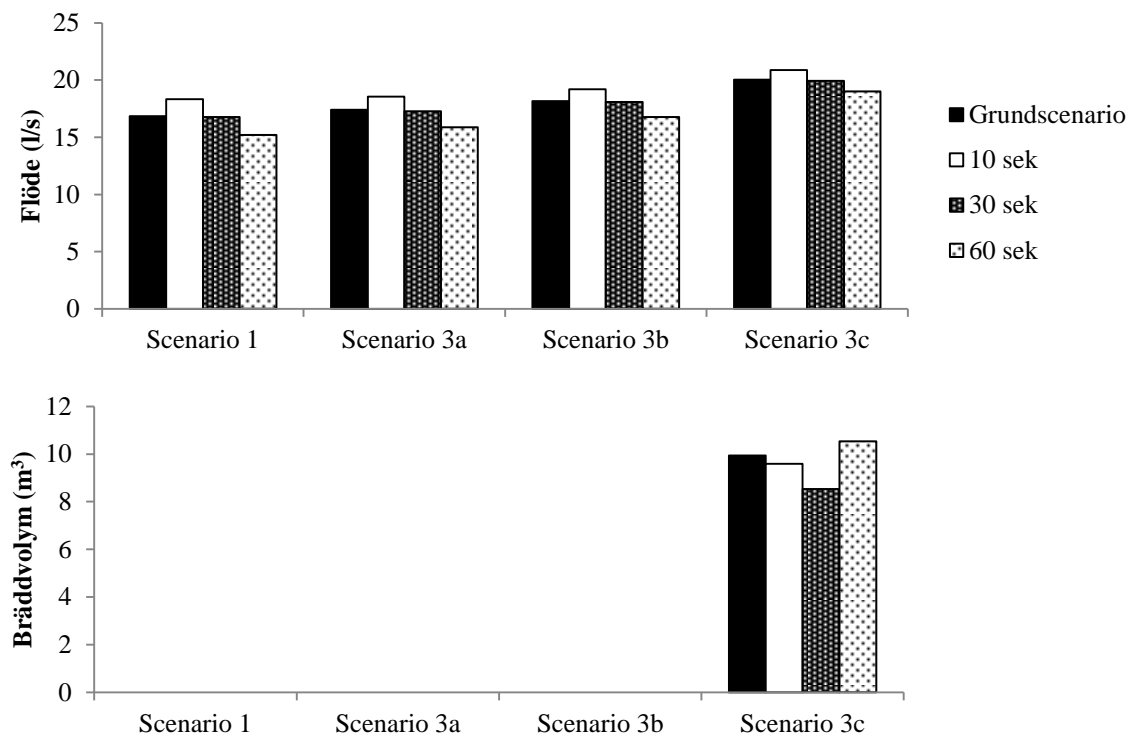
Figur 32. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen P14 vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.

I figur 33, 34 och 35 visas ett urval resultaten för den känslighetsanalys som gjordes för modellparametrarna accelerations- och retardationstid. Accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, med 10 s, med 30 s och med 60 s. Beräknat medelflöde och beräknad bräddvolym presenteras för tre pumpstationsmodeller som sammanfattar hur resultatet såg ut överlag. Modellberäkningarna gjordes för samtliga scenarion av flödesbelastning men eftersom resultatet för scenario 1 och scenario 2 blev precis det samma redovisas inte resultat från scenario 2. Observera att resultaten (särskilt bräddvolymerna) som presenteras här inte är representativa för hur det ser ut i verkligheten eftersom vattenförbrukning och avrinningsområden i modellerna endast är antagna.

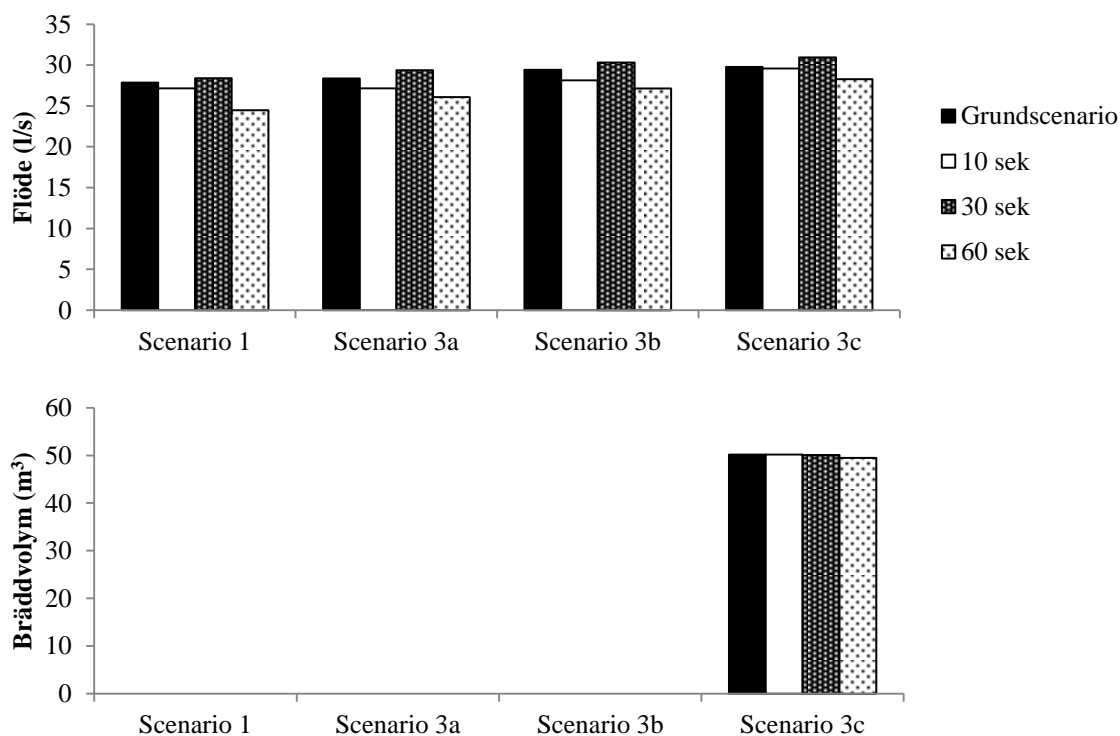
I figur 33 redovisas beräkningsresultatet från pumpstationsmodellen Musikparken. I stapeldiagrammet kan ses att med ökad accelerations- och retardationstid minskade det beräknade flödet. Den beräknade bräddvolymen påverkades inte av förändringar av accelerations- och retardationstid. Resultat liknande detta kunde ses för sex pumpstationsmodeller till, nämligen Djurgårdsbacken, Södra Gottsunda, Malma Södra, Garaget, P10 och P14. Dessa resultat kan ses närmare i bilaga D. I figur 34 redovisas beräkningsresultatet för pumpstationsmodellen Kohagen. Detta resultat skiljde sig från det som ses i figur 33 endast genom att den beräknade bräddvolymen här påverkades något av förändringar av accelerations- och retardationstid. Resultat liknande detta kunde ses för två pumpstationsmodeller till, nämligen Jenny och Björnsholm. Dessa resultat kan ses närmare i bilaga D. I figur 35 redovisas beräkningsresultatet för pumpstationsmodellen Stenhagen. Detta var den enda pumpstationsmodellen där det beräknade flödet inte entydigt minskade med ökad accelerations- och retardationstid. Den beräknade bräddvolymen påverkades i detta fall inte av förändringar av accelerations- och retardationstid.



Figur 33. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Musikparken vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



Figur 34. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Kohagen vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



Figur 35. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Stenhagen vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.

4.2.5 Vattenhastighet

Tabell 18 presenterar för samtliga pumpstationer vattenhastighet i tryckledning för normal drift av en pump samt maxhastighet vid regn med återkomsttid tio år. Vattenhastigheten vid normal drift av en punkt beräknades utifrån uppmätt driftpunkt medan maxhastigheten vid regn med tio års återkomsttid erhöles genom modellberäkning för scenario 3c. Vattenhastigheterna beräknades utifrån den tryckledningsdimension som erhöles efter kalibreringen. För tryckledningar med olika tryckledningsdimension anges den vattenhastighet som erhöles för den dominerande dimensionen. För pumpstationen Jenny anges i tabellen vattenhastigheter efter rensning av tryckledning.

Tabell 18. Beräknad vattenhastighet i tryckledning vid normal drift av en pump och maxhastighet vid regn med återkomsttid 10 år.

Pumpstation	Vattenhastighet vid normal drift av en pump (m/s)	Vattenhastighet vid regn med 10 års återkomsttid (m/s)
Djurgårdsbacken	0,57	1,31
Stenhagen	0,90	1,27
Södra Gottsunda	1,20	1,40
Musikparken	0,51	0,88
Kohagen	0,57	1,10
Malma Södra	1,21	1,43
Garaget	0,70	0,81
P10	0,92	1,83
P14	0,62	1,12
Jenny	0,78*	0,85
Björnsholm	0,80	0,84

*Före rensning av tryckledning var vattenhastigheten 0,56 m/s

5. DISKUSSION

5.1 KAPACITETSMÄTNING I AVLOPPSPUMPSTATIONER

Syftet med att utföra kapacitetsmätningar i pumpstationer var förutom att få fram mätvärden till indata i de modeller som konstruerades och för kalibrering av modellerna även att jämföra den uppmätta kapaciteten (flöde och tryck) med den teoretiska kapaciteten.

Genom att jämföra den uppmätta driftpunkten med den teoretiska pumpkurvan kunde ses vilken kondition pumpen var i. Om den uppmätta driftpunkten låg utanför den nedre gränsen för ISO 9906:2012 kunde antas att pumpens kondition var försämrad. Så var fallet för 12 av totalt 22 pumpar som flöde och tryck mättes för. I de flesta fall av dessa sågs dock bara en relativt liten försämring av pumpens kondition, det vill säga den uppmätta driftpunkten låg nära den nedre gränsen för ISO 9906:2012. I pumpstationerna Musikparken och P14 kunde däremot ses en stor försämring av båda pumparna som kapacitetsmätningar gjordes för. Vad man kan säga om dessa pumpstationer var att båda två var relativt gamla (Musikparken är antagligen från 1975 och P14 är från 1969). Dock säger pumpstationens ålder inte så mycket om själva pumparnas ålder eftersom de (eller delar av dem) kan vara utbytta sedan pumpstationen anlades. Uppgifter om pumparnas ålder saknades väldigt ofta vilket upplevdes som ett ganska stort problem i det här projektet. För två pumpstationer sammanföll nästan den uppmätta driftpunkten med den teoretiska. Detta var pumpstationerna Södra Gottsunda och Björnsholm. Troligt är att båda dessa pumpstationer anlades 1990 men uppgifter finns om att pumparna i Södra Gottsunda är nyare vilket kanske även gäller för Björnsholm med tanke på mätresultatet. På grund av den bristande informationen om pumpars ålder var det svårt att dra några slutsatser om några starkare samband mellan de pumpar som hade en försämrad respektive bra kondition. Vad som skulle kunna påverka vilken kondition pumpen är i är till exempel antalet tillslag per dag, gångtid, om det blir tryckslag vid på- och avstängning av pump och karaktären på det pumpade vattnet (om det till exempel är starkt förorenat skulle det kunna slita på pumpen) men som sagt är det svårt att dra några slutsatser när pumparnas ålder är okänd. I en pumpstation där det blir mycket slitage på pumparna är ju chansen även större att pumparna, eller delar av pumparna, byts oftare vilket skulle kunna medföra att de trots allt är i bra kondition vid kapacitetsmätning.

Genom att jämföra den uppmätta driftpunkten med den teoretiska systemkurvan kunde ses i vilken kondition tryckledningen var. Om den uppmätta driftpunkten låg till vänster om systemkurvan kunde antas att tryckledningens kondition var försämrad. Så var fallet för fyra pumpstationer av totalt elva, nämligen Stenhagen, Malma Södra, Garaget och Jenny (för Jenny gäller detta *innan* rensning av tryckledning). I pumpstationen Kohagen låg uppmätt driftpunkt för den ena pumpen på systemkurvan och den andra till vänster om systemkurvan. Eftersom båda pumparna var anslutna till en och samma tryckledning så var det konstigt att dessa resultat visade på två olika saker. Någoting blev antagligen fel vid mätningen i det fallet. För de fyra pumpstationer där resultatet visade på en tryckledning med försämrad kondition kunde ses att tryckledningarna var anlagda mellan 1983 och 1989 (Garagets tryckledning var anlagd 1973 men uppgifter fanns att den byggts om 2007). Detta kan tyckas vara förhållandevis nya tryckledningar men det kan nämnas att de plastledningar som var i bra kondition (Södra Gottsunda och Björnsholm) var ännu något yngre, båda var nämligen

anlagda 1990. Övriga fyra tryckledningar som resultatet visade var i bra kondition (Djurgårdsbacken, Musikparken, P10 och P14) hade annat material än plast, två av dem var av asbest och de andra två av gjutjärn. Det ska dock nämnas att tryckledningarna i Djurgårdsbacken, P10 och P14 hade de största dimensionerna vilket skulle kunna vara en anledning till att en försämrad kondition inte skulle ge lika stor effekt. Men det gick inte heller att se något entydigt samband mellan storlek på tryckledningens innerdimension och dess kondition eftersom resultaten för just den tryckledningen med störst dimension (P10) och den tryckledningen med minst dimension (Björnsholm) båda visade på god tryckledningsdimension. Att tryckledningar får försämrad kondition skulle kunna bero på till exempel att ledningen är sliten och nött vilket medför att dess skrovlighet blir större eller att det bildats sediment inuti ledningen vilket kan leda till att ledningen blir igensatt. Enligt Svenskt Vatten (2004) erhålls självrensning av tryckavloppsledning vid vattenhastigheter större än 0,6 m/s. Dock kunde i tabell 18 ses att för tre av fyra av de pumpstationer som hade försämrad tryckledningskondition var vattenhastigheten vid normal drift av en pump högre än 0,6 m/s. Samtidigt kunde ses att för flera av pumpstationerna med bra tryckledningskondition var vattenhastigheten vid normal drift av en pump lägre än 0,6 m/s. För pumpstationen Jenny var vattenhastigheten precis efter rensning av tryckledning relativt hög (0,78 m/s) men trots det är inte tryckledningen självrensande. Eftersom det i denna pumpstation är problem med att tryckledningen sätts igen av slam som kommer från ett vattenverk uppströms rensas tryckledningen två gånger om året. Jämförs de uppmätta driftpunkterna före och efter rensning av tryckledning kan tydligt ses att tryckledningens kondition, som innan rensning var dålig, förbättras när ledningen rensas och att driftpunkten flyttas tillbaka till höger och hamnar mitt på systemkurvan. Detta resultat pekar tydligt på att en försämrad tryckledningskondition kan vara orsakad av att ledningen är igensatt av partiklar som inte bör finnas där och att detta kan ske trots att vattenhastigheten är relativt hög.

För tre pumpstationer (P10, P14 och Björnsholm) låg uppmätt driftpunkt till höger om den teoretiska systemkurvan vilket tydde på en bättre tryckledningskondition är förväntat. För plastledningar skulle ett sådant resultat kunna förklaras av expansion av tryckledningen med upp till 5 % eller att plasten har en glattare yta än vad som räknats med. Björnsholm har tryckledning av plast med liten dimension. Att tryckledningar i plast med liten dimension gav ett resultat som visade på förbättrad tryckledningskondition kunde även ses i parallellt examensarbete (Fredriksson, 2014). Pumpstationerna P10 och P14 hade enligt mätningen av statiskt tryck ett lägre statiskt tryck än enligt underlag erhållet från kommunerna. Den teoretiska systemkurvan beräknades dock baserat på statisk höjd enligt kommundata eftersom ritningar över tryckledningen fanns för både P10 och P14 och informationen om statiskt tryck därmed ansågs vara säker. Dock justerades modellerna för skillnaden mellan uppmätt statiskt tryck och statiskt tryck enligt kommundata vilket ledde till att dessa modeller sedan inte krävde någon kalibrering. Antingen visade ritningarna inte den rätta verkliga statistiska höjden (alternativt att ritningarna avlästes fel) eller så var mätningen av statiskt tryck felaktigt i de här fallen. Om det skulle vara så att mätningen av statiskt tryck var korrekta så skulle det medföra att hela den teoretiska systemkurvan skulle sänkas, vilket i sin tur skulle medföra att de uppmätta driftpunkterna skulle ligga till vänster om systemkurvan. Om det skulle vara så att statiskt tryck enligt kommundata stämde så skulle det medföra att de uppmätta

driftpunkterna skulle ligga till höger om systemkurvan så som figur 19 och 20 visar och förklaringen till den förbättrade tryckledningskonditionen skulle till exempel kunna vara att tryckledningens material har en glattare yta än vad som räknats med.

I början av kapacitetsmätningarna kalibrerades flödesmätaren på ett felaktigt sätt vilket medförde att för pumpstationen P10 erhöles inga mätvärden av flöde för kompletta pumpcykler. Däremot noterades för en av pumparna i denna pumpstation det uppmätta flödet genom att detta kunde avläsas på en display på flödesmätaren. Inga accelerations- och retardationstider kunde heller erhållas för P10 eftersom hela uppmätta pumpcykler var en förutsättning för att accelerations- och retardationstider skulle kunna avläsas. Inte heller i pumpstationerna Stenhagen och Södra Gottsunda kunde uppmätta accelerations- och retardationstider erhållas. I de här fallen var orsaken dålig signalstyrka för flödesmätaren i början av varje pumpcykel vilket skulle kunna förklaras av att flödet var turbulent eller att det fanns luft i ledningarna. I pumpstationen Garaget användes en stationär flödesmätare vilken sparade mätvärden var tionde sekund. På grund av att så pass glesa mätvärden med denna flödesmätare erhöles (jämfört med övriga flödesmätare där mätvärden sparades varje sekund) var det svårt att läsa av accelerations- och retardationstid även för Garaget. Vad gäller mätning av accelerations- och retardationstid kan även nämnas att vid jämförelse med Fredriksson (2014) så kunde samband ses mellan längden på uppmätta tider och vilken flödesmätare som användes. Att ett sådant samband kunde ses gav anledning att tro att mätning av accelerations- och retardationstid egentligen inte gav så mycket information då denna mätning skulle kunna visa på olika resultat beroende av vilken mätutrustning som användes.

Slutligen bör nämnas de osäkerheter som fanns vid kapacitetsmätningarna. Vilket mätfel som gällde för respektive mätutrustning kan ses i tabellerna 3 och 4. Utöver själva kapacitetsmätningarna så mättes även nivåskillnaden in mellan vattennivån i sumpen och tryckgivarens placering. Mätfelet för denna manuella inmätning uppskattas till så mycket som upp till 0,5 m. Anledningen till en så pass stor mätosäkerhet var att förutsättningarna för inmätning inte var optimala (det kunde till exempel vara ganska mörkt nere i pumpsumpen) och att bra mätinstrument saknades så nivåskillnaden mättes in med ett vanligt måttband.

5.2 MODELLBYGGE

För att kunna bygga och beskriva pumpstationsmodeller i MIKE URBAN krävs en stor mängd indata och det var i detta projekt ett stort och tidskrävande arbete att samla in all denna data. Tillgängligheten av pumpstationsdata varierade också mycket. I vissa fall fanns detaljerade ritningar över både själva pumpstationen och tryckledningen tillgängliga och i andra fall fanns bara att tillgå specifika nödvändiga nivåer och en uppskattning om pumpsumpens geometri. Om fullständiga uppgifter helt saknades fick skattningar av parametervärden göras. Det var till exempel inte alltid givet för samtliga pumpar i en pumpstation vilken modell de var av och om denna uppgift saknades antogs att samtliga pumpar i en och samma pumpstation var av samma modell. Hur underlaget såg ut framgår av bilaga B. Variationen av kvaliteten på indata medförde varierande kvalitet på pumpstationsmodellerna och därmed modellberäkningarna. Just att det är ett stort och

tidskrävande arbete att beskriva pumpstationer i modeller var en av anledningarna till att detta examensarbete gjordes och under arbetets gång kunde konstateras att så verkligen är fallet.

Den spillvattenavrinning som användes som inflöde till modellerna byggde inte på verklig vattenförbrukningsdata utan var ett antagande baserat på uppmätt medelflöde. Även de avrinningsområden som kopplades till modellerna beskrevs baserat på antaganden både vad gäller storlek och egenskaper. Ännu en gång kan poängteras att på grund av dessa antaganden vad gäller inflöde till modellerna så är inte resultaten av modellberäkningarna representativa för hur det ser ut i verkligheten. Att en pumpstationsmodell i det här projektet till exempel ser ut att ha stor bräddning behöver inte betyda att bräddningen från den verkliga pumpstationen är stor.

5.3 STATISKT TRYCK

I pumpstationsmodeller beskrivs vanligtvis inte de högpunkter före släppunkt som kan finnas på tryckledningar eftersom man räknar med att en häverteffekt erhålls efter högpunkt vilken utjämnar högpunktens effekt på flöde och tryck. Där resultatet av mätning av statiskt tryck tydde på att en högpunkt före släppunkt fanns på tryckledningen valdes dock i detta projekt att införa denna på tryckledningen i modellen. För pumpstationen Björnsholm fanns enligt ritning en känd högpunkt på tryckledningen. För Björnsholm låg dessutom släppunkten på en lägre nivå än vattennivån i pumsumpen, det vill säga det var ett negativt statiskt tryck. För att ens kunna göra en modellberäkning i MIKE URBAN var det i detta fall nödvändigt att implementera högpunkten i modellen (det var inte tillåtet i MIKE URBAN att ha en släppunkt under pumsumpsnivån). När högpunkten var införd i modellen erhöles ett beräknat flöde som relativt väl överensstämde med uppmätt flöde. Högpunkt före släppunkt infördes i två pumpstationsmodeller till, nämligen Stenhagen och Malma Södra. I dessa fall blev dock inte effekten på beräkningsresultatet med avseende på flöde lika tydligt som för Björnsholm, se figur 24. Det kan bero på att högpunkterna som infördes i pumpstationsmodellerna Stenhagen och Malma Södra inte låg på lika hög nivå över släppunkten som högpunkten i pumpstationsmodellen Björnsholm gjorde. Effekten av en ändring av det statistiska trycket beror dessutom på utseendet på pumpkurvan, för vissa pumpar krävs bara en liten ändring av trycket för att få en stor ändring av flöde och ibland krävs en stor ändring av trycket för att flödet ska påverkas nämnvärt. Fredriksson (2014) fann också att införande av högpunkt före släppunkt på tryckledningen i en pumpstationsmodell gav stor påverkan på beräkningsresultatet med avseende på flöde. Även i detta fall var nivåskillnaden mellan högpunkt och släppunkt stor.

Att beskriva en nedåtsluttande ledning som en tryckledning var i MIKE URBAN inte möjligt och därför beskrevs den nedåtsluttande delen av ledningen (efter högpunkten) i modellerna som en självfallsledning. För att bättre likna denna självfallsledning vid en trycksatt ledning gjordes försök att minska dennes spaltbredd till samma storlek som för en tryckledning. Anledningen till detta var att undersöka om beräkningsresultatet varierade beroende på hur denna ledning beskrevs. Eftersom beräkningsresultatet för de två olika spaltbredderna blev exakt det samma kunde dock slutsatsen dras att spaltbreddens storlek i det här fallet inte hade någon betydelse.

Eftersom det är okänt var på tryckledningen en högpunkt som uppmärksammas vid mätning är placerad så undersöktes hur beräkningsresultatet med avseende på flöde påverkades vid olika placering av högpunkt. Resultatet visade att det hade en viss betydelse var på tryckledningen högpunkten placerades vilket kan ses i figur 25. Ett sätt att välja placering av högpunkten hade kunnat vara att undersöka vilken placering som gav det beräkningsresultat som bäst överensstämde med den uppmätta kapaciteten. I det här projektet valdes dock att placera högpunkten på en fast punkt, nämligen efter två tredjedelar av tryckledningen. Denna placering kanske inte var den optimala i syftet att erhålla beräknat flöde så likt uppmätt flöde som möjligt men ansågs ändå rimligt enligt resonemanget i avsnitt 3.3.2. Att beräknat flöde efter införande av högpunkt fortfarande skiljde sig från uppmätt flöde (vilket var fallet för Stenhagen) kunde förklaras med att modellens tryckledning beskrevs på fel sätt och att modellen därmed behövde kalibreras.

5.4 KALIBRERING

För att de konstruerade pumpstationsmodellerna skulle beskriva verkligheten så bra som möjligt kalibrerades de mot uppmätt kapacitet. Fem av totalt elva modeller krävde kalibrering i form av att den beräknade kapaciteten förbättrades genom att tryckledningens diameter ökades och i vissa fall att även Mannings tal ökades. De modeller som detta gjordes för var Stenhagen, Södra Gottsunda, Garaget, Jenny och Björnsholm. Observera att Jenny kalibrerades mot uppmätt kapacitet efter rensning av tryckledning. Anledningen till att kapaciteten behövde förbättras för dessa modeller skulle kunna förklaras av att tryckledningar i plast kan expandera upp till 5 % samt att ledningens yta kan vara glattare än vad som i modellen är standard för plastledningar. En av totalt elva modeller krävde kalibrering i form av att extra tryckförluster lades in i modellen genom att Mannings tal minskades. Den modell detta gjordes för var Kohagen. Anledningen till att extra tryckförluster krävdes i denna modell skulle kunna vara att extra tryckförluster i verkligheten finns i form av punktförluster på grund av krökar och ventiler med mera, för att ledningen är gammal och sliten eller för att det finns sedimenterat material i ledningen. En hög vattenhastighet i tryckledningen skulle kunna vara en indikation på att extra tryckförluster skulle behöva läggas in i modellen eftersom effekterna av punktförlusterna ökar med ökad vattenhastighet. Samtidigt skulle en hög vattenhastighet förväntas ge en bättre självrensning av ledningen vilket skulle tala emot att extra tryckförluster skulle behöva läggas in i modellen. Totalt sett kunde inget samband ses mellan vattenhastighet i tryckledning och behov av kalibrering. Väntat hade varit att de pumpstationer som vid jämförelse mellan uppmätt kapacitet och teoretisk kapacitet visade på en försämrad tryckledningskondition skulle visa samma sak vid jämförelse mellan uppmätt kapacitet och beräknad kapacitet (innan kalibrering). Så blev dock inte fallet i det här projektet. Detta visar på att det är svårt att beskriva en pumpstation i en modell så att den får samma egenskaper och beter sig på samma sätt som den verkliga pumpstationen och att kapacitetsmätningar ger information som är svår att erhålla på annat sätt.

Eftersom de höga beräknade flödestoppar som kunde ses i början av varje pumpcykel för vissa pumpstationsmodeller inte var representativa för hur de uppmätta pumpcyklerna såg ut var det önskvärt att få bort eller åtminstone minska dessa beräknade flödestoppar. Att låta flödestopparna vara kvar skulle medföra att beräknat medelflöde blev för högt. Försök gjordes

att minska de fiktiva brunnarnas spaltbredd. Beräknat flöde utvärderades dessutom i både pump och tryckledning. För de pumpstationsmodeller där problem med flödestoppar inte fanns medförde en minskning av spaltbredden ingen förändring av beräknat maxflöde. För de pumpstationsmodeller där det var problem med flödestoppar (det vill säga Garaget, Jenny och Björnsholm) medförde en minskning av spaltbredden att det beräknade maxflödet minskade något (förutom i tryckledning för Garaget där maxflödet ökade, se figur 28) men det fanns fortfarande flödestoppar. Jämfördes flöde utvärderat i pump och i tryckledning kunde ses att för båda inställningarna av spaltbredden var de beräknade maxflödena mindre då flödet utvärderades i tryckledningen även om flödestoppen till viss del fanns kvar. Eftersom flera beräkningar blev instabila då spaltbredden minskades valdes att behålla spaltbreddens grundinställning. Valet att utvärdera beräknat flöde i tryckledning istället för pump gjordes också. Grundat på jämförelsen i tabell 15 ansågs det inte ge ett felaktigt resultat att utvärdera beräknat flöde i tryckledning istället för pump. Det kan nämnas att för vissa pumpstationsmodeller sågs en liten negativ flödesdipp i slutet av varje pumpcykel då beräknat flöde utvärderades i tryckledning. Dock var dessa negativa flödesdippar väldigt små och antogs kunna försummas. Ett undantag fanns där beräknat flöde inte kunde utvärderas i tryckledningen. I modellen Stenhagen var det nämligen inte möjligt att utvärdera beräknat flöde i tryckledningen eftersom det var för tätt mellan pumpcyklerna. I tryckledningen blev det en liten fördröjning av flödet jämfört med pump och då pumpcyklerna i Stenhagen var så pass täta medförde det att flödet i tryckledningen inte hann gå ner till noll förrän nästa pumpcykel började. För Stenhagen valdes därmed att fortsätta utvärdera beräknat flöde i pumpen då det var den enda möjligheten.

5.5 INSTABILITET

Instabilitet antogs uppkomma i vissa pumpstationsmodeller på grund av att stora förändringar av tryck och flöde skedde mycket snabbt. För att lösa problem med instabilitet i modeller i MIKE URBAN kan olika åtgärder vidtas, till exempel kan tidssteget för beräkning minskas, pumpens accelerations- och retardationstider justeras eller de fiktiva brunnarnas storlek ökas. I det här projektet var ambitionen att beskriva pumpstationsmodellerna så likt verkligheten som möjligt och därför var det inget bra alternativ att ändra på accelerations- och retardationstid eftersom det var önskat att beskriva modellerna med uppmätta värden. Att minska tidssteget för modellberäkningarna skulle kunna vara ett bra sätt att lösa problem med instabilitet eftersom flöde och tryck i modellen då skulle beräknas oftare och snabba förändringar av tryck och flöde hinna registreras bättre. Dock var det i det här projektet inget optimalt alternativ på grund av att tiden att utföra en modellberäkning ökade proportionellt med minskning av tidssteget och det fanns helt enkelt inte tillräckligt med tid då modellberäkningarna redan innan var relativt tidskrävande. Att variera den fiktiva brunnens (nod 3) diameter undersöktes och resultaten visade att alla pumpstationsmodeller utom P10 blev stabila då diametern ökades från 0,5 m till 1 m. Eftersom de fiktiva brunnarna inte finns i systemet i verkligheten skulle den extra volym som de bidrar med kunna ge ett missvisande beräkningsresultat och genom att öka volymen skulle denna eventuella effekt kunna förstöras. Det undersöktes hur beräknat medelflöde förändrades vid ändring av den fiktiva brunnens storlek. Resultatet med avseende på flöde ändrades inte mycket förutom för pumpstationsmodellen Garaget där beräknat medelflöde minskade vid ökning av den fiktiva

brunnens diameter. Detta kunde förklaras med att den flödestopp som fanns i början av varje pumpcykel för Garaget minskade då den fiktiva brunnens diameter ökades, vilket var en positiv effekt. Resultatet med avseende på bräddning ändrades mest för pumpstationsmodellen Kohagen där bräddningen ökade med 9,7 % då den fiktiva brunnens diameter ökades. Vad som orsakade detta var oklart men eftersom en ökning av den fiktiva brunnens diameter fransett detta gav positiva effekter så valdes ändå att beskriva den fiktiva brunnen med diametern 1 m istället för 0,5 m. Det uppmärksammades att då beräknat flöde utvärderades i pump ökade i vissa fall maxflödet och därmed flödestopparna då den fiktiva brunnens diameter ökades. Eftersom beräknat flöde i det här projektet utvärderades i tryckledning istället för pump (förutom för modellen Stenhagen) var dock detta inte ett problem.

I pumpstationsmodellen P10 löstes inte problemet med instabilitet av en ökning av den fiktiva brunnens diameter till 1 m. Försök gjordes att öka den fiktiva brunnens storlek ytterligare men inte förrän den hade storleken 3 m i diameter med 3 m höjd blev beräkningsresultatet stabilt. En så stor fiktiv brunn ansågs dock inte rimlig med tanke på att en alldeles för stor extra volym skulle tillkomma i systemet. Försök gjordes även att öka accelerations- och retardationstiderna men detta gav ingen effekt på resultatet med avseende på instabilitet. När tidssteget för beräkningarna minskades till 0,2 s (övriga modeller beräknades med tidssteget 1 s) så erhöles stabila beräkningsresultat för pumpstationsmodellen P10. Modellberäkningen med tidssteget 0,2 s tog cirka 20 min vilket var lång tid med tanke på att många beräkningar skulle göras. Därför valdes att endast använda detta tidssteg för beräkning av pumpstationsmodellerna i Västervik för scenario 3 eftersom det endast var i detta fall det korta tidssteget krävdes för att uppnå stabilitet.

5.6 KÄNSLIGHETSANALYS

Modellparametern pumpkapacitet troddes vara en känslig parameter, det vill säga att en variation av denna skulle medföra stor påverkan på beräkningsresultatet. Det kunde också konstateras att så var fallet i detta projekt. För samtliga pumpstationsmodeller stämde beräknat flödet för konstant kapacitet väl överrens med beräknat flöde enligt grundscenariot. Detta var ett väntat resultat eftersom båda dessa beskrivningar av parametern pumpkapacitet baserades på uppmätt medelvärde vid full kapacitet. Däremot skiljde sig beräknad bräddvolym för konstant kapacitet från beräknad bräddvolym enligt grundscenariot. För fem av tolv pumpstationsmodeller var den beräknade bräddvolymen för konstant kapacitet högre än enligt grundscenariot och för sex pumpstationsmodeller var den lägre. Då pumpkapaciteten beskrevs med en pumpkurva påverkades beräknat flöde av vattennivån i pumsumpen. Vid till exempel regnväder ökade nivån i pumsumpen kraftigt vilket medförde att det statiska trycket (höjdskillnaden mellan vattennivån i pumsumpen och släppunkten) minskade och därmed också att det totala trycket som pumpen arbetade mot minskade. Ett minskat tryck medförde då ett ökat flöde enligt pumpkurvan. På så sätt kunde ett högt flöde erhållas då inflödet till pumpstationsmodellen var stort och vattennivån i pumsumpen snabbt steg till en hög nivå. Det vill säga, ju högre vattennivå i pumsumpen desto högre flöde. Då pumpkapaciteten beskrevs med konstant kapacitet påverkades däremot inte beräknat flöde av vattennivån i pumsumpen. Oavsett vad vattennivån i pumsumpen steg till pumpades vattnet

bort med det konstanta flöde som angivits. Om detta konstanta flöde överskattats underskattades därmed beräknad bräddvolym. I MIKE URBAN angavs det konstanta flödet dels för en pump i drift, dels för flera pumpar i drift samtidigt. Det konstanta flöde som angavs för en pump i drift var det uppmätta medelvärde vid full kapacitet. För drift av flera pumpar samtidigt saknades i nästan samtliga fall uppmätta värden och därför fick detta flöde skattas utifrån tidigare beräkningar. Att det konstanta flödet för samkörning av flera pumpar endast var en skattning var antagligen anledningen till att detta flöde i flera fall överskattades och att därmed bräddningen underskattades då pumpkapaciteten beskrevs med konstant kapacitet. Näst efter konstant kapacitet kunde ses att beräknat flöde för den teoretiska pumpkurvans nedre gräns enligt ISO 9906:2012 bäst överensstämde med beräknat flöde enligt grundscenariot, vilket verkade rimligt eftersom pumpar kan antas få en minskad kapacitet med tiden. I vissa fall blev detta flöde något högre än för grundscenariot och i andra fall blev det något lägre. Då pumpkapaciteten beskrevs med den teoretiska pumpkurvan och den teoretiska pumpkurvans övre gräns enligt ISO 9906:2012 blev det beräknade flödet i samtliga fall större än flödet enligt grundscenariot. Då parametern pumpkapacitet beskrevs med en pumpkurva av något slag (det vill säga i alla fall förutom konstant kapacitet) medförde ett ökat beräknat flöde en minskad beräknad bräddning och vice versa.

Modellparametrarna accelerations- och retardationstid troddes inte vara lika känslig som pumpkapacitet. Skulle resultatet visa på att detta stämde skulle det vara värdefullt eftersom uppgifter om accelerations- och retardationstid ofta saknas och kan vara svåra att ta fram. Det skulle även vara värdefullt eftersom accelerations- och retardationstid är parametrar som kan justeras för att uppnå stabilitet i modeller. För samtliga pumpstationsmodeller med undantag av Stenhagen medförde en ökad accelerations- och retardationstid ett minskat beräknat flöde. Detta verkade rimligt med tanke på att med en ökad accelerations- och retardationstid erhöles full kapacitet under mindre del av pumpcykeln, det vill säga vattnet pumpades bort långsammare och under en längre tid. För pumpstationsmodellen Stenhagen blev beräknat flöde lägre för accelerations- och retardationstid 10 s jämfört med 30 s och 60 s och även något lägre än för grundscenariot. Detta berodde antagligen på att det med accelerations- och retardationstid 10 s endast var en pump i drift vid normalt inflöde, för alla andra fall startade även pump 2. Med accelerations- och retardationstid 10 s pumpades antagligen vattnet i pumpstationsmodellen Stenhagen bort tillräckligt snabbt för att nivån inte skulle stiga till startnivå för pump 2. För alla pumpstationsmodeller utom tre sågs att resultatet med avseende på bräddvolym inte påverkades av ändring av accelerations- och retardationstid. För pumpstationsmodellerna Kohagen, Jenny och Björnsholm kunde viss påverkan på beräknad bräddning ses då accelerations- och retardationstid ändrades. Dock var påverkan inte likadan för de tre modellerna, för Kohagen och Jenny gav accelerations- och retardationstiden 30 s den minsta bräddningen medan det för Björnsholm var 60 s som gav den minsta bräddningen. Skillnaderna i beräknad bräddvolym var inte heller särskilt stora. En förklaring till att dessa skillnader uppkom skulle kunna vara att det för pumpstationsmodeller med glesa men långa pumpcykler var betydande var i en pumpcykel ett regnväder inföll. Särskilt Jenny och Björnsholm hade mycket glesa pumpcykler. Vid en titt i MIKE View kunde ses att i de fall där den beräknade bräddningen blev liten slog det stora inflödet orsakat av regn till när en pump redan hade varit igång ett bra tag vilket borde innebära att pumpsumpen var relativt

tömd och volym för magasinering fanns tillgänglig. I de fall där bräddningen blev stor däremot slog det stora inflödet orsakat av regn till då pumparna varit avstängda ett bra tag vilket borde innebära att pumpsumpen var relativt fylld och volym för magasinering inte fanns tillgänglig.

Slutligen ska påpekas att för att kunna utreda vilka modellparametrar i pumpstationsmodeller som har störst respektive minst betydelse för modellberäkningarna skulle känslighetsanalys behöva utföras för många fler modellparametrar än de som undersöktes i det här projektet tillsammans med de modellparametrar som undersöktes av Fredriksson (2014). Det hade också varit intressant att sätta in pumpstationsmodellerna i ett större system och undersöka hur förändringar av modellparametrar skulle påverka beräkningsresultatet nedströms pumpstationen.

6. SLUTSATSER

Kapacitetsmätningar

- Resultaten från kapacitetsmätningar i avloppspumpstationer visade att uppmätt pumpkapacitet ofta skiljer sig från teoretisk pumpkapacitet och att detta kan bero på i vilken kondition både pump och tryckledning är. Oftast var uppmätt pumpkapacitet sämre än teoretisk pumpkapacitet.
- Att utföra kapacitetsmätningar i avloppspumpstationer ansågs vara värdefullt ur modelleringsperspektiv eftersom den information som erhöles vid mätning var viktig då syftet var att beskriva modellerna så likt verkliga förhållanden som möjligt.

Modellering

- Resultaten från modellberäkningarna visade att uppmätt pumpkapacitet ofta skiljer sig från beräknad pumpkapacitet trots att modellerna beskrivits noggrant. Resultaten visade också att uppmätt pumpkapacitet både kan vara bättre och sämre än beräknad pumpkapacitet. Detta visade behovet av kalibrering.
- Eventuell högpunkt före släppunkt på tryckledning bör enligt den här studien införas i modeller då det ansågs ge en mer korrekt beskrivning av verkliga förhållanden.
- Ett relativt effektivt sätt att undvika instabilitet vid modellberäkningar visade sig i det här projektet vara att öka storleken på fiktiva brunnar. Ett annat effektivt (dock inte tidseffektivt) sätt att undvika instabilitet var att minska tidssteget för beräkningarna.
- Den här studien visade att genom att utvärdera beräknat flöde i tryckledning istället för pump kan problem med icke representativa flödestoppar i början av varje pumpcykel undvikas.

Känslighetsanalys

- Resultaten från känslighetsanalysen visade att variationer av modellparametern pumpkapacitet påverkar beräkningsresultatet med avseende på både flöde och bräddning. Resultaten visade också att variationer av modellparametern accelerations- och retardationstid påverkar beräkningsresultatet med avseende på flöde men att påverkan på beräknad bräddning är marginell.
- Enligt denna studie beskrivs pumpkapaciteten i pumpstationsmodeller bäst med approximerad uppmätt pumpkurva. Saknas teoretisk pumpkurva beskrivs enligt studien pumpkapaciteten bäst med konstant kapacitet baserat på uppmätt driftpunkt. Är däremot kapacitetsmätning inte möjlig att genomföra beskrivs pumpkapaciteten bäst med den teoretiska pumpkurvans nedre gräns enligt ISO 9906:2012.
- Enligt denna studie beskrivs accelerations- och retardationstid i pumpstationsmodeller bäst med uppmätta tider. Saknas uppmätta tider visade den här studien att det med avseende på bräddning inte spelar så stor roll hur accelerations- och retardationstid beskrivs men att de bör sättas längre än standardinställningen 10 s om överskattning av flöde vill undvikas.

7. REFERENSER

Ahlman, S., 2011. *Plan B - Hantering av översvämningar i tätorter vid extrema regn*. Svenskt Vatten, rapport nr 2011-03.

Crowe, C.T., Elger, D.F., Williams, B.C. & Robertson, J.A., 2010. *Engineering fluid mechanics*. Nionde upplagan. John Wiley & sons, Inc.

DHI, utan datum. *Mouse pipe flow – Reference manual*. DHI.

DHI, utan datum, nr. 2. *'Dhiapp.ini' and '*.adp' files – Reference manual*. DHI.

Fredriksson, L., 2014. *Modellering av avloppspumpstationer - En modelloptimering och känslighetsanalys av pumpstationer i Umeå, Sundbyberg och Värmdö*. Uppsala universitet examensarbete.

Granlund, B., & Nilsson, D., 2000. *Mätningar i avloppsnät samt principer för verifiering av avloppsmodeller*. VAV, VA-forsk rapport 2000-7.

Grundfos, utan datum. *The sewage pumping handbook*. Grundfos.

Hamby, D.M., 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental monitoring and assessment*, vol.32, nr.2, s.135-154.

Ingalls, B., 2008. Sensitivity analysis: from model parameters to system behavior. *Essays in biochemistry*, vol.45, nr.1, s.177-194.

Larsson, J., 2010. *Metodik för beräkning av anslutna hårdgjorda ytor till spillvattennätet*. Examensarbete W12015. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Malmgren, L., utan datum. *Pumpteknik, grundkurs*. Andra upplagan. Flygt AB.

Mike by DHI, 2012a. *Mike Urban model manager*. DHI.

Mike by DHI, 2012b. *Mike Urban collection system*. DHI.

Panametrics, utan datum. *Model 6068 Ultrasonic flowmeter – User´s manual*. Panametrics.

Pumpportalen, utan datum. *Pumphandboken*. Pumpportalen.

Siemens, 2006. *Sitrans fm magflo – Handbok*. Siemens.

Svenskt Vatten, 2004. *Dimensionering av allmänna avloppsledningar*. Svenskt Vatten, publikation P90.

Uppsala kommun, senast uppdaterad 2013. *Kommunfakta*. (Elektronisk) Tillgänglig: <http://www.uppsala.se/sv/Kommunpolitik/Kommunfakta/> (Hämtad 2013-12-19).

VAV, 1984. *Avloppspumpstationer – Dimensionering, utformning och drift*. VAV (Svenska vatten- och avloppsverksföreningen), publikation P47.

Västerviks kommun, senast uppdaterad 2013. *Kommunfakta*. (Elektronisk) Tillgänglig: <http://www.vastervik.se/Kommun-och-politik/Kommunfakta/> (Hämtad 2013-12-19).

Wika, 2009. *Tronic line – Reference manual*. Wika.

PERSONLIG KOMMUNIKATION

Flachmeyer, Carl Johan, 2013. Specialist, pumpsystem för vatten och avlopp, Grundfos. *Muntlig kontakt, 2013-09-09*.

Hammarlund, Hans, 2013. Specialist, hydraulisk modellering, Tyréns. *Muntlig kontakt, flera tillfällen 2013*.

Johansson, Thomas, 2014. Civ. ing. Schaktfri VA-teknik, Tyréns. *E-postkontakt 2014*.

BILAGA A - DYGNSVARIATION VATTENFÖRBRUKNING

Tabell A1. Vattenförbrukningens dygnsförbrukningsfaktor (Svenskt Vatten, 2004).

Timma på dygnet	Dygnsförbrukningsfaktor
1	0,65
2	0,43
3	0,32
4	0,29
5	0,29
6	0,32
7	0,58
8	1,77
9	1,83
10	1,60
11	1,10
12	0,93
13	0,87
14	0,84
15	0,81
16	0,82
17	0,91
18	1,10
19	1,31
20	1,50
21	1,56
22	1,58
23	1,48
24	1,12

BILAGA B - PUMPSTATIONSDATA

Tabell B1. Pumpstationsdata.

Pumpstation	Anlagd	Antal pumpar	Utseende pumpsump	Finns ritning pumpsump?
Djurgårdsbacken	1970	3	Rektangulär	Ja
Stenhagen	-	2	Cylindrisk	Ja
Södra Gottsunda	-	2	Cylindrisk	Nej
Musikparken	-	2	Cylindrisk	Nej
Kohagen	1969	2	Cylindrisk	Ja
Malma Södra	1989	2	Cylindrisk	Nej
Garaget	70-tal	2	Cylindrisk	Ja
P10	1964	3	Avancerad	Ja
P14	1969	3	Avancerad	Ja
Jenny	1983	2	Cylindrisk	Ja
Björnsholm	1990	2	Cylindrisk	Nej

Tabell B2. Pumpdata.

Pumpstation	Pump	Fabrikat	Modell	Pumphjul
Djurgårdsbacken	P1	Flygt	3170	430
	P2	Flygt	3170	-
	P3	Flygt	3170	-
Stenhagen	P1	Flygt	3127	430
	P2	Flygt	3127	-
Södra Gottsunda	P1	Flygt	3152	431
	P2	Flygt	3152	431
Musikparken	P1	Flygt	3127	483
	P2	Flygt	3126	430
Kohagen	P1	Flygt	3127	481
	P2	Flygt	3127	487
Malma Södra	P1	Flygt	3085	432
	P2	Flygt	3085	432
Garaget	P1	Flygt	3153	451
	P2	Flygt	3153	451
P10	P1	Flygt	3171	611
	P2	Flygt	3171	611
	P3	Flygt	3171	611
P14	P1	Flygt	3152	441
	P2	Flygt	3152	441
	P3	Flygt	3152	441
Jenny	P1	Flygt	3127	257
	P2	Flygt	3127	257
Björnsholm	P1	Flygt	3152	267
	P2	Flygt	3152	267

Tabell B3. Tryckledningsdata.

Pumpstation	Ålder	Innerdiameter (mm)	Längd (m)	Material	Finns ritning tryckledning?
Djurgårdsbacken	1970	400 (404 m) 500 (236 m)	640	Asbest/gjutjärn	Nej
Stenhagen	1988	203	517	Plast	Nej
Södra Gottsunda	1990	144	619	Plast	Nej
Musikparken	1975	200	226	Segjärn	Nej
Kohagen	-	203	358	Plast	Nej
Malma Södra	1989	110*	168	Plast	Nej
Garaget	2007	176	3900	Plast	Nej
P10	1964	500	682	Asbest	Ja
P14	1969	300	793	Gjutjärn	Ja
Jenny	1983	96,8 (64 m) 101,6 (2164 m)	2228	Plast	Ja
Björnsholm	1990	96,8 (2569 m) 141 (177 m) 96,8 (3383 m)	6129	Plast	Ja

*Ledningsdiametern för Malma Södra är ytterdiametern

BILAGA C - MÄTVÄRDEN

Tabell C1. Uppmätt driftpunk. Flöde anger medelvärde av uppmätt flöde vid full kapacitet.

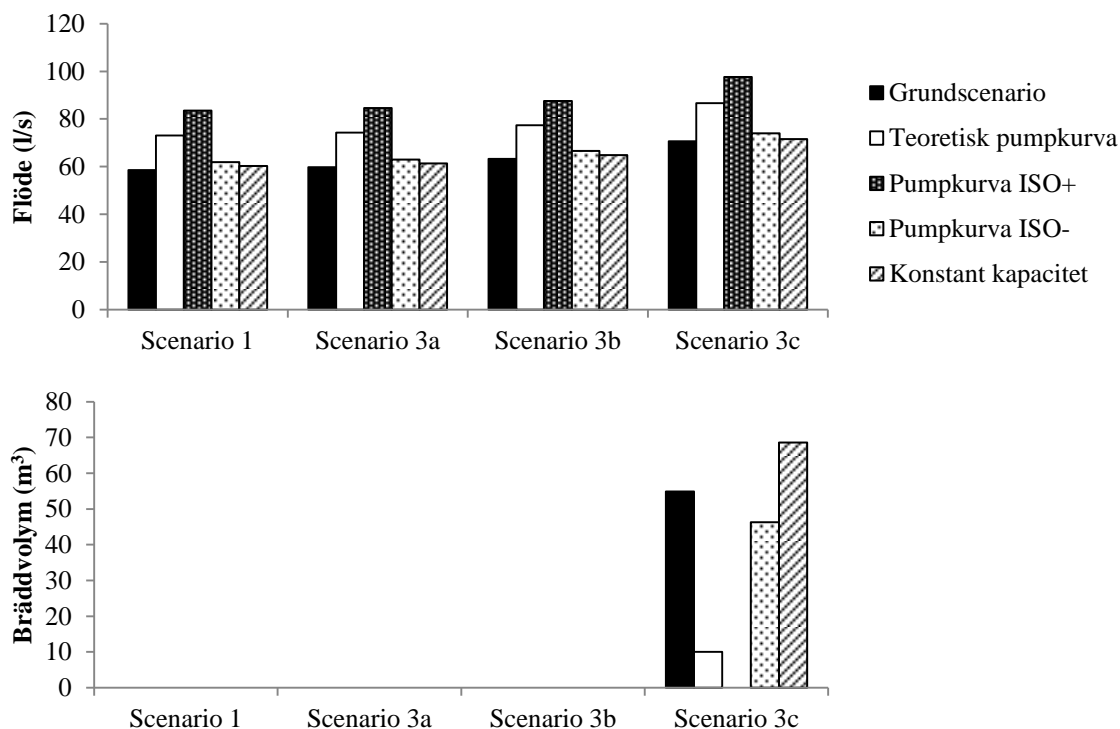
Pumpstation	Pump	Flöde (l/s)	Tryck (mvp)
Djurgårdsbacken	P1	71,9	15,3
	P2	72,9	15,8
	P3	74,2	15,4
Stenhagen	P1	32,0	10,0
	P2	27,4	9,1
Södra Gottsunda	P1	21,6	19,1
	P2	22,3	19,4
Musikparken	P1	16,0	8,1
	P2	12,1	7,8
Kohagen	P1	18,4	14,4
	P2	17,7	13,8
Malma Södra	P1	9,8	7,9
	P2	10,1	8,1
Garaget	P1	18,6	22,5
	P2	18,2	22,1
P10	P1	-	3,8
	P2	180,0	3,9
	P3	-	3,6
P14	P1	43,7	8,1
	P2	52,1	9,1
	P3	-	9,3
Jenny (före rensning tryckledning)	P1	5,0	29,0
	P2	5,2	31,6
Jenny (efter rensning tryckledning)	P1	7,0	25,8
	P2	7,3	28,4
Björnsholm	P1	6,5	42,0
	P2	6,5	42,9

Tabell C2. Uppmätt statistiskt tryck.

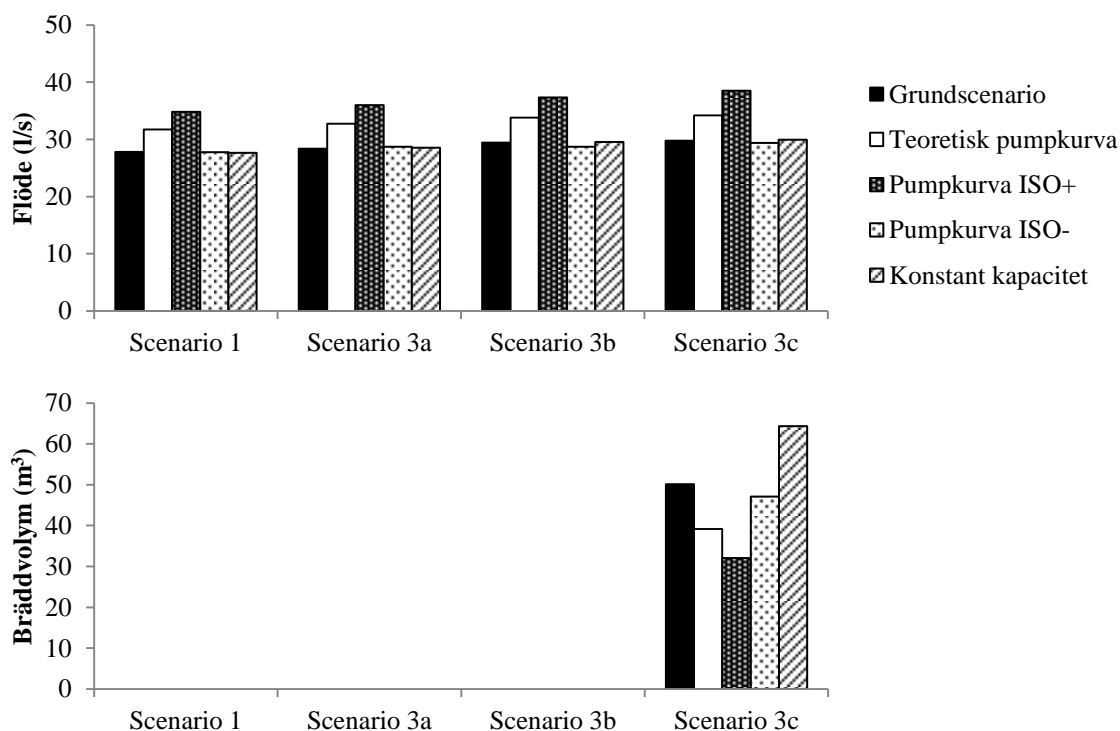
Pumpstation	Statiskt tryck (mvp)
Djurgårdsbacken	14,6
Stenhagen	8,2
Södra Gottsunda	9,6
Musikparken	7,3
Kohagen	13,0
Malma Södra	4,0
Garaget	2,3
P10	2,1
P14	6,6
Jenny	4,7
Björnsholm	15,9

BILAGA D - RESULTAT KÄNSLIGHETSANALYS

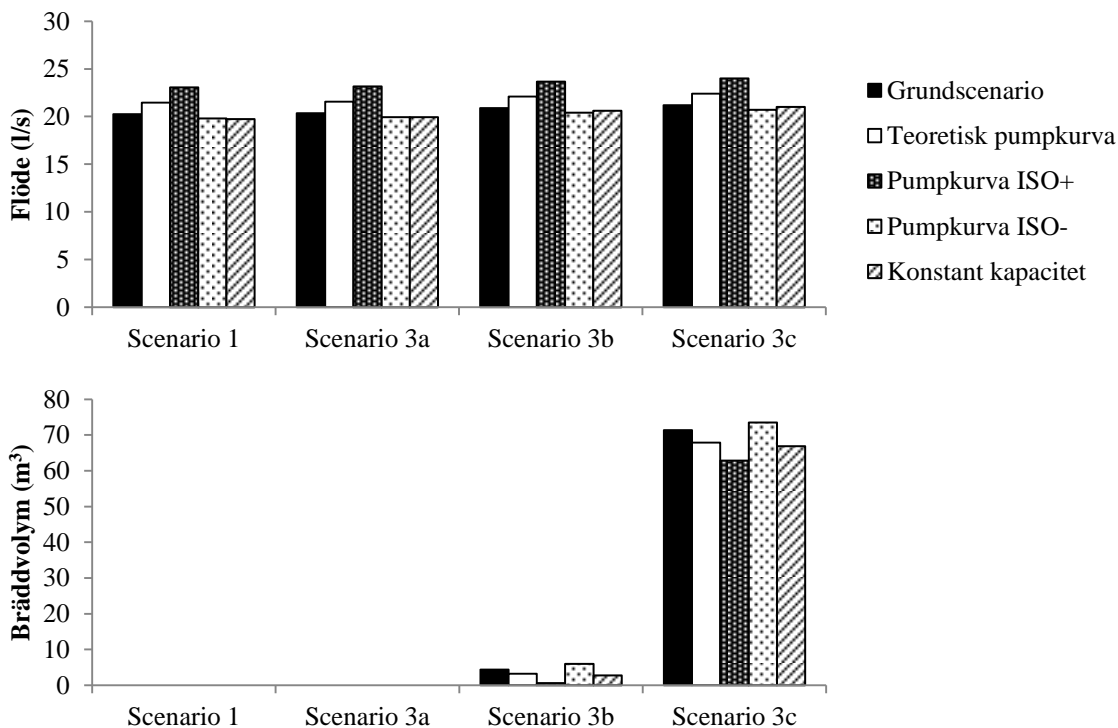
Pumpkapacitet



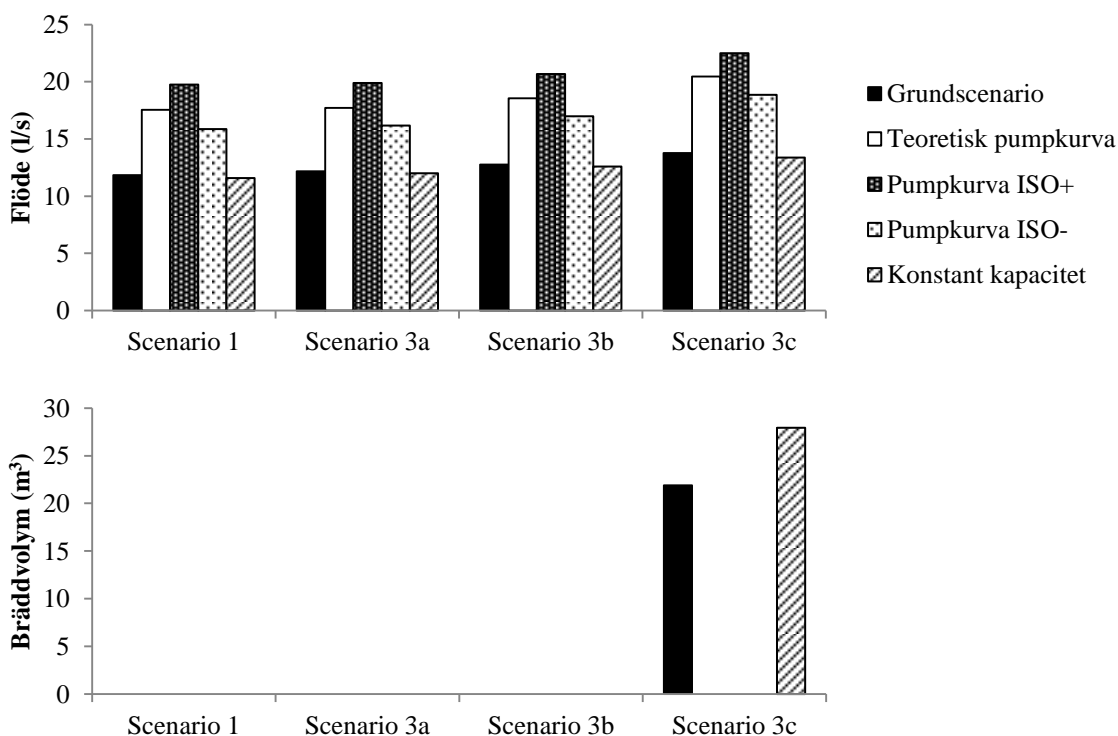
Figur D1. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Djurgårdsbacken vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



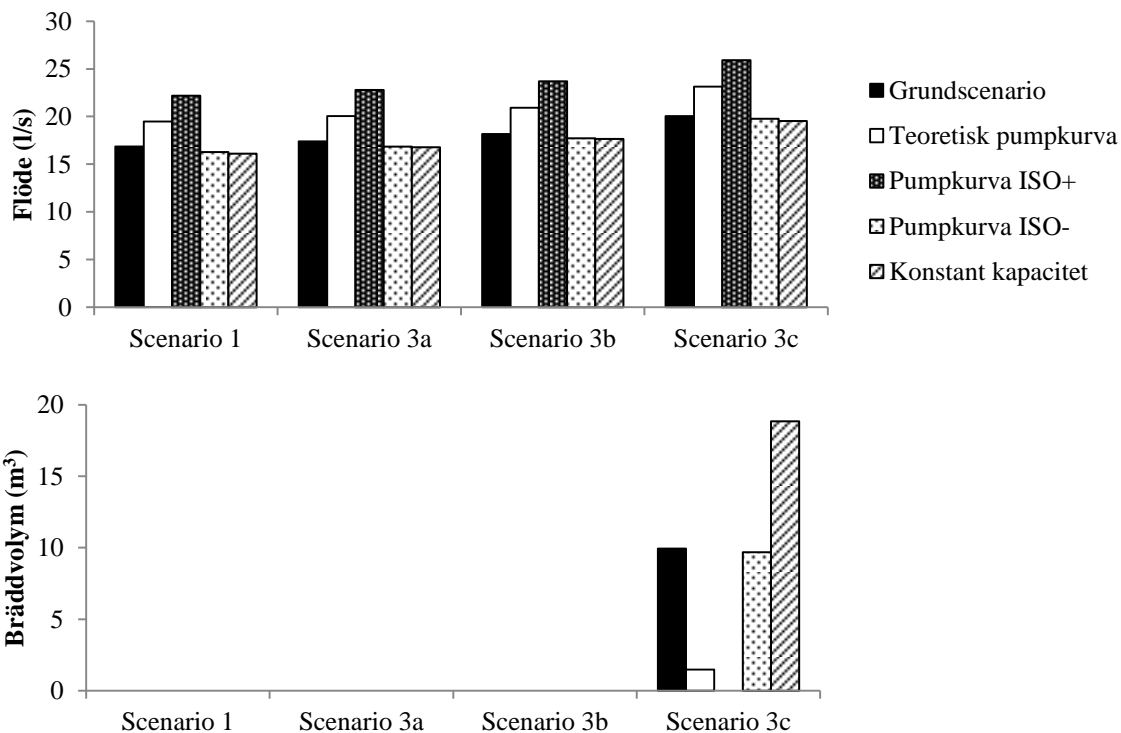
Figur D2. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Stenhagen vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



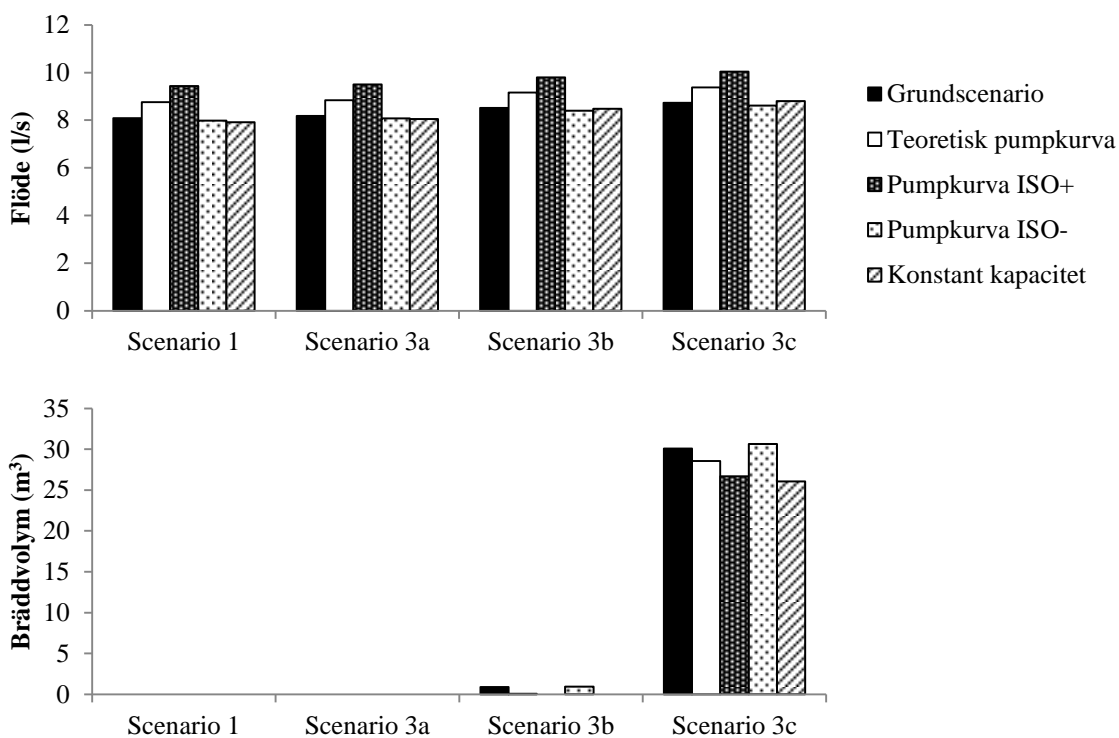
Figur D3. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Södra Gottsunda vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



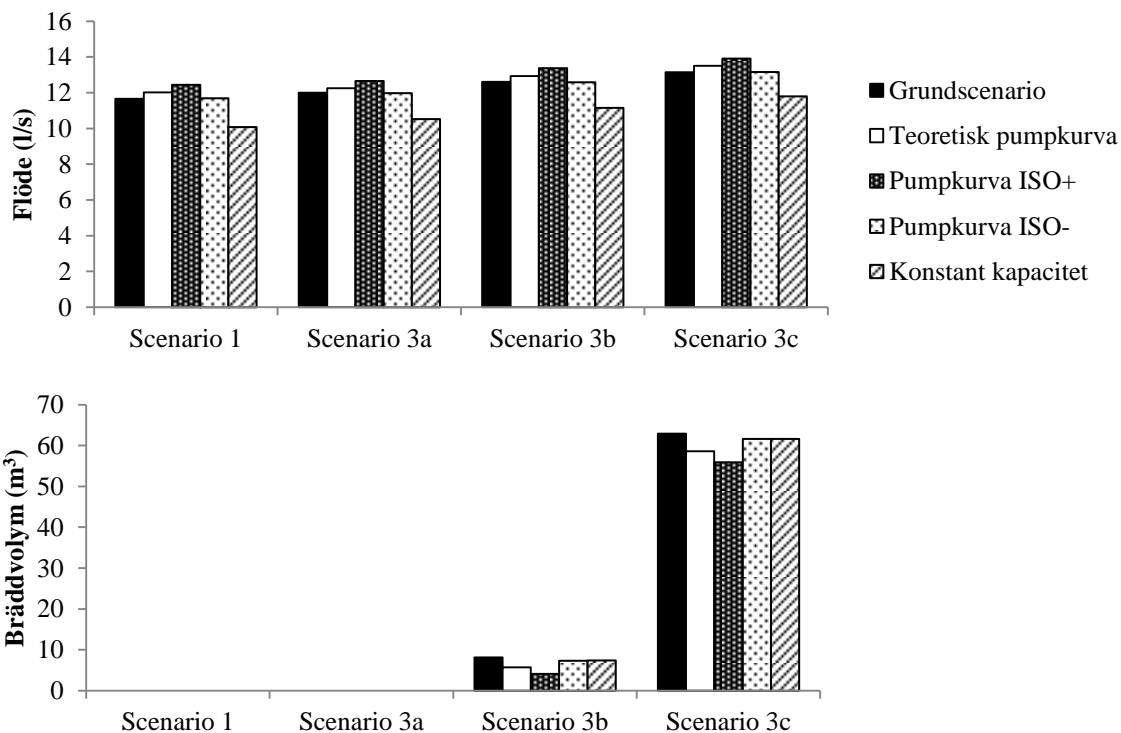
Figur D4. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Musikparken vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



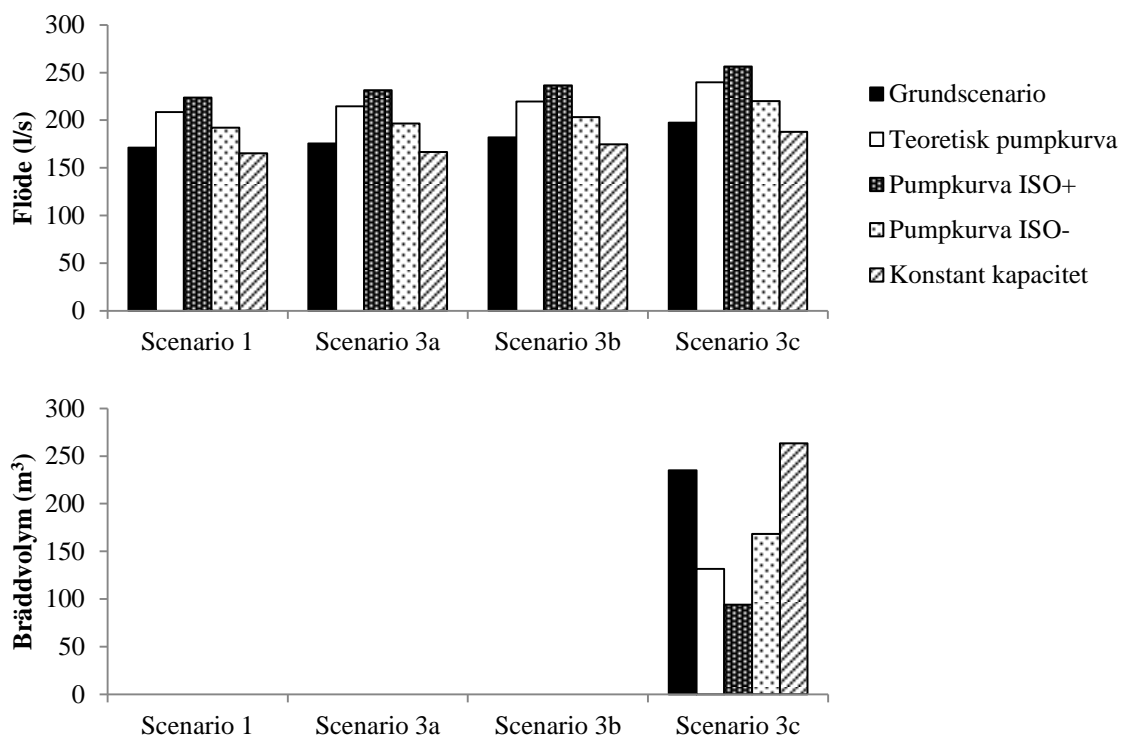
Figur D5. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Kohagen vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



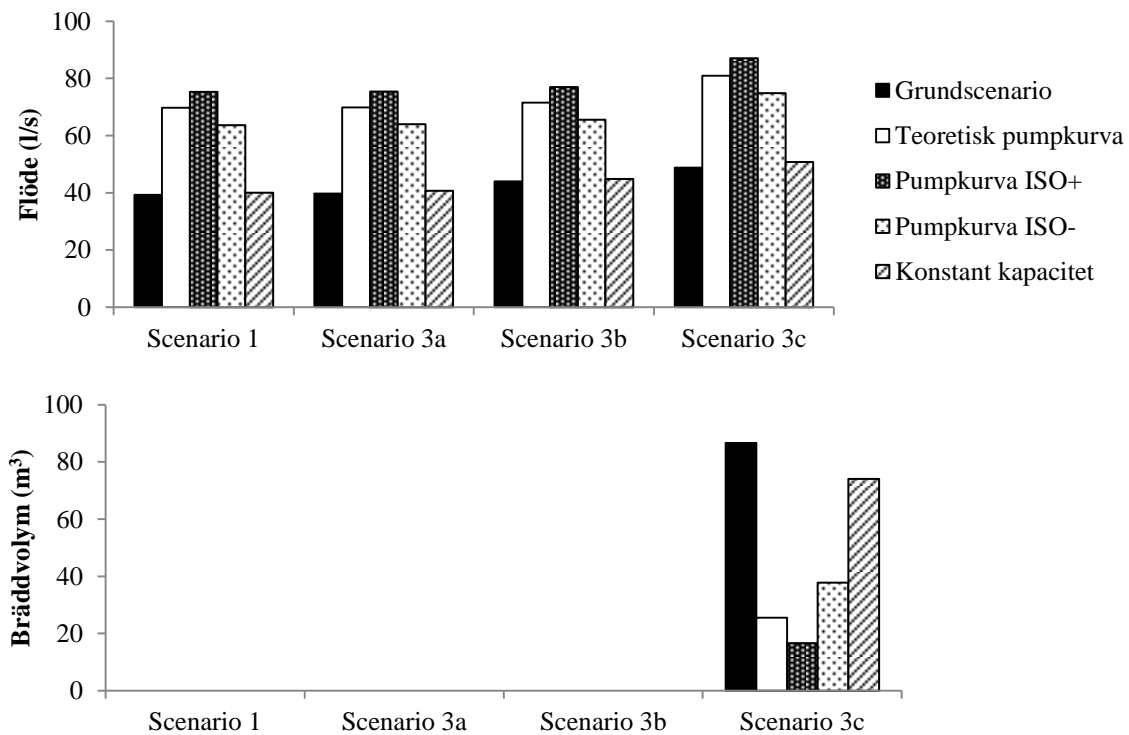
Figur D6. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Malma Södra vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



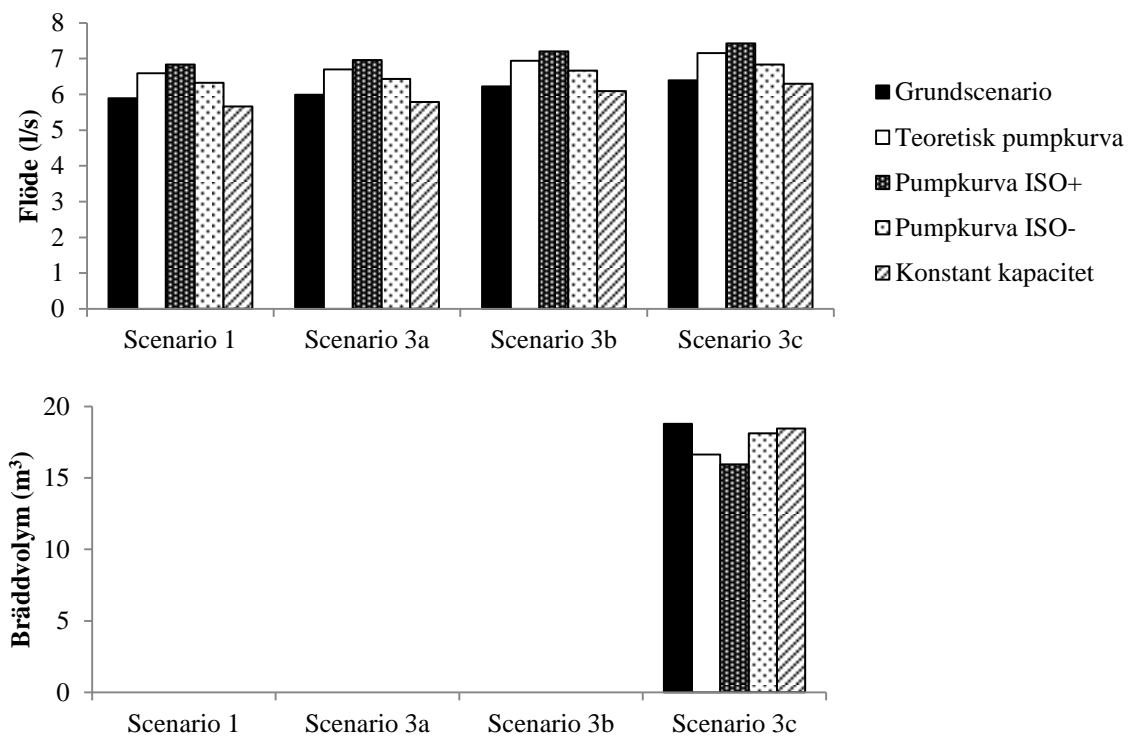
Figur D7. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Garaget vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



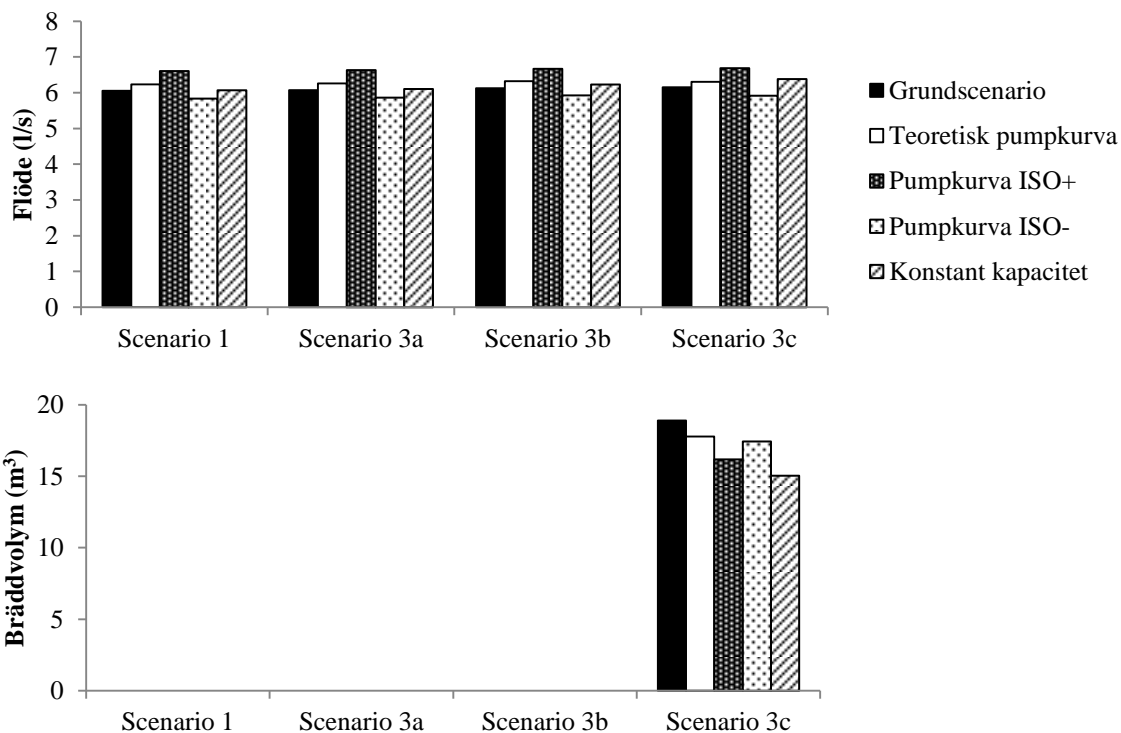
Figur D8. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen P10 vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.



Figur D9. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen P14 vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.

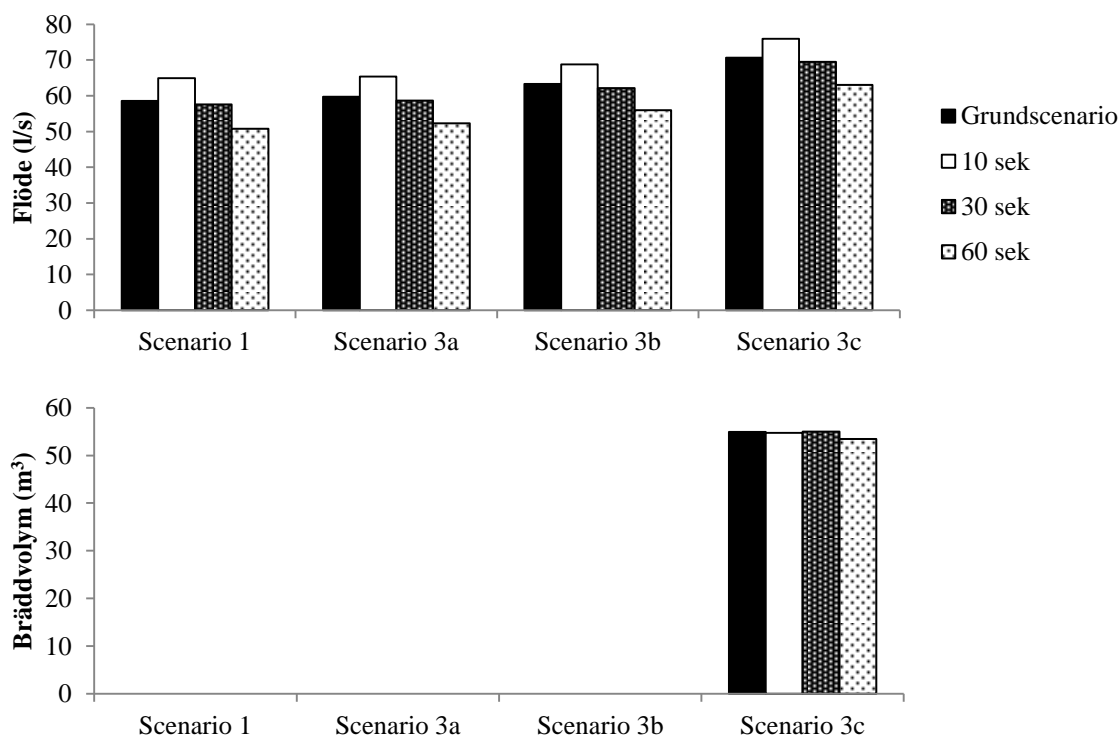


Figur 36. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Jenny vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.

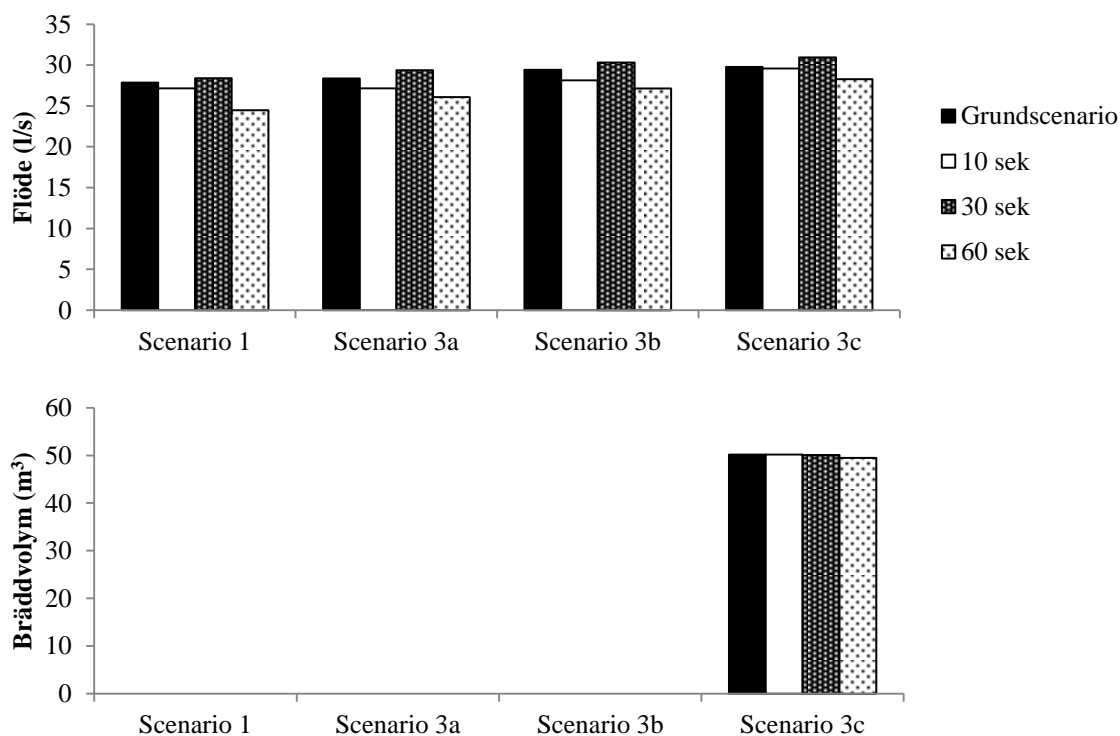


Figur D11. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Björnsholm vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametern pumpkapacitet beskrevs enligt grundscenariot, med teoretisk pumpkurva, med teoretisk pumpkurva avvikande enligt ISO 9906:2012 samt med konstant kapacitet.

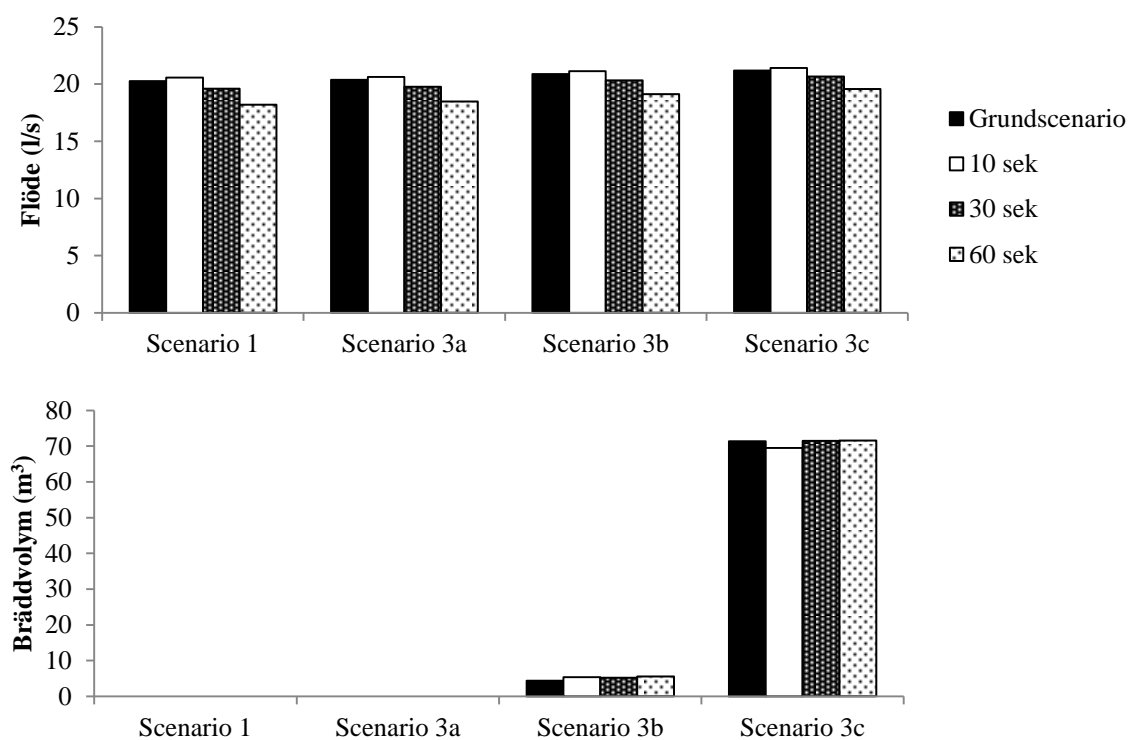
Accelerations- och retardationstid



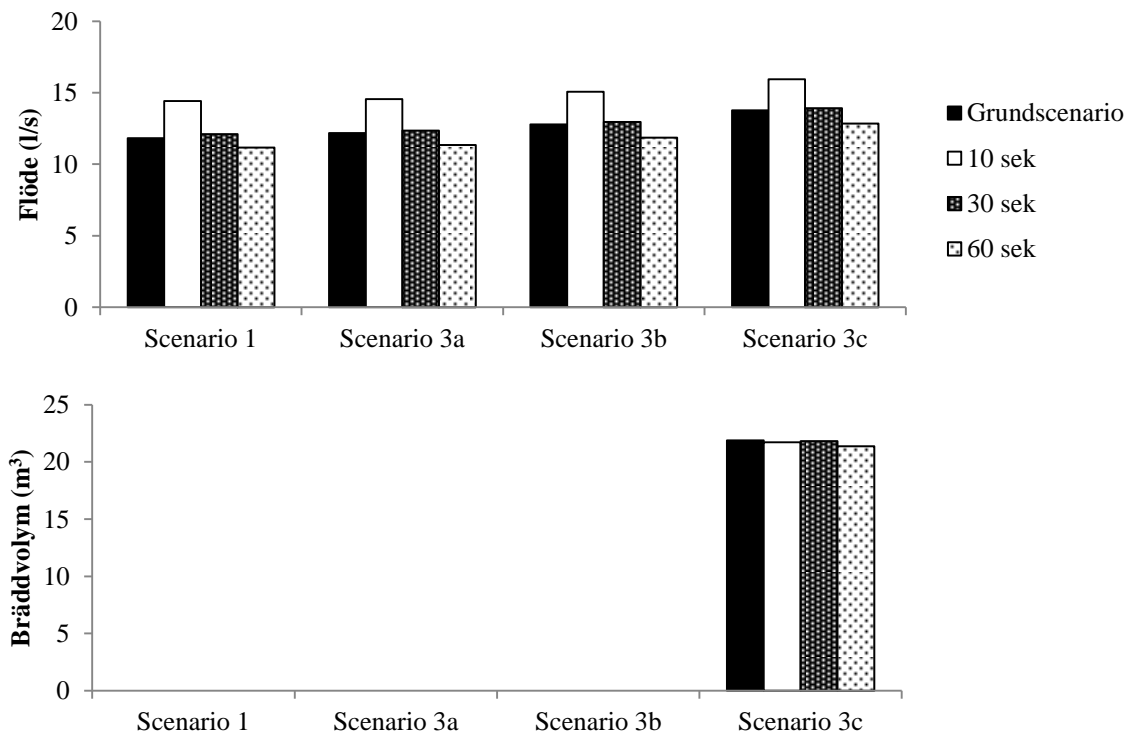
Figur D12. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Djurgårdsbacken vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



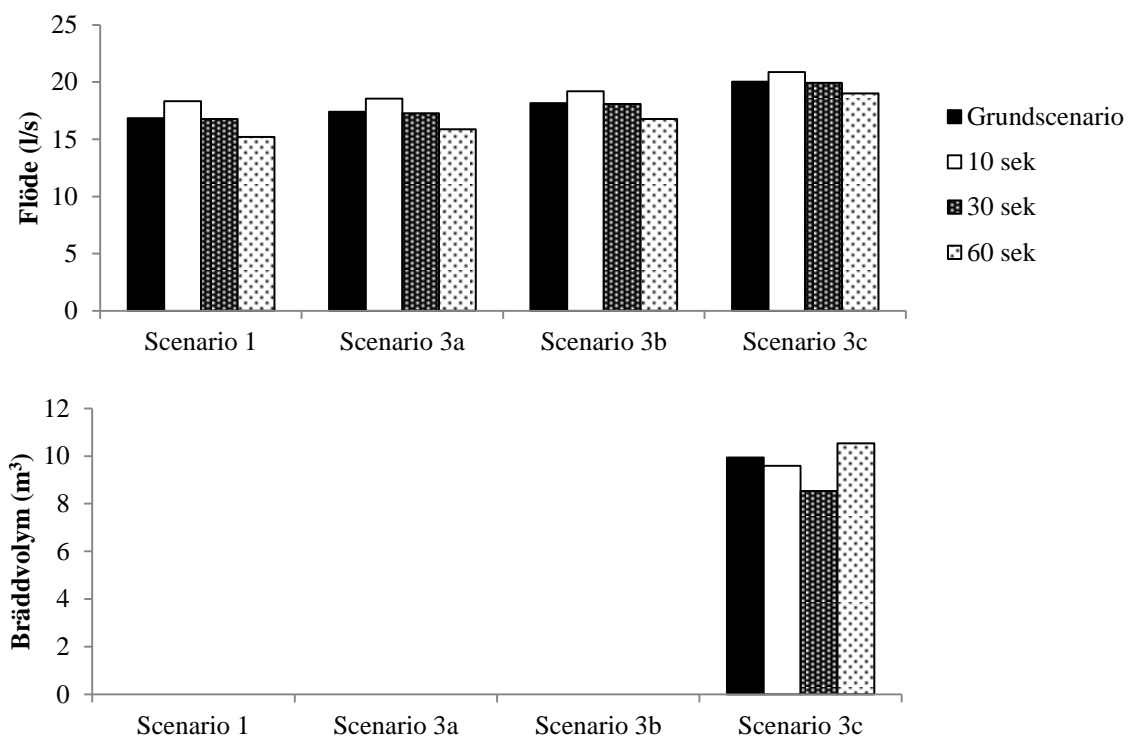
Figur D13. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Stenhagen vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



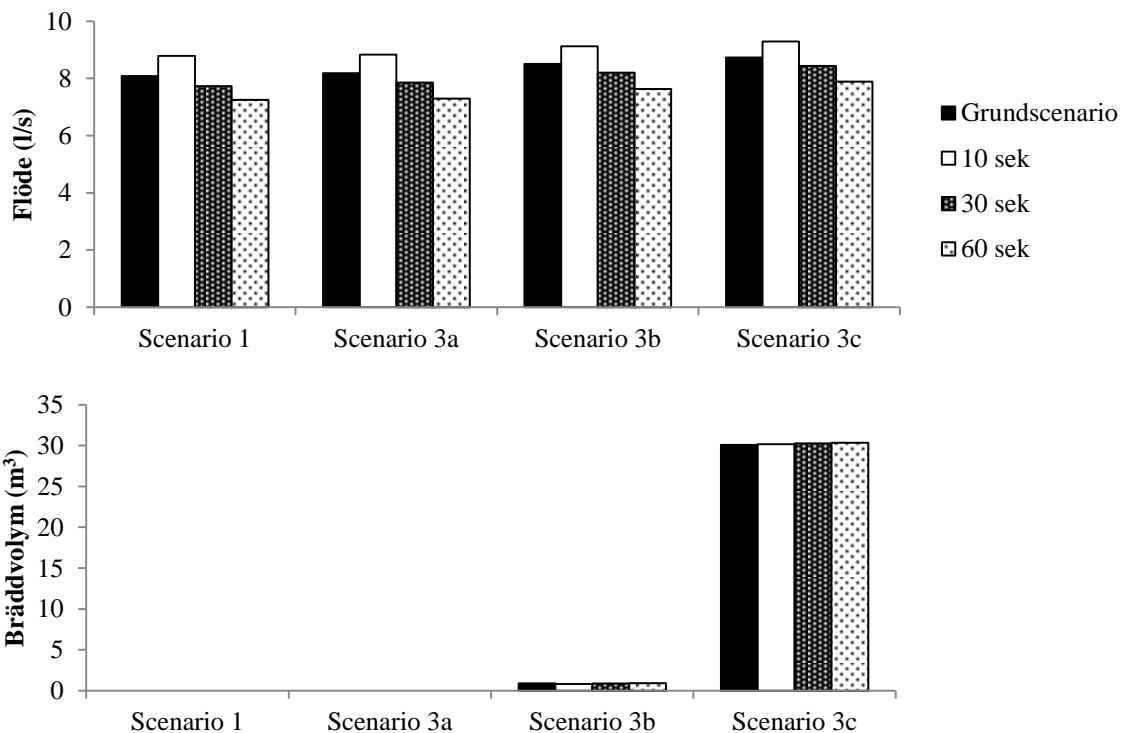
Figur D14. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Södra Gottsunda vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



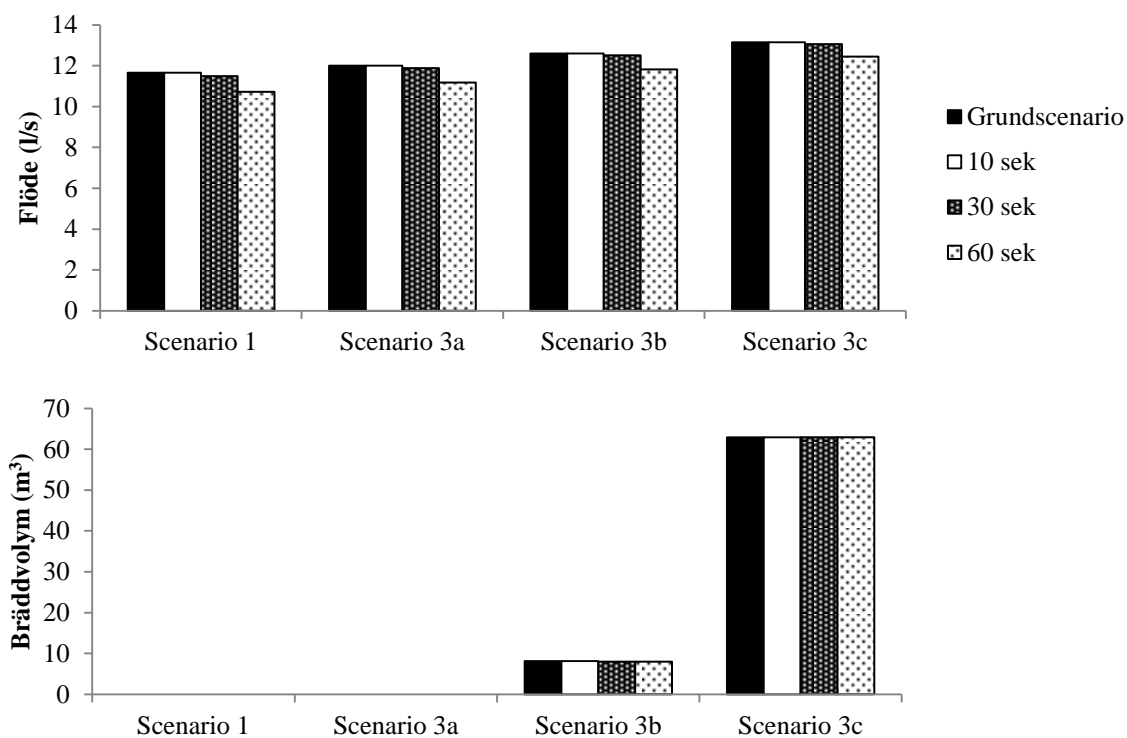
Figur D15. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Musikparken vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



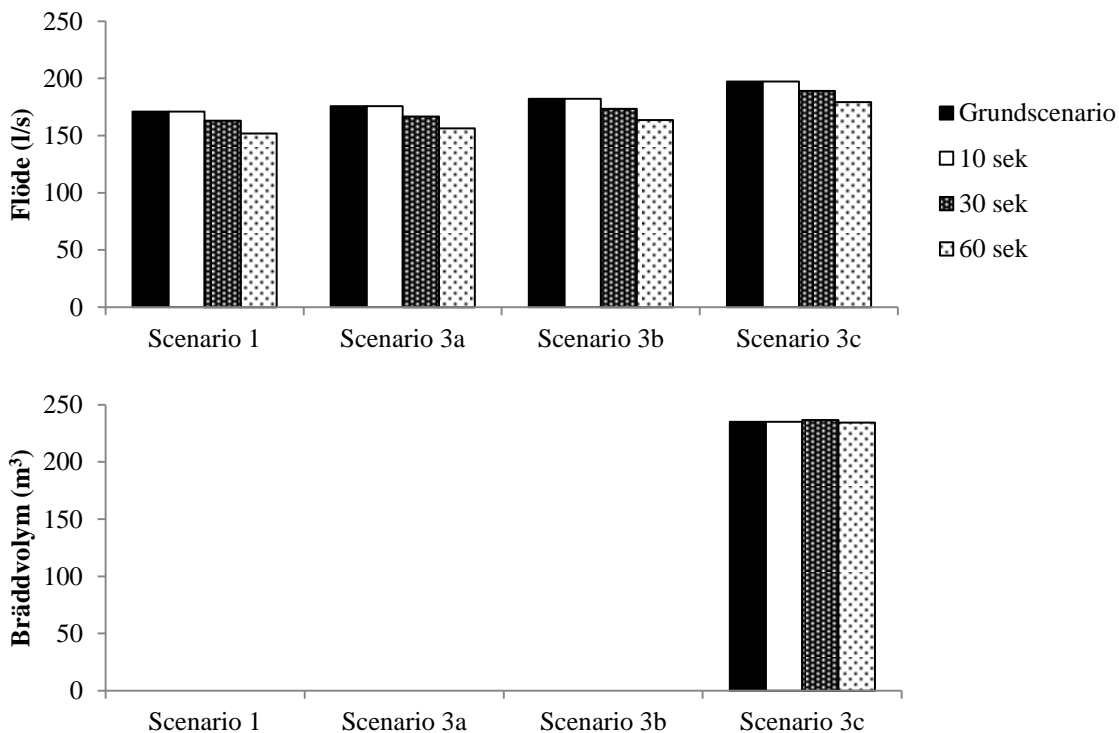
Figur D16. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Kohagen vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



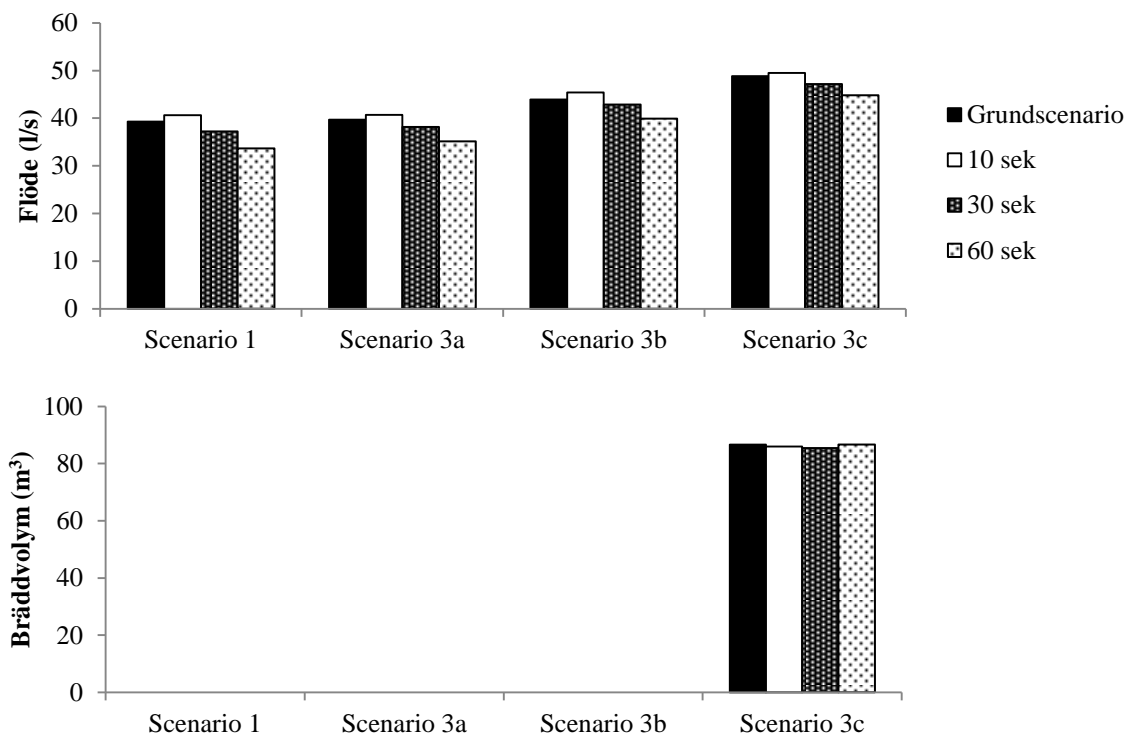
Figur D17. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Malma Södra vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



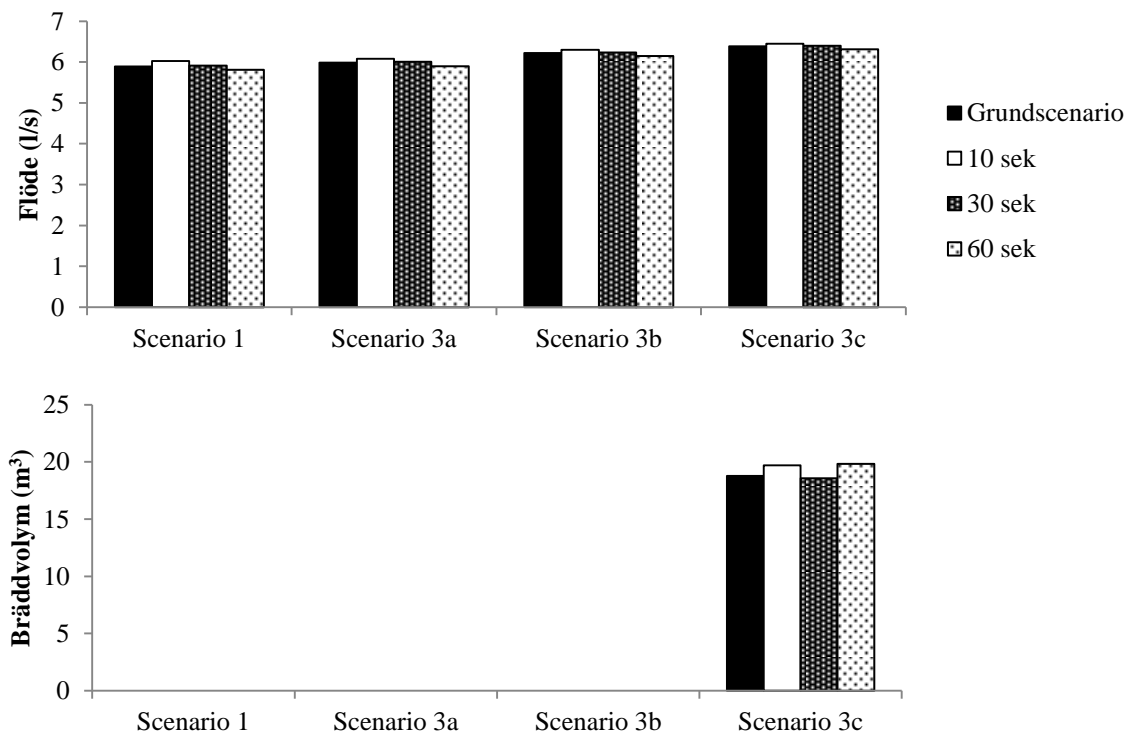
Figur D18. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Garaget vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



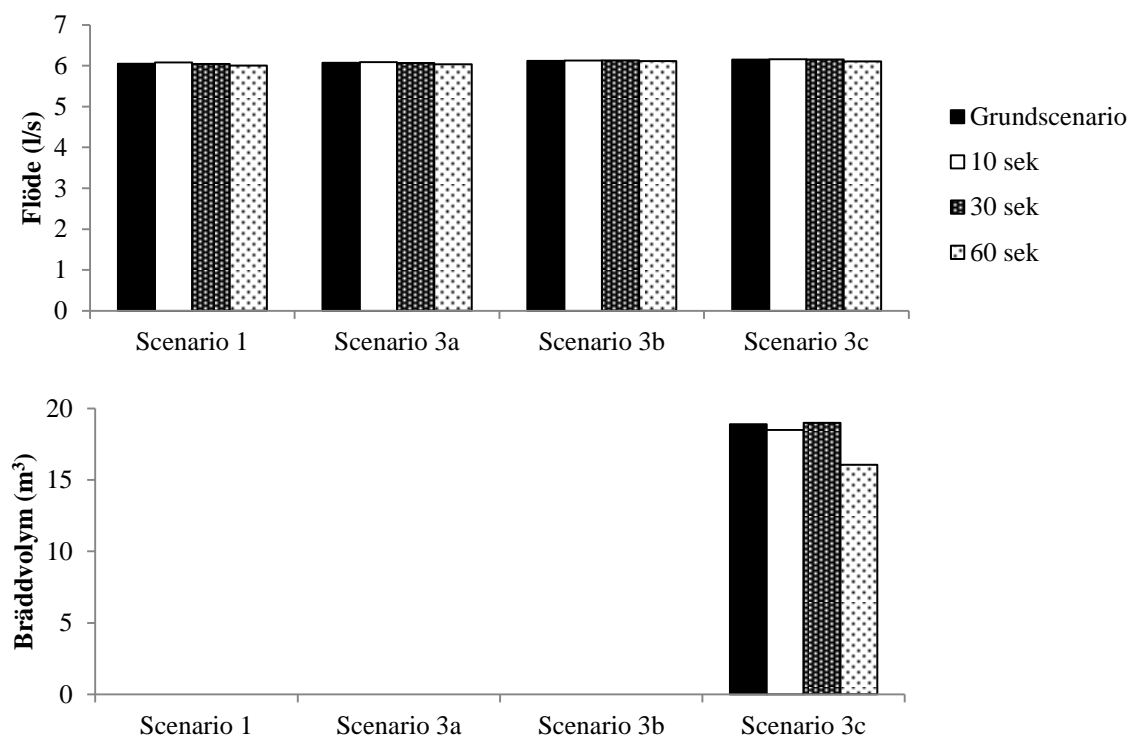
Figur D19. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen P10 vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



Figur D20. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen P14 vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



Figur D21. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Jenny vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.



Figur D22. Beräknat medelflöde och bräddvolym för pumpstationsmodellen Björnsholm vid beräkning för scenario 1, 3a, 3b och 3c. Modellparametrarna accelerations- och retardationstid beskrevs enligt grundscenariot, som 10 s, 30 s samt 60 s.