



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 13 019

Examensarbete 30 hp
September 2013

Tillförlitligheten i beräknade dimensionerande flöden i två mindre vattendrag med trånga sektioner

The reliability of estimated design floods
in two small streams with narrow sections

Lisa Carlsson

REFERAT

Tillförlitligheten i beräknade dimensionerande flöden i två mindre vattendrag med trånga sektioner

Lisa Carlsson

I Sverige finns idag en vedertagen metod för att bestämma dimensionerande flöde för dammanläggningar. De teoretiska beräkningarna av dimensionerande flöde för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I baseras på HBV-modellen, en begreppsmässig hydrologisk beräkningsmodell som beskriver samspelet mellan de meteorologiska och hydrologiska förhållanden som råder inom ett avrinningsområde. Begreppsmässiga hydrologiska modeller baseras på vattenbalansen och används för att bestämma tillrinning till vattendrag, sjöar eller andra vattenförekomster. Vid hydrologisk modellering med begreppsmässiga modeller tas ingen explicit hänsyn till vattendragets geometri. Trånga sektioner i naturliga vattendrag kan hindra vattnets framfart och orsaka dämning uppströms den trånga sektionen. Till följd av det kan en del av flödestoppen kvarhållas i terrängen och därmed dämpas och fördröjas. Hydrauliska modeller beskriver vattnets flöde genom vattendraget. Högupplöst höjddata utgör grunden i en hydraulisk modell och vid hydraulisk modellering tas således hänsyn till avrinningsområdets topografi såväl som vattendragets batymetri.

Syftet med detta examensarbete var att analysera tillförlitligheten i beräknade dimensionerande flöden framtagna enligt Flödeskommitténs *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*. Genom att upprätta hydrauliska modeller över två specifika vattendragssträckor som berörs av trånga sektioner kunde det undersökas huruvida de trånga sektionerna orsakar någon flödesdämpning samt om flödesdämpningen beror av storleken på vattenflödet. De områden som var föremål för denna studie var en delsträcka av Övre Lagan samt en del av Bolmån som är Lagans största tillflöde.

Resultaten visade att flödestopparna dämpades och att det var de trånga sektionerna som orsakade den huvudsakliga flödesdämpningen. Vidare visade resultaten att den relativa dämpningen beror av storleken på inflödet i de hydrauliska modellerna. Den relativa dämpningen av det dimensionerande flödet vid Övre Lagan var marginell, 1,2 % respektive 2,0 %, medan den vid Bolmån uppgick till 6,7 %. Det faktum att de dimensionerande flödena emellertid dämpades i de båda fallen bör vara skäl nog att se över metoden för bestämmandet av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I och undersöka huruvida det är möjligt att innefatta hydraulisk modellering i den idag vedertagna beräkningsmetodiken.

Nyckelord: Dimensionerande flöden, trånga sektioner, flödesdämpning, hydraulisk modellering, MIKE 11

*Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet
Geocentrum, Villavägen 16, SE 752 36 Uppsala*

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

The reliability of estimated design floods in two small streams with narrow sections

Lisa Carlsson

In Sweden there is currently an accepted method for determining the design floods for dams which is described in *The Swedish Design Flood Guidelines*. The theoretical calculations of the design floods for dams associated with Flood Design Category I are based on the HBV model, a conceptual hydrological model that describes the interaction between the meteorological and hydrological conditions within a basin. Conceptual hydrological models are based on the water balance and are used to determine runoff to streams, lakes or other bodies of water. Conceptual hydrological models do not take explicit account for the geometry of the watercourse. Narrow sections in natural streams may prevent water flow and cause impoundment upstream from the narrow section. Following that, a part of the flow peak can be retained in the terrain and thereby attenuated and delayed. Hydraulic models describe the flow of water through the watercourse. High resolution elevation data is the foundation of a hydraulic model and hydraulic models thus take into account the basin topography as well as the watercourse bathymetry.

The objective of this study was to analyze the reliability of design floods that have been determined according to *The Swedish Design Flood Guidelines*. By establishing hydraulic models of two specific streams affected by narrow sections it could be examined whether the narrow sections cause flow attenuation and whether the flow attenuation depends on the size of the water flow. The areas which were the subject of this study were a subsection of River Lagan and part of River Bolmån, which is River Lagan's largest tributary.

The results of the hydraulic model simulations showed that the flow peaks were attenuated and that it was the narrow sections that caused the main flow attenuation. Furthermore, the results showed that the relative attenuation depends on the size of the inflow in the hydraulic models. The relative attenuation of the design floods was 1.2 % and 2.0 % at River Lagan and 6.7 % at River Bolmån. The relative attenuation of the design flood was thus marginal at River Lagan. The fact that the design floods nevertheless were attenuated at both areas which were the subject of this study should be reason enough to review the method for the determination of design floods for dams associated with Flood Design Category I and examine whether it is possible to include hydraulic modeling in today's conventional calculation methodology.

Keywords: Design floods, narrow sections, flow attenuation, hydraulic modeling, MIKE

11

FÖRORD

Detta examensarbete utgör det avslutande momentet på Civilingenjörsprogrammet i Miljö- och Vattenteknik vid Uppsala Universitet och omfattar 30 hp. Examensarbetet utfördes på Sweco Infrastructure, Vattenkraft & Dammar.Handledare för examensarbetet var Joakim Holmbom, Sweco, och ämnesgranskare var Jan Seibert, Institutionen för geovetenskaper; Luft- vatten- och landskapslära.

Först vill jag tacka Jonas Jonsson för goda råd och hjälp att hitta rätt i examensarbetets initialskede samt Petter Stenström för att jag fick möjligheten att göra mitt examensarbete på Sweco, Vattenkraft & Dammar. Vidare vill jag rikta ett stort tack till min handledare Joakim Holmbom för stöd och bra synpunkter genom hela arbetets gång. Jag vill även tacka Karen Kemling för hennes engagemang och hjälpsamhet vid skapandet av terrängmodellerna i ArcGIS samt Katarina Losjö som trots tjänstledighet alltid tagit sig tid att svara på mina frågor. Ett tack riktas även till min ämnesgranskare Jan Seibert samt alla på Vattenkraft & Dammar för bra bemötande samt för en rolig och lärorik tid.

Slutligen vill jag uttrycka min uppskattning till min examiner Allan Rodhe, professor i hydrologi vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet, för det engagemang och den uppmuntran han har visat, inte bara vid examensarbetet utan genom hela studietiden på Miljö- och Vattenteknikprogrammet.

Uppsala, juni 2013

Lisa Carlsson

Samtliga höjdnivåer i examensarbetet är angivna i höjdsystemet RH2000.

Copyright © Lisa Carlsson och Institutionen för geovetenskaper; Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet.

UPTEC W 13 019, ISSN 1401-5765.

Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet, Uppsala 2013.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Tillförlitligheten i beräknade dimensionerande flöden i två mindre vattendrag med trånga sektioner

Lisa Carlsson

Människan påverkar den hydrologiska cykeln på många olika sätt. Ett exempel på mänsklig påverkan är dammanläggningar som konstrueras till förmån för bevattnings eller vattenkraft. Dammar förändrar vattnets flödesvägar och inverkar således på vattnets kretslopp. I takt med att den mänskliga påverkan ökar blir det allt viktigare att kunna prediktera framtidens hydrologi. Hydrologiska modeller har länge varit ett välanvänt verktyg för att förutsäga hydrologiska processer och exempelvis planera vattenkraftproduktion eller i ett försök att förhindra översvämningar. En modell kan beskrivas som en förenkling av verkligheten. Hur bra en modell är styrs av hur väl den efterliknar det verkliga systemet.

I Sverige producerar vattenkraften nästan hälften av all den elektricitet som förbrukas och till följd av det finns det ett stort antal dammanläggningar runt om i landet. Ett eventuellt dammbrott kan leda till allvarliga konsekvenser och orsaka stora skador på infrastruktur, människa och miljö. För att undvika detta är det viktigt att dammsäkerheten är hög och för samtliga dammar i Sverige beräknas därför det så kallade dimensionerande flödet. Det dimensionerande flödet är det flöde som dammen skall kunna hantera och släppa igenom utan att gå till brott.

Idag finns en vedertagen metod för att beräkna dimensionerande flöde för dammanläggningar vilken beskrivs i *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*. Enligt dessa riktlinjer delas dammanläggningarna in i olika flödesdimensioneringsklasser beroende på vilka konsekvenser ett eventuellt dammbrott i samband med höga flöden skulle medföra. Dammanläggningar för vilka ett eventuellt dammbrott skulle kunna medföra förlust av människoliv eller betydande skador på infrastruktur och/eller miljö tillhör flödesdimensioneringsklass I. För dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I baseras bestämningen av de dimensionerande flödena på hydrologiska modellsimuleringar som beskriver det värsta tänkbara scenariot, det vill säga följderna av extremt stora nederbördsmängder i samverkan med vattenmättade markförhållanden och betydande snösmältning. Beräkningarna utförs med den så kallade HBV-modellen, en begreppsmässig hydrologisk beräkningsmodell som beskriver samspelet mellan de meteorologiska och hydrologiska förhållanden som råder inom ett avrinningsområde.

Hydrologisk modellering används för att bestämma tillrinningen till vattendrag, sjöar eller andra vattenförekomster. Vid hydrologisk modellering tas ingen explicit hänsyn till hur vattendraget ser ut. I mindre vattendrag är det inte ovanligt att det finns trånga sektioner som vattnet måste passera längs sin flödesväg. Trånga sektioner kan hindra vattnets framfart och orsaka dämning uppströms den trånga sektionen. Hur trånga sektioner påverkar vattenflödet tas inte i beaktande när det dimensionerande flödet beräknas med hjälp av hydrologisk modellering. Hydrauliska modeller beskriver

vattnets flöde genom vattendraget. Hydrauliska modeller baseras på högupplöst höjddata och till skillnad från hydrologiska modeller tar hydrauliska modeller hänsyn till den omgivande terrängens topografi så väl som vattendragets batymetri. Hydrauliska modeller kan således användas för att studera hur trånga sektioner påverkar vattenflödet och huruvida de orsakar någon flödesdämpning.

Syftet med detta examensarbete var att analysera tillförlitligheten i beräknade dimensionerande flöden framtagna enligt *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*. Genom att upprätta hydrauliska modeller över två specifika vattendragssträckor som berörs av trånga sektioner kunde det studeras hur de trånga sektionerna påverkar vattenflödet samt huruvida de orsakar någon flödesdämpning och ifall denna flödesdämpning är beroende av storleken på inflödet i de hydrauliska modellerna. De områden som var föremål för denna studie var en delsträcka av Övre Lagan samt en del av Bolmån som är Lagans största tillflöde.

Resultatet av modellsimuleringarna visade att flödestopporna dämpades och att det till stor del var de trånga sektionerna som orsakade denna flödesdämpning. Den relativa dämpningen av det dimensionerande flödet vid Övre Lagan var marginell, 1,2 % respektive 2,0 %, medan den vid Bolmån uppgick till 6,7 %. Vidare visade resultaten att storleken på den relativa dämpningen beror på inflödet i modellerna. Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan visade därtill att flödesdämpningen beror av värdet på den hydrauliska resistansen, det så kallade Mannings tal. För att simuleringarna skall vara tillförlitliga är det därför viktigt att värdet på Mannings tal är så korrekt som möjligt. Är det möjligt bestäms Mannings tal således med fördel genom att kalibrera modellen med hjälp av uppmätt vattenföring och vattenstånd från det aktuella vattendraget.

Den relativa flödesdämpningen av det dimensionerande flödet vid Övre Lagan var som ovan nämnts inte särskilt stor. Studien visade emellertid att de dimensionerande flödena framtagna enligt riktlinjerna är överskattade, både för Fågelforsdammen i Övre Lagan och för Skeendammen i Bolmån. Det faktum att flödet dämpades vid båda de studerade vattendragssträckorna bör således vara skäl nog att se över den metod som idag används för att beräkna dimensionerande flöde för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I. Ett alternativ skulle kunna vara att komplettera de rådande riktlinjerna och försöka innefatta hydraulisk modellering i den idag vedertagna beräkningsmetodiken.

Det är dock viktigt att tänka på att hydraulisk modellering både kräver mer indata samt är mer tidskrävande än hydrologisk modellering. Det bör därför göras en avvägning i varje enskilt fall där arbetsbördan ställs mot sannolikheten att de rådande förhållandena är sådana att de trånga sektionerna påverkar vattenflödet så pass mycket att ett dimensionerande flöde framtaget enbart med hydrologisk modellering skulle kunna vara missvisande.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT	i
ABSTRACT	ii
FÖRORD	iii
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING	iv
1 INLEDNING	1
1.1 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	2
1.2 FOKUS OCH AVGRÄNSNINGAR	3
1.3 DISPOSITION.....	3
2 BAKGRUND OCH TEORI	4
2.1 MODELLERINGSVEKTYG.....	4
2.1.1 Hydrologisk modellering.....	4
2.1.2 Hydraulisk modellering	4
2.2 HBV-MODELLEN	5
2.3 MIKE 11	6
2.3.1 Tvärsektioner	6
2.3.2 Randvillkor	7
2.3.3 Hydraulisk resistans.....	7
2.3.4 Hydrodynamiska modulen.....	8
2.3.5 MIKE View.....	9
2.4 HÖJDDATA.....	9
2.4.1 Ny nationell höjdmodell	9
2.4.2 Rasterbaserad höjdmodell.....	10
2.5 RIKTLINJER FÖR BESTÄMNING AV DIMENSIONERANDE FLÖDEN FÖR DAMMANLÄGGNINGAR	10
2.5.1 Flödesdimensioneringsklasser	10
2.5.2 Bestämning av dimensionerande flöde för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I.....	10
3 MATERIAL OCH METODER	12
3.1 ÖVERSIKTLIGT UTFÖRANDE	12
3.2 OMRÅDESBESKRIVNING.....	12
3.2.1 Övre Lagan	13
3.2.2 Bolmån.....	15
3.3 TERRÄNGMODELLERNA.....	17

3.3.1	Höjddata.....	17
3.3.2	Inmätning av vattendragens batymetri	17
3.3.3	Terrängmodell i ArcGIS	20
3.4	DIMENSIONERANDE FLÖDE.....	22
3.4.1	Dimensionerande flöde för Fågelforsdammen	22
3.4.2	Dimensionerande flöde för Skeens kraftverk	23
3.5	MOTIVERING AV VALET AV HYDRAULISK MODELL.....	23
3.6	UPPRÄTTANDE AV DE HYDRAULISKA MODELLERNA I MIKE 11	24
3.6.1	Randvillkor	24
3.6.2	Tvärsektioner	26
3.6.3	Hydrauliska strukturer	26
3.6.4	Hydraulisk resistans.....	27
3.6.5	Parametervärden	27
3.7	SIMULERING MED DE HYDRAULISKA MODELLERNA	27
3.7.1	Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan.....	28
3.7.2	Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Bolmån.....	28
3.8	FLÖDESDÄMPNINGEN	29
3.9	KALIBRERING AV DE HYDRAULISKA MODELLERNA.....	29
3.9.1	Övre Lagan	29
3.9.2	Bolmån.....	30
4	RESULTAT	31
4.1	KALIBRERINGSRESULTAT.....	31
4.1.1	Övre Lagan	31
4.1.2	Bolmån.....	31
4.2	ÖVRE LAGAN	31
4.2.1	Flödesdämpningen strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen	31
4.2.2	Flödesdämpningen strax uppströms Fågelforsdammen	33
4.2.3	Den huvudsakliga dämpningen	35
4.3	BOLMÅN	36
4.3.1	Scenario A.....	36
4.3.2	Scenario B.....	37
4.3.3	Scenario C.....	38
4.3.4	Jämförelse mellan Scenario B och Scenario C.....	39

5	DISKUSSION	40
5.1	SIMULERINGSSRESULTATEN	40
5.1.1	Övre Lagan	40
5.1.2	Bolmån.....	40
5.1.3	Jämförelse mellan de båda studieområdena	42
5.1.4	Tillförlitligheten i SMHI:s beräknade dimensionerande flöden	43
5.2	OSÄKERHETER I MODELLERNA	43
5.2.1	Terrängmodellerna.....	43
5.2.2	De hydrauliska modellerna.....	44
5.3	FORTSATTA STUDIER	45
6	SLUTSATSER.....	46
7	REFERENSER	47
	BILAGOR	51
	BILAGA A – SAINT VENANTS EKVATIONER.....	51
	BILAGA B – EDITORERNA I MIKE 11	53
	BILAGA C – FÄLTMÄTNINGARNA.....	56
	BILAGA D – FLÖDESHYDROGRAFERNA.....	60

1 INLEDNING

Människan påverkar den hydrologiska cykeln på många olika sätt. Ett exempel på mänsklig påverkan är dammbyggnationer. Dammar som används för bevattning eller vattenkraft förändrar vattnets flödesvägar och inverkar därmed på vattnets naturliga kretslopp (Jackson *m.fl.*, 2001). I takt med att den mänskliga påverkan ökar blir det allt viktigare att kunna prediktera framtidens hydrologi. I dagens samhälle är därför hydrologiska modeller ett välanvänt verktyg för att förutsäga hydrologiska processer och exempelvis planera vattenkraftproduktion eller i ett försök att förhindra översvämningar (Beven, 2003).

I Sverige står vattenkraften för ungefär 45 % av elproduktionen och det finns således ett stort antal dammanläggningar runt om i landet (Svensk Energi, 2013). Svensk Kraftverksförening antog år 1997 *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS*. Dessa riktlinjer skall användas som ett stöd i dammsäkerhetsarbetet och förhindra dammbrott som kan medföra stora skador på infrastruktur, människa och miljö. Som ett led i detta dammsäkerhetshöjande arbete beräknas det dimensionerande flödet, det vill säga ”*det flöde som en damm och dess avbördningssystem måste kunna tåla respektive avbörda utan risk för allvarlig skada på någon del av dammen eller dess avbördningssystem*”, för samtliga dammanläggningar i Sverige (Svensk Energi, 2012).

I Sverige finns idag en vedertagen metod för att beräkna dimensionerande flöde för dammanläggningar vilken beskrivs i *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar* (Svensk Energi *m.fl.*, 2007). Vid beräkning av dimensionerande flöde delas dammanläggningarna in i olika flödesdimensioneringsklasser. Klassificeringen baseras på vilka konsekvenser ett dammbrott i samband med höga flöden skulle medföra. Flödesdimensioneringsklass I tillämpas för dammanläggningar där ett eventuellt dammbrott skulle kunna medföra förlust av människoliv, stora skador på infrastruktur och/eller miljö eller annan betydande ekonomisk förlust (Svensk Energi *m.fl.*, 2007).

De teoretiska beräkningarna av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I baseras på HBV-modellen. HBV-modellen är en begreppsmässig hydrologisk beräkningsmodell som beskriver samspelet mellan de meteorologiska och hydrologiska förhållanden som råder inom ett avrinningsområde. Modellen används för att skapa hydrologiska prognoser genom att omräkna observationer av främst nederbörd och temperatur till avrinning (Lindström *m.fl.*, 1996). Bestämningen av de dimensionerande flödena bygger på hydrologiska modellsimuleringar som beskriver följderna av extremt stora nederbördsmängder i samverkan med vattenmättade markförhållanden och betydande snösmältning. Dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I skall klara av att avbörda de extremt höga flöden som uppstår om de ovan nämnda ogynnsamma flödesskapande förhållandena inträffar samtidigt (Svensk Energi *m.fl.*, 2007).

Begreppsmässiga hydrologiska modeller baseras på vattenbalansen och används för att bestämma tillrinning till vattendrag, sjöar eller andra vattenförekomster. En

begreppsmässig hydrologisk modell som HBV-modellen kan inte explicit beakta trånga sektioner i naturliga vattendrag (Åkesson, 2010). Trånga sektioner i vattendrag kan hindra vattnets framfart och orsaka dämning uppströms den trånga sektionen. Till följd av det kan en del av flödestoppen kvarhållas i terrängen. Hur stor del av flödet som kvarhålls och fördröjs beror på vattendragets geometri. Vid hydrologisk modellering med begreppsmässiga modeller tas således ingen hänsyn till den flödesdämpning som kan uppstå på grund av trånga sektioner. Det finns följaktligen en risk att dimensionerande flöden framtagna enligt *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar* är överskattade för dammanläggningar belägna i mindre vattendrag som berörs av trånga sektioner.

Hydrauliska modeller beskriver vattnets flöde genom vattendraget. I hydrauliska modeller används bland annat topografisk information som indata (Schumann, 2011). Hydrauliska modeller kan i och med det, till skillnad från begreppsmässiga hydrologiska modeller, explicit ta hänsyn till vattendragets geometri vilket gör det möjligt att undersöka hur trånga sektioner i vattendrag påverkar vattenflödet och huruvida de orsakar någon flödesdämpning (Åkesson, 2010). Genom att upprätta hydrauliska modeller över vattendrag som påverkas av trånga sektioner är det möjligt att utvärdera de, enligt riktlinjerna beräknade dimensionerande flödena med hänsyn tagen till avrinningsområdets topografi såväl som vattendragets batymetri. Hydrauliska modeller kan påvisa huruvida trånga sektioner påverkar flödeshydrografen, det vill säga om, och i sådana fall hur mycket, flödet dämpas samt om flödesdämpningen påverkas av vattenflödets storlek.

Hydrologisk såväl som hydraulisk modellering används för att förutsäga hur ett verkligt hydrologiskt system skulle uppträda i en given situation. Modellen som representerar systemet bör återspegla verkligheten på ett så tillfredsställande sätt som möjligt (Ljung och Glad, 2004). Det är därför av stor vikt att tillförlitligheten i beräknade dimensionerande flöden är hög även i mindre vattendrag där vattnets framfart eventuellt hindras av trånga sektioner. Främst dammägare, men även konsulter som utför dimensioneringsberäkningar, är intresserade av att veta huruvida trånga sektioner kan dämpa dimensionerande flöden så att de kan göra kostnadseffektiva investeringar gällande exempelvis avbördningsanordningar för dammanläggningar.

1.1 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

Syftet med detta examensarbete var att upprätta hydrauliska modeller över två specifika vattendragssträckor som påverkas av trånga sektioner och utifrån dessa diskutera tillförlitligheten i de dimensionerande flödena framtagna enligt *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*. De frågeställningar som studien ämnade besvara var följande:

- Sker någon flödesdämpning – och i sådana fall hur stor är denna dämpning – på grund av de trånga sektionerna?
- Påverkas flödesdämpningen av vattenflödets storlek?

- Finns det skäl att se över den vedertagna metodiken för beräkning av dimensionerande flöden för dammanläggningar belägna i mindre vattendrag som berörs av trånga sektioner eller är flödesdämpningen på grund av de trånga sektionerna försumbar?

1.2 FOKUS OCH AVGRÄNSNINGAR

Inom ramen för detta examenarbete fanns endast utrymme att studera två specifika områden. Arbetet avgränsades till att omfatta en delsträcka av Övre Lagan samt en del av Bolmån som avvattnar sjön Bolmen och är Lagans största tillflöde. Vattendragssträckorna som var föremål för denna studie valdes utifrån att de berörs av trånga sektioner och att det därtill fanns tillgängligt dataunderlag för de specifika områdena. Fokus låg i att studera huruvida de trånga sektionerna belägna i Övre Lagan och Bolmån påverkar vattenflödet och ifall någon flödesdämpning sker på grund av sektionerna samt i att analysera tillförlitligheten i de dimensionerande flödena framtagna enligt *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*. I examensarbetet utreddes vidare endast om – ej hur – den vedertagna metodiken för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I bör utvecklas så att hänsyn tas till trånga sektioners inverkan på vattenflödet.

Hydrologisk modellering används vid bestämmandet av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I. Dammanläggningarna belägna i de studerade vattendragen tillhör flödesdimensioneringsklass II och det finns således inga krav på att dessa dammar skall kunna avbörda ett klass I-flöde (avsnitt 2.5). För att besvara frågeställningarna och göra de aktuella jämförelserna är dock examensarbetet utfört som om Fågelforsdammen och Skeendammen tillhörde flödesdimensioneringsklass I. När det i arbetet talas om dimensionerande flöde för dessa dammanläggningar så avser det således klass I-flödet. I verkligheten är detta emellertid inte det dimensionerande flödet för Fågelforsdammen och Skeendammen eftersom dammanläggningarna tillhör flödesdimensioneringsklass II.

1.3 DISPOSITION

Bakgrund och teori återfinns i kapitel 2. Litteraturstudier låg till grund för kapitel 2 och i detta avsnitt finns information rörande hydrologisk och hydraulisk modellering, HBV-modellen samt beräkningsprogramvaran MIKE 11. I kapitel 2 beskrivs vidare nuvarande metodik för att bestämma dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I. I kapitel 3 beskrivs tillvägagångssättet som användes för att upprätta terrängmodeller samt hydrauliska modeller över de två studieområdena. Resultat återfinns i kapitel 4 och i kapitel 5 förs diskussioner rörande resultaten. I kapitel 6 dras slutligen kortfattade slutsatser utifrån de framtagna resultaten.

2 BAKGRUND OCH TEORI

2.1 MODELLERINGSVEKTYG

Ett system är en samling element som tillsammans utgör en helhet. Att skapa modeller av system är ett sätt att besvara frågor om systemet utan att behöva utföra dyra eller komplicerade experiment. En modell är således en förenkling av verkligheten som används för att förutsäga hur det verkliga systemet skulle uppträda i en given situation (Ljung och Glad, 2004).

2.1.1 Hydrologisk modellering

Inom vetenskapsområdet hydrologi har modellering använts som verktyg för att beskriva och förutsäga hydrologiska händelseförlopp i mer än hundra år (Rosbjerg och Madsen, 2005). Hydrologiska processer är komplexa och det är därför många gånger fördelaktigt att studera hydrologi ur ett systemperspektiv där systemet exempelvis utgörs av ett avrinningsområde (Chow *m.fl.*, 1988). En hydrologisk modell är en approximation av verkligheten som gör det möjligt att undersöka förhållanden som inte är mätbara, till exempel hur framtida klimatförändringar kommer att påverka avrinningsområdets hydrologiska processer (Beven, 2003).

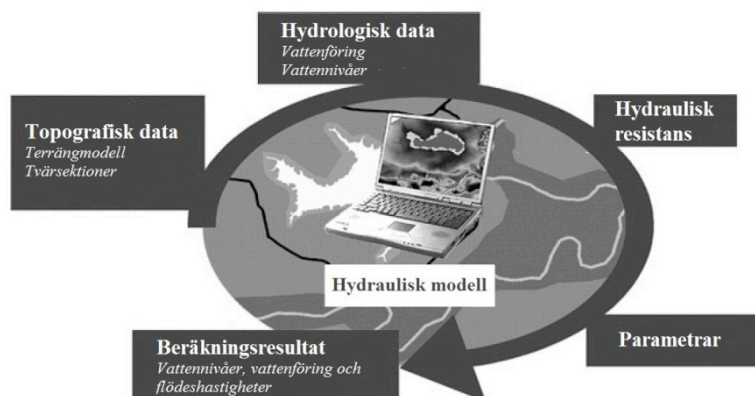
Hydrologiska modeller kan vara fysikaliska eller begreppsmässiga. Fysikaliska modeller baseras på fysikaliska beskrivningar av de hydrologiska processer som sker. Dessa beskrivningar baseras ofta på ekvationerna för bevarandet av massa, energi och rörelsemängd. Begreppsmässiga modeller representerar aktuella processer i det hydrologiska systemet men den exakta fysikaliska beskrivningen av processerna är inte känd (Beven, 2003). Begreppsmässiga hydrologiska modeller baseras på vattenbalansen och används för att simulera tillrinning till vattendrag, sjöar eller andra vattenförekomster. Vid hydrologisk modellering med begreppsmässiga modeller tas ingen explicit hänsyn till vattendragets geometri och dessa modeller kan således inte beakta hur trånga sektioner i vattendrag påverkar vattenflödet.

Vidare kan hydrologiska modeller klassificeras som distribuerade eller sammanslagna. I sammanslagna modeller betraktas systemet som en enhet. Detta är ett väldigt förenklat synsätt där ett medelvärde av avrinningsområdets hydrologiska variabler får representera hela området. I distribuerade modeller är modellvariablerna en funktion av rumsliga dimensioner och dessa modeller kan ses som en kombination av en hydraulisk och en hydrologisk modell (Beven, 2003; Chow *m.fl.*, 1988).

2.1.2 Hydraulisk modellering

Hydraulisk modellering – även kallad hydrodynamisk modellering – är liksom hydrologisk modellering ett sätt att förutsäga hur ett hydrologiskt system, exempelvis en vattendragssträcka, uppträder i en specifik situation. Den stora skillnaden ligger i modellens rumsliga upplösning. Hydrauliska modeller kräver förutom information om systemets hydrologi, såsom vattenflöde och vattennivå, även information rörande avrinningsområdets topografi samt vattendragets batymetri och hydrauliska resistans

(Schumann, 2011). Till skillnad från hydrologiska modeller som används för att simulera hur mycket vatten som når vattendraget beskriver hydrauliska modeller vattnets flöde genom vattendraget. I figur 1 visas den övergripande modellstrukturen hos en hydraulisk modell.



Figur 1. Övergripande modellstruktur hos en hydraulisk/hydrodynamisk modell. Figur baserad på bild i *Flood Risk Assessment and Management* (Schumann, 2011).

Trots att vattenströmning i naturliga vattendrag är tredimensionell är det ofta en distinkt strömningsriktning som dominerar och vattenflödet kan därmed beskrivas på ett tillfredsställande sätt genom att använda färre rumsliga dimensioner. Hydrauliska modeller är därför många gånger en- eller tvådimensionella. I hydrauliska modeller måste randvillkor alltid definieras. Det är viktigt att dessa formuleras så exakt som möjligt eftersom de i hög utsträckning påverkar modelleringsresultatet (Schumann, 2011).

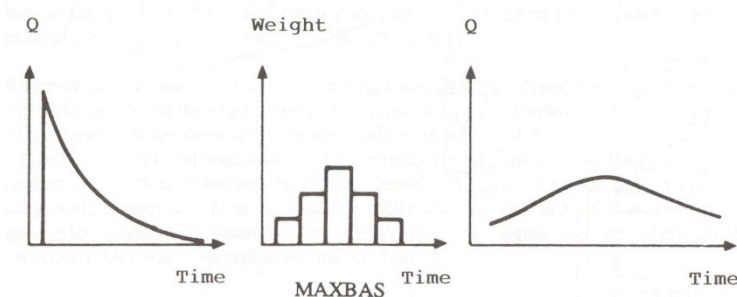
2.2 HBV-MODELLEN

Den första lyckade körningen med HBV-modellen utfördes år 1972. Idag, drygt 40 år senare, är HBV-modellen ett standardverktyg för att simulera avrinning i Sverige och modellen tillämpas därtill i flera andra länder runt om i världen (Bergström, 1992). Det ursprungliga användningsområdet för HBV-modellen var planering av kraftverksdrift och översvämningsskartering. Idag tillämpas modellen inom en rad nya områden, såsom i Flödeskommitténs *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar* (Lindström *m.fl.*, 1996).

HBV-modellen klassificeras som begreppsmässig, vilket innebär att modellen beskriver huvuddragen av den hydrologiska cykeln men inte de exakta fysikaliska processer som påverkar vattnets kretslopp. HBV-modellen används för att simulera avrinning och modellen baseras på vattenbalansen, en numerisk konceptuell beskrivning av de hydrologiska processer som sker i ett avrinningsområde. HBV-modellen kräver förhållandevis lite indata. Indata till modellen är dygnsmedelvärden av nederbörd och temperatur samt långtidsmedelvärden av potentiell avdunstning (Lindström *m.fl.*, 1996).

HBV-modellen består av tre huvudkomponenter: snörutinen, markrutinen och responsfunktionen (Bergström, 1992). HBV-modellens responsfunktion påverkar flödeshydrografens form och har som uppgift att fördela flödet över tiden.

Responsfunktionen är av stor vikt vid dimensionering av dammanläggningar eftersom funktionen beskriver när vattenflödet kommer att kulminera (Lindström *m.fl.*, 1996). Responsfunktionen transformerar den genererade avrinningen med hjälp av en triangulär viktningsfunktion (figur 2). Viktningsfunktionen består av en fri parameter, *MAXBAS*, som utgör basen i triangeln (Lindström, *m.fl.*, 1996).



Figur 2. Den triangulära viktningsfunktion som HBV-modellen använder för att fördela vattenflödet över tiden, i detta exempel har parametern *MAXBAS* tilldelats värdet 5 (Bergström, 1992).

I de fall att flera delavrinningsområden kopplas samman använder HBV-modellen parametrarna *LAG* och *DAMP* för att beskriva den fördröjning och dämpning som sker i vattendragssträckan mellan delavrinningsområdena. *LAG* beskriver hur många dagar vattenflödet skall förskjutas och *DAMP* beskriver dämpningen av flödet. Beräkningarna baseras på de så kallade Muskingums ekvationer (Lindström *m.fl.*, 1996).

2.3 MIKE 11

MIKE 11 är en avancerad beräkningsprogramvara utvecklad av Danish Hydraulic Institute, DHI. MIKE 11 används för att simulera vattenföring, vattenkvalitet och sedimenttransport i naturliga vattendrag, kanaler, bevattningssystem, flodmynningar och andra vattenförekomster. MIKE 11 är ett hydrauliskt och helt dynamiskt modelleringsverktyg som kan användas för att studera enkla vattendragssträckor såväl som för att analysera komplicerade älvsystem. Vidare är MIKE 11 ett endimensionellt modelleringsprogram vilket innebär att hänsyn endast tas till processer som sker i flödesriktningen (DHI, 2012a). Endimensionella modeller kan användas där merparten av vattnet flödar i en distinkt riktning och övriga flödesriktningar därmed kan försummas (Schumann, 2011).

För att kunna sätta upp en modell i MIKE 11 är det viktigt att höjddata finns tillgängligt för hela det område som skall studeras. Höjddata ligger till grund för den hydrauliska modellen och det är med hjälp av denna som vattendragets tvärsnitt kan specificeras (DHI, 2012b). För utförligare beskrivning av MIKE 11:s uppbyggnad och de editorer som används för att upprätta en hydraulisk modell i MIKE 11 se bilaga B.

2.3.1 Tvärsnitt

I MIKE 11 beskrivs modellområdets topografi och batymetri genom att ett antal tvärsnitt i det studerade vattendraget specificeras. Tvärsnitten definieras med hjälp av *x*- och *z*-koordinater, där *x* är det tvärgående avståndet från en fix punkt på vattendragets vänstra strandkant – sett i vattnets flödesriktning – och *z* är bottennivån i

meter över havet. Tvärsektionerna skall placeras vinkelrätt mot vattnets flödesriktning och beskriva vattendragets utseende så bra som möjligt. Ändrar vattendraget form eller har en slingrande flödesväg måste tvärsektionerna placeras tätare. Det är i vattendragets tvärsektioner som vattenföring, Q , och vattennivå, h , beräknas (DHI, 2012b).

2.3.2 Randvillkor

Vid hydraulisk modellering i MIKE 11 krävs randvillkor vid samtliga av modellens ränder, det vill säga alla upp- och nedströmsändar av vattendragssträckan som skall modelleras. Valet av randvillkor beror på området som skall studeras samt tillgången på data. Vanliga uppströms randvillkor är konstant vattenflöde från en reservoar eller en flödeshydrograf från ett specifikt flödestillfälle. Typiska nedströms randvillkor är en konstant vattennivå såsom havsnivån eller dämmningsgränsen i ett vattenkraftsmagasin, eller en avbördningskurva från en mätstation (DHI, 2012b).

2.3.3 Hydraulisk resistans

I MIKE 11 kan tre olika beskrivningar av den hydrauliska resistansen användas, Chezy koefficient, C , Mannings tal, M , eller Mannings skrovlighetskoefficient, n . Skillnaden mellan beskrivningarna är att C varierar med vattendjupet medan M och n i regel är oberoende av vattendjupet. Ifall det är möjligt bör C , M och n bestämmas genom modellkalibrering alternativt baseras på kalibrerade modeller i områden med liknande topografi. Uppskattningar av värdet på Mannings skrovlighetskoefficient, n , finns därtill att läsa i en rad publikationer som behandlar hydraulik i öppna kanaler och naturliga vattendrag (DHI, 2012b).

Mannings tal och Mannings skrovlighetskoefficient är relaterade till varandra genom att $M = 1/n$. Mannings tal kan anta värden mellan 10 och 100, där $M = 100$ beskriver vattendrag med slät botten medan $M = 10$ beskriver vattendrag med tät vegetation eller skrovlig botten (DHI, 2012b). Enligt Chow *m.fl.* (1988) kan den hydrauliska resistansen för naturliga vattendrag beskrivas enligt tabell 1.

Tabell 1. Mannings tal för naturliga vattendrag (Chow *m.fl.*, 1988).

Naturliga vattendrag	Mannings tal, M ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)
Raka vattendrag utan hinder	33
Slingrande vattendrag utan hinder	25
Slingrande vattendrag med ogräs och korvssjöar	20
Vattendrag med nedfällda träd och snårskog	10

Vattnets hastighet påverkas av vattendragets hydrauliska resistans. En skrovlig bottenyta medför ett litet värde på M och således en låg vattenhastighet (ekvation 1) (Chow *m.fl.*, 1988).

$$v = R^{2/3} S_f^{1/2} M \quad (1)$$

där

v = vattenhastigheten (m/s)

R = hydrauliska radien (m)

S_f = lutningen (-)

M = Mannings tal ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)

2.3.4 Hydrodynamiska modulen

MIKE 11 är uppbyggt av en rad integrerade moduler, bland annat grundläggande beräkningsmoduler för hydrologi, hydrodynamik och sedimenttransport (Singh, 1995). Den hydrodynamiska modulen är kärnan i MIKE 11 och den ligger till grund för de flesta av de andra beräkningsmodulerna (DHI, 2012a). Den hydrodynamiska modulen beräknar icke stationärt flöde i vattendrag och flodmynningar. I den hydrodynamiska modulen finns därtill avancerade beräkningsmetoder för att beskriva vattenflödet över hydrauliska strukturer såsom exempelvis dammar och broar (DHI, 2012b).

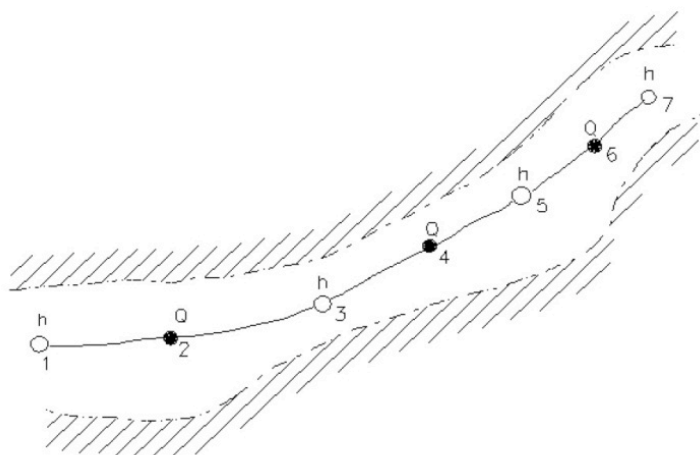
Beräkning av vattenflödet

Den hydrodynamiska modulen löser ekvationerna för bevarande av volym och rörelsemängd, Saint Venants ekvationer. I MIKE 11 löses Saint Venants ekvationer under antagandena att:

- Vattnet är inkompressibelt och homogent, det vill säga att densiteten inte varierar i särskilt stor utsträckning
- Vattendragets bottenlutning är liten
- Vågornas längd är stor i förhållande till vattendjupet vilket medför att vattnets flödesriktning kan antas vara parallell med botten och att vertikal acceleration därmed kan försummas
- Flödet är subkritiskt, vilket innebär att våghastigheten är större än vattnets medelhastighet och att eventuella störningar i vattenströmningen således kan fortplanta sig uppströms

Lösningssmodell

Saint Venants ekvationer (ekvation A9 och A10, bilaga A) beräknas för varje tidssteg. Beräkningsrutnätet består av omväxlande Q - och h -punkter (figur 3), det vill säga punkter där vattenflödet och vattennivån beräknas. Rutnätet generas automatiskt av modellen utifrån de villkor som användaren satt upp. Vattennivåpunkter placeras där tvärsektionsdata finns tillgänglig och avståndet mellan dessa varierar således. Flödespunkter placeras mitt emellan kringliggande vattennivåpunkter samt vid eventuella hydrauliska strukturer (Singh, 1995; DHI, 2012b).



Figur 3. Lösningsmodell med omväxlande Q - och h -punkter där vattenflöde respektive vattennivå beräknas för varje tidssteg (DHI, 2012b).

2.3.5 MIKE View

MIKE View är ett tillägg till MIKE 11 som används för att analysera resultatfiler. I MIKE View kan bland annat vattenföring, vattenstånd och Q/h -förhållanden plottas som en funktion av tiden vid olika punkter längs den studerade vattendragssträckan. Vidare kan vattendragets horisontella profil studeras. I den horisontella profilen kan vattennivåvariationerna i vattendraget visualiseras. Därtill går det att med hjälp av den horisontella profilen dynamiskt studera hur vattennivån förändras under simuleringsperioden (DHI, 2012c).

2.4 HÖJDDATA

För att sätta upp en hydraulisk modell krävs underlag i form av höjddata som täcker hela det område som skall studeras (Schumann, 2011). Upplösningen på höjddata är avgörande för hur bra modellen kan beskriva verkligheten och därmed vilken noggrannhet som kan uppnås i den hydrauliska modelleringen.

2.4.1 Ny nationell höjdmodell

Regeringen har givit Lantmäteriet i uppgift att ta fram en ny nationell höjdmodell av hög kvalitet. Arbetet med den nya nationella höjdmodellen påbörjades år 2009 och målet är att det innan år 2015 skall finnas en rikstäckande höjdmodell. Målsättningen är att hela Sverige skall skannas med flygburen laser och att högupplöst laserdata skall utgöra grunden för den nya nationella höjdmodellen (Skytt, 2012). Från laserskanningen erhålls ett så kallat punktmoln, en stor mängd datapunkter med känt läge i plan och i höjd. Dessa datapunkter representerar allt från vatten till hus eller vegetation och för att få en höjdmodell som representerar markytan måste datapunkterna bearbetas där de klassificeras till mark, vatten eller övrigt (Lantmäteriet, 2012).

I dagsläget är stora delar av Sverige laserskannat och för vissa områden finns därtill leveransklar höjddata. Lantmäteriet tillhandahåller den nya nationella höjdmodellen i två olika former, det laserskannade punktmolnet eller som ett färdigt raster med

gridstorleken 2×2 meter. Kravet på noggrannhet för den nya nationella höjdmodellen är att felet i höjddled inte får överstiga 0,5 m i ett grid med 2 meters upplösning (Lantmäteriet, 2013). Detta kan jämföras med Lantmäteriets gamla rikstäckande höjdmodell, GSD-Höjddata 50+, där rutnätet har en upplösning av 50 m och noggrannheten i höjd är $\pm 2,5$ meter (MSB, 2012). Den nya nationella höjdmodellen ger enligt Skytt (2012) potential att modellera verkligheten med bättre resultat än vad som tidigare varit möjligt.

2.4.2 Rasterbaserad höjdmodell

Rasterstruktur innebär att data delas in i ett rutnät, ett så kallat raster, där varje ruta tilldelas ett numeriskt värde. I en rasterbaserad höjdmodell representeras varje cell av ett höjdvärde. Höjdmodellens upplösning avgörs således av storleken på rastrets celler. Nackdelen med hög upplösning är att det medför ökad datamängd. Minskas cellernas sidstorlek så ökar mängden data som måste lagras kvadratisk (Harrie, 2008).

2.5 RIKTLINJER FÖR BESTÄMNING AV DIMENSIONERANDE FLÖDEN FÖR DAMMANLÄGGNINGAR

Flödeskommitténs riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar presenterades för första gången år 1990. Sedan dess har en rad kompletteringar och förändringar skett och en nyutgåva av riktlinjerna publicerades år 2007. Riktlinjerna tillämpas för bestämning av dimensionerande flöden för såväl vattenkraft- som gruvindustrins dammanläggningar (Svensk Energi *m.fl.*, 2007).

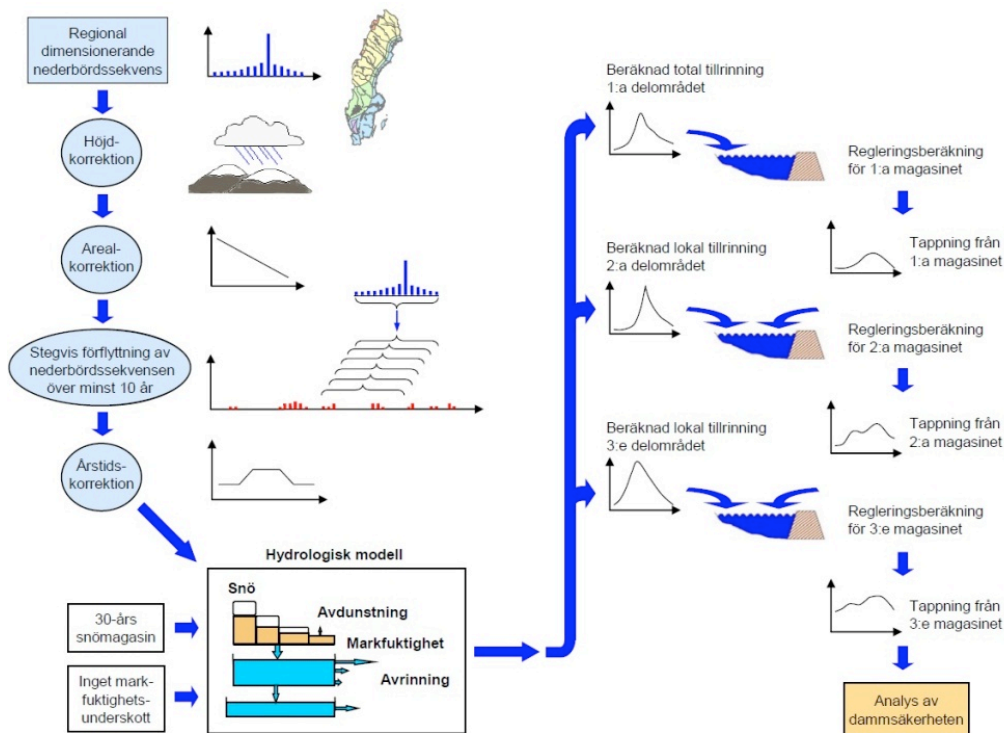
2.5.1 Flödesdimensioneringsklasser

Vid beräkning av dimensionerande flöde delas dammanläggningarna in i olika flödesdimensioneringsklasser. Klassificeringen baseras på vilka konsekvenser ett dammbrott i samband med höga flöden skulle medföra. Är sannolikheten att människor skadas eller dör i händelse av dammbrott icke försumbar så tillhör dammanläggningen flödesdimensioneringsklass I. Medför dammbrott med hög respektive beaktansvärd sannolikhet stor ekonomisk skadegörelse respektive allvarlig skada på infrastruktur eller miljövärde tillhör även dessa dammanläggningar flödesdimensioneringsklass I. I fall sannolikheten att ett dammbrott medför skada på infrastruktur, dammanläggning eller miljövärde icke är försumbar tillhör dammanläggningen flödesdimensioneringsklass II (Svensk Energi *m.fl.*, 2007).

2.5.2 Bestämning av dimensionerande flöde för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I

De teoretiska beräkningarna av de dimensionerande flödena baseras på hydrologiska modellsimuleringar utförda med HBV-modellen. HBV-modellen simulerar vattenflöde och vattennivå genom att verklig observerad nederbörd ersätts av dimensionerande nederbördssekvenser. Modellsimuleringarna beskriver följderna av extremt stora nederbörds mängder i samverkan med ogynnsamma faktorer såsom vattenmättade markförhållanden och betydande snösmältning. Dessa ogynnsamma faktorer ligger

inom ramen för vad som har inträffat och kombineras på ett sådant sätt att den mest kritiska effekten på vattendraget kan studeras. Dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I skall klara av att avbörda de extremt höga vattenflöden som uppstår om de ovan nämnda ogynnsamma flödesskapande faktorerna inträffar samtidigt (Svensk Energi *m.fl.*, 2007). En översiktlig bild av tillvägagångssättet för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I visas i figur 4.



Figur 4. Tillvägagångssätt för bestämning av dimensionerande flöde för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I (Svensk Energi *m.fl.*, 2007).

För att kunna utföra de hydrologiska modellberäkningar som utgör grunden för bestämningen av de dimensionerande flödena krävs både meteorologisk och hydrologisk indata. Beräkningsresultatet påverkas därmed i stor utsträckning av kvaliteten i dessa indata. De meteorologiska indata som används är en dimensionerande nederbördssekvens som ersätter den verkliga nederbörden under 14 dygn. Den dimensionerande nederbördssekvensen måste korrigeras för avrinningsområdets storlek samt beroende av vilken årstid som råder när nederbörden faller. Korrigerings av nederbördssekvensen måste även utföras om avrinningsområdet är beläget på hög höjd, eftersom nederbörden normalt ökar med höjden (Svensk Energi, *m.fl.*, 2007).

Dimensioneringsberäkningarna omfattar en simuleringsperiod av minst tio år. Under denna tidsperiod förskjuts den 14 dagar långa dimensionerande nederbördssekvensen i steg om ett dygn och flödesberäkningar utförs för varje tidssteg. Det dimensionerande flödet tas fram genom att identifiera det mest kritiska flödesförloppet under den valda tidsperioden. Den hydrologiska modellen kalibreras mot verkliga flödesserier och det är särskilt viktigt att modellen återger höga vattenflöden på ett bra sätt (Svensk Energi, *m.fl.*, 2007).

3 MATERIAL OCH METODER

3.1 ÖVERSIKTLIGT UTFÖRANDE

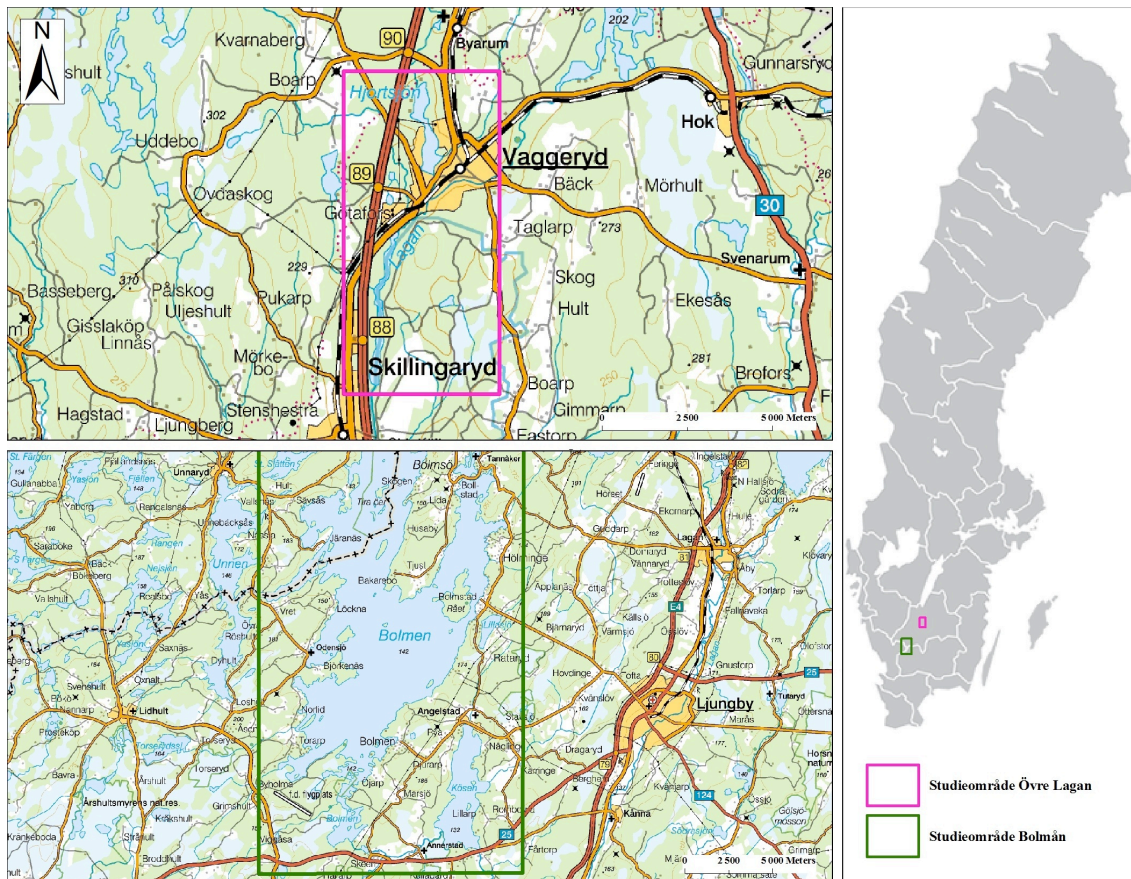
För att bestämma de trånga sektionernas inverkan på vattenflödet upprättades hydrauliska modeller över två specifika vattendragssträckor. De områden som omfattades av studien var en delsträcka av Övre Lagan uppströms Fågelforsdammen i Vaggeryds Kommun samt en del av Bolmån och sjön Bolmen uppströms Skeendammen i Ljungby Kommun. Båda dessa vattendragssträckor påverkas av trånga sektioner i någon form. Arbetet utfördes i två huvudsteg. Först skapades terrängmodeller i ArcGIS som omfattade både vattendragens batymetri och den omgivande terrängens topografi. Med dessa terrängmodeller som grund upprättades därefter hydrauliska modeller i MIKE 11.

För Fågelforsdammen såväl som för Skeendammen har SMHI beräknat dimensionerande flöden enligt *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöde för dammanläggningar*. Vid de hydrauliska modellsimuleringarna i MIKE 11 användes SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrografer som indata och tidsserier av vattenflödet nedströms de trånga sektionerna beräknades. Genom att jämföra de i MIKE 11 modellerade flödeshydrograferna med SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrografer kunde det undersökas huruvida de trånga sektionerna i vattendragen hindrar vattnets framfart och således medför att vattenflödet dämpas. För att fastställa ifall flödesdämpningen beror av storleken på vattenflödet utfördes modellsimuleringarna även med 75 %, 50 % och 25 % av SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrografer som indata.

3.2 OMRÅDESBESKRIVNING

Lagan är ett av Sydsvenska höglandets största vattendrag (Nationalencyklopedin, 2013a). Lagans källsjöar är Västersjön och Tahesjön som ligger strax söder om Jönköping (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2005). Ån rinner söderut genom bland annat Vaggeryd och Värnamo och passerar därefter Ljungby innan den mynnar ut i Laholmsbukten vid Laholm. Lagan är 244 km lång och medelvattenföringen i ån är 82 m³/s (Nationalencyklopedin, 2013a). Lagan är ett kraftigt reglerat vattendrag och i princip helt utnyttjad för vattenkraft (Vattenmyndigheterna, 2009).

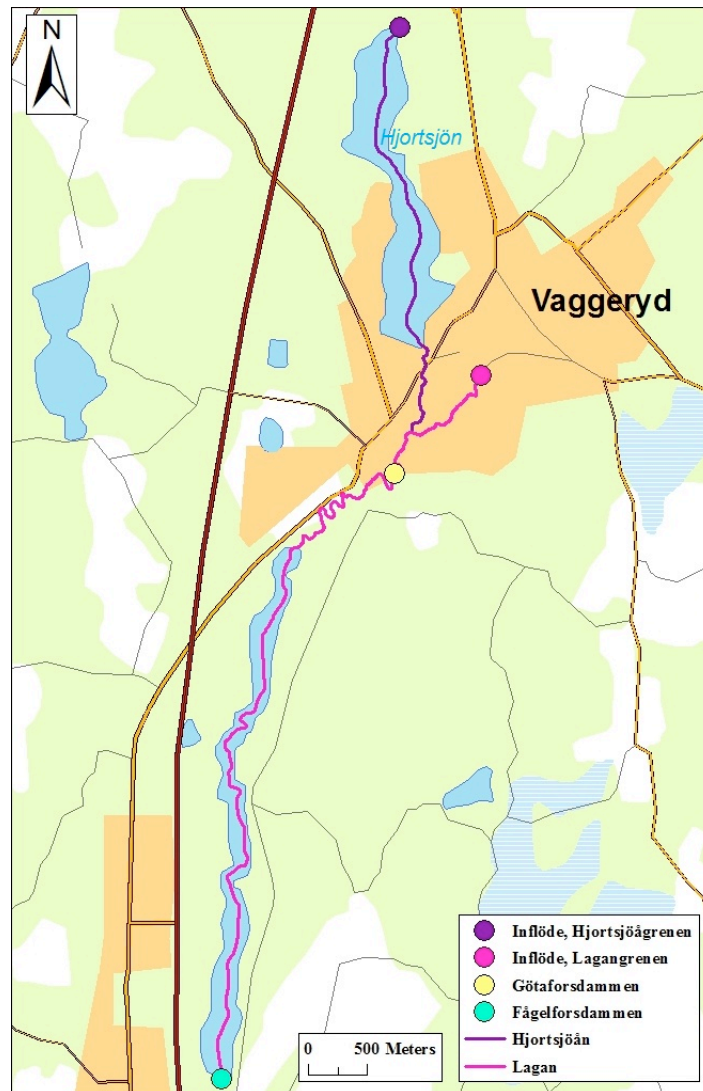
I detta examensarbete upprättades hydrauliska modeller över två specifika områden (figur 5), en delsträcka av Övre Lagan samt en del av Bolmån som avvattnar sjön Bolmen och är Lagans största tillflöde (Nationalencyklopedin, 2013b).



Figur 5. De två områden som studerades i detta examensarbete och deras lokalisering i Sverige. ©Lantmäteriet, medgivande i2012/921.

3.2.1 Övre Lagan

Topografiskt sett tillhör de övre delarna av Lagan Sydsvenska höglandet (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2005). Den del av Lagan som studerades ligger i Småland och sträcker sig från Vaggeryd tätort i norr till Fågelforsdammen i söder och har en längd av drygt åtta kilometer. Den hydrauliska modellen omfattade även Hjortsjön och Hjortsjöån som är ett tillflöde till Lagan (figur 6).



Figur 6. Den rosa linjen visar den delsträcka av övre Lagan som studerades och den lila linjen markerar Hjortsjön och Hjortsjöån som också omfattades av den hydrauliska modellen. ©Lantmäteriet, medgivande i2012/921.

Den del av Lagan som studerades har svag lutning och domineras av lugnflytande sträckor (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2005). Götaforsdammen ligger i den södra delen av Vaggeryd samhälle och dammen utgör en trång sektion där vattnet måste passera genom två utskovsluckor vardera av bredden 1,4 meter (Larsson, pers. kom., 2013). Nedströms Götaforsdammen har Lagan genom erosion skapat raviner och ån slingrar sig fram genom landskapet. Lagans botten utgörs till största delen av sand men det finns även vissa områden där botten domineras av grus och större stenar (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2005). I vissa delar av vattendraget, främst nedströms Götaforsdammen, begränsar grenar och omkullfallna träd vattenflödet (figur 7). Knappt en och en halv kilometer söder om Götaforsdammen mynnar Lagan ut i Fågelforsdammens magasin.



Figur 7. Lagan upp- respektive nedströms Götaforsdammen. Foto: Lisa Carlsson, 2013.

Fågelfors kraftverk byggdes år 1912 och ägs idag av Vattenfall AB. Anläggningen består av en regleringsdamm med tillhörande kraftverk (Svensk Energi, 2011). Fågelforsdammens magasin utgörs av en lokal uppdämning av Lagan och har en area av 0,78 km². Fågelforsdammen tillhör flödesdimensioneringsklass II (VEGAB Vattenenergi AB, 2005). I dagsläget pågår dock en omprövning av dammens flödesdimensioneringsklass på grund av Fågelforsdammens närhet till E4:an.

Hjortsjön ligger i den västra delen av Vaggeryd tätort (figur 8). Sjön har en area av 1,05 km² och medeldjupet är 4,5 meter. Hjortsjön binds samman med Lagan genom Hjortsjöån (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2011a). Hjortsjöån är endast 800 m lång och flyter lugnt genom Vaggeryd tätort innan den mynnar ut i övre Lagan några hundra meter uppströms Götaforsdammen. Åns botten består uteslutande av sand (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2005).

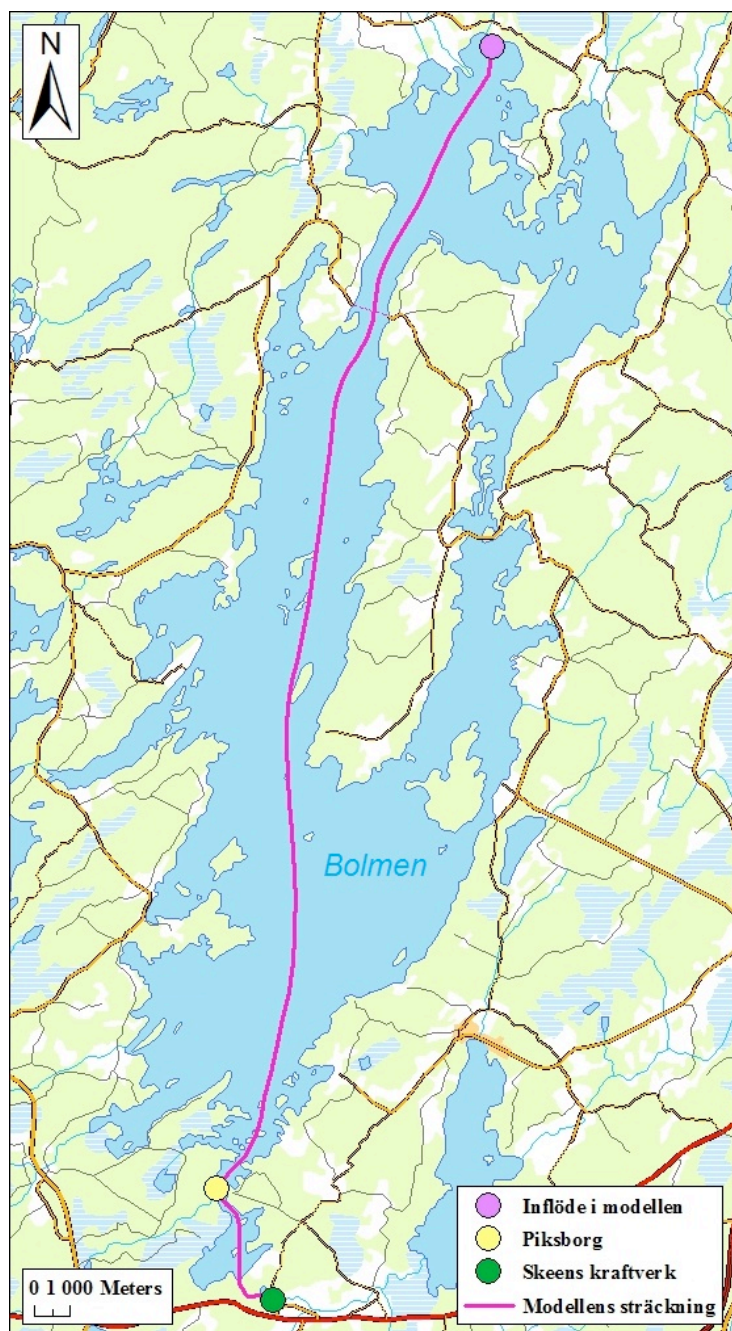


Figur 8. Den vänstra bilden visar Hjortsjön, fotot är taget med blicken vänd söderut. Den högra bilden visar Hjortsjöån, Hjortsjön kan skymtas i bakgrunden. Foto: Lisa Carlsson, 2013.

3.2.2 Bolmån

Bolmån är Lagans största tillflöde. Ån avvattnar sjön Bolmen som är den största sjön i Lagans huvudavrinningsområde (Nationalencyklopedin, 2013b). Bolmen har en area av 183 km² och medeldjupet är 5,4 meter (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2011b).

Den hydrauliska modell som sattes upp för Bolmån omfattar sjön Bolmen och den del av Bolmån som rinner mellan Bolmens utlopp och Skeens kraftverk. Vattendragssträckan mellan sjön och vattenkraftverket är ungefär en kilometer lång (figur 9).



Figur 9. Den rosa linjen visar den hydrauliska modellens sträckning genom sjön Bolmen och Bolmåns kanaler fram till Skeens kraftverk. ©Lantmäteriet, medgivande i2012/921.

Mellan Bolmen och Skeens kraftverk utgörs Bolmån av två grävda kanaler, ca 20 respektive 25 meter breda. Kanalerna kantas av tät vegetation och stenar. I den vänstra kanalen – sett i vattnets flödesriktning – ligger flera omkullfallna träd över vattendraget (figur 10). I båda kanalerna finns ålfiskeanläggningar (Driftpersonal Statkraft, pers. kom., 2013b). Ålfiskeanläggningarna utgörs av två metallkonstruktioner som löper över kanalerna och möjliggör övergång av kanalerna till fots. Knappt tre kilometer uppströms kanalerna vid Piksborg finns en gammal järnvägsbro som löper över sjön Bolmen. Broöppningen är ungefär 40 meter bred och utgör, precis som kanalerna, en förträngning som kan hindra vattnets framfart.



Figur 10. Den vänstra respektive den högra kanalen sett i vattnets flödesriktning. Dessa kanaler representerar Bolmån på sträckan mellan sjön Bolmen och Skeens kraftverk. Foto: Lisa Carlsson, 2013.

Skeens kraftverk byggdes år 1954 och ägs idag av Statkraft Sverige AB. Vattenkraftverket ligger i samhället Skeeen ungefär 18 kilometer sydväst om Ljungby. Dammens magasin utgörs i huvudsak av sjön Bolmen och magasinet har en volym av $240 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Svensk Energi, 2009). Dammen är konsekvensklassificerad enligt *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS* och tillhör flödesdimensioneringsklass II (Statkraft, 2010).

3.3 TERRÄNGMODELLERNA

För att kunna upprätta en hydraulisk modell krävs god kännedom om terrängen, dels kring, men även i det studerade vattendraget. Genom att skapa en terrängmodell som innefattar både vattendragets batymetri och topografin i området kring vattendraget erhålls ett underlag som sedan kan användas vid de hydrauliska beräkningarna.

3.3.1 Höjddata

För både Övre Lagan och Bolmån fanns Lantmäteriets nya nationella höjdmodell att tillgå, en höjdmodell bestående av högupplöst höjddata inhämtad med flygburen laserskanning. Höjdmodellen som Lantmäteriet tillhandahöll hade en noggrannhet av 0,5 meter i höjddled i ett grid med rutstorleken 2×2 meter (Lantmäteriet, 2013).

Vid flygburen laserskanning mäts avstånd genom att laserpulser skickas ut från en sensor. Laserpulsen studsar mot byggnader, mark- eller vattenyta och tiden det tar för pulsen att återvända till sensorn registreras. Eftersom ljusets hastighet är känd kan avståndet till objekten på marken beräknas (Lantmäteriet, 2009). Det faktum att laserpulserna studsar mot vattenytor innebär att Lantmäteriets höjdmodell bara innefattar information om terrängen ovan den nivå som vattenytan låg på vid skanningstillfället. Höjdmodellen gav följaktligen inte någon information om vattendragens batymetri.

3.3.2 Inmätning av vattendragens batymetri

För att kunna skapa en fullständig terrängmodell som omfattade både terrängen kring vattendragen och vattendragens batymetri genomfördes ett fältbesök till Övre Lagan och Bolmån under vilket en rad mätningar utfördes (bilaga C).

Övre Lagan

Uppströms Götaforsdammen mättes bottennivån i Hjortsjöån och Lagan på fyra ställen (figur 11). Vid tre av de fyra platserna fastställdes vattendragens bottennivå i m ö.h. genom att mäta det vertikala avståndet från en punkt med känd höjd – enligt laserskannad höjddata – ned till vattendragens botten.



Figur 11. Platserna där djupmätningarna utfördes. Vid punk 1, 2 och 3 utfördes djupmätningarna från broar med hjälp av en latta. I området kring punkt 4 utfördes djupmätningarna med hjälp av vadarstövlar och en latta. ©Lantmäteriet, medgivande i2012/921.

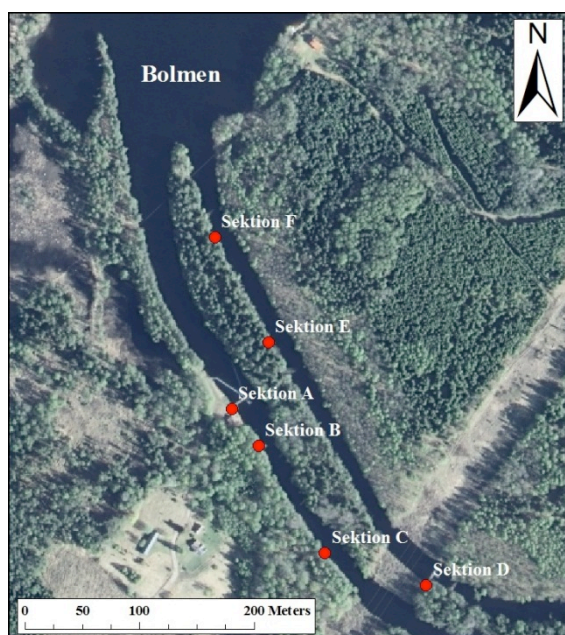
Längs sträckan nedströms Götaforsdammen och fram till Fågelforsdammens magasin är Lagan väldigt smal och grund. Vidare fanns, utmed denna vattendragssträcka, inte några punkter med känd höjd att utgå ifrån när bottennivån skulle fastställas. Till följd av detta mättes istället vattendjupet mitt i vattendraget (figur 11) och bottennivån i m ö.h. kunde fastställas genom att subrahiera vattendjupet från vattenytans nivå enligt den laserskannade höjddatan.



Figur 12. Mätning av vattendjupet i Lagan nedströms Götaforsdammen. Djupmätningarna utfördes mitt i vattendraget med hjälp av en latta och vadarstövlar. Foto: Joakim Holmbom, 2013.

Bolmån

I kanalerna mellan sjön Bolmen och Skeens kraftverk mättes sex tvärsektioner in, tre i vardera kanalen. För att tvärsektionerna på bästa sätt skulle beskriva kanalerna utfördes djupmätningarna där kanalerna ändrade form eller där det fanns hydrauliska strukturer. Kanalernas djup omöjliggjorde djupmätningar med vadarstövlar. Två av tvärsektionerna, sektion A och D (figur 13), mättes från ålfiskeanläggningar som löper över kanalerna och de övriga fyra, sektion B, C, E och F, uppmättes från gummibåt (figur 13).



Figur 13. Markeringar som visar var inmätningarna av tvärsektionerna utfördes. Sektion A och D mättes från ålfiskeanläggningar som löper över kanalerna. Sektion B, C, E och F mättes från gummibåt. ©Lantmäteriet, medgivande i2012/921.

Ålfiskeanläggningarna är metallkonstruktioner som löper över båda kanalerna. Från dessa metallkonstruktioner utfördes djupmätningarna med hjälp av en latta och ett lod (figur 14). I den högra kanalen var vattnet relativt strömt vilket resulterade i att lodet inte hängde lodrät. För att korrigera för detta mättes vinkeln mellan lodet och metallkonstruktionens sida och det lodräta avståndet till vattendragets botten kunde därmed fastställas.



Figur 14. Inmätning av tvärsektion D belägen i den vänstra kanalen. Foto: Joakim Holmbom, 2013.

Djupmätningar från gummibåt genomfördes på två ställen i vardera kanalen. För att kunna genomföra mätningarna från gummibåten spändes ett rep mellan två träd på vardera sidan om kanalen. Vattnet i kanalerna strömmade relativt snabbt och repet gjorde att båten kunde hållas stilla på samma plats så att mätningarna kunde genomföras (figur 15). Vattenströmningen i den högra kanalen ställde till problem även vid djupmätningarna från gummibåten. Lodet som användes för att fastställa vattendjupet hängde inte lodrätt och eftersom vinkeln var svår att mäta från båten gjordes antagandet att lodet hängde med samma vinkel som vid djupmätningarna från ålfiskeanläggningen.



Figur 15. Denna bild visar inmätningen av tvärsektion C belägen i den högra kanalen. Djupmätningarna utfördes från gummibåt med hjälp av ett lod. Foto: Lisa Carlsson, 2013.

3.3.3 Terrängmodell i ArcGIS

Terrängmodellerna skapades i ArcGIS, ett datorprogram som används för att samla in, bearbeta och analysera geografisk information (ESRI, 2013a). Lantmäteriets höjdmodell gjordes om till punkter med hjälp av funktionen *Raster to Point*, där varje datapunkt representerade ett höjdvärde. ArcGIS funktion *Selection by Location* gjorde det möjligt att välja de datapunkter som låg inom vattendragen. Genom att ändra höjdvärdet hos dessa punkter skapades terrängmodeller som omfattade topografin kring vattendragen såväl som vattendragens batymetri.

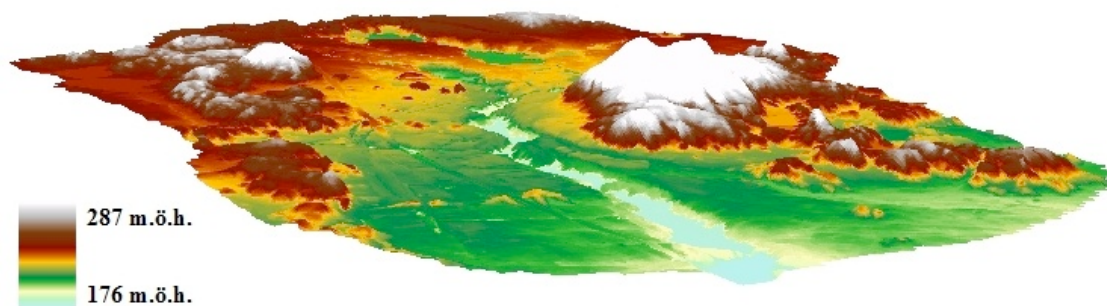
Övre Lagan

Hjortsjön utgör en stor del av det studerade området vid Övre Lagan. För Hjortsjön fanns inga djupkurvor att tillgå. Bottennivån i Hjortsjön fastställdes genom att subtrahera sjöns medeldjup från vattenytans nivå vid tillfället för Lantmäteriets laserskanning. För att fastställa bottennivån i Lagan och Hjortsjöån studerades LAS-punkterna i området. LAS-punkterna är de enskilda datapunkter som erhålls från laserskanningen. Från LAS-punkterna kunde broarnas och vattenytans nivå i m ö.h. fastställas och utifrån dessa nivåer kunde bottennivåerna beräknas. Bottennivån vid Götaforsdammen antogs ligga på samma nivå som utskovens tröskeldjup, vilket enligt Larsson (pers. kom., 2013) uppgår till 1,1 meter vid normalvattenstånd. Vattendragets

bottennivå i m ö.h. beräknades även här med hjälp av höjdvärdena i LAS-filen.

Under antagandet att vattennivån vid fältbesöket låg på ungefär samma nivå som vid tillfället för Lantmäteriets laserskanning minskades samtliga datapunkters höjdvärde, längs sträckan mellan Lagangrenens övre rand (figur 6) och Götaforsdammen, med medeldjupet av djupmätningarna vid dammen och bron vid den övre randen. Nedströms Götaforsdammen och fram till Fågelforsdammens magasin minskades datapunkternas höjdvärde med medelvärdet av djupmätningarna som utfördes med vadarstövlar och latta. Även detta gjordes under antagandet att vattenytan låg på ungefär samma nivå vid fältbesöket som vid skanningstillfället. Bottennivån i Fågelforsdammens magasin kunde bestämmas genom att subtrahera magasinets medeldjup från vattenytans nivå. Magasinets medeldjup beräknades utifrån magasinets area och maximal frisläppt volym vid dammbrott. Magasinets area och maximal frisläppt volym kunde utläsas ur Kraftindustrins dammregister (Svensk Energi, 2011).

När samtliga datapunkter i Hjortsjön, Hjortsjöån, Lagan och Fågelforsdammens magasin hade redigerats kunde punkterna omvandlas tillbaka till ett raster genom funktionen *Topo to Raster* i ArcGIS. Topo to raster är en interpolationsmetod anpassad för att skapa digitala terrängmodeller som skall användas vid hydrologiska och hydrauliska beräkningar (ESRI, 2013b). Terrängmodellen omfattade väldigt många datapunkter och för att kunna skapa ett raster delades området in i fem delområden inom vilka punkterna omvandlades separat. Delområdena sattes sedan ihop med ArcGIS funktion *Mosaic to New Raster*. Det slutgiltiga rastrets gridstorlek valdes till 2 meter, vilket innebär att terrängmodellen består av ett rutnät med 2×2 meter stora rutor där varje ruta representeras av ett höjdvärde. I figur 16 åskådliggörs den fullständiga terrängmodellen för områden kring Övre Lagan.



Figur 16. Den fullständiga terrängmodellen för området kring Övre Lagan. I denna figur är den vertikala höjdskillnaden kraftigt överdriven för att tydligare åskådliggöra höjdskillnaderna i området.

Bolmån

Vid skapandet av terrängmodellen för Bolmån var gridstorleken tvungen att ändras från 2×2 meter till 5×5 meter, eftersom området är av en sådan omfattning att antalet datapunkter blev för stort att hantera i den version av ArcGIS som användes. Vidare delades området in i fem delområden som bearbetades separat för att undvika hantering av alltför stora datamängder. Även i detta fall användes Lantmäteriets höjdmodell som

grund vid skapandet av terrängmodellen. Höjdvärdena i de punkter som representerade landområdet lämnades oförändrade. Endast datapunkterna inom sjön Bolmen, Bolmån och Skeendammens magasin redigerades.

För sjön Bolmen fanns färdiga digitaliserade djupkurvor och djuppunkter att tillgå. Ekvidistansen mellan djupkurvorna var fem meter och den första djupkurvan representerade djupet 135,5 m.ö.h. För magasinet vid Skeens kraftverk fanns inga färdiga digitaliserade djupkurvor. En inskannad djupkarta över magasinet fanns dock att tillgå. Djupkartan exporterades till ArcGIS varvid djupkurvorna sedan kunde kalkeras och tilldelas respektive höjdvärde. För Skeens magasin skapades sju djupkurvor med ekvidistansen en meter.

För att få en bra övergång mellan mark- och bottennivå skapades en så kallad bufferlinje. Detta var särskilt viktigt i stora delar av sjön Bolmen där de första djupvärdena representerades av djupkurvan vid fem meters djup. Linjen placerades fem meter innanför strandlinjen och tilldelades höjdvärdet 140 m ö.h.

Datapunkterna i kanalerna redigerades efter de i fält uppmätta vattendjupen. Bottennivåerna kunde fastställas genom att subtrahera de uppmätta vattendjupen från den rådande vattennivån vid tiden för fältbesöket. Vid fältbesöket mättes vattendjupet vid åtta punkter utmed varje tvärsektion. Eftersom kanalerna hade relativt konstant djup definierades endast tre punkter vid varje tvärsektion i terrängmodellen, en punkt som representerade djupet i mitten av kanalen och en på vardera sidan om denna.

När samtliga datapunkter hade redigerats kunde punkterna omvandlas till ett raster med hjälp av funktionen *Topo to Raster*. Varje delområde omvandlades för sig och sammanfogades därefter med hjälp av funktionen *Mosaic to New Raster*. Det slutgiltiga rastrets gridstorlek valdes till fem meter, vilket innebär att terrängmodellen består av ett rutnät med 5×5 meter stora rutor där varje ruta representeras av ett höjdvärde.

3.4 DIMENSIONERANDE FLÖDE

SMHI har tagit fram det dimensionerande flödet – det vill säga klass I-flödet – för Fågelforsdammen och Skeendammen enligt 2007 års nyutgåva av *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöde för dammanläggningar*. Det dimensionerande flödet kan avse både tillrinning och avbördning. För dammanläggningar är det emellertid oftast den dimensionerande tillrinningen som är intressant eftersom denna talar om vilken effekt utskovskapaciteten har på det dimensionerande vattenståndet i magasinet och således även dammsäkerheten (Losjö, pers. kom., 2013). För Fågelforsdammen och Skeendammen avser det dimensionerande flödet tillrinningen till dammanläggningarna vilken är modellerad med HBV-modellen, version IHMS 6.2 (Losjö, pers. kom., 2013).

3.4.1 Dimensionerande flöde för Fågelforsdammen

Vid SMHI:s beräkning av det dimensionerande flödet för Fågelforsdammen fanns inte några data att kalibrera modellen mot, varken vattenföring, Q , eller vattennivå, h . Modellen är därför kalibrerad med hjälp av data från SMHI:s mätstation Fryele i Härån,

ett vattendrag som angränsar till Lagan och rinner genom samhället Hok öster om Vaggeryd. Det fanns således inte heller några data att verifiera modellen mot, det är därför endast verifierat att de för Fågelforsdammen högsta simulerade flödestopparna ter sig rimliga i förhållande till de vattenflöden som uppmätts vid mätstationen Fryele. Värdet på tillrinningstoppen är därför inte lika säkert som om det hade funnits kalibreringsdata att tillgå, dock bedöms storleken på flödestoppen rimlig vid jämförelse med andra dimensioneringsberäkningar som utförts (Losjö, pers. kom., 2013). Klass I-tillrinningshydrografen för Fågelforsdammen är en 30 dagar lång tidsserie där det maximala flödet uppstår dag 16 och uppgår till 138,2 m³/s (figur D1, bilaga D).

3.4.2 Dimensionerande flöde för Skeens kraftverk

SMHI:s beräkningar av det dimensionerande flödet för Skeendammen är utförda under antagandet att dammen ligger vid Bolmens utlopp. Skeendammen ligger i själva verket ungefär en kilometer nedströms Bolmens utlopp. Anledningen till att SMHI inte tog hänsyn till kanalerna mellan Bolmen och Skeens kraftverk var att det saknades information om dessa vilket gjorde att kanalerna inte kunde modelleras med HBV-modellen. Modellen är kalibrerad med data över vattennivån i Bolmen och tappningen vid Skeens kraftverk (Losjö, pers. kom., 2013). Klass I-tillrinningshydrografen för Skeendammen är en 30 dagar lång tidsserie där det maximala flödet uppstår dag 14 och uppgår till 703,0 m³/s (figur D2, bilaga D).

3.5 MOTIVERING AV VALET AV HYDRAULISK MODELL

Vid val av hydraulisk modell är det viktigt att ta hänsyn till flödeskaraktistiken i det vattendrag som skall studeras. Modellerna kan vara en-, två- eller tredimensionella. Tredimensionella modeller har visat ge sämre resultat än en- eller tvådimensionella modeller och används främst inom forskning där begränsade områden studeras (Brandt, 2009). Endimensionella modeller används där flödet är väldefinierat och har en distinkt flödesriktning. Tvådimensionella modeller nyttjas i komplicerade flodsystem där det exempelvis finns öar, många förgreningar eller hydrauliska strukturer (Schumann, 2011). Nackdelen med tvådimensionella modeller är att de ofta blir tungkörda på grund av att de kräver stora datamängder. Endimensionella modeller kräver inte lika mycket data som de tvådimensionella modellerna. Vidare har jämförelser visat att de endimensionella modellerna ger resultat i paritet med de tvådimensionella vid vattendragssimuleringar (Brandt, 2009).

I de två områden som studerades i detta examensarbete ansågs flödet vara av sådan karaktär att en endimensionell modell var ett bra verktyg för att simulera vattenflödet i de båda vattendragen. Vidare beaktades fördelen att endimensionella modeller inte är lika beräkningstunga som tvådimensionella modeller samt att de ofta ger lika bra resultat som de tvådimensionella modellerna. Som en följd av detta upprättades de hydrauliska modellerna i det endimensionella modelleringsprogrammet MIKE 11.

3.6 UPPRÄTTANDE AV DE HYDRAULISKA MODELLERNA I MIKE 11

Första steget vid upprättandet av de hydrauliska modellerna i MIKE 11 var att skapa ett *River Network* där vattendragen kunde studeras både grafiskt och i tabellform. För att definiera de hydrauliska modellernas sträckning skapades så kallade *Polylines* i ArcGIS. Vattenpolygoner som visar sjöarna och vattendragens utbredning användes som underlag och linjerna ritades så att de följde vattnets huvudsakliga flödesriktning. Linjerna exporterades därefter från ArcGIS till MIKE 11.

Den hydrauliska modellen för Övre Lagan utgjordes av två grenar, Lagan som kommer in i Vaggeryd från nordost och Hjortsjön som rinner in i Vaggeryd norrifrån via Hjortsjön. Den hydrauliska modellen för Bolmån bestod även den av två grenar, en huvudgren som rinner söderut via sjön Bolmen mot Skeens kraftverk och en mindre gren som utgjorde den vänstra av de båda kanalerna mellan Bolmen och Skeendammen. De skapade vattendragsnätverken utgjorde stommen i de hydrauliska modellerna. För att kunna genomföra de hydrauliska modellsimuleringarna i MIKE 11 krävdes vidare att randvillkor, tvärsektioner, hydraulisk resistans, tidssteg samt simuleringsperiod specificerades.

3.6.1 Randvillkor

För området uppströms Fågelforsdammen hade SMHI inte utfört några beräkningar av klass I-tillrinningen. I den hydrauliska modellen för Övre Lagan areakorrigerades därför SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf för Fågelforsdammen och de areakorrigerade klass I-tillrinningshydrograferna utgjorde randvillkor vid modellens två övre ränder, Hjortsjön och Lagan (figur 6). Areakorrigerad är en approximativ metod och den areakorrigerade klass I-tillrinningen är därför inte ett korrekt dimensionerande flöde. Enligt Losjö (pers. kom., 2013) var dock de areakorrigerade klass I-tillrinningshydrograferna så pass tillförlitliga att de kunde användas som randvillkor vid de hydrauliska modellsimuleringarna. Vidare ansåg Losjö (pers. kom., 2013) att det inte fanns skäl att utföra mer noggranna beräkningar då det inte fanns någon verifieringsdata att tillgå för den delsträcka av Lagan som studerades.

Avrinningsområdenas area togs fram med hjälp SMHI:s Internettjänst Vattenwebb, en hemsida där information rörande Sveriges kust- och sötvatten finns tillgänglig (SMHI, 2013a). De areakorrigerade klass I-tillrinningshydrograferna beräknades därefter enligt ekvation (2).

$$Q_{areakorrigerad} = \frac{A_{del}}{A_{total}} Q_{dimensionerande} \quad (2)$$

där

$Q_{areakorrigerad}$ = areakorrigerad klass I-tillrinning (m^3/s)

A_{del} = delavrinningsområdets area (km^2)

A_{total} = arean på Fågelforsdammens avrinningsområde (km^2)

$Q_{dimensionerande}$ = klass I-tillrinningshydrograf för Fågelforsdammen (m^3/s)

Förutom de två uppströms ränderna definierades ytterligare tre randvillkor i den hydrauliska modellen för Övre Lagan, två punktkällor där biflödena Stödtorpaån och Duveledbäck möter Lagan samt nedströms randvillkor. Nedströms randvillkor sattes till Fågelforsdammens dämningssgräns, vilken uppgår till 185,55 m ö.h. (Svensk Energi, 2011). Biflödenas areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografer togs fram på samma sätt som klass I-tillrinningshydrograferna för den hydrauliska modellens uppströms ränder (ekvation 2). Samtliga areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografer återfinns i figur D1 i bilaga D.

De trånga sektionerna som studerades i den hydrauliska modellen över Bolmån ligger strax uppströms Skeens kraftverk. Till följd av detta användes SMHI:s beräknade dimensionerande klass I-tillrinningshydrograf för Skeendammen som uppströms randvillkor i modellen (figur D2, bilaga D) och areakorrigering var således inte nödvändig i detta fall.

Nedströms randvillkor i den hydrauliska modellen för Bolmån utgjordes dels av Skeendammens dämningssgräns, vilken uppgår till 141,9 m ö.h. (Svensk Energi, 2009), dels av kraftverkets avbördningskurva (figur 17). Ekvation 3 beskriver avbördningen när vattennivån ligger mellan dämningssgränsen och dammens tättkärna och ekvation 4 beskriver avbördningen när vattennivån ligger mellan tättkärnans övre kant och dammkrönet (Losjö, pers. kom., 2013).

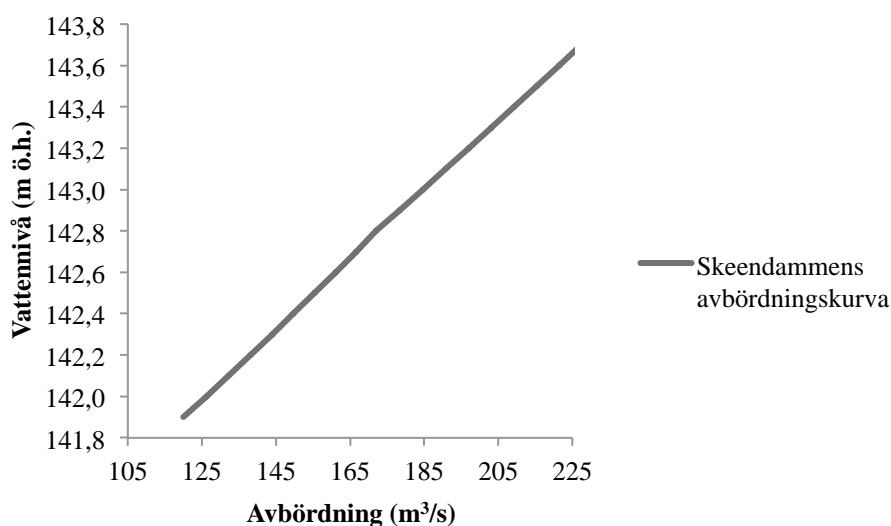
$$Q = 94,04355(h - 140,5)^{0,725} \quad (3)$$

$$Q = 84,991(h - 140,5)^{0,84637} \quad (4)$$

där

Q = vattenföring (m³/s)

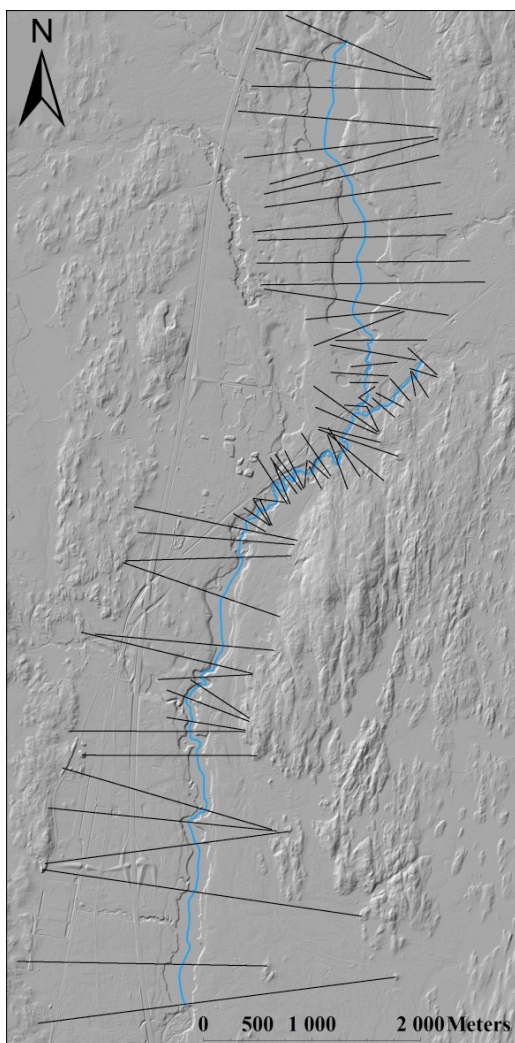
h = vattennivå (m ö.h.)



Figur 17. Skeendammens avbördningskurva. Brytpunkten i avbördningskurvan, vid vattennivån 142,8 m ö.h., beror på att avbördningen beskrivs av två olika ekvationer, en som beskriver avbördningen när vattennivån ligger mellan dämningssgränsen och dammens tättkärna och en som beskriver avbördningen när vattennivån ligger mellan tättkärnans övre kant och dammkrönet.

3.6.2 Tvärsektioner

Tvärsektioner skall som tidigare nämnts väljas så att de på bästa sätt beskriver vattendraget. Antalet tvärsektioner som definieras i en hydraulisk modell bestäms alltså av hur vattendraget ser ut. För att beskriva vattendragen i den hydrauliska modellen för Övre Lagan definierades 46 tvärsektioner i Lagangrenen och 23 tvärsektioner i Hjortsjöågrenen (figur 18). I den hydrauliska modellen för Bolmån användes 39 tvärsektioner för att beskriva vattendraget.



Figur 18. De svarta strecken i bilden representerar de tvärsektioner som definierades i den hydrauliska modellen för Övre Lagan.

Tvärsektionerna skapades i ArcGIS. Vid skapandet av tvärsektionerna användes de båda studieområdenas respektive terrängmodell som underlag. Sektionerna drogs från vänster till höger i vattnets flödesriktning, vidare placerades de vinkelrätt mot vattnets flödesriktning. I ArcGIS mättes avståndet från modellens övre rand till samtliga tvärsektioner. På så vis kunde tvärsektionerna placeras på rätt plats i nätverket i MIKE 11. Rådata, det vill säga tvärsektionernas x - och z -koordinater, exporterades därefter från ArcGIS till MIKE 11.

Vid skapandet av terrängmodellen för Bolmån förenklades beskrivningen av kanalerna till att endast omfatta tre djupvärden i respektive tvärsektion. För att så korrekt som möjligt beskriva kanalernas batymetri redigerades därför tvärsektionerna i MIKE 11 och samtliga av de djupvärden som mättes upp i fält lades in. Tvärsektionen vid järnvägsbron i Piksborg redigerades på samma sätt.

3.6.3 Hydrauliska strukturer

I den hydrauliska modellen för Övre Lagan var den trånga sektionen vid Götaforsdammen tvungen att specificeras. Götaforsdammen består av en 7,4 meter bred överfallsdamm samt två utskovsluckor med en bredd av 1,4 meter vardera och ett tröskeldjup på 1,1 meter vid normalt vattenstånd (Larsson, pers. kom., 2013). Dammen utgör en hydraulisk struktur och definierades som en *Broad Crested Weir* i MIKE 11. Götaforsdammen lokaliserades med hjälp av ett Ortofoto över det studerade området. En tvärsektion drogs längs med dammen i den skapade terrängmodellen och rådata

exporterades därefter från ArcGIS till MIKE 11. För att ta hänsyn till överfallsdammen och utskovsluckornas geometri ändrades tvärsektionens z-koordinater.

3.6.4 Hydraulisk resistans

För att beskriva vattendragens hydrauliska resistans användes Mannings tal. Det är möjligt att välja Mannings tal så att värdet är globalt – det vill säga samma i hela modellen – eller lokalt. Vidare kan vattendragets tvärsektioner delas in tre zoner, där zonerna exempelvis representerar vattendragets vegetationsfria botten samt vattendragets kanter där det ofta finns växtlighet (DHI, 2012d). I de hydrauliska modellerna som upprättades användes *Uniform Approach*, vilket innebar att värdet på Mannings tal var detsamma längs hela de studerade vattendragssträckorna.

Övre Lagan

För Övre Lagan fanns ingen flödes- eller vattenståndsdata att tillgå och det var således inte möjligt att bestämma värdet på Mannings tal genom modellkalibrering. Vid fältbesöket studerades vattendragets botten och omgivning i den mån det var möjligt för att underlätta fastställandet av Mannings tal. För att kunna välja ett så korrekt värde på Mannings tal som möjligt användes USGS:s dokument *Surface Water Field Techniques – Verified Roughness Characteristics of Natural Channels* (2001) till hjälp. I detta dokument visas bilder på olika naturliga vattendrag och deras respektive Mannings tal anges. Vidare användes även *Applied Hydrology* (Chow *m.fl.*, 1988) som underlag för att finna de Mannings tal som bäst beskriver vattendraget.

Bolmån

Mannings tal för Bolmån uppskattades genom att modellen kalibrerades med hjälp av data över vattenföring och vattenstånd, se avsnitt 3.9.2.

3.6.5 Parametervärden

I MIKE 11 finns en rad parametrar som kan specificeras av användaren. Alla dessa lämnades som standardvärden, förutom Delta. Delta är en parameter som påverkar stabiliteten och värdet på Delta ändrades från 0,5 till 0,7 eftersom ett högre värde på Delta ofta leder till ökad numerisk stabilitet (DHI, 2012b).

3.7 SIMULERING MED DE HYDRAULISKA MODELLERNA

Simuleringarna med de båda hydrauliska modellerna genomfördes med simuleringsperioden 30 dygn, det vill säga samma tidsperiod som SMHI:s beräknade flödesserier. Simuleringarna med modellen för Övre Lagan genomfördes med tidssteget fem sekunder och resultat sparades var tionde tidssteg. Simuleringarna med modellen för Bolmån utfördes med tidssteget en sekund för att undvika instabilitet. Valet av tidssteget en sekund baserades på att ett kortare tidssteg ofta ger stabilare simulering (DHI, 2012b). Resultat sparades i detta fall var trehundra tidssteg, det vill säga var femte minut.

3.7.1 Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan

Vid simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan användes dels hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf som indata dels 75 %, 50 % samt 25 % av tillrinningshydrografen som indata. På grund av avsaknad av flödes- respektive vattenståndsdata för den studerade vattendragssträckan kunde inte Mannings tal bestämmas genom modellkalibrering. Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan utfördes därför med två olika värden på Mannings tal, $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ respektive $M = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Detta gjordes för att undersöka hur värdet på Mannings tal påverkar flödesdämpningen. Nedströms randvillkor utgjordes av Fågelforsdammens dämpningsgräns vilken uppgår till 185,55 m ö.h.

3.7.2 Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Bolmån

Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Bolmån utfördes enligt tre olika scenarier: Scenario A, Scenario B samt Scenario C. För samtliga scenarier genomfördes simuleringarna dels med hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf för Skeendammen som indata dels med 75 %, 50 % samt 25 % av klass I-tillrinningshydrografen som indata. Värdet på Mannings tal var $16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ vid samtliga modellsimuleringar.

Vid Scenario A jämfördes flödet nedströms kanalerna med SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf vilket motsvarar de jämförelser som utfördes vid modellsimuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan. En stor skillnad studieområdena emellan ligger emellertid i lokaliseringen av de trånga sektionerna. I den hydrauliska modellen för Bolmån ligger de trånga sektionerna som kanalerna utgör nedströms sjön Bolmen och således sker den eventuella dämpningen nedströms Skeendammens huvudsakliga magasin. Det faktum att kanalerna är lokaliserade nedströms Bolmen medför att kanalerna utnyttjar samma magasin som Skeendammen för att dämpa flödet vilket resulterar i att det kan vara missvisande att jämföra flödet nedströms kanalerna som dämpats i sjön Bolmen med SMHI:s klass I-tillrinningshydrograf som beskriver flödet innan det dämpats av Skeendammens magasin.

Vid SMHI:s beräkningar av det dimensionerande flödet för Skeendammen har Skeendammens påverkan på vattenflödet tagits i beaktande medan de trånga sektionernas påverkan försumrats. Det faktum att Skeendammens påverkan tagits i beaktande medför att det dimensionerande flödet för Skeendammen inte är detsamma som klass I-tillrinningen. För att undersöka tillförlitligheten i det beräknade dimensionerande flödet och erhålla resultat som åskådliggör den flödesdämpning som sker på grund av de trånga sektionerna studerades därför även Scenario B och Scenario C. Genom att jämföra de modellerade flödeshydrograferna strax uppströms Skeendammen för Scenario B respektive Scenario C kunde de trånga sektionernas påverkan på vattenflödet bestämmas och det kunde fastställas huruvida de trånga sektionerna orsakade någon ytterligare flödesdämpning.

Scenario A

I Scenario A utfördes simuleringarna med en fast vattennivå som nedströms randvillkor. Nedströms randvillkor utgjordes av Skeendammens dämmningsgräns vilken uppgår till 141,9 m ö.h. En konstant vattennivå som nedströms randvillkor innebär att allt vatten kan avbördas utan att vattennivån höjs och således påverkas vattenflödet inte av Skeendammen.

Scenario B

I Scenario B togs hänsyn till hur både de trånga sektionerna och Skeendammen påverkade vattenflödet. Vid detta scenario utfördes modellsimuleringarna med Skeens kraftverks avbördningskurva som nedströms randvillkor.

Scenario C

I Scenario C försumrades Piksborgs och kanalernas inverkan på vattenflödet genom att den hydrauliska modellen förkortades och Skeendammen placerades vid sjön Bolmens utlopp. Vidare togs tvärsektionen vid Piksborg bort. Även vid dessa simuleringar utgjordes nedströms randvillkor av Skeens kraftverks avbördningskurva.

3.8 FLÖDESDÄMPNINGEN

Vid simuleringarna med de hydrauliska modellerna studerades den relativa dämpningen av flödestopparna (ekvation 4), det vill säga hur mycket det maximala flödet dämpades jämfört med inflödet i modellerna (figur 6 och 9).

$$D_{relativ} = 100 \cdot (Q_{in} - Q_{ut}) / Q_{ut} \quad (4)$$

där

$D_{relativ}$ = den relativa dämpningen av flödestoppen (%)

Q_{in} = inflödet i den hydrauliska modellen (m^3/s)

Q_{ut} = utflödet, det vill säga flödet nedströms de trånga sektionerna (m^3/s)

3.9 KALIBRERING AV DE HYDRAULISKA MODELLERNA

3.9.1 Övre Lagan

För den hydrauliska modellen för Övre Lagan saknades bra kalibreringsunderlag. SMHI har inga mätstationer utplacerade i denna del av Lagan och det fanns således ingen vattennivå- eller vattenföringsdata att tillgå. På grund av avsaknaden av data utfördes endast en förenklad kalibrering av den hydrauliska modellen för Övre Lagan.

Kalibreringen av modellen baserades på flödesdata från Lagans grannvattendrag Härån. Medelvattenföringen för SMHI:s station Fryele i Härån uppgår till $6,65 m^3/s$ (SMHI, 2013b) och det antogs att detta flöde ungefär motsvarar medelvattenföringen i den delsträcka av Lagan som studerades. Medelvattenföringen areakorrigerades och modellen simulerades med $2,905 m^3/s$ respektive $1,613 m^3/s$ som uppströms randvillkor i Lagan- respektive Hjortsjöågrenen (figur 6). Därefter studerades hurvida vattennivåerna i modellen låg på rimliga nivåer när dessa vattenflöden användes som indata i modellen. Rimliga vattennivåer antogs vara de nivåer som vattenytan låg på vid

tillfället för Lantmäteriets laserskanning av området.

3.9.2 Bolmån

Den hydrauliska modellen för Bolmån kalibrerades med hjälp av vattennivå- och vattenföringsdata som tillhandahölls av driftpersonal på Statkraft (pers. kom., 2013a). Dataserien omfattade tidsperioden 2007-01-01 till 2008-01-01. För att kalibrera modellen utfördes simuleringar med två olika konstanta vattenflöden som indata och konstanta vattennivåer som nedströms randvillkor. De vattenflöden som valdes var dels den högsta observerade vattenföringen under denna tidsperiod samt en – från vad som gick att utläsa ur dataserien – normal vattenföring. Storleken på vattenflödena uppgick till 81,98 m³/s respektive 37,56 m³/s. Vattennivåskillnaden som uppstod mellan sjön Bolmen uppströms kanalerna och Skeens magasin nedströms kanalerna jämfördes därefter med den observerade vattennivåskillnaden. Olika värden på Mannings tal, M , ansattes för att hitta det Mannings tal som medförde bäst överensstämmelse mellan modellerad och observerad vattennivåskillnad.

4 RESULTAT

4.1 KALIBRERINGSRESULTAT

4.1.1 Övre Lagan

Vid simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan då den areakorrigerade medelvattenföringen för SMHI:s mätstation Fryele användes som indata uppgick vattennivån strax uppströms Götaforsdammen till 193,98 m ö.h. Enligt LAS-filen uppgick vattennivån för samma område till 193,94 m ö.h. vid tillfället för Lantmäteriets laserskanning. Vattennivån strax uppströms Fågelforsdammen uppgick, enligt modellen, till 185,55 m ö.h. och enligt LAS-filen till 185,50 m ö.h. Följaktligen avvek de modellerade vattennivåerna från de uppmätta vattennivåerna med 4 respektive 5 cm.

4.1.2 Bolmån

Vid kalibreringen av den hydrauliska modellen för Bolmån utfördes modellsimuleringar med två olika inflöden samt olika värden på Mannings tal, M . Bästa överensstämmelse mellan modellerade och i verkligheten observerade vattennivåskillnader mellan området upp- och nedströms kanalerna uppstod då Mannings tal tilldelades värdet $16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Vid modellsimuleringen då ett konstant vattenflöde av storleken $81,98 \text{ m}^3/\text{s}$ användes som indata, nedströms randvillkor sattes till en konstant vattennivå, $h = 141,5675 \text{ m}$ ö.h., och Mannings tal tilldelades värdet $16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ uppgick vattennivån uppströms kanalerna till $141,9346 \text{ m}$ ö.h. Således var den modellerade vattennivåskillnaden $0,3671$ meter. Enligt mätdata var vattennivåskillnaden vid samma vattenföring $0,3648$ meter. Den modellerade vattennivåskillnaden avvek följaktligen från den observerade med $0,23$ centimeter.

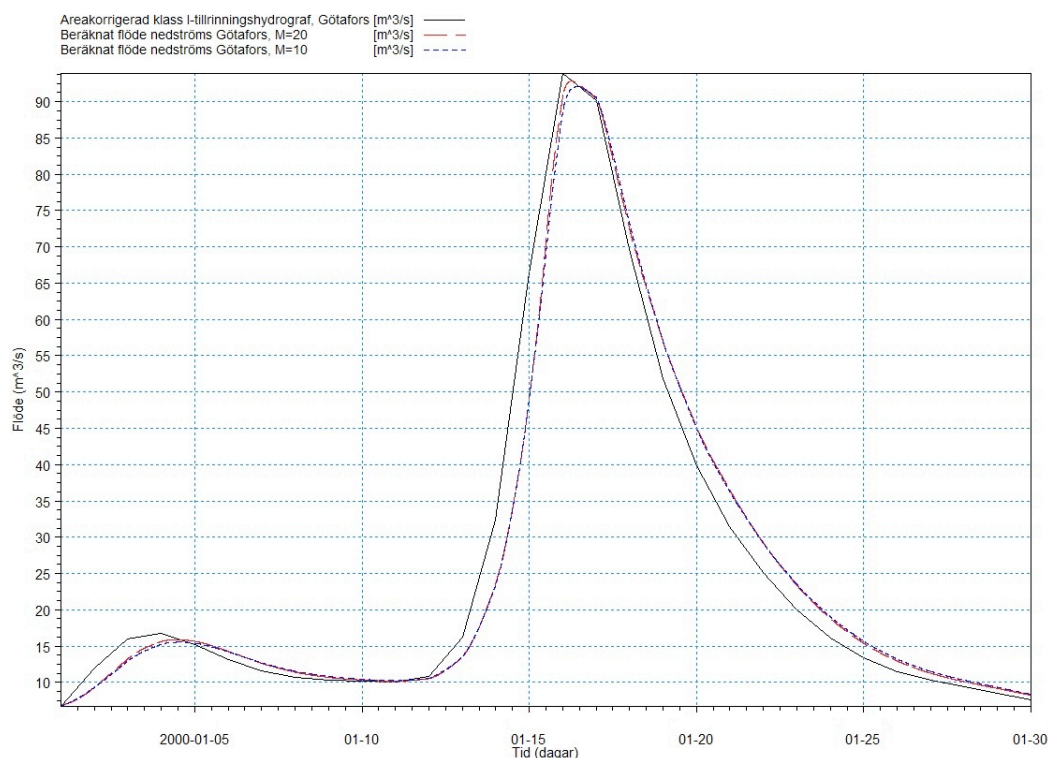
Vid modellsimuleringarna då ett konstant vattenflöde av storleken $37,56 \text{ m}^3/\text{s}$ användes som indata, nedströms randvillkor sattes till en konstant vattennivå, $h = 141,5675 \text{ m}$ ö.h., och Mannings tal tilldelades värdet $16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ uppgick vattennivån uppströms kanalerna till $141,7693 \text{ m}$ ö.h. Således var den modellerade vattennivåskillnaden $0,073$ meter. Enligt mätdata var vattennivåskillnaden vid samma vattenföring $0,080$ meter. Den modellerade vattennivåskillnaden avvek följaktligen från den observerade med $0,70$ centimeter.

4.2 ÖVRE LAGAN

4.2.1 Flödesdämpningen strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen

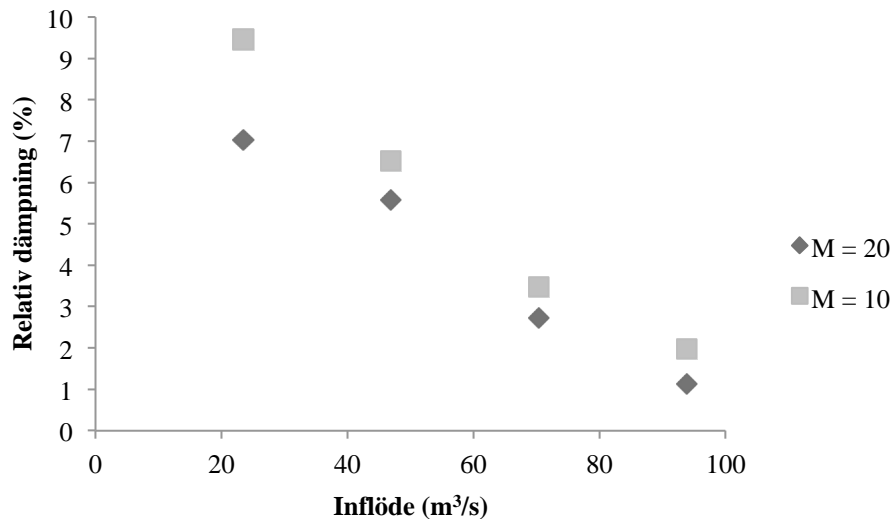
Då hela den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen för Lagan- respektive Hjortsjöågrenen användes som indata i den hydrauliska modellen och Mannings tal, M , tilldelades värdet $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ minskade det maximala flödet från $93,9 \text{ m}^3/\text{s}$ till $92,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Flödesdämpningen strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen uppgick således till $1,2 \%$. Vid modellsimuleringen med $M = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ uppgick det maximala flödet till $92,0 \text{ m}^3/\text{s}$ och flödesdämpningen var följaktligen $2,0 \%$. Vidare fördröjdes

flödestopparna och det maximala flödet inträffade drygt en halv dag senare jämfört med klass I-tillrinningshydrografen framtagen av SMHI (figur 19).



Figur 19. Jämförelse mellan det totala inflödet i den hydrauliska modellen, det vill säga den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen för Lagan- samt Hjortsjöågrenen, och modellerat flöde strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen. Den röda långstreckade grafen visar resultatet av modellsimuleringen med $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ och den blå kortstreckade grafen visar resultatet av modellsimuleringen med $M = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Flödesdämpningen strax nedströms Götaforsdammen minskade med ökad storlek på inflödet i den hydrauliska modellen. Den största relativa flödesdämpningen uppstod när 25 % av den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i modellen. Vid dessa simuleringar uppgick flödesdämpningen strax nedströms Götaforsdammen till 7,0 respektive 9,5 %. Vidare var den relativa dämpningen av flödestopparna större då ett lägre värde på Mannings tal användes (figur 20).



Figur 20. Den relativa dämpningen av flödestoppen strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen vid olika stora inflöden i den hydrauliska modellen samt olika värden på Mannings tal, M ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$).

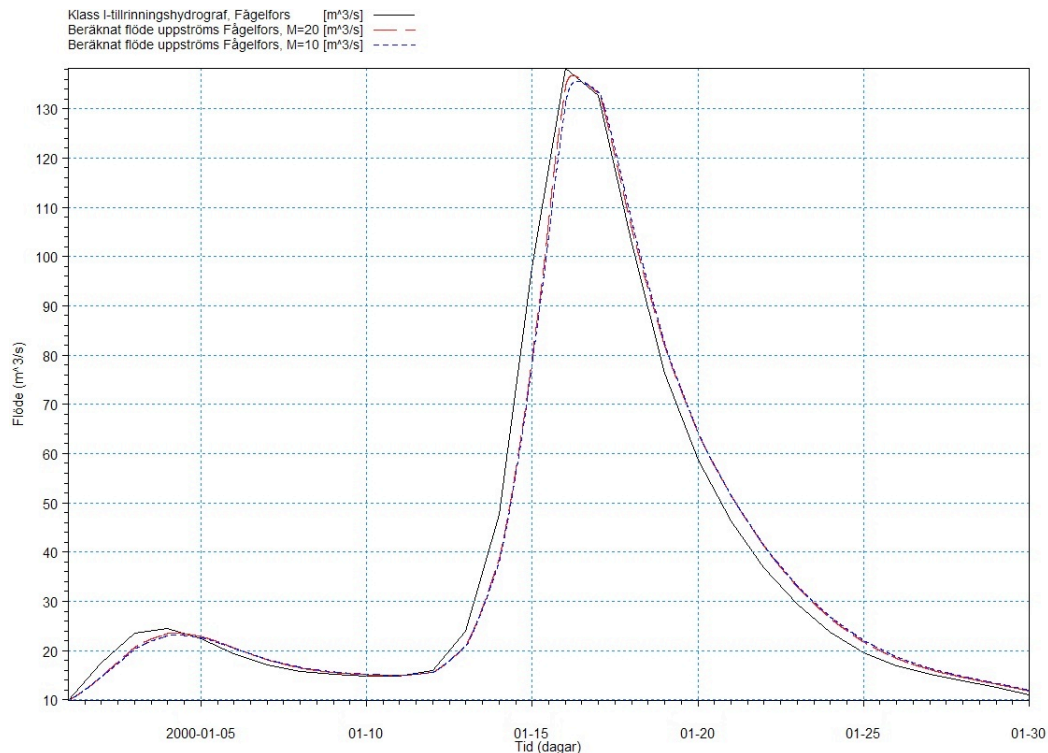
Vattennivån uppströms Götaforsdammen var som högst när hela den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i den hydrauliska modellen. Vattennivån uppströms den trånga sektionen minskade med minskad storlek på inflödet (tabell 2).

Tabell 2. Den maximala vattennivån uppströms Götaforsdammen vid olika storlek på inflödet i den hydrauliska modellen samt olika värden på Mannings tal, M .

Inflöde	Maximal vattennivå uppströms Götaforsdammen (m ö.h.) $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	Maximal vattennivå uppströms Götaforsdammen (m ö.h.) $M = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
Klass I	196,18	196,18
75 %	196,09	196,06
50 %	195,66	195,65
25 %	194,91	194,89

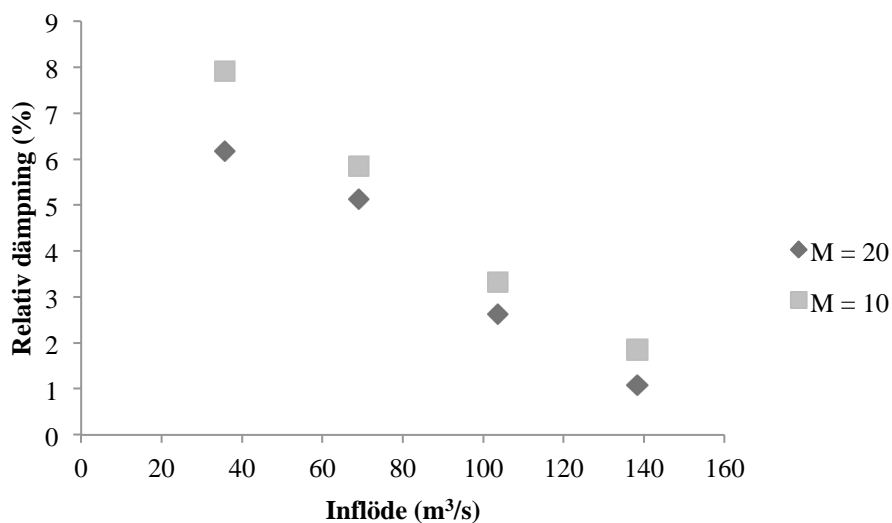
4.2.2 Flödesdämpningen strax uppströms Fågelforsdammen

Vid modellsimuleringarna då hela den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen för Lagan- respektive Hjortsjöågrenen användes som indata och Mannings tal tilldelades värdena $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ respektive $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ minskade det maximala flödet från $138,2 \text{ m}^3/\text{s}$ till $136,7 \text{ m}^3/\text{s}$ respektive $135,6 \text{ m}^3/\text{s}$ och flödesdämpningen strax uppströms Fågelforsdammen uppgick följaktligen till 1,1 respektive 1,9 %. Vidare fördröjdes flödestopparna och det maximala flödet inträffade ungefär en halv dag senare jämfört med klass I-tillrinningshydrografen framtagen av SMHI (figur 21).



Figur 21. Jämförelse mellan det totala inflödet i den hydrauliska modellen, det vill säga den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen för Lagan- samt Hjortsjöågrenen, och modellerat flöde strax uppströms Fågelforsdammen. Den röda långstreckade grafen visar resultatet av modellsimuleringen med $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ och den blå kortstreckade grafen visar resultatet av modellsimuleringen med $M = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Precis som vid Götaforsdammen ökade flödesdämpningen med minskad storlek på inflödet och den största relativa flödesdämpningen uppstod även i detta fall då 25 % av den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i den hydrauliska modellen. Vidare var den relativa dämpningen av flödestopparna större då ett lägre värde på Mannings tal användes (figur 22).



Figur 22. Den procentuella dämpningen av flödestoppen strax uppströms Fågelforsdammen vid olika stora inflöden i den hydrauliska modellen samt olika värden på Mannings tal, $M \text{ (m}^{1/3}/\text{s)}$.

4.2.3 Den huvudsakliga dämpningen

För att undersöka var längs vattendragssträckan den huvudsakliga dämpningen sker jämfördes flödesdämpningen strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen med flödesdämpningen strax uppströms Fågelforsdammen. Fågelforsdammen är lokaliserad längst ner i den hydrauliska modellen och den flödesdämpning som skett vid dammen representerar således den totala dämpningen.

Vid modellsimuleringarna med $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ hade majoriteten av flödesdämpningen inträffat redan strax nedströms den trånga sektionen vid samtliga inflöden i den hydrauliska modellen. Då hela den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i den hydrauliska modellen hade 73 % av den totala dämpningen skett redan strax nedströms Götaforsdammen (tabell 3).

Tabell 3. Andelen av den totala dämpningen som inträffat strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen vid olika inflöden i den hydrauliska modellen och $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Inflöde i den hydrauliska modellen	Dämpning strax nedströms Götaforsdammen (m^3/s)	Totala dämpningen (m^3/s)	Andel av den totala dämpningen som skett strax nedströms Götaforsdammen (%)
Klass I	1,1	1,5	73
75 %	1,9	2,7	70
50 %	2,6	3,6	72
25 %	1,7	2,1	81

Även vid modellsimuleringarna då Mannings tal tilldelades värdet $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ hade den övervägande delen av dämpningen skett redan strax nedströms den trånga sektionen vid samtliga inflöden i den hydrauliska modellen (tabell 4).

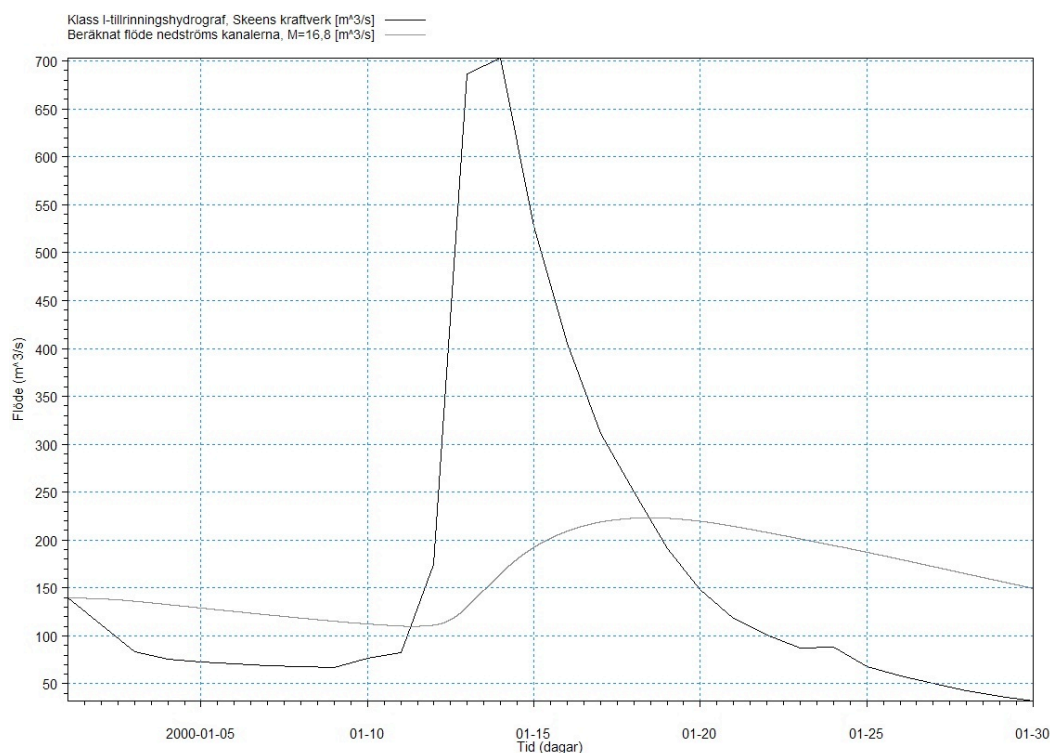
Tabell 4. Andelen av den totala dämpningen som inträffat strax nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen vid olika inflöden i den hydrauliska modellen och $M = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Inflöde i den hydrauliska modellen	Dämpning strax nedströms Götaforsdammen (m^3/s)	Totala dämpningen (m^3/s)	Andel av den totala dämpningen som skett strax nedströms Götaforsdammen (%)
Klass I	1,9	2,6	73
75 %	2,5	3,5	71
50 %	3,1	4,0	78
25 %	2,2	2,7	81

4.3 BOLMÅN

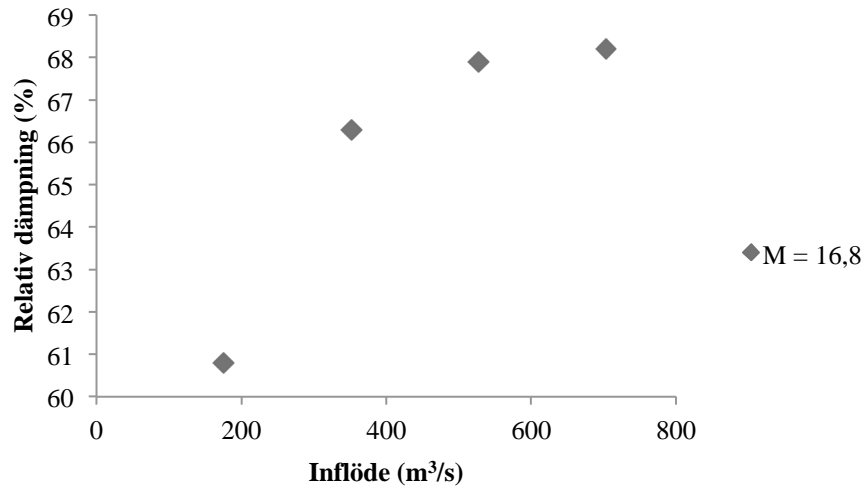
4.3.1 Scenario A

När den hydrauliska modellen upprättades enligt Scenario A och hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf användes som indata minskade det maximala flödet från 703,0 m³/s till 223,4 m³/s och flödestoppen dämpades således med 68,2 %. Vidare fördröjdes flödestoppen och det maximala flödet inträffade drygt fyra dagar senare jämfört med klass I-tillrinningshydrografen framtagen av SMHI (figur 23).



Figur 23. Jämförelse mellan det totala inflödet i den hydrauliska modellen, det vill SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf, och modellerat flöde nedströms kanalerna. Den svarta grafen representerar inflödet i modellen och den grå grafen visar modellerat flöde nedströms kanalerna. Simuleringarna utfördes med $M = 16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

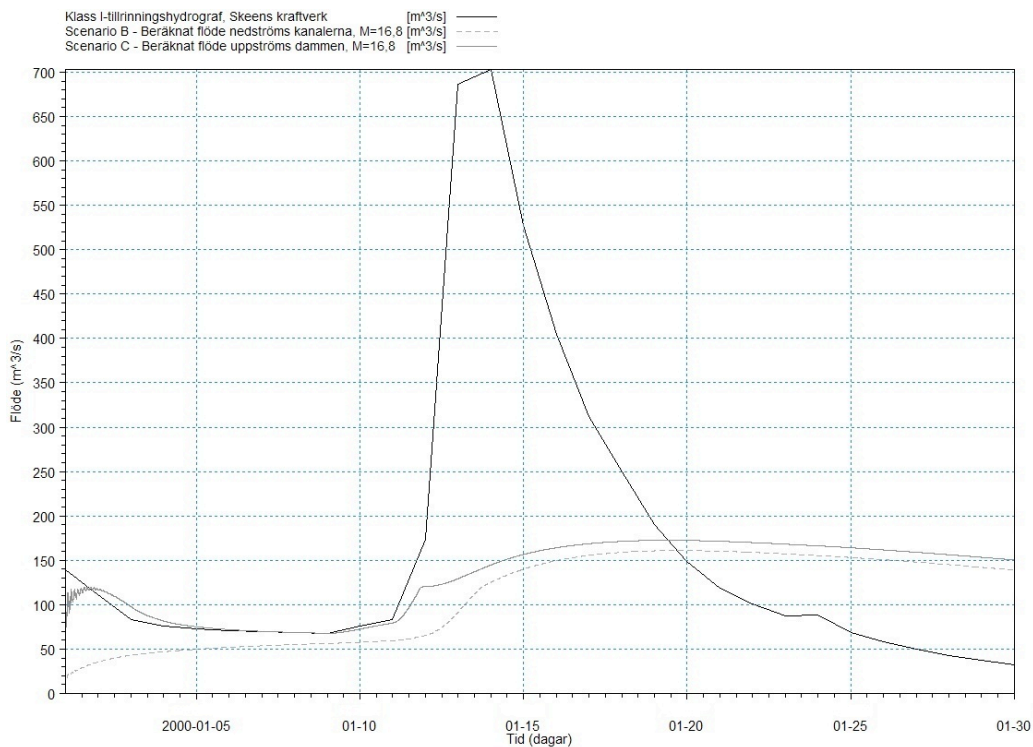
Dämpningen ökade med ökad storlek på inflödet i modellen och den relativa flödesdämpningen var till följd av detta som störst när hela SMHI:s klass I-tillrinningshydrograf användes som indata i modellen (figur 24).



Figur 24. Den relativa dämpningen av flödestoppen nedströms kanalerna vid olika stora inflöden i den hydrauliska modellen. Vid simuleringarna var $M = 16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

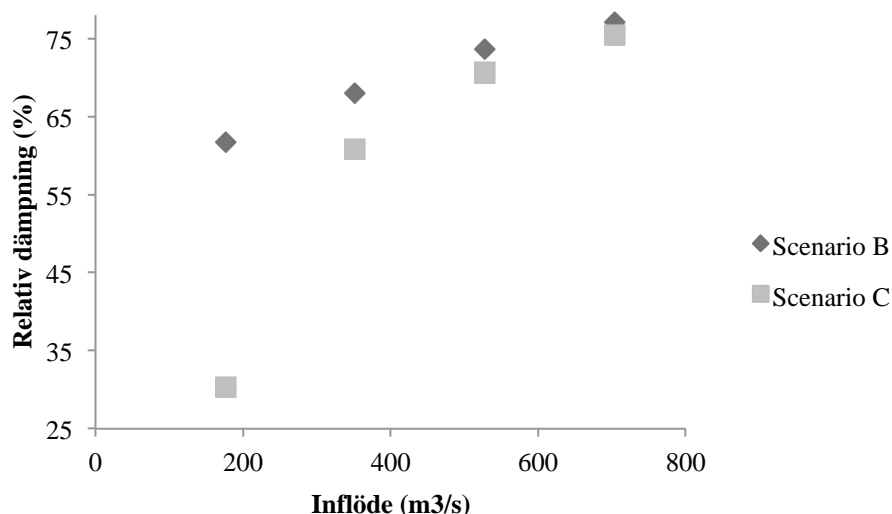
4.3.2 Scenario B

När den hydrauliska modellen upprättades enligt Scenario B och hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf användes som indata minskade det maximala flödet från $703,0 \text{ m}^3/\text{s}$ till $161,0 \text{ m}^3/\text{s}$ och flödestoppen dämpades således med 77,1 %. Vidare fördröjdes flödestoppen med ungefär sex dagar jämför med SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf (figur 25).



Figur 25. Den svarta heldragna grafen representerar inflödet i modellen, det vill säga SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf. Den ljusgrå streckade grafen visar modellerat flöde uppströms Skeendammen när modellen upprättades enligt Scenario B och den grå heldragna grafen visar modellerat flöde uppströms Skeendammen när modellen upprättades enligt Scenario C. Simuleringarna utfördes med $M = 16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Den relativa flödesdämpningen ökade med ökad storlek på inflödet i den hydrauliska modellen och den största dämpningen uppstod således vid modellsimuleringarna då hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf användes som indata (figur 26).



Figur 26. Den relativa dämpningen av flödestoppen vid olika stora inflöden i den hydrauliska modellen. I figuren åskådliggörs den relativa dämpningen när den hydrauliska modellen upprättades enligt Scenario B respektive Scenario C. Vid båda scenarierna var $M = 16,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Vattennivån uppströms kanalerna var som lägst när 25 % av SMHI:s klass I-tillrinningshydrograf användes som indata i den hydrauliska modellen och nivån ökade med ökad storlek på inflödet (tabell 5).

Tabell 5. Vattennivån uppströms kanalerna vid olika stora inflöden i den hydrauliska modellen.

Inflöde i den hydrauliska modellen	Maximal vattennivå uppströms kanalerna (m ö.h.)
Klass I	142,94
75 %	142,61
50 %	142,30
25 %	142,10

4.3.3 Scenario C

När den hydrauliska modellen upprättades enligt Scenario C och hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf användes som indata minskade det maximala flödet från $703,0 \text{ m}^3/\text{s}$ till $172,6 \text{ m}^3/\text{s}$ och flödestoppen dämpades således med 75,4 %. Vidare fördröjdes flödestoppen med ungefär sex dagar jämfört med SMHI:s beräknade tillrinningshydrograf (figur 25). Precis som vid Scenario B ökade flödesdämpningen med ökad storlek på inflödet i modellen (figur 26).

Vattennivån strax uppströms Skeendammen var som lägst när 25 % av SMHI:s klass I-tillrinningshydrograf användes som indata i den hydrauliska modellen och nivån ökade med ökad storlek på inflödet (tabell 6).

Tabell 6. Vattennivån strax uppströms Skeendammen vid olika stora inflöden i den hydrauliska modellen.

Inflöde i den hydrauliska modellen	Maximal vattennivå uppströms dammen (m ö.h.)
Klass I	142,81
75 %	142,50
50 %	142,20
25 %	141,94

4.3.4 Jämförelse mellan Scenario B och Scenario C

När hela SMHI:s klass I-tillrinningshydrograf användes som indata i den hydrauliska modellen för Bolmån och modellen upprättades enligt Scenario B uppgick det maximala flödet uppströms dammen till 161,0 m³/s. När modellen upprättades enligt Scenario C uppgick det maximala flödet uppströms dammen, vid samma inflöde, till 172,6 m³/s. Den relativa dämpningen av flödestoppen då modellen upprättades enligt scenario B jämfört med då modellen upprättades enligt Scenario C var således 6,7 % (tabell 7).

Vidare var det maximala flödet uppströms dammen genomgående större när modellen upprättades enligt Scenario C jämfört med Scenario B. Den största skillnaden i maximalt flöde uppstod när 25 % av SMHI:s klass I-tillrinningshydrograf användes som indata i den hydrauliska modellen och således var den relativa dämpningen av flödestoppen vid Scenario B jämfört med Scenario C även som störst när 25 % av klass I-tillrinningshydrografen användes som inflöde i modellen (tabell 7).

Tabell 7. Det maximala flödet uppströms Skeendammen vid olika inflöden i den hydrauliska modellen för Scenario B respektive Scenario C samt relativ dämpning av flödestoppen när modellen upprättades enligt Scenario B jämfört med Scenario C.

Inflöde i de hydrauliska modellerna	Maximalt flöde uppströms dammen – Scenario B (m ³ /s)	Maximalt flöde uppströms dammen – Scenario C (m ³ /s)	Relativ dämpning – Scenario B jämfört Scenario C (%)
Klass I	161,0	172,6	6,7
75 %	138,7	155,2	10,6
50 %	112,7	137,8	18,2
25 %	67,4	122,5	45,0

5 DISKUSSION

5.1 SIMULERINGSSRESULTATEN

5.1.1 Övre Lagan

Simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan visade att det sker en dämpning av flödet längs den studerade vattendragssträckan. Flödestopparna dämpades då hela den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i den hydrauliska modellen såväl som när 75, 50 och 25 % av denna hydrograf användes som indata. Vidare var flödesdämpningen beroende av storleken på vattenflödet. Flödesdämpningen avtog näst intill linjärt med storleken på inflödet och större flöden dämpades således inte i lika stor utsträckning som mindre flöden (figur 20 och 22).

När hela den areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i den hydrauliska modellen uppstod endast en marginell dämpning av flödestoppen strax nedströms Götaforsdammen (figur 19). Vid denna simulering steg vattennivån uppströms Götaforsdammen så pass mycket (tabell 2) att dammen översvämmades vilket resulterade i att vattnet kunde flöda fritt på en flera hundra meter bred översvämningsyta istället för att flöda genom de trånga utskovsluckorna. Vattenflödet begränsades följaktligen inte längre av den trånga sektionen. Att Götaforsdammen översvämmades är något som inte får ske i verkligheten eftersom detta medför en påtaglig risk för dammbrott vilket kan få allvarliga konsekvenser för boende i närområdet, miljön och infrastrukturen. Vid simuleringarna med lägre flöden som indata steg vattennivån uppströms Götaforsdammen inte lika mycket (tabell 2). Den trånga sektionen påverkade fortfarande till viss del vattenflödet och som en följd av detta dämpades de mindre flödena i större utsträckning än det dimensionerande flödet.

Modellsimuleringarna visade att flödesdämpningen beror av värdet på Mannings tal. Oavsett storlek på inflödet i den hydrauliska modellen innebar ett lägre värde på Mannings tal en större flödesdämpning, vilket ter sig rimligt eftersom ett lägre värde på Mannings tal innebär en större hydraulisk resistans och således mer motstånd mot vattenflödet. Skillnaden mellan flödesdämpningen då olika värden på Mannings tal ansattes visade sig vara särskilt stor när hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf användes som indata i modellen (figur 20 och 22). Det är således av stor vikt att värdet på Mannings tal är så korrekt som möjligt vid analys av dämpning av dimensionerande flöden och det är därför fördelaktigt om värdet på Mannings tal kan bestämmas genom modellkalibrering.

För samtliga flödesscenarier hade den övervägande delen av dämpningen skett redan strax nedströms Götaforsdammen (tabell 3 och 4), vilket tyder på att det är den trånga sektionen vid dammen som orsakar den huvudsakliga flödesdämpningen längs den studerade vattendragssträckan.

5.1.2 Bolmån

När den hydrauliska modellen för Bolmån upprättades enligt Scenario A och hela

SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf användes som indata dämpades flödet markant (figur 23). Vidare ökade flödesdämpningen med storleken på inflödet i den hydrauliska modellen (figur 24). Det faktum att kanalerna ligger nedströms Skeendammens magasin medför dock att denna jämförelse – som på ett bra sätt åskådliggör flödesdämpningen vid Götaforsdammen – blir missvisande just för detta studieområde. För att på ett bättre sett belysa den faktiska dämpningen som de trånga sektionerna orsakar upprättades därför den hydrauliska modellen för Bolmån därtill enligt Scenario B och Scenario C.

Vid simuleringarna med den hydrauliska modellen för Bolmån uppstod den största flödesdämpningen när modellen upprättades enligt Scenario B, det vill säga det verkliga scenariot där hänsyn togs till både de trånga sektionerna och Skeendammen. När hela SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf användes som indata var det maximala flödet nedströms kanalerna $11,6 \text{ m}^3/\text{s}$ lägre vid Scenario B jämfört med vid Scenario C (figur 25). Genomgående var att den relativa flödesdämpningen, oberoende av storleken på inflödet, var större när modellen upprättades enligt Scenario B jämfört med Scenario C. Den största skillnaden mellan fallen uppstod emellertid vid låga inflöden i den hydrauliska modellen (figur 26). När modellen upprättades enligt Scenario C var det endast Skeendammen som påverkade vattenflödet. Det är vattennivån vid dammen som styr avbördningen. Ligger vattennivån under dämningens gräns, 141,9 m ö.h., avbördas allt vatten utan att det sker någon vattenståndshöjning och vid dessa vattennivåer orsakar således inte dammen någon flödesdämpning. När vattennivån stiger över 141,9 m ö.h. styr dammens avbördningskurva hur mycket vatten som släpps genom dammluckorna. Allt vatten som når dammen kan inte längre avbördas vilket leder till att vattennivån stiger och som en följd av detta dämpas vattenflödet. När den hydrauliska modellen upprättades enligt Scenario C och 25 % av klass I-tillrinningen användes som inflöde låg vattennivån största delen av simuleringsperioden under 141,9 m ö.h. Vattennivån var som maximalt 141,94 m ö.h. (tabell 6) och dammen påverkade således vattenföringen i väldigt liten utsträckning. På grund av detta var skillnaden i relativ dämpning de båda fallen emellan särskilt stor när 25 % av klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i den hydrauliska modellen (figur 26).

Likt simuleringarna med modellen för Övre Lagan visade simuleringarna med modellen för Bolmån att flödesdämpningen beror av storleken på vattenflödet. För Scenario B såväl som för Scenario C var flödesdämpningen större när klass I-tillrinningshydrografen användes som indata i den hydrauliska modellen jämfört med när mindre vattenflöden användes som indata. Den relativa flödesdämpningen ökade med storleken på inflödet i den hydrauliska modellen (figur 26). Vid stora inflöden i modellen steg vattennivån uppströms kanalerna respektive uppströms dammen till en högre nivå än då mindre flöden användes som indata (tabell 5 och 6). Dämpningen beror på till vilken nivå vattenytan i Bolmen stiger. Högre vattenstånd innebär att större volym vatten lagras i sjön och som en följd av detta blir även flödesdämpningen större. Genomgående var att den maximala vattennivån uppströms kanalerna (Scenario B) var högre än den maximala vattennivån uppströms dammen (Scenario C) (tabell 5 och 6). Detta visar att kanalerna orsakade en vattenståndsökning vilken inte togs i beaktande när modellen

upprättades enligt Scenario C och det är således ytterligare en förklaring till varför den relativa flödesdämpningen var lägre när den hydrauliska modellen upprättades enligt Scenario C jämfört med Scenario B.

Eftersom modellen, när den upprättades enligt Scenario C, motsvarade SMHI:s beräkningsmetodik beskriver jämförelsen mellan Scenario B och Scenario C den faktiska skillnaden mellan beräkningarna av det dimensionerande flödet enligt den idag vedertagna beräkningsmetodiken och den i examensarbetet utökade beräkningsmetodiken vilken innefattade hydraulisk modellering. Den relativa dämpningen av flödestoppen då modellen upprättades enligt Scenario B jämfört med då modellen upprättades enligt Scenario C uppgick till 6,7 % när hela SMHI:s klass I-tillrinningshydrograf användes som indata (tabell 7). Till skillnad från vid Övre Lagan där dämpningen av det dimensionerande flödet var marginell var den vid Bolmån således betydande. Simuleringsresultaten visade följaktligen att det dimensionerande flödet framtaget enligt Scenario C, där dammen antogs ligga vid sjön Bolmens utlopp och de trånga sektionernas påverkan på vattenflödet inte togs i beaktande, överskattades. Vidare var skillnaden de båda scenarierna emellan större när simuleringarna utfördes med lägre inflöde i den hydrauliska modellen (tabell 7) vilket, som ovan nämnts, beror på att Skeendammen påverkade flödesdämpningen i väldigt liten utsträckning vid låga inflöden i modellen.

5.1.3 Jämförelse mellan de båda studieområdena

I samtliga simuleringar utförda för Övre Lagan och för Bolmån dämpades flödet på grund av de trånga sektionerna. Den stora skillnaden mellan de båda studieområdena låg i att dämpningen minskade med ökat inflöde i modellen för Övre Lagan medan dämpningen ökade med ökat inflöde i modellen för Bolmån.

Hjortsjön som är lokaliserad vid den övre randen i modellen för Övre Lagan fungerar som en så kallad buffertvolym som kan lagra vattnet som däms upp på grund av den trånga sektionen vid Götaforsdammen. Vid stora inflöden i den hydrauliska modellen överskreds Hjortsjön buffertvolym och till följd av detta översvämmades Götaforsdammen och den trånga sektionen påverkade således inte längre vattenflödet. Hade Hjortsjöns area varit större skulle mer vatten kunnat lagras i sjön och vattennivån uppströms Götaforsdammen skulle således stiga långsammare vilket i sin tur skulle leda till att dammen inte översvämmades trots stora flöden i vattendraget. Till följd av detta skulle den trånga sektionen även kunnat dämpa vattenflöden av samma storleksordning som det dimensionerande flödet. Sjön Bolmen som är lokaliserad vid den övre randen i modellen för Bolmån är betydligt större i förhållande till det dimensionerande flödet jämfört med Hjortsjön. Bolmen kan därför lagra större volymer vatten än Hjortsjön och därmed även dämpa stora vattenflöden. Hade ännu större vattenflöden använts som indata i den hydrauliska modellen för Bolmån skulle troligvis utfallet bli likt det vid Övre Lagan. Kanalerna skulle sannolikt översvämmas och de trånga sektioner som kanalerna utgör skulle således inte längre påverka flödet och därmed inte orsaka någon nämnvärd flödesdämpning.

5.1.4 Tillförlitligheten i SMHI:s beräknade dimensionerande flöden

De dimensionerande flödena, eller de så kallade klass I-flödena, dämpades vid båda de undersökta vattendragssträckorna och resultaten visade att de var de trånga sektionerna som orsakade denna flödesdämpning. Den relativa dämpningen av det dimensionerande flödet vid Övre Lagan var marginell, 1,2 % respektive 2,0 %, medan den vid Bolmån uppgick till 6,7 % och således var betydligt större. Trots att dämpningen av det dimensionerande flödet vid Övre Lagan var marginell visade simuleringarna med de hydrauliska modellerna för båda de studerade vattendragssträckorna att det föreligger en skillnad mellan beräkningsmetoderna, det vill säga när de dimensionerande flödena beräknas enligt Flödeskommitténs riktlinjer respektive när de dimensionerande flödena tas fram med hydraulisk modellering i MIKE 11. Vidare visade resultaten att de dimensionerande flödena för Fågelforsdammen respektive Skeendammen, framtagna enligt *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*, är överskattade.

5.2 OSÄKERHETER I MODELLERNA

Nedan beskrivs osäkerheter vid upprättandet av terrängmodellerna och de hydrauliska modellerna för Övre Lagan och Bolmån samt åtgärder som eventuellt hade kunnat förbättra modellerna.

5.2.1 Terrängmodellerna

Terrängmodellerna som ligger till grund för de hydrauliska modellerna bedöms representera de båda studieområdena väl eftersom de baseras på högupplöst laserskannad höjddata med en noggrannhet av 0,5 meter i höjddled. En osäkerhet ligger dock i fastställandet av vattendragens batymetri. Denna osäkerhet bedöms dock som relativt liten, särskilt vid stora flöden i vattendragen. Vid stora vattenflöden översvämmas vattendragen och den naturliga flodfårans batymetri får därmed minskad betydelse.

Fältmätningarna

För att fastställa bottennivån i Övre Lagan gjordes vid flera punkter antagandet att vattennivån vid tillfället för fältmätningarna låg på samma nivå som vid tillfället för Lantmåteriets laserskanning vilket är en förenkling av verkligheten. I själva verket kan således bottennivån vara lägre eller högre än den nivå som är inlagd i terrängmodellen. Att avsänka LAS-punkterna med medeldjupet för längre sträckor, likt det som gjordes mellan Lagangrenens övre rand (figur 6) och Götaforsdammen, kan därtill innebära att trånga sektioner som eventuellt kan påverka flödesdämpningen förbises. En mer korrekt beskrivning av vattendragets batymetri kunde ha uppnåtts genom att loda vattendraget från båt.

Vid Bolmåns kanaler mellan sjön Bolmen och Skeens kraftverk mättes sex tvärsektioner in. Djupet vid dessa var sådant att det är rimligt att anta att kanalerna har en liknande geometri längst hela sträckan mellan sjön och kraftverket. Hade tid och möjlighet funnits skulle – för att uppnå en noggrannare beskrivning av kanalernas batymetri och

utesluta att förträningar eller grundare områden missas – emellertid fler tvärsektioner kunna ha mätts in alternativt att hela vattendragssträckan kunde ha lodats från båt. Ytterligare en osäkerhet vid framställandet av bottenivån berör det faktum att lodet inte hängde lodrätt i den högra kanalen på grund av vattnets strömningshastighet. Vinkeln mättes upp vid djupmätningarna från ålfiskeanläggningen men kunde inte bestämmas vid mätningarna från gummibåten. Antagandet att lodet föll med samma vinkel från båten som från ålfiskeanläggningen bör dock inte generera större fel än ± 5 cm.

Terrängmodellernas upplösning

Mängden data för studieområdet Bolmån medförde att terrängmodellen inte kunde skapas med den tänkta upplösningen 2×2 meter. Terrängmodellen för Bolmån utgörs därför av ett rutnät med gridstorleken 5×5 meter där varje grid representeras av ett höjdvärde. Detta medför att terrängmodellen för Bolmån inte ger en lika noggrann beskrivning av vattendragets batymetri och den omgivande terrängens topografi som terrängmodellen för Övre Lagan.

5.2.2 De hydrauliska modellerna

Överlag anses de hydrauliska modellerna beskriva vattenföringen i de båda studerade vattendragssträckorna på ett tillförlitligt sätt. Osäkerheter som bör tas i beaktande berör främst fastställandet av Mannings tal, numerisk instabilitet vid modellsimuleringarna samt begränsning i data för kalibrering av modellerna.

Den hydrauliska resistansen i de studerade vattendragen

För båda de hydrauliska modellerna som upprättades i detta examensarbete användes en så kallad *Uniform Approach* för att beskriva vattendragens hydrauliska resistans. De hydrauliska modellerna skulle eventuellt kunnat förbättras genom att istället använda *Trippel Zone Approach* där olika Mannings tal kan ansättas för olika delar av tvärsektionerna eftersom tvärsektionernas råhet sannolikt varierar längs de enskilda sektionerna samt längs vattendragen.

Värdet på Mannings tal togs fram genom modellkalibrering för studieområdet Bolmån vilket inte var möjligt för studieområdet Övre Lagan. Eftersom modellsimuleringarna visar att värdet på Mannings tal påverkar flödesdämpningen hade en förbättring av den hydrauliska modellen för Övre Lagan således kunnat uppnås om Mannings tal hade kunnat fastställas genom modellkalibrering även för detta område.

Instabilitet vid simuleringarna

Vid simuleringarna med modellen för Bolmån uppstod instabilitet i början av simuleringsperioden, se figur 25. Det faktum att instabiliteten låg i simuleringens uppstartsperiod medförde att den inte påverkade flödestopparna och den bör således inte ha försämrat beräkningsresultaten. Som ett led i att försöka minimera instabiliteten minskades tidssteget, dock kvarstod en viss instabilitet. För att ytterligare motverka instabiliteten hade modellsimuleringarna kunnat genomföras med så kallad *Hot Start* som initialvillkor. Fördelen med Hot Start är att modellen snabbare ställer in sig och

instabilitet i simuleringsperiodens initialskede därmed minimeras. På grund av att instabiliteten sannolikt inte påverkade beräkningsresultaten samt den rådande tidsramen för examensarbetet togs emellertid beslutet att inte göra om simuleringarna med Hot Start som initialvillkor.

Kalibrering av de hydrauliska modellerna

Den hydrauliska modellen för Bolmån kalibrerades med hjälp av vattenförings- och vattenståndsdata från sjön Bolmen och Skeendammens magasin. Kalibreringen visade på en avvikelse mellan 0,23 och 0,70 cm mellan modellerade och observerade vattenståndsskillnader vilket tyder på att den hydrauliska modellen för Bolmån beskriver verkligheten på ett tillfredställande sätt.

För Övre Lagan fanns inget kalibreringsunderlag att tillgå och kalibreringen av den hydrauliska modellen är till följd av detta väldigt förenklad. Den kalibrering som utfördes visade att modellerad vattennivå uppströms Götaforsdammen samt uppströms Fågelforsdammen stämmer relativt bra överens med den nivå som vattenytan låg på vid tillfället för Lantmäteriets laserskanning. Eftersom kalibreringen baserades på flödesdata från Lagans grannvattendrag Härån är det emellertid svårt att dra några slutsatser kring hur väl den hydrauliska modellen för Övre Lagan beskriver verkligheten.

5.3 FORTSATT STUDIER

Inom ramen för detta examensarbete fanns inte utrymme att undersöka hur metoden för beräkning av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I kan utvecklas så att trånga sektioners påverkan på vattenflödet tas i beaktande. Förslag på vidare studier är således att undersöka hur *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar* kan kompletteras och hur hydraulisk modellering på bästa sätt innefattas i den idag vedertagna beräkningsmetodiken.

Simuleringarna med de hydrauliska modellerna för Övre Lagan och Bolmån visade att flödesdämpningen var beroende av storleken på inflödet i den hydrauliska modellen. HBV-modellen som SMHI använder för att bestämma dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I beskriver flödesdämpningen med en triangulär viktningsfunktion där basen utgörs av en konstant parameter. När flera delområden kopplas samman används Muskingums ekvationer för att fördröja och dämpa flödet i vattendragssträckan mellan de båda delområdena. Ytterligare förslag till vidare studier är därför att undersöka huruvida HBV-modellens dämpningsfunktioner kan efterlikna den flödesberoende dämpning som uppstod till följd av de trånga sektionerna vid Övre Lagan och Bolmån.

6 SLUTSATSER

Utifrån simuleringarna med de hydrauliska modellerna över den delsträcka av Lagan samt den del av Bolmån som studerades i detta examensarbete kan det konstateras att SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrografer dämpas på grund av de trånga sektionerna i vattendragen och som en följd av detta är de dimensionerande flödena som SMHI tagit fram för Fågelforsdammen respektive Skeendammen något överskattade. Vidare kan det konstateras att flödesdämpningen är beroende av storleken på inflödet i de hydrauliska modellerna. Utifrån simuleringarna med den hydrauliska modellen för Övre Lagan kan det därtill fastställas att värdet på Mannings tal påverkar flödesdämpningen och att det således, för att resultaten skall vara så tillförlitliga som möjligt, är fördelaktigt om värdet på Mannings tal kan fastställas genom modellkalibrering.

Den relativa flödesdämpningen som uppstod på grund av den trånga sektionen vid Götaforsdammen var marginell. Det faktum att de dimensionerande flödena trots allt dämpades vid båda studieområdena bör emellertid vara skäl nog att se över metodiken för bestämmandet av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillhörande flödesdimensioneringsklass I. Särskilt viktigt är det i de fall där vattendragen berörs av trånga sektioner och det därtill finns en stor buffervolym uppströms de trånga sektionerna.

För att ta hänsyn till trånga sektioners påverkan på flödesdämpningen bör det undersökas huruvida det går att innefatta hydraulisk modellering i den idag vedertagna beräkningsmetodiken vilken beskrivs i *Riktlinjer för bestämmande av dimensionerande flöden för dammanläggningar*. Det skall emellertid tas i beaktande att hydraulisk modellering kräver mer indata och är långt mer tidskrävande än hydrologisk modellering. Det bör därför undersökas, i varje enskilt fall, om förutsättningarna är sådana att de trånga sektionerna antas påverka flödesdämpningen i en sådan utsträckning att de dimensionerande flödena framtagna med hydrologisk modellering är missvisande.

7 REFERENSER

- Bergström, S., 1992. The HBV Model – its structure and applications. *SMHI Reports Hydrology*, 4.
- Beven, K. J., 2003. *Rainfall-Runoff Modeling: The Primer*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Brandt, S. A., 2009. *Betydelsen av höjdmodellers kvalitet vid översvänningsmodellering*. [pdf]. Tillgänglig på: <<http://hig.diva-portal.org/smash/get/diva2:212428/FULLTEXT01>> [Hämtad 2013-04-10].
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., 1988. *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill.
- DHI, 2012a. *MIKE 11 – A Modeling System for Rivers and Channels, Short Introduction Tutorial – Version 2012*. Hørsholm: DHI.
- DHI, 2012b. *MIKE 11 – A modeling System for Rives and Channels, Reference manual*. Hørsholm: DHI.
- DHI, 2012c. *MIKE View – A Results Presentation Tool for MOUSE, MIKE URBAN and MIKE 11, User Guide*. Hørsholm: DHI.
- DHI, 2012d. *MIKE 11 – A Modeling System for Rivers and Channels, User Guide*. Hørsholm: DHI.
- ESRI, 2013a. *What is ArcGIS?* [online] Tillgänglig på: <<http://resources.arcgis.com/en/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>> [Hämtad 2013-05-14].
- ESRI, 2013b. *Hydrologically correct surfaces: Topo to Raster*. [online] Tillgänglig på: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Hydrologically_correct_surfaces%3A_Topo_to_Raster> [Hämtad 2013-04-09].
- Harrie, L., 2008. *Geografisk informationsbehandling – Teori, metoder och tillämpningar*. Upplaga 4. Stockholm: Liber Distribution AB.
- Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C. N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L. och Running, S. W., 2001. Water in a changing world. *Ecological Applications*, 11(4), s. 1027-1045.
- Lantmäteriet, 2009. *Ny nationell höjdmmodell – Infoblad n:o 14 Flygburen laserskanning*. [pdf] Lantmäteriet. Tillgänglig på: <http://www.lantmateriet.se/Global/Kartor%20och%20geografisk%20information/H%20c3%b6jddata/Nyhetsbrev/2012/Flygburen%20laserskanning_info_blad-14%5b1%5d.pdf> [Hämtad den 8 april 2013].
- Lantmäteriet, 2012. *Produktbeskrivning: Laserdata*. [pdf] Lantmäteriet. Tillgänglig på: <<http://www.lantmateriet.se/Global/Kartor%20och%20geografisk%20information/H%20C3%B6jddata/Produktbeskrivningar/laserdat.pdf>> [Hämtad 2013-04-03].
- Lantmäteriet, 2013. *Ny nationell höjdmmodell*. [online] Tillgänglig på:

- <<http://www.lantmateriet.se/Kartor-och-geografisk-information/Hojddata/Ny-nationell-hojdmodell/>> [Hämtad 2013-04-03].
- Lindström G., Gardelind M., Johansson B., Persson M. och Bergström S., 1996. HBV-96 – En areellt fördelad modell för vattenkrafthydrologin. *SMHI Rapporter Hydrologi*, 12.
- Ljung, L., Glad, T., 2004. *Modellbygge och simulering*. Upplaga 2. Lund: Studentlitteratur.
- Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2005. *Lagans avrinningsområde – Naturvärdesbedömning av vattendrag i Jönköpings län 2005*. [pdf] Jönköping: Länsstyrelsen i Jönköpings län. Tillgänglig på: <http://www.lansstyrelsen.se/jonkoping/SiteCollectionDocuments/Sv/publikationer/2005/2005_15.pdf> [Hämtad 2013-03-12].
- Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2011a. *Hjortsjön*. [pdf] Jönköping: Länsstyrelsen i Jönköpings län. Tillgänglig på: <http://www.lansstyrelsen.se/jonkoping/SiteCollectionDocuments/Sv/miljo-och-klimat/vatten-och-vattenanvandning/Vattenfoldrar/Lagan/Sj%c3%b6ar/98_Hjortsjon.pdf> [Hämtad 2013-03-27].
- Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2011b. *Bolmen*. [pdf] Jönköping: Länsstyrelsen i Jönköpings län. Tillgänglig på: <http://www.lansstyrelsen.se/jonkoping/SiteCollectionDocuments/Sv/miljo-och-klimat/vatten-och-vattenanvandning/Vattenfoldrar/Lagan/Sj%c3%b6ar/98_Bolmen.pdf> [Hämtad 2013-03-27].
- MSB, 2012. *Ny Nationell Höjdmmodell vid havsnivåhöjningar – Analyser av översvämningsrisk och bedömning av erosionskänslighet i strandzoner*. [pdf] MSB. Tillgänglig på: <<https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/26212.pdf>> [Hämtad 2013-04-03].
- Nationalencyklopedin, 2013a. *Lagan*. [online] Tillgänglig på: <<http://www.ne.se/lang/lagan/236373>> [Hämtad 2013-03-12].
- Nationalencyklopedin, 2013b. *Bolmån*. [online] Tillgänglig på: <<http://www.ne.se/bolm%C3%A5n>> [Hämtad 2013-03-12].
- Rosbjerg, D. och Madsen, H., 2005. Concepts of Hydrologic Modeling. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons.
- Schumann, A. H., 2011. *Flood Risk Assessment and Management, How to Specify Hydrological Loads, Their Consequences and Uncertainties*. Bochum: Springer.
- Singh V. P., 1995. *Computer models of watershed hydrology*. Baton Rouge: Water Resources Publications.
- Skytt, V., 2012. *NNH och naturolyckor, Inventering av genomförda tillämpningar av*

den nya nationella höjdmodellen (NNH) - med fokus på naturolyckor och katastrofriskreducerande arbete. [pdf] MSB. Tillgänglig på:
<<https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/26182.pdf>> [Hämtad 2013-04-03].

SMHI, 2013a. *SMHI Vattenwebb*. [online] Tillgänglig på: <<http://vattenwebb.smhi.se/>> [Hämtad 2013-04-12].

SMHI, 2013b. *Vattenföring – Flödesstatistik 1900-tal*. [online] Tillgänglig på:
<<http://www.smhi.se/klimatdata/hydrologi/Vattenforing>> [Hämtad 2013-06-05].

Statkraft, 2010. *Drift-, tillståndskontroll- och underhållsmanual, Skeens kraftverk*.

Svensk Energi, 2009. *Kraftindustrins dammregister – Skeendammen*.

Svensk Energi, 2011. *Kraftindustrins dammregister – Fågelforsdammen*.

Svensk Energi, 2012. *Ridas 2012 – kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*.

Svensk Energi, 2013. *Vattenkraft*. [online] Tillgänglig på:
<<http://www.svenskenergi.se/Elfakta/Elproduktion/Vattenkraft1/>> [Hämtad 2013-05-14].

Svensk Energi, Svenska Kraftnät och SweMin, 2007. *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöde för dammanläggningar – Nyutgåva 2007*. [pdf]. Tillgänglig på:
<<http://svenskenergi.episerverhotell.net/upload/Vi%20arbetar%20med/Elproduktion/Vattenkraft/Filer/Riktlinjer.dim.flöden.200%202.pdf>> [Hämtad 2013-02-06].

USGS, 2001. *Surface Water Field Techniques – Verified Roughness Characteristics of Natural Channels*. [online] Tillgänglig på:
<<http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/>> [Hämtad 2013-03-26].

Vattenmyndigheterna, 2009. *Avrinningsområde nr 98 – Lagan*. [pdf]. Tillgänglig på:
<<http://www.vattenmyndigheterna.se/SiteCollectionDocuments/sv/vasterhavet/beslut-2009/underlagsmaterial-per-delomrade-ap/98lagan.pdf>> [Hämtad 2013-03-12].

VEGAB Vattenenergi AB, 2005. *Fågelfors kraftverk – konsekvensklassificering*.

Åkesson, A., 2010. *Hydraulic- hydromorphologic analysis as an aid for improving peak flow predictions*. Licentiatavhandling. Kungliga Tekniska Högskolan. Tillgänglig på:
<<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-25425>> [Hämtad 2013-02-06].

Personlig kommunikation

Driftpersonal Statkraft, 2013a. *Vattenförings- och vattenståndsdata för Skeenmagasinet och sjön Bolmen*. [email] (Personlig kommunikation 2013-05-03).

Driftpersonal Statkraft, 2013b. *Diskussion rörande konstruktionerna över kanalerna mellan Bolmen och Skeens kraftverk*. [email] (Personlig kommunikation 2013-05-06).

Larsson, Jonas, 2013. *Diskussion kring Götaforsdammens dimensioner*. [email] (Personlig kommunikation 2013-03-11).

Losjö, Katarina, 2013. Hydrolog, SMHI. *Dimensionerande flöde och avbördning*. [email] (Personlig kommunikation 2013-01-29 till 2013-05-17).

Statkrafts driftcentral, 2013. *Fråga angående vattennivån vid Skeens kraftverk vid tillfället för djupmätningarna*. [Telefonsamtal] (Personlig kommunikation 2013-03-01).

BILAGOR

BILAGA A – SAINT VENANTS EKVATIONER

För att beräkna vattenföringen i flodmynningar och vattendrag löser MIKE 11 ekvationerna för bevarande av volym och rörelsemängd, de så kallade Saint Venants ekvationer. Under antagandet att vattendragets tvärsektioner är rektangulära med horisontell botten och konstant bredd kan bevarandet av massa och rörelsemängd beskrivas enligt ekvation A1 respektive A2 nedan (DHI, 2012b).

$$\frac{\partial(\rho Hb)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho Hb\bar{u})}{\partial x} \quad (\text{A1})$$

$$\frac{\partial(\rho Hb\bar{u})}{\partial t} = \frac{\partial(\alpha' \rho Hb\bar{u}^2 + \frac{1}{2} \rho g b H^2)}{\partial x} \quad (\text{A2})$$

där

ρ = densiteten (kg/m^3)

H = djupet (m)

b = bredden (m)

\bar{u} = medelhastigheten i vertikalled (m/s)

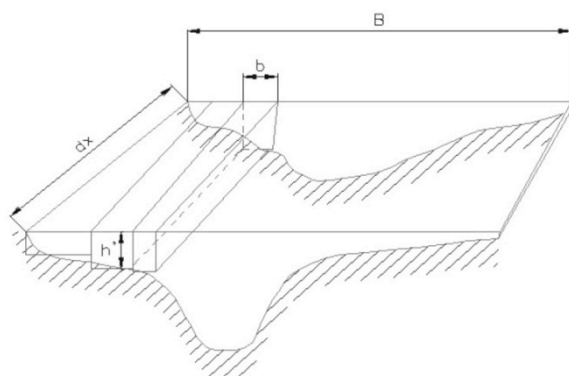
α' = vertikal hastighetsfördelningskoefficient (-)

För att beskriva naturliga vattendrag på ett korrekt sätt måste hänsyn tas till att botten lutar och ekvationen för rörelsemängdens bevarande utökas i och med det med fler termer. Vattennivån h ersätter vattendjupet H och bredden på vattendraget tillåts att variera. Vidare divideras bevarandeekvationerna med densiteten, ρ . De omskrivna ekvationerna ser ut som följer:

$$\frac{\partial(Hb)}{\partial t} = - \frac{\partial(Hb\bar{u})}{\partial x} \quad (\text{A3})$$

$$\frac{\partial(Hb\bar{u})}{\partial t} = - \frac{\partial(\alpha' Hb\bar{u}^2)}{\partial x} - Hbg \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{A4})$$

Genom att dela in vattendragets tvärsektioner i rektanglar med bredden b , höjden h' och längden dx (figur A1) och integrera ekvation A3 och A4 kan vattenflödet genom tvärsektioner av godtycklig form beskrivas (DHI, 2012b).



Figur A1. Tvärsektion indelad i rektanglar med bredden b , höjden h' , längden dx och den totala bredden B (DHI, 2012b).

Under antagandet att dh/dx är konstant över vattendraget samt att det inte sker något utbyte av rörelsemängd mellan de rektanglar som tvärsektionen delats in i kan den integrerade tvärsnittsarean, A , och det integrerade vattenflödet, Q , beskrivas enligt ekvation A5 och A6 nedan.

$$A = \int_0^B H dB \quad (\text{A5})$$

$$Q = \int_0^B H \bar{u} dB = \bar{u}A \quad (\text{A6})$$

Ekvationerna för bevarandet av rörelsemängd och massa kan skrivas om med hjälp av uttrycken för tvärsnittsarean och vattenflödet. Integreras de omskrivna bevarandekvationerna fås:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{A7})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\alpha \frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (\text{A8})$$

Introduceras hydraulisk resistans, M , och lateralt inflöde, q , i de omskrivna ekvationerna kan de slutliga ekvationer som MIKE 11 använder för att beräkna vattenflödet skrivas enligt ekvation A9 och A10 nedan (DHI, 2012b).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (\text{A9})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\alpha \frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{M^2 AR^{4/3}} = 0 \quad (\text{A10})$$

där

Q = vattenflöde (m^3/s)

A = flödesarea (m^2)

q = lateralt inflöde (m^2/s)

h = nivå ovan datum (m)

R = hydraulisk radie (m)

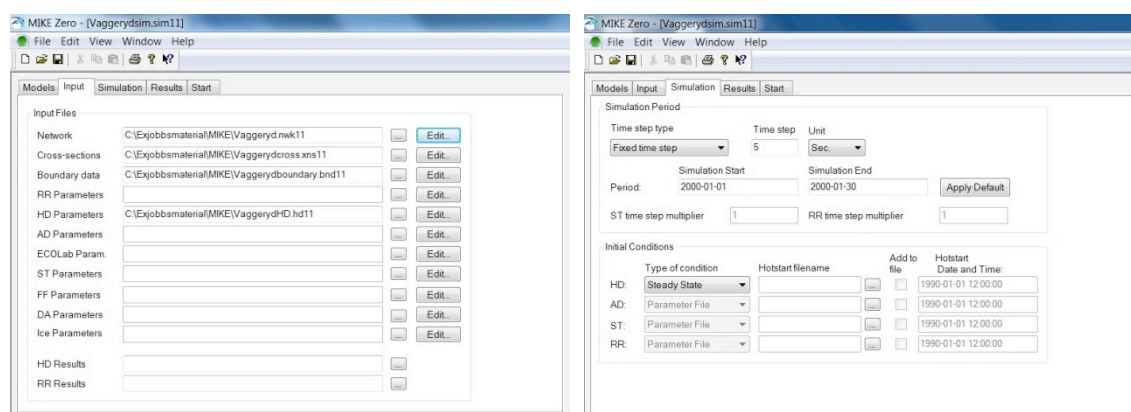
M = Mannings tal ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)

α = rörelsemängdsfördelningskoefficient (-)

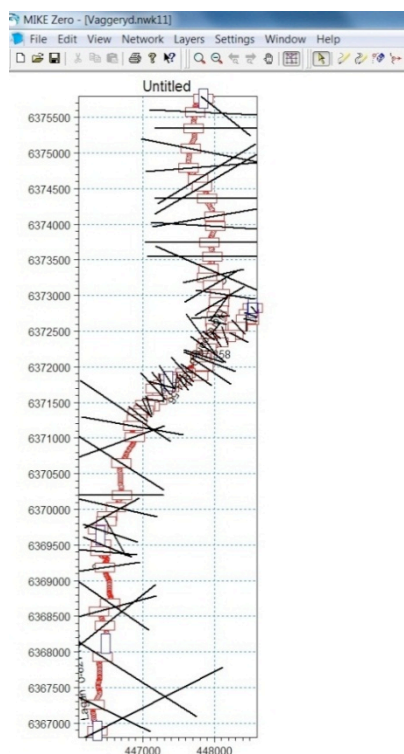
BILAGA B – EDITORERNA I MIKE 11

MIKE 11 består av en rad så kallade editorer, exempelvis *Simulation Editor*, *Network editor*, *Cross Section Editor*, *Boundary Editor*, *Time Series Editor* och *HD Parameter Editor*. Det finns ingen koppling mellan editorerna såvida de öppnas separat och i de olika editorerna kan data implementeras och redigeras oberoende av varandra (DHI, 2012a).

Informationsutbytet mellan de olika editorerna sker med hjälp av *Simulation Editor* (figur B1), som även används för att välja simuleringsperiod och tidssteg, namnge resultatfiler samt starta simuleringarna (DHI, 2012a).



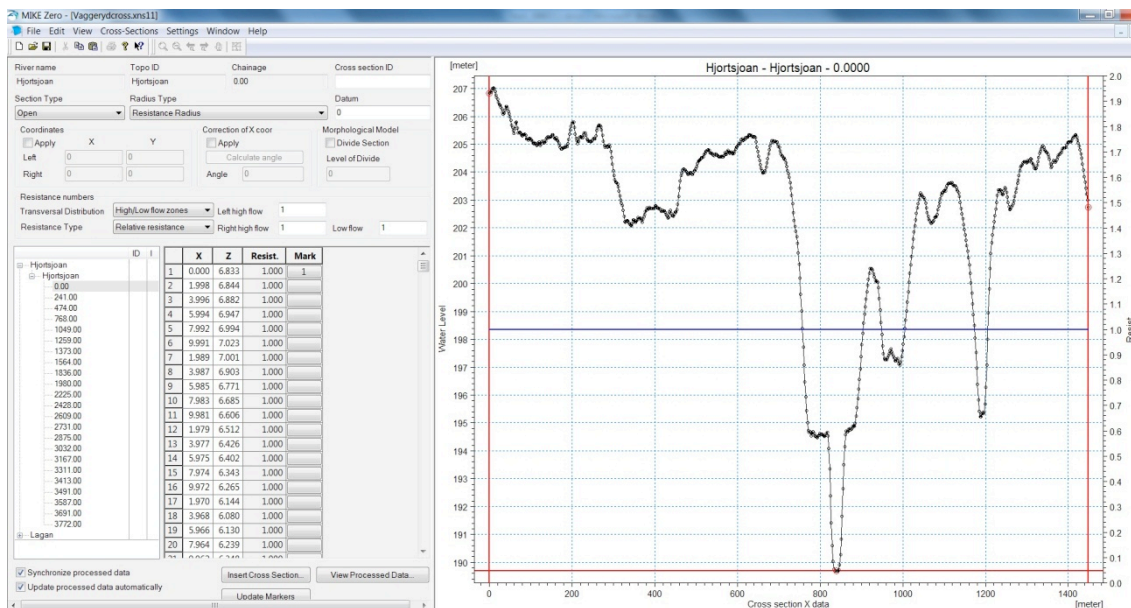
Figur B1. Illustration av *Simulation Editor* i MIKE 11. Till vänster visas hur de olika editorerna kopplas samman och till höger visas hur simuleringsperiod och tidssteg definieras.



Figur B2. Illustration av *Network Editor*s grafiska del. Sträcken i figuren representerar de tvärsektioner som definierats för vattendraget.

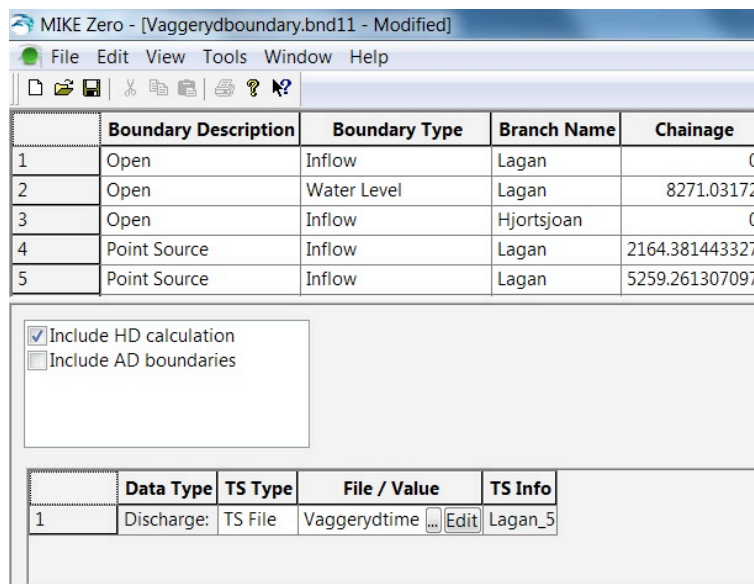
Network Editor är en central del i MIKE 11. *Network editor* består av två olika delar, en del där vattendraget åskådliggörs grafiskt (figur B2) och en del där all data rörande vattendraget visas i tabellform. I den grafiska delen kan information från de andra editorerna visualiseras, exempelvis var vattendragets tvärsektioner är lokaliserade. *Network Editor* möjliggör redigering av de data som definierar vattendraget. I denna editor kan exempelvis vattendragsgrenar kopplas samman och hydrauliska strukturer såsom broar eller dammar specificeras (DHI, 2012a).

I *Cross Section Editor* definieras vattendragets tvärsektioner (figur B3). Denna editor består av två olika dataset, rådata och bearbetad data. Rådata är den data som beskriver tvärsektionens geometri, det vill säga tvärsektionens x - och z -koordinater. Bearbetad data beräknas utifrån rådata och innefattar vattennivåer, tvärsnittsarea, flödesbredd och hydraulisk radie (DHI, 2012a).



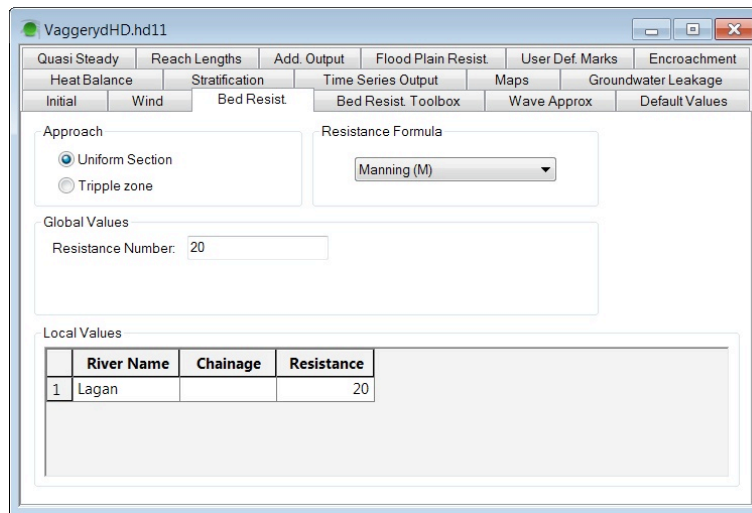
Figur B3. Illustration av *Cross Section Editorn* i MIKE 11. I figuren visas rådata, det vill säga tvärsnittens x - och z -koordinater.

Den hydrauliska modellens randvillkor definieras i *Boundary Editorn* (figur B4). Randvillkor måste alltid definieras vid modellens start- och slutpunkt men kan även definieras vid andra punkter, exempelvis vid biflöden. Ifall randvillkoren utgörs av konstanta värden kan de definieras direkt i *Boundary Editorn*. Består randvillkoren av en tidsserie, exempelvis en flödeshydrograf, måste denna tidsserie definieras i *Time Series Editorn* (DHI, 2012a).



Figur B4. Illustration av *Boundary Editorn* i MIKE 11.

I *HD Parameter Editorn* (figur B5) kan användaren specificera värden på de olika variabler som påverkar de hydrauliska beräkningarna, exempelvis den hydrauliska resistansen, initialvärden för vattenflöde och vattennivå samt en rad parametrar som påverkar simuleringarnas stabilitet (DHI, 2012a).



Figur B5. Illustration av *HD Parameter Editorn* i MIKE 11. I figuren visas hur den hydrauliska resistansen tilldelats värdet $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

BILAGA C – FÄLTMÄTNINGARNA

Djupmätningarna vid Övre Lagan

Djupmätningarna vid mätpunkt 1, 2 och 3 (figur 11, avsnitt 3.2.2.) utfördes 2013-02-28.

Mätpunkt 1 – Bilbron som går över Hjortsjöån:

Från botten av vattendraget till brobanans överkant var avståndet till 2,60 meter. Vattendjupet uppgick till 54,5 centimeter.

Mätpunkt 2 – Bilbron parallellt med tågbron som går över Hjortsjöån:

Från botten av vattendraget till brobanans överkant uppgick var avståndet 2,37 meter. Vattendjupet uppgick till 90 centimeter.

Mätpunkt 3 – Bilbron som ligger mitt i Vaggeryd samhälle och går över Lagan:

Från botten av vattendraget till brobanans överkant av var avståndet 3,82 meter. Vattendjupet uppgick till 90 centimeter.

Mätpunkt 4 – Nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen:

Djupmätningarna vid mätpunkt 4 (figur 11, avsnitt 3.3.3) utfördes 2013-03-01.

GPS-koordinater i koordinatsystemet RT90:

x: 63754697

y: 1399247

Tabell C1. Djupmätningarna som utfördes i Lagan nedströms den trånga sektionen vid Götaforsdammen.

Mätpunkt	Vattendjup (m)
4.1	0,42
4.2	0,50
4.3	0,33
4.4	0,43
4.5	0,62

Djupmätningarna vid Bolmån

Djupmätningarna i kanalerna mellan sjön Bolmen och Skeens kraftverk utfördes 2013-03-01. Vattennivån vid Skeens kraftverk var 142,23 m ö.h. dagen då mätningarna utfördes. För lokalisering av tvärsektionerna se figur 13, avsnitt 3.2.2.

Sektion A

Inmätningarna av tvärsektion A utfördes från en ålfiskeanläggning. Avståndet från vattenytan till konstruktionens övre kant uppgick till 1,68 meter.

Tabell C2. Inmätningar av tvärsnitt A belägen i den högra kanalen sett i vattnets flödesriktning.

Läge (m)	Avstånd från botten till konstruktionens övre kant (m)	Vinkel (°)	Lodrätt avstånd (m)	Vattendjup (m)	Bottennivå (m ö.h.)
0	4,35	6	4,33	2,65	138,58
3	4,40	10	4,33	2,65	138,58
6	4,46	10	4,39	2,71	138,52
9	4,42	10	4,35	2,67	138,56
12,7*	4,38	6	4,36	2,68	138,55
15	4,42	10	4,36	2,68	138,55
18	4,42	10	4,36	2,68	138,55
21	4,37	6	4,35	2,67	138,56

*Vid läge 12 meter var ett betongfundament i vägen och därför utfördes mätningarna vid läge 12,7 meter istället.

Sektion B

Inmätningarna av tvärsnitt B utfördes från gummibåt.

GPS-koordinater i koordinatsystemet RT90:

x: 6294768

y: 1368773

Tabell C3. Inmätningar av tvärsnitt B belägen i den högra kanalen sett i vattnets flödesriktning.

Läge (m)	Uppmätt vattendjup (m)	Uppskattad vinkel (°)	Lodrätt vattendjup (m)	Bottennivå (m ö.h.)
0	0	6	0	141,23
3	1,89	10	1,86	139,37
6	2,99	10	2,94	138,29
9	2,93	10	2,89	138,34
12	2,94	10	2,90	138,33
15	2,95	10	2,91	138,32
18	2,92	10	2,88	138,35
20	1,95	10	1,92	139,31
25	0	6	0	141,23

Sektion C

Inmätningarna av tvärsnitt C utfördes från gummibåt.

GPS-koordinater i koordinatsystemet RT90:

x: 6294711

y: 1368819

Tabell C4. Inmätningar av tvärsektion C belägen i den högra kanalen sett i vattnets flödesriktning.

Läge (m)	Uppmätt vattendjup (m)	Uppskattad vinkel (°)	Lodrätt vattendjup (m)	Bottennivå (m ö.h.)
0	0	6	0	141,23
3	2,58	10	2,54	138,69
6,5	2,77	10	2,73	138,50
9,5	2,95	10	2,91	138,32
12,5	3,00	10	2,95	138,28
15,5	3,00	10	2,95	138,28
18,5	1,85	10	1,82	139,41
22,5	0	6	0	141,23

Sektion D

Inmätningarna av tvärsektion D utfördes från en ålfiskeanläggning. Avståndet från vattenytan till konstruktionens övre kant uppgick till 1,68 meter.

Tabell C5. Inmätningar av tvärsektion D belägen i den vänstra kanalen sett i vattnets flödesriktning.

Läge (m)	Avstånd från botten till konstruktionens övre kant (m)	Vattendjup (m)	Bottennivå (m ö.h.)
0	2,87	1,19	140,04
3	2,86	1,18	140,05
6	2,86	1,18	140,05
9	2,87	1,19	140,04
12	2,89	1,21	140,02
15	2,89	1,21	140,02
18	2,91	1,23	140,00
21	2,88	1,20	140,03

Sektion E

Inmätningarna av tvärsektion E utfördes från gummibåt.

GPS-koordinater i koordinatsystemet RT90:

x: 6294888

y: 1368762

Tabell C6. Inmätningar av tvärsektion E belägen i den vänstra kanalen sett i vattnets flödesriktning.

Läge (m)	Vattendjup (m)	Bottennivå (m ö.h.)
0	0	141,23
3	1,17	140,06
6	1,30	139,93
9	1,28	139,95
12	1,26	139,97
15	1,25	139,98
18	1,19	140,04
21	0	141,23

Sektion F

Inmätningarna av tvärsektion F utfördes från gummibåt.

GPS-koordinater i koordinatsystemet RT90:

x: 6295000

y: 1368703

Tabell C7. Inmätningar av tvärsektion F belägen i den vänstra kanalen sett i vattnets flödesriktning.

Läge (m)	Vattendjup (m)	Bottennivå (m ö.h.)
0	0	141,23
3	1,00	140,23
6	1,12	140,11
9	1,20	140,03
12	1,35	139,88
15	1,21	140,02
17	1,10	140,13
19	0	141,23

Djupmätningarna vid Piksborg

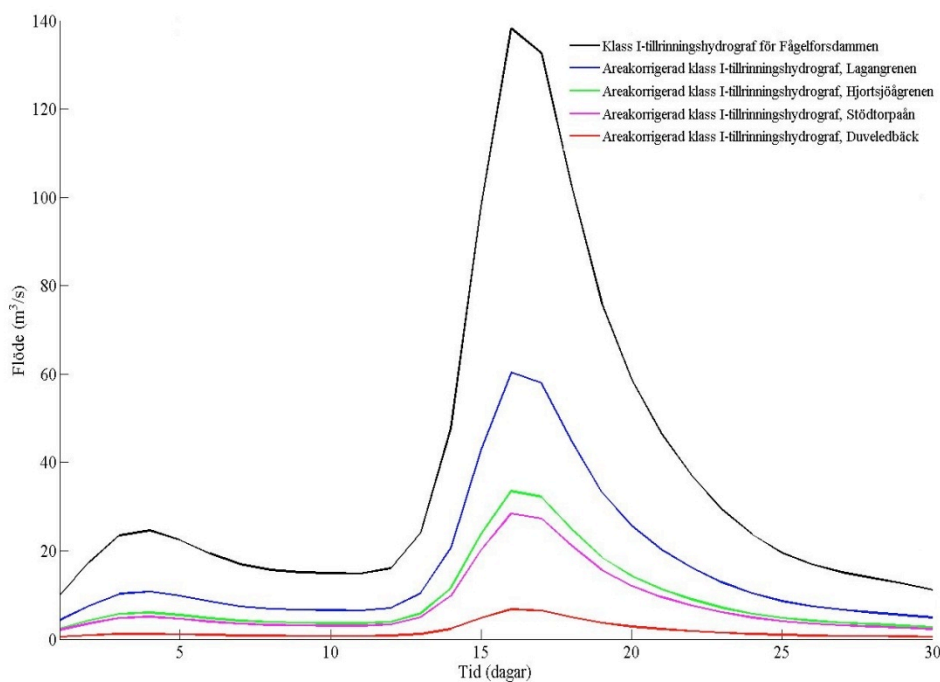
Djupmätningarna vid den gamla järnvägsbron vid Piksborg (figur 9, avsnitt 3.2.2) utfördes 2013-02-28. Öppningen, det vill säga bredden mellan brofundamenten, som vattnet måste passera igenom uppgick till 39,65 meter.

Tabell C8. Djupmätningarna vid den gamla järnvägsbron vid Piksborg.

Läge (m)	Vattendjup (m)
10	4,50
18	4,73
28	4,40

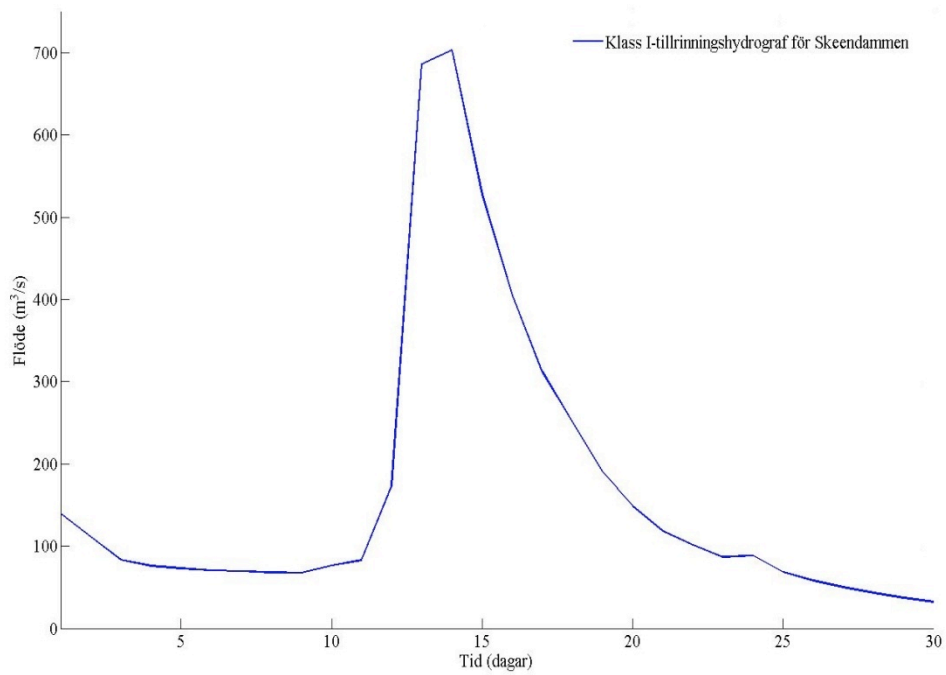
BILAGA D – FLÖDESHYDROGRAFERNA

I den hydrauliska modellen för Övre Lagan areakorrigerades SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf för att bestämma randvillkor för modellen. Uppströms randvillkor utgjordes av areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografer för Lagan- respektive Hjortsjöågrenen (figur D1). Övriga randvillkor var där biflödena Stödtorpaån och Duveledbäck möter Lagan, även dessa randvillkor utgjordes av areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografer (figur D1).



Figur D1. SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf för Fågelforsdammen. Figuren visar även de areakorrigerade klass I-tillrinningshydrografer som utgjorde randvillkor i den hydrauliska modellen för Övre Lagan.

I den hydrauliska modellen för Bolmån specificerades endast upp- och nedströms randvillkor. Uppströms randvillkor utgjordes av SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf för Skeendammen (figur D2).



Figur D2. SMHI:s beräknade klass I-tillrinningshydrograf för Skeendammen. Denna klass I-tillrinningshydrograf utgjorde uppströms randvillkor i den hydrauliska modellen för Bolmån.