

Simulering av vågförhållanden i vattenkraftmagasin

Simulation of wave conditions in hydropower
reservoirs

Elon Jonsson

REFERAT

Simulering av vågförhållanden i vattenkraftmagasin

Elon Jonsson

Kraftindustrin arbetar oavbrutet med att försöka höja och upprätthålla dammsäkerheten i Sverige. Erosionsskydd för fyllningsdammar skall dimensioneras och utformas så att de medverkar till en god dammsäkerhet. Vid dimensionering och projektering av erosionsskydd måste vågberäkningar utföras för att bedöma angripande våglast. I Sverige genomförs dessa beräkningar utifrån kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS. Uträkningarna och bedömningar av våglasterna är ur dammsäkerhetssynpunkt viktiga eftersom de ofta avgör erforderligt fribord. Vågberäkningarna är behäftade med stora osäkerheter, speciellt i fall då störningar i form av öar, uddar och uppgrundande partier finns framför dammkonstruktionen.

Syftet med examensarbetet har varit att utvärdera vågförhållanden och därmed våglasterna på Vojmsjöns regleringsdamm. Vågförhållandena har simulerats och analyserats med den numeriska modellen MIKE 21 Spectral Wave. Tillvägagångssättet är nytt och modellen har tidigare inte använts inom området. Således genomfördes en verifiering och orienterande kalibrering i magasin Sädvajaure. Utifrån de kunskaper och erfarenheter som erhöles vid utförandet i Sädvajaure användes modellen i fallstudie Vojmsjön. Ett mer övergripande syfte har varit att utreda om förfarandet är en ny möjlig metod för att utvärdera vågor i vattenkraftmagasin.

Undersökningen i Sädvajaure visade på en relativt god korrelation mellan uppmätta och simulerade våghöjder. Modellens noggrannhet är starkt beroende av tillförlitligheten hos indata. Mer exakt indata hade förmodligen resulterat i ännu bättre samband. Fallstudie Vojmsjön visade på signifikanta skillnader i resultat mellan vågberäkningarna enligt RIDAS och de av modellen simulerade. RIDAS beräkningsmetoder överskattar våghöjderna i området framför Vojmsjöns regleringsdamm, främst till följd av att beräkningarna genomförs med grova förenklingar av magasinets form och att vågorna antas propagera fritt utan inverkan av refraktion och uppgrundande partier.

Förfarandet med att använda en numerisk modell för att analysera vågor i vattenkraftmagasin anses vara tillämpbar. Metoden bedöms, utifrån denna studie, vara ett bra komplement för tillfällena när RIDAS beräkningsmetoder anses vara otillräckliga och särskilda utredningar är påkallade. Liknande mer grundliga utredningar, skulle kunna ge bra underlag för att fatta goda ekonomiska och dammsäkerhetsmässiga beslut.

Nyckelord: Vattenkraftmagasin, dammsäkerhet, erosionsskydd, vågor, simulering, MIKE 21 Spectral Wave

ABSTRACT

Simulation of wave conditions in hydropower reservoirs

Elon Jonsson

The power industry is constantly trying to raise and maintain the safety of dams in Sweden. Erosion protection for embankment should be designed to contribute to a high level of dam safety. When designing an erosion protection, wave calculation must be carried out to assess the wave load. In Sweden, these calculations and assessments are based on the Power Companies Guidelines for Dam Safety, named RIDAS. The calculation of wave loads is important from a dam safety point of view, because they often determine the required freeboard. The wave calculations are subject to large uncertainties especially in cases when islands, capes and shoaling areas are located in front of the dam construction.

The aim of the thesis has been to assess the wave conditions and thereby the wave loads in reservoir Vojmsjön. The approach has been to simulate and analyse the wave conditions with a numerical model MIKE 21 Spectral Wave. The procedure is new and a verification and orientated calibration was conducted since the model has not previously been used in the field. The verification of the model was carried out in reservoir Sädvajaure. Based on the knowledge and experience obtained during the investigation at Sädvajaure the model was used in the case study Vojmsjön. A more general aim has been to investigate whether the approach is a new possible method to evaluate waves in hydropower reservoirs.

The investigation in Sädvajaure showed a relatively good correlation between measured and simulated wave heights. The model precision is highly dependent on the accuracy of input data. More accurate input data had probably given even better results. Case study Vojmsjön showed significant differences in result between wave calculation based on RIDAS and the model simulated. RIDAS calculation methods overestimate the wave heights in the area in front of regulation dam Vojmsjön. Mainly because the calculations are based on simplifications of the reservoir structure, but also depending on the fact that the waves are assumed propagating freely without the influence of refraction and shoaling.

The approach of using a numerical model to evaluate the waves in hydropower reservoirs is believed to be applicable. The method is considered to be useful as a complement in investigations when RIDAS calculation methods are considered being insufficient and special investigations is necessary. Similar more extended investigations could provide good material to make good decisions, both from an economic and a dam safety point of view.

Keywords: Hydropower reservoirs; dam safety; erosion protection; waves; simulation; MIKE 21 Spectral Wave

*Department of Engineering Sciences, Electricity. Ångströmlaboratoriet, Uppsala University,
Lägerhyddsvägen 1, SE-751 21 UPPSALA
ISSN 1401-5765*

FÖRORD AV FÖRFATTARE

Föreliggande arbete har utförts som en sista och avslutande del på civilingenjörsprogrammet miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet. Examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng och har utarbetats vid Institutionen för teknikvetenskaper, Elektricitetslära på Ångströmlaboratoriet i Uppsala.

Arbetet har utförts vid avdelningen för strömningsteknik på SWECO Infrastructure, Region Vattenkraft och Dammar i Stockholm. Ett stort tack till hela avdelningen som bidragit med sina erfarenheter och visat stort intresse under studiens gång.

Speciellt tack till min handledare Romanas Ascila, gruppchef strömningsteknik SWECO Infrastructure, som visat stort engagemang och intresse. Jag vill tacka min ämnesgranskare Urban Lundin vid Institutionen för teknikvetenskaper, Elektricitetslära på Ångströmlaboratoriet, som bidragit med råd angående arbetets upplägg och möjligheter till förbättring. Varmt tack till Nils Isaksson SWECO Infrastructure som presenterade grundidén till det här examensarbetet.

Jag vill även framföra ett varmt tack till DHI och Stefan Ahlman för studentlicensen av modellverkyget. Utan verkyget hade inte studien kunnat förverkligas. Ett hedersomnämning ges även till Else-Marie Wingqvist och SMHI för vågdata som varit en viktig byggsten i arbetet.

Uppsala 2009



Elon Jonsson

Copyright © Elon Jonsson och Institutionen för teknikvetenskaper, Elektricitetslära. Uppsala universitet.

UPTEC W09 001, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala 2009.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Simulering av vågförhållanden i vattenkraftmagasin

Elon Jonsson

Dammbyggnader är en av människans mest imponerande och komplexa byggnadsverk. Förhållandet med vatten på ena sidan och luft på den andra är något som naturen har svårt att godta. Historiskt sätt användes uppdämda vattenvolymer för att driva kvarnar och sågverk. Dagens användningsområde är framförallt uppdämning för vattenförsörjning och vattenkraft. Kraftindustrins forsknings- och utvecklingsarbete med att öka dammsäkerheten i Sverige är ett direkt svar på ett alltmer föränderligt och oförutsägbart klimat. Vidare byggdes flertalet svenska dammar i början och mitten av 1900-talet vilket betyder att många av dammarna måste ses över och rustas upp för kommande framtid.

I regel används ordet damm synonymt med dammbyggnad medan den uppdämda vattenytan brukar benämnas magasin eller dämningssområde. Dammbyggnader brukar vanligen delas in i två huvudgrupper, betongdammar och fyllningsdammar. Fyllningsdammar består i huvudsak av packat naturligt jordmaterial och i allmänhet krossat bergmaterial. Det krossade bergmaterialet utgör dammens erosionskydd. Erosionskyddet på fyllningsdammar skall utformas så att de medverkar till att åstadkomma en god dammsäkerhet genom att klara påverkan av laster som vågor, is och tjäle. I kraftindustrins riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS, finns anvisningar för hur erosionskydd skall utformas utifrån angripande laster. Denna studie fokuserar på källan till lasten som anbringas av vågorna, dvs. vågförhållandena i magasinet.

Anvisningarna över vågberäkningarna i RIDAS är viktiga ur dammsäkerhetssynpunkt eftersom de ofta styr hur stor säkerhetsmarginal som behövs mellan vattenyta och dammkrön. Vågberäkningarna är förknippade med stora osäkerheter, mycket på grund av vågors fysiska egenskaper men också till följd av de starkt skiftande förhållandena vid magasinen. Beräkningarna och bedömningarna försvåras ytterligare i fall då öar, uddar och uppgrundande partier befinner sig framför dammbyggnaden. Noggrannare utredningar är ofta påkallade, särskilt i de fall då magasinet har säregen form eller då överspolning av dammkrön riskeras.

Föreliggande arbete behandlar en noggrannare utredning vid Vojmsjöns regleringsdamm i Ångermanälvens system. Vad som skiljer denna undersökning från andra liknade utredningar är att tillvägagångssättet för hur vågförhållandena uppskattas är nytt. Förfaringsättet innebär att vågorna simuleras och analyseras utifrån en modell, MIKE 21 Spectral Wave. Modellen utför mer avancerade beräkningar och bygger på mer indata, i jämförelse med RIDAS beräkningsmetoder. Arbetets mer övergripande syfte har varit att utvärdera om tillvägagångssättet är en ny möjlig metod att utvärdera vågor i vattenkraftmagasin.

Eftersom modellen främst är framtagen för havsmiljö och att tillvägagångssättet är nytt genomfördes en kontroll och kalibrering av modellen. Åren 1982-83 genomförde SMHI vågmätningar i magasin Sädvajaure i Skellefteälvs system. Med vågmätningarna som referens kontrollerades modellen tillförlitlighet för begränsade vattenområden. Lämplig uppställning av modellen erhöles utifrån producentens manualer och liknande studier. Undersökning i Sädvajaure gav erfarenheter och kunskaper i hur modellen fungerar samt hur förändringar av olika faktorer påverkar simuleringsresultaten. Med dessa kunskaper och erfarenheter tillämpades modellen på fallstudie Vojmsjön.

Fallstudie Vojmsjön innebar dels vågberäkningar enligt dagens rekommenderade RIDAS beräkningsmetoder, dels simuleringar med modell. Utifrån RIDAS riktlinjer beträffande vind genomfördes olika simuleringar för att analysera vindriktningars och vindhastigheters påverkan på vågförhållandena i magasinet. Genom att förändra magasinets strandlinje framför dammen kunde även uddars påverkan analyseras. Som avslutande del jämfördes resultaten från beräkningarna enligt RIDAS med modellens simulerade.

Undersökningen i Sädvajaure magasin visar på en god överensstämmelse mellan uppmätta och simulerade värden. Trenden för de simulerade värdena överensstämde med vågmätningarna som SMHI utförde 1982. Modellens noggrannhet är starkt beroende av kvaliteten på indata. Mer tillförlitlig indata hade förmodligen bidragit till ännu bättre resultat. Fallstudie Vojmsjön visade på relativt stora skillnader i resultat mellan RIDAS rekommenderade beräkningsmetoder och modellens simulerade. RIDAS beräkningsmetoder överskattar våghöjderna framför Vojmsjöns regleringsdamm, främst till följd av att beräkningarna genomförs med grova förenklingar av magasinets form och att vågorna antas propagera fritt utan inverkan av refraktion och uppgrundande partier. En känslighetsanalys visade att magasinets form hade stor inverkan på våghöjderna framför Vojmsjöns regleringsdammen.

Denna studie är viktigt eftersom den lyfter fram en ny möjlig metod att utvärdera och analysera vågförhållanden i vattenkraftsmagasin. Metoden anses vara användbar och kan i många fall erbjuda en bättre bild av verkligheten än RIDAS beräkningsmetoder. Liknande mer grundliga undersökningar kan ge bra underlag för att fatta bra ekonomiska och dammsäkerhetsmässiga beslut.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT.....	iii
ABSTRACT	v
FÖRORD AV FÖRFATTARE	vii
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING.....	ix
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	xi
DEFINITIONER.....	xiv
1 INLEDNING	1
1.1 ORGANISATION.....	1
1.2 BAKGRUND	1
1.3 SYFTE.....	1
1.4 ARBETETS UPPLÄGG	2
1.5 AVGRÄNSNING.....	2
2 DAMMKONSTRUKTIONER	3
2.1 ALLMÄNT OM DAMMAR.....	3
2.2 BETONGDAMMAR	3
2.3 Fyllningsdammar.....	4
2.4 DAMMSÄKERHET OCH KONSEKVENSKLASSIFICERING	5
3 EROSION.....	7
3.1 EROSION PÅ DAMMAR.....	7
3.2 EROSIONSKYDD	7
3.2.1 Allmänt om erosionskydd.....	7
3.2.2 Mekaniskt stabila erosionskydd	8
3.3 VÅGLASTER	8
4 VÅGTEORI OCH VÅGFENOMEN.....	10
4.1 YTVATTENVÅGOR.....	10
4.1.1 Generering av vindvågor.....	10
4.1.2 Linjär teori	10
4.1.3 Vågors statistiska variation.....	12
4.1.4 Vågutbredning.....	12
4.2 VÅGFENOMEN.....	13
4.2.1 Diffraction	13
4.2.2 Refraktion	14
4.2.3 Reflektion, vindnivellering och stående vågor.....	14
5 VÅGBERÄKNINGAR I VATTENKRAFTMAGASIN	15
5.1 BERÄKNINGSMETODER FÖR VINDGENERERANDE VÅGOR	15
5.1.1 Uppskattning av vindstyrkor.....	15
5.1.2 Saville (1962)	16
5.1.3 Vågparametrar	16
5.1.4 Rekommendationer	17

5.2	VÅGUPPSPOLNING	17
5.3	VINDDENIVELLERING	18
5.4	FRIBORD MED HÄNSYN TILL VÅGOR.....	19
6	VÅGMODELLERING.....	20
6.1	MODELLERINGSVERKTYG.....	20
6.2	MIKE 21 SW	20
6.2.1	<i>Teori</i>	20
6.2.2	<i>Numerisk implementation</i>	21
6.2.3	<i>Beräkningsnät</i>	22
6.2.4	<i>Kalibreringsfaktorer</i>	22
6.3	MIKE 21 SW APPLICERBART FÖR VATTENKRAFTMAGASIN?.....	23
7	UTFÖRANDE	24
7.1	INGÅENDE OBJEKT	24
7.1.1	<i>Sädvajaure</i>	24
7.1.2	<i>Vojmsjön</i>	24
7.2	DATABEARBETNING.....	26
7.2.1	<i>Batymetri</i>	26
7.2.2	<i>Vågmätningar</i>	27
7.2.3	<i>Vinddata</i>	27
7.2.4	<i>Övrig data</i>	28
7.4	MODELLUPPSTÄLLNING.....	28
7.4.1	<i>Simulering Sädvajaure</i>	28
7.4.2	<i>Simulering fallstudie Vojmsjön</i>	29
7.6	BERÄKNINGAR ENLIGT RIDAS.....	30
8	RESULTAT OCH OBSERVATIONER	32
8.1	SIMULERING.....	32
8.1.1	<i>Sädvajaure</i>	32
8.1.2	<i>Fallstudie Vojmsjön</i>	33
8.2	KÄNSLIGHETSANALYS.....	35
8.3	VÅGBERÄKNINGAR I VOJMSJÖN ENLIGT RIDAS.....	38
9	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	40
9.1	SÄDVAJAURE	40
9.2	FALLSTUDIE VOJMSJÖN	40
9.3	JÄMFÖRELSE MOT PUBLIKATIONEN RIDAS	41
9.4	SLUTSATSER	41
9.5	FRAMTIDA STUDIER	42
10	REFERENSER.....	43
BILAGA 1	I
	VÅGBERÄKNINGAR I VOJMSJÖN.....	I
	<i>Effektiv stryklängd enligt Saville</i>	I
	<i>Dimensionerande vindhastigheter</i>	III
	<i>Vågparametrar</i>	III
	<i>Våguppspolning</i>	III

<i>Vinddenivellering</i>	<i>IV</i>
<i>Erforderligt fribord</i>	<i>IV</i>

DEFINITIONER

Damm

Barriär över vattendrag med syfte att lagra kontrollera och/eller avleda vatten.

Magasin

Uppdämda vattenytan uppströms dammkonstruktion.

Dammbrott

Okontrollerad utströmning av uppdämt vatten som utgör risk för människor och egendom.

Dammsäkerhet

Med dammsäkerhet avses säkerhet mot uppkomst av okontrollerad utströmning från magasin som kan medföra skador.

Dämningsgräns (D.G.)

Högsta tillåtna normala vattenstånd enligt vattendom.

Sänkningsgräns (S.G.)

Lägsta tillåtna normala vattenstånd enligt vattendom.

Magasinkapacitet

Den totala lagringskapaciteten av vatten mellan sänkningsgräns och dämningsgräns.

Fribord

Vertikal höjdskillnaden mellan dämningsgräns och dammkrönets lägsta nivå.

Vinddenivellering

Snedställning av vattenyta till följd av ihållande vind.

Dimensionerande flöde

Flödet som en damm och dess avbördningssystem måste kunna tåla eller avbörda utan risk för skada på damm eller avbördningssystem.

Batymetri

Beskriver terrängens fysiska form under vattnet.

Dissipation

En minskning i vågenergi och därmed avtagande våghöjd till följd av olika fysiska företeelser.

Propagering

Beskriver hur vågorna förändras när de färdas i rummet.

1 INLEDNING

Det här kapitlet innehåller en genomgång av ämnesområdet och syftet med studien. Vidare ges även en beskrivning på arbetets upplägg samt viktiga avgränsningar som ger insatta läsare möjligheten att snabb hitta relevant information .

1.1 Organisation

SWECO Infrastructure Vattenkraft och Dammar har fått i uppdrag av Ångermanälvens Vattenregleringsföretag AB att upprätta förslag till utförande av dammsäkerhetshöjande åtgärder vid Vojmsjöns regleringsdamm. Detta examensarbete har löpt parallellt med utredningen i uppdragets del med att utvärdera vågförhållandena i regleringsmagasinet.

1.2 Bakgrund

Rätt dimensionering av erosionsskyddet på fyllningsdammar är en viktig del för att åstadkomma en god dammsäkerhet. Principen bakom dimensioneringsreglerna är att vissa specifika, sällan förekommande, yttre laster skall kunna motstå utan att dammsäkerheten äventyras. Reparering och komplettering av underdimensionerade erosionsskydd är tekniskt svårt och kostsamt. I dagsläget används RIDAS teoretiska beräkningar och bedömningar för att utvärdera våglaster vid dimensionering och utformning av erosionsskydd. Noggrannare analyser är ofta påkallade, särskilt i de fall då magasinet har säregen karaktär eller då överspolning av dammkrön riskeras. Ytterligare studier behövs för att bättre kunna förutse och analysera vågförhållandena i vattenkraftmagasin.

Lanseringen av modellverktyget MIKE 21 Spectral Wave 2008 tillsammans med datorernas ökade prestanda introducerar nya möjligheter att granska vågförhållanden i magasin. MIKE 21 SW är en tredje generations vind-/våg modell och använder, till skillnad från dagens beräkningsmetoder, mer avancerade beräkningar som bygger på mer indata. MIKE 21 SW behandlar även många av vindgenererade vågors fysiska egenskaper.

Objektet som studerats är Vojmsjöns regleringsmagasin i Ångermanälvens övre del. Magasinet är av långsmal natur och har i söder, framför dammkonstruktionen, varierande struktur i form av öar, uddar och uppgrundande partier. Magasinet har alla egenskaper som medför osäkerheter för de teoretiska vågberäkningarna och bedömningarna. Vattenregleringsföretagen tillsammans med SWECO har därför ansatt att en mer ingående utredning har varit befogad.

1.3 Syfte

Syftet med examensarbetet är att med hjälp av numeriska modellen MIKE 21 SW analysera vågförhållandena i Vojmsjöns regleringsmagasin. Eftersom tillvägagångssättet är nytt och att modellen främst är framtagen för havsmiljö torde någon form av verifiering, om möjligt kalibrering genomföras. Ett mer övergripande syfte är att utreda om tillvägagångssättet är en ny möjlig metod för att utvärdera vågor i vattenkraftmagasin.

Arbetets mål är att utreda storleken på våglasterna mot Vojmsjöns regleringsdamm. Målet är även att försöka identifiera eventuella skillnader i resultaten mellan RIDAS beräkningsmetoder och de med modellen simulerade.

1.4 Arbetets upplägg

Studien genomfördes och utarbetades i tre faser. Dessa kan uppdelas i en planerande och orienterande fas, en genomförande fas och en utvärderingsfas.

Inledande fas syftade främst i att erhålla teoretiska kunskaper inom området. Vidare kontaktades producenten av modellverktyget angående möjligheterna att bruka en studentlicens. Tidigt påbörjades sökandet av indata till modellen. Genomförandefasen var mest omfattande, modellverktygets manualer och menysystem studerades och en betydande databehandling påbörjades. Att lära känna ett nytt modellverktyg har varit utmanande. Slutgiltiga fasen i studien präglades av analyser och kontroller av modellens simulerade resultat.

1.5 Avgränsning

Inledande kapitel, dammkonstruktioner och erosion, är enklare orienterande kapitel. Läsare med goda kunskaper om dammar, dammsäkerhet och dammkonstruktioner kan därför läsa dessa kapitel mer flyktigt.

Det finns redan en rad examensarbeten och rapporter som grundligt behandlar erosionsskyddet på fyllningsdammar och de beräkningsmetoder som används för att beräkna dimensionerande laster. Detta examensarbete fokuserar istället på främsta orsaken till varför man erosionsskyddar fyllningsdammar, nämligen vågförhållandena i magasinen. Den här studien skiljer sig från andra publikationer och undersökningar genom att använda ett helt nytt tillvägagångssätt för att utvärdera vågförhållandena i magasinet. En djupdykning hur modellen arbetar har inte hunnit behandlats utan endast de mest elementära delarna tas upp. Läsare med stort intresse för vågmodellering hänvisas till *Lin (2008)* och *Komen m.fl. (1994)*. Detta arbete behandlar och diskuterar i första hand RIDAS riktlinjer. Andra beräkningsmetoder hittas i tidigare rapport *Cedervall och Bergh (1995)* som ger en god överblick av metoderna och jämför dessa. I huvudsak har svensk litteratur används förutom den delen i studien som behandlar vågmodellering.

2 DAMMKONSTRUKTIONER

Det här kapitlet ger en kortare orientering om dammar och olika konstruktionsmetoder. I övrigt ges en beskrivning av dammsäkerhet och det klassificeringssystem som används.

2.1 Allmänt om dammar

En dammbyggnad är ett bygnadsverk som utgör barriär över en terrängsänka med syfte att lagra, kontrollera och/eller avleda vatten eller annan vätska. Ofta används ordet damm synonymt med dammbyggnad men det kan också beteckna den uppdämda vattenytan. I regel används dock andra benämningar för detta såsom, dämningssområde, regleringsmagasin, vattenspegel eller endast magasin.

Dammbyggnader brukar indelas med avseende på ändamål, användning och bygnadsmaterial. I Sverige står Kraftbolagen och vattenkraften för den största andelen och de mest uppmärksammade dammkonstruktionerna. Utbyggnaden av de Svenska älvarna var som störst under 1950, -60 och -70 talet och innebar ett stort ingrepp i naturen. Idag är det framförallt gruvindustrin som står för nybyggnationerna av dammar i Sverige. Stora dammar indelas ofta efter bygnadsmaterial och konstruktionsmetod. Nedan följer en vanlig indelning med två huvudgrupper, betongdammar och fyllningsdammar.

2.2 Betongdammar

Kombinationen av täthet och egentyngd hos betongen gör det möjligt att uppföra en dammbyggnad med endast ett material. Beroende på konstruktionsmetod så delas betongdammar vanligen in i tre olika huvudgrupper, gravitationsdammar, lamelldammar och valvdammar.

Gravitationsdammar använder dammkroppens egentyngd tillsammans med undergrundens friktion för att hindra dammen från att stjälpas eller glida. Tyngden används för att i vertikalled överföra det horisontala trycket till undergrunden. Gravitationsdammar är i huvudsak utförda av oarmerad betong. För att minimera åtgången av betong utvecklades nya konstruktionsmetoder. Lamelldammar, eller även kallade pelardammar, är slankare och lättare konstruktioner som innehåller avsevärt mindre betong än gravitationsdammar. Konstruktionen består i regel av en frontplatta som upptar vattentrycket och en stöpelare i form av en vertikal skiva som för ned vattenlasten till grunden. Konstruktionsmetoden medför därmed att dammbyggnadens tyng har en underordnad betydelse. Eftersom betongen stressas mer, till skillnad från betong i gravitationsdammar, armeras både frontplattan och stöpelare. Lamelldammar är lämpliga att använda vid dammlägen då undergrunden inte tål stor belastning. Valvdammar är utan tvekan de mest uppmärksammade dammkonstruktionerna. Konstruktionen är något rundade i utformningen och överför vattenlasten främst genom valvverkan till förankringar i berggrunden vid dalgångens bågiga sidor. Dalgångens sidor måste därav vara av god högkvalitativt berg. Valvdammar är lämpliga vid relativt trånga dalgångar. I Sverige finns det endast ett fåtal valvdammar. En av dessa ligger i Ljusnan Krokströmmen, Figur 1. Det finns självklart varianter av de tidigare nämnda huvudgrupperna, *Spade (1999)*.



Figur 1. Valvdamm i Krokströmmen, Ljusnan.

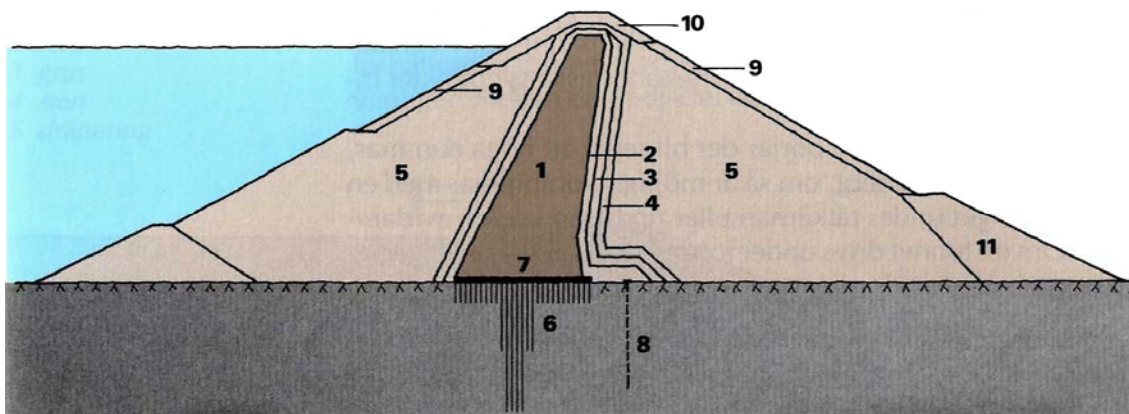
Källa: Dammsäkerhet – egenkontroll och tillsyn, Svenska Kraftnät (2007)

2.3 Fyllningsdammar

Fyllningsdammar är en gemensam benämning på dammar som i huvudsak består av packat naturligt jordmaterial och i allmänhet krossat eller sprängt bergmaterial. I Sverige och även internationellt är fyllningsdammar den vanligaste dammtypen. Fyllningsdammar är den äldsta typen av dammkonstruktion och brukar delas in i jord- och stenfyllningsdammar beroende på dominerande fraktion. Utformningen av fyllningsdammen anpassas bland annat till undergrunden som dammen ska byggas på och jordmaterial som finns inom rimligt avstånd. Klimatförhållanden påverkar också dammbyggnadens utformning. De långa vinterperioder med temperaturer under 0°C som råder i norra Sverige ger andra förutsättningar än för områden där klimatet karakteriseras av regnperioder och torrperioder. Därav är uppbyggnaden och grundläggningen unik för varje dammbyggnad.

Tvärsnittet hos den vanligaste typen av fyllningsdamm består av ett antal zoner med olika fysikaliska egenskaper. Figur 2 visar zonerna som har i uppgift att tillsammans säkerställa dammbyggnadens stabilitet och funktion. Centralt finns en tätande zon som brukar benämnas tåtkärna. Tåtkärnan består av morän som lagts ut i lager och komprimerats så att vattengenomsläppligheten är låg. Runt tåtkärnan finns skyddande zoner, filter, som består av sand och grusmaterial. Filtren håller tåtkärnan på plats och förhindrar att tåtkärnan transporteras bort om ett läckage skulle uppstå. Utanför filterzonerna finns stödfyllning som stabiliserar den tätande zonen och för ner vattenlasten till grunden. Ytskiktet på dammbyggnaden skyddas från vågor och ytvatten genom erosionskyddet som ofta består av sprängsten. Betongplatta hindrar genomgående sprickor till följd av spänningsändringar av dammlasten och dämningen samt ger ett mottryck vid injektering så att sprickorna i berget fylls ända upp mot betongen. Injektering säkrar bergets täthet längs ytan och på djupet. Dammtåstödet säkerställer fyllningsdammens stabilitet. Fyllningsdammar är den för studie intressanta konstruktionsmetoden och kommer behandlas ytterligare i kommande kapitel erosion.

För mer ingående läsning om fyllningsdammar och de olika dammtyperna rekommenderas Vattenfalls handbok *Jord- och Stenfyllningsdammar, Vattenfall (1988)*.



Figur 2. Principsektion av fyllningsdamm (>15 m) med jordkärna.

Källa: Jord- och Stenfyllningsdammar, Vattenfall (1988)

- | | |
|-----------------|---|
| 1. Tätkärna | 7. Betongplatta |
| 2. Finfilter | 8. Filterbrunn |
| 3. Mellanfilter | 9. Släntskydd (benämns erosionskydd i texten) |
| 4. Grovfilter | 10. Krönskydd |
| 5. Stödfyllning | 11. Dammtåstöd |
| 6. Injektering | |

2.4 Dammsäkerhet och konsekvensklassificering

År 1918 tillkom vattenlagen i Sverige som behandlade byggande i vatten, t.ex. dammbyggnader. Lagen behandlade inte några särskilda regler om dammsäkerhet eller övervakning utan det var dammägaren som avgjorde hur dammen skulle konstrueras, byggas och övervakas. Dimensioneringen av dammens olika delar baserades på erfarenheter och lärdomar från liknande projekt så som vågbrytare och hamnbyggnationer. I mitten på 1980-talet och under 1990-talet förekom frekvent höga flöden och översvämningar på olika håll i landet. Behovet av gemensamma och heltäckande riktlinjer växte fram och resulterade i "Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet", benämnda RIDAS, som blev klara 1997.

Enligt *Svenska Kraftnät (2007)* är definitionen av dammsäkerhet "Med dammsäkerhet avses säkerhet mot uppkomst av brott i en dammbyggnad som kan medföra skador genom okontrollerad utströmning av vatten som dämns upp med hjälp av dammbyggnad".

Konsekvenserna av ett dammbrott beror på många faktorer, några av dessa är magasinets storlek, dammens höjd, typ av damm och topologiska förhållanden nedströms. Ett dammbrott vid en av Sveriges större anläggningar skulle kunna leda till stora förluster samtidigt som ett dammbrott vid en mindre anläggning skulle ge ringa förluster. Med bakgrund av detta har man valt att bedriva dammsäkerheten konsekvensstyrt vilket betyder att dammbyggnader klassificeras utifrån de konsekvenser som ett dammbrott skulle förorsaka. *RIDAS (2008)* klassificering av dammar består av fyra konsekvensklasser, se tabell 1 och 2. Konsekvensklass 1A motsvarar den allvarligaste konsekvensen och klass 3 den lindrigaste. Klasserna utvärderar i sin tur sannolikheten för förlust av människoliv eller allvarlig personskada samt skador på miljö, samhällsanläggningar och andra ekonomiska värden. Konsekvensklassificeringen redovisas i två tabeller, en för människoliv och personskador och den andra för skador på materiella ting. Dammens konsekvensklass erhålls genom att den högsta klassningen ur tabellerna blir den gällande och som i sin tur avgör vilka säkerhetskrav som skall uppfyllas. För en närmare beskrivning av sannolikhetsnivåerna och konsekvensbeskrivningarna hänvisas läsaren till *RIDAS (2008)* kapitel 2.3.

Tabell 1. Konsekvensklassificering med avseende på risk för personskada och människoliv.
Källa: RIDAS (2008)

Konsekvensklass	Konsekvens
1A	<u>Hög sannolikhet</u> för förlust av många människoliv
1B	<u>Sannolikheten</u> för förlust av människoliv eller för allvarlig personskada <u>är icke försumbar</u> .
2	Sannolikheten är försumbar för skadefall enligt ovan.

Tabell 2. Konsekvensklassificering med avseende på risk för materiella skador.
Källa: RIDAS (2008)

Konsekvensklass	Konsekvens
1A	<u>Hög sannolikhet</u> för: mycket allvarlig skada på - viktiga samhällsanläggningar - betydande miljövärde eller mycket stor ekonomisk skadegörelse
1B	<u>Sannolikheten är beaktansvärd</u> för: allvarlig skada på - viktiga samhällsanläggningar - betydande miljövärde eller <u>Hög sannolikhet</u> för: - stor ekonomisk skadegörelse
2	<u>Sannolikheten är icke försumbar</u> för: beaktansvärd skada på - samhällsanläggningar - miljövärde eller - ekonomisk skadegörelse
3	Sannolikheten är försumbar enligt skadefall enligt ovan.

3 EROSION

Det här avsnittet behandlar erosion på fyllningsdammar. Beskrivningen är inte på något sätt heltäckande utan redogör främst för våglaster och dess inverkan på erosionsskyddet.

3.1 Erosion på dammar

Erosion är en process som nöter ned och formar bergrunden och jordtäcknet genom rinnande vatten, vind, vågor eller is i rörelse. Erosion på dammar, framförallt jord- och stenfyllningsdammar, brukar delas upp i ytvattenerosion och grundvattenerosion, *Vattenfall (1988)*. Grundvattenerosion kan inträffa var som helst i jordlagret, där grundvattnets hastighet blir för stor, medan ytvattenerosion äger rum i gränsskiktet mellan ytströmmande vatten och jordlager. Dammsäkerheten bestäms av dammens svagaste del och det försvar mot vattengenomströmning som kan användas på den platsen.

Grundvattenerosion är kanske den mest förädiska av de två eftersom den i regel är svår att upptäcka och kan leda till katastrofala följder om det får fortlöpa. Förutsättningar för grundvattenerosion finns i de flesta naturliga jordar. Lager med mer vattengenomsläppliga material ansamlar grundvattnet och om jordlagret består av erosionskänsligt material och vattenhastigheten är tillräckligt stor sker en materialtransport. Erosion av denna typ har varit den huvudsakliga orsaken vid många dammbrott.

Ytvattenerosion påverkar dammens samtliga sidor. Erosionsprocesserna på uppströmslätten beror till stor del av vågor medan framförallt regnvatten och snösmältning påverkar dammkrönet och nedströmsidan. Dammkrönet kan också utsättas för den ej önskvärda situationen överspolning. Vid överspolning kommer stora mängder vatten skölja över dammkrönet och risken för dammbrott är stor.

Frost, is och låga temperaturer påverkar i synnerhet uppströmslätten. Som bekant har ett istäcke avsevärd styrka och utsätter uppströmslätten för tryckande och dragande krafter. Ett istäckes rörelse beror till stor del av vinden och vattnets rörelse.

3.2 Erosionsskydd

En fyllningsdamm skyddas mot erosion på uppströmslätten, dammkrönet och nedströmslätten. Erosionsskyddet på uppströmslätten är den del som utsätts för störst laster, främst av vågor och is. Rätt dimensionerat erosionsskydd är således viktigt för att åstadkomma en god dammsäkerhet. Erosionsskador på uppströmslätten är en vanlig reparationsorsak. En reparation eller uppgradering av ett underdimensionerat erosionsskydd är tekniskt svårt och kostsamt.

3.2.1 Allmänt om erosionsskydd

Stranderosion är en process som förekommer naturligt på de flesta platser där vatten möter land. Det har länge varit känt att en strandlinje som inte erosionsskyddas löper stor risk för omfattande erosionspåverkan. Det finns olika metoder att minska erosionen vid en strandlinje. Enligt *Rytters 1999* görs en första grov indelning för metoderna att hindra den naturliga erosionen

1. Reduktion av angripande laster
2. Tillförsel av instabilt offermaterial
3. Mekaniskt stabila erosionsskydd

Reduktion av angripande last angriper problemet genom att minska vattenströmningen och vågornas eroderande kraft innan de når fram till det erosionskänsliga området. Metoden är tämligen vanlig vid hamnbyggnationer, ofta i form av vågbrytare. Metoden anses vara mindre lämpad i vattenkraftmagasin mycket på grund av det omedelbart ökande djupet i magasinen. Stora djup erfordrar omfattande och stora konstruktioner.

Tanken med att tillföra offermaterial bygger på att det erosionskänsliga området förses med ett tjockt lager av material som tillåts erodera bort. Metoden används för att skydda naturliga stränder men anses mindre lämpad på fyllningsdammar eftersom materialet behöver en slänt med flack lutning för att ligga kvar.

3.2.2 Mekaniskt stabila erosionskydd

Den sista metoden är mekaniskt stabila erosionskydd som använder sin vikt och/eller styrka för att fånga upp angripande last. Det finns en rad olika material och tillvägagångssätt för utformningen av ett mekaniskt stabilt erosionskydd.

Mekaniskt stabilt erosionskydd brukar delas in i täta respektive genomsläppliga erosionskydd. Vid utformningen av täta erosionskydd används material som betongplattor, vältbetong, jord-cement blandning och asfaltbeläggningar. Gemensamt för dessa material är att de levererar en god tätande förmåga på uppströmslätten. Genomsläppliga erosionskydd har funktionen att snabbt utjämna de varierande krafter som uppkommer när vågor slår in mot konstruktionen vilket motverkar obalans och instabilitet. Ett vanligt utförande är flexibla, genomsläppliga erosionskydd. Flexibilitet är en viktig egenskap hos erosionskydd eftersom fyllningsdammar ofta utsätts för sättningar och sjunkropar. Vanliga material är block av sprängsten och betong som antingen placeras som ordnat eller oordnat erosionskydd. Figur 3 och 4 visar ordnat respektive oordnat erosionskydd av sprängsten.



Figur 3. Ordnat erosionskydd, provyta Håckrendammen.

Källa: SWECO



Figur 4. Oordnat erosionskydd, Grundsjädammen

Källa: SWECO

För en mer grundlig genomgång av mekaniskt stabila erosionskydd hänvisas läsaren till *Rytters (1999)*.

3.3 Våglaster

Erosionskyddet dimensioneras för att klara de våglaster som magasinet kan frambringa. Likartade förhållanden hittar vi vid kusten där hamnar och andra konstruktioner utsätts för omfattande erosion och stora laster. Främsta olikheten mellan en strand- och kustlinjen är att

vattenmassan är betydligt mindre framför en strandlinje. Strandlinjen för begränsade vattenområden påverkas avsevärt mycket mindre av vågor och strömmar.

Vågerosion, även kallad abrasion, sker tills största delen i surfzonen som är zonen mellan strandlinjen och den brytande vågen. Surfzonen i begränsade vattenområden är i regel väldigt kort. Vågorna påverkar erosionskyddet främst genom sin sköljande och bortspolande effekt. Vågturbulensen kastar lösa korn av och an i varierande vattenhastighet och transporterar bort mindre partiklarna. Vågor och strömmande vatten eroderar olika. Vågor eroderar i två riktningar till skillnad från strömmande vatten, *Reeve m.fl. (1944)*.

I kapitel fem, vågberäkningar i vattenkraftmagasin, behandlas de olika beräkningsmetoderna som används för att beräkna dimensionerande våglast mot erosionskydd i Svenska magasin.

4 VÅGTEORI OCH VÅGFENOMEN

Syftet med detta kapitel är att förbereda läsare med kunskaper inom vattenvågor och dess uppkomst. Kapitlet behandlar grundläggande begrepp inom vågteori och vågfenomen, med inriktning mot begränsade vattenområden.

4.1 Ytvattenvågor

Ytvattenvågor förekommer i översta lagret i en vattensamling. Storleken på vågorna varierar mellan små kapillärvågor till stora tsunamis. Man brukar dela in ytvattenvågor beroende på hur de har bildats t.ex. vindvågor, dyningar, seicher (stående vågor, resonansvågor), fartygsvågor eller vågor som bildats av geologiska aktiviteter. Ytvattenvågor som är relevant i detta arbete är framförallt vindgenererande vågor.

4.1.1 Generering av vindvågor

Vindvågor växer från kapillärvågor som bildas när friktionen från vinden sträcker vattenytan samtidigt som ytspänningen försöker föra vattnet tillbaka i jämviktsläge. Energiutbytet mellan vinden och vattenytan expanderar vattenpartiklarnas cirkulära bana i vindriktningen. Kapillärvågorna övergår till vindvågor när våglängden blir större än 1,73 cm, *Garrison (1999)*. Efter övergången är den huvudsakliga återställande kraften gravitationen och med bakgrund av detta tillhör vindgenererande vågor gruppen gravitationsvågor. Vanligen delas gravitationsvågor in med hänsyn till vattenpartiklarnas rörelse, transporterande vågor eller svängande vågor. I detta arbete behandlas framförallt svängande vågor som brukar delas in i fortskridande eller stående vågor.

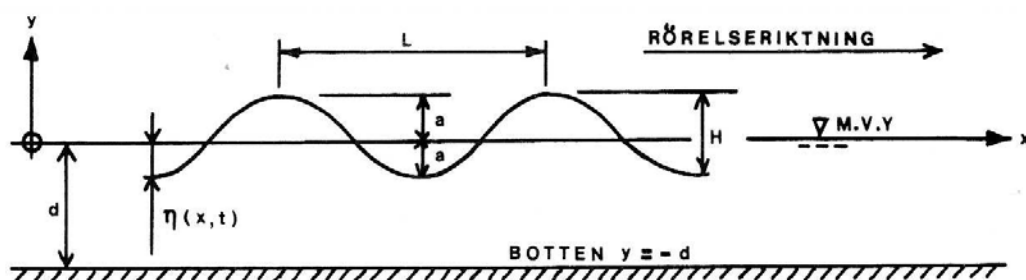
Vågor har olika egenskaper beroende på om de fortfarande är under inverkan av vinden eller om de lämnat genereringsområdet. Kortperiodiska vågor som lämnar genereringsområdet fortplantas långsamt och dör i regel ut relativt snabbt. Vågor med längre perioder och mindre amplituder fortplantas snabbt och gör av med lite energi när vågen transporteras. Dessa vågor dämpas långsamt och kan observeras tusentals kilometer från genereringsområdet. Denna kategori vågor brukar benämnas svall eller dyningar.

Ytvattenvågor genererade av vinden uppvisar stor variation i vågornas form, hastighet och även riktning. Vågmönstret har ett komplext utseende där snabba vågor passerar genom långsamma och ibland förstärker eller släcker ut varandras amplituder. En beskrivning av vattenytan är därför svår att göra. Nedan behandlas en av teorierna för att beskriva enskilda vågors form och propagering.

4.1.2 Linjär teori

Den klassiska och mest använda teorin för att beskriva enkla vågor utvecklades av G.B. Airy 1945, *Reeve m.fl. (1944)*. Teorin förutsätter att vågens amplitud är liten i förhållande till våglängden varför termer av högre ordning försummas. Teorin brukar benämnas 1:a ordningens teori, linjär teori eller teorin för vågor med liten amplitud, eng small amplitude wave theory.

Figur 5 visar en harmonisk fortskridande våg i positiv x-riktning och Tabell 4 redovisar förekommande beteckningar.



Figur 5. Fortskridande sinusformad våg.

Källa: Vallander (1997)

Tabell 3. Parametrar som definierar en fortskridande svängande våg.

Beteckning	Förklaring	Beteckning	Förklaring
x	horisontal koordinat, positiv i vågens rörelseriktning	$H = 2a$	våghöjden
y	vertikal koordinat från lugnvattenyta, positiv uppåt	L	våglängden
d	vattendjup från lugnvattenyta	T	vågperiod
$\eta(x, t)$	rörliga vattenytans läge i förhållande till botten	$c = \frac{L}{T}$	våghastigheten
t	tiden	$k = \frac{2\pi}{L}$	vågtalet
a	vågamplitud	$\sigma = \frac{2\pi}{T}$	vågens vinkelfrekvens

Härledningen av den linjära teorin baseras på att det finns en funktion, hastighetpotential som definierar de horisontella och vertikala komponenterna av vattenpartiklarnas hastighet i en punkt. Med antagandet att vätska är ideal införs hastighetpotentialen i kontinuitetsekvationen som satisfieras av Laplace ekvation. Laplace differentialekvation löses med lämpliga randvillkor. Ekvationerna kan förenklas för djupt och grunt vatten eftersom olika vågkaraktäristika, asymptotiskt ansluter till gränsvärden när förhållandet d/L varierar. Tabell 4 presenterar några, för studien, intressanta storheter.

Tabell 4. Vågkaraktäristika för fortskridande sinusvåg enligt linjär teori.

Storhet	Grunt vatten $d/L < 0,05$	Övergångszon $0,05 < d/L < 0,5$	Djupt vatten $d/L > 0,5$
Våglängd, L	$T\sqrt{gd}$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd$	$\frac{gT^2}{2\pi}$
Våghastighet, c	\sqrt{gd}	$\frac{gT}{2\pi} \tanh kd$	$\frac{gT}{2\pi} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$
Vattenpartiklarnas banor	Linjär bana	Elliptisk bana	Cirkulär bana

Vågor på djupt vatten, även kallad djupvattenvågor, påverkas inte av botten och vattenpartiklarna rör sig i cirkulära banor men minskar snabbt med ökat djup. På djupt vatten är

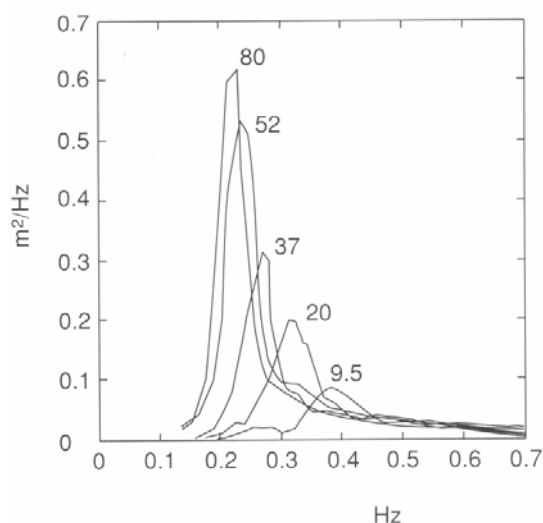
våghastigheten beroende av våglängden. Ökad våglängd ger en ökning i våghastighet. Vågor som propagerar i övergångszonen eller över grunt vatten påverkas av botten. I övergångszonen rör sig vattenpartiklarna i elliptiska banor medan vid grunt vatten oscillerar partiklarna fram och tillbaka. Våghastigheten är beroende av vattendjupet. Minskat djup leder till lägre våghastighet. En komplett lista över samtliga vågkaraktistika för en fortskridande sinusvåg enligt linjär teori kan hämtas i *Lin (2007)*.

4.1.3 Vågors statistiska variation

Ett sätt att beskriva regelbundna vågors statistiska fördelning för ett vågmönster är med hjälp av ett energispektrum, eller vågspektrum. Ett vågspektrum beskriver energifördelningen över vågperioder vid ett visst sjötillstånd, *Reeve m.fl. (1944)*. Utifrån registreringar och fouriranalys av vågtåg kan ett vågspektrum bestämmas.

Empiriska standardspektra bygger på medelvärden från många olika vågtåg och kan bestämmas utifrån vindstyrka, stryklängd och vindens varaktighet. Ett vanligt förekommande standardspektra är JONSWAP som baseras på observationer från projektet Joint North Sea Wave Observation Project, *Hasselmann et al (1973)*. JONSWAP bygger på förhållanden med begränsad stryklängd och skrivs ofta som funktionen av frekvensen. Figur 6 visar spekrat med olika grafer för olika stryklängder i kilometer.

II.9 Observations of spectral shape



Figur 6. Utveckling av vågspektra med stryklängder i kilometer för vindar till havs, 11-12 h, sept. 15 1968.

Källa: Komen m.fl. (1994)

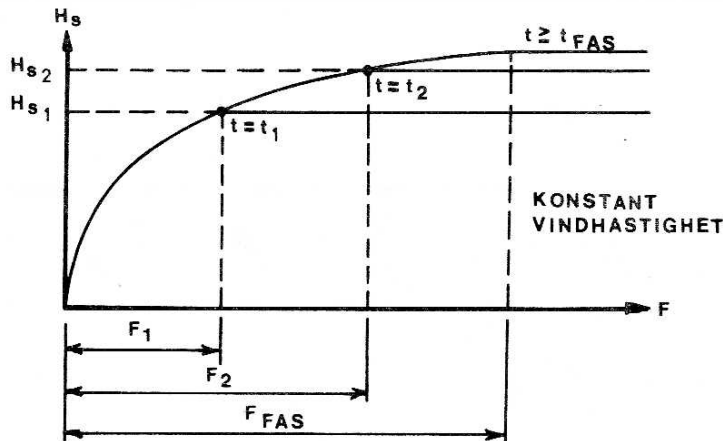
4.1.4 Vågutbredning

För att karakterisera vågornas storlek har man infört två statistiska begrepp, signifikant våghöjd och vågperiod. Signifikanta våghöjden H_s är medeltalet av de $N/3$ högsta vågorna i en serie med N vågor. På samma sätt är signifikanta vågperioden T_s medeltalet av vågperioderna hos de $N/3$ högsta vågorna.

Storleken på vågorna är en funktion av vindens hastighet, vindens varaktighet och den sträcka över vilket den blåser dvs. fetch eller stryklängd. Om vinden blåser över ett tillräckligt stort område under en längre tid laddas vågorna med stora mängder energi och vågrörelsen tenderar att bli instabil. Detta tillstånd kallas mogen sjö eller på engelska FAS, Fully Arien Sea. Vid detta tillstånd slutar vågor att växa oavsett stryklängdens storlek. När vågorna propagerar in mot land och bryter släpps all den energi som tagits upp av vinden.

Sambandet mellan våghöjd, stryklängd och vindvaraktighet åskådliggöra lättare med hjälp av Figur 7 från *Vallander (1977)*. Horisontala linjerna i Figur 7 är relaterade till en viss vindvaraktighet t . Vid vindvaraktigheten t_1 erhålls våghöjden H_{s1} utmed stryklängden F_1 för att sedan vara konstant, trots att ökad stryklängd. Våghöjden är i detta fall bestämd av vindvaraktigheten. För sträckan innan F_1 är våghöjden mindre än H_{s1} och här bestäms våghöjden av stryklängden. Med andra ord är vindvaraktigheten t_1 den minsta vindvaraktigheten för att

stryklängden F_1 skall bestämma vågstorleken. I fallet då vindvaraktigheten ökar till t_2 är sträckan fram till F_1 oförändrad. Ökningen i våghöjd sker mellan F_1 och F_2 . Figuren förevisar även tillståndet FAS med en stryklängd F_{FAS} för en minsta vindvaraktighet t_{FAS} som är gränsen då ytterligare vågtillväxt avstannar vid konstant vindhastighet.



Figur 7. Signifikanta våghöjdens tillväxt längs stryklängder.

Källa: Vallander (1997)

För stora och breda vattenområden är stryklängden lika med avståndet i vindriktningen från den strandlinje varifrån det blåser till den aktuella platsen. För begränsade vattenområden, t.ex. vattenkraftsmagasin, är stryklängderna i allmänhet korta. Följaktligen är också vågorna relativt små och korta. För de områden där bredden är liten i förhållande till längden kommer sidorna av området att inverka på storleken av vågorna. Vid vågberäkningar för begränsade vattenområden införs därför ofta begreppet effektiv stryklängd. Det finns olika metoder för att beräkna den effektiva stryklängden. Att nämna är; Vallander (1977) metod som avser beräkningar av vågstorlekar i Skärgårdsmiljö, USBR (1992) metod som är utarbetad utifrån mätningar i Great Lakes på gränsen mellan USA och Kanada och oceanområden, Saville (1962) metod som är baserad på mätningar i dammreservoarer i USA under åren 1950-1954.

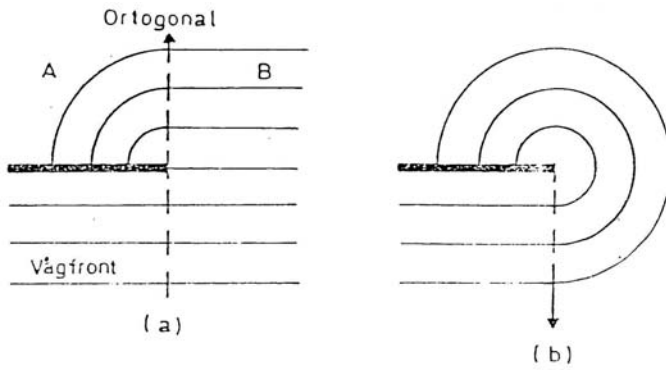
I studien *Cedervall och Bergh (1995)* beskrivs bakgrunden för de olika metoderna. Denna rapport behandlar endast den enligt RIDAS rekommenderade metoden, Saville (1962).

4.2 Vågfenomen

I vattenområden uppstår olika vågfenomen som kan ha positiv eller negativ inverkan på människans konstruktioner beroende på situation. I regel är det svårt att förutse fenomenen och uppskatta dess inverkan i olika lägen. Nedan beskrivs några vanliga vågfenomen som är av intresse för detta arbete. Bilder och information är hämtat från *Bergh*.

4.2.1 Diffraktion

Diffraktion är ett fenomen som uppträder när vågor böjer av runt ett hinder och en del av energin diffunderar in i skuggområdet. Figur 8 a) visar en schematisk bild över vågkammar som propagerar in vinkelrätt mot en vågbrytare. Vågorna som träffar vågbrytaren dödas eller reflekteras helt eller delvis medan energin i de vågor som passerar vågbrytaren fortplantas in i område A. Cirkelformade vågfronter bildas i området. Våghöjderna i området B kommer att påverkas eftersom energi diffunderar in i område A. Vågbilden kompliceras ytterligare då de reflekterade vågorna diffrakterar in i område B och A, Figur 8 b)

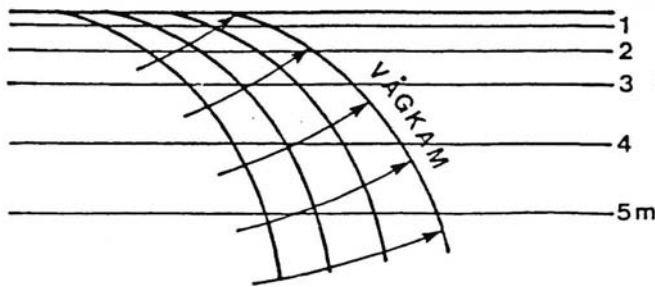


Figur 8. Schematisk bild av fenomenet diffraktion.

Källa: Bergh

4.2.2 Refraktion

Vågor som vandrar in med sned riktning mot en uppgrundande botten strävar att bli parallell med strandlinjen. Egenskapen kallas refraction och uppkommer på grund av att vattendjupet varierar längs en vågkam, se Figur 9. Som nämnts tidigare är våghastigheten i grunt vatten och i övergångszonen beroende av vattendjupet. Delen av vågkammen som befinner sig längst in mot stranden har lägre hastighet än delen av vågkammen som befinner sig längst ut. Vågorna tenderar till att böja av och bli parallell med botten nivåkurvor.



Figur 9. Schematisk bild av fenomenet refraction.

Källa: Bergh

4.2.3 Reflektion, vindnivellering och stående vågor

Tidigare har framförallt propagerande vågor i en riktning behandlats, så behöver dock inte alltid fallet vara. En vertikal barriär kan reflektera tillbaka propagerande vågor utan att vågen tappar särskilt mycket energi. Om vågorna träffar barriären vinkelrätt kommer vågorna att vända och propagera i omvänd riktning. Den reflekterande vågen har samma fas men omvänd riktning. Detta fenomen benämns stående vågor, eng standing waves, eftersom det ger vertikala stillastående oscillerande rörelser. Som namnet antyder propagerar inte dessa vågor utan förekommer endast som alternativa vågtoppar och vågdalar vid en fix position.

Stående vågor förekommer inte endast lokalt i samband med reflektion utan kan även förekomma mer storskaligt. Vindnivellering är ett fenomen som snedställer vattenytan till följd av ihållande vind. När vinden avtar tenderar vattnet att svänga fram och tillbaka i magasinet, fenomenet brukar benämnas seiche, *Tom Garrison (1999)*. Snabba tappningsändringar från magasinet kan också ge upphov till fenomenet.

I Norge har fenomenet stående vågor observerats i större sjöar med vattenståndsvariationer som understiget 50 mm, *Burstedt et.al (1995)*. I Sverige bortser man från fenomenet stående vågor vid dimensionering av erosionskyddet på fyllningsdammar.

5 VÅGBERÄKNINGAR I VATTENKRAFTMAGASIN

Det här kapitlet behandlar metoderna som idag används för att uppskatta våg- och vindförhållandena i vattenkraftmagasin. Kapitlet redovisar endast de Svenska riktlinjerna RIDAS beräkningsmetoder som bl.a. behandlar effektiv stryklängd, signifikant våghöjd, våguppspolning och vindnivellering.

5.1 Beräkningsmetoder för vindgenererande vågor

Vid dimensionering av erosionskydd utförs vågberäkningar. Beräkningarna är viktiga ur dammsäkerhetssynpunkt eftersom de ofta blir styrande vid dimensionering av erforderat fribord. Tillförlitligheten för beräkningarna är starkt kopplad till uppskattningarna för rådande vindförhållandena på plast. För vattenområden med olika störningar i form av uddar, öar eller andra konstruktioner framför dammbyggnaden kompliceras beräkningarna och bedömningarna ytterligare i form diffraktion, refraktion och reflektion.

5.1.1 Uppskattning av vindstyrkor

För att uppskatta dimensionerande vind är en frekvensanalys av årliga uppmätta maximivärden att föredra, varigenom vindhastigheter för olika återkomstintervall kan bestämmas. Analysen skall förutsätta att maximala vindhastigheten kan sammanfalla med den mest ogynnsamma vindriktningen och att varaktigheten för vinden är tillräckligt stor för att stryklängden skall vara den begränsande faktorn.

I regel inhämtas vinddata från den mest närliggande vindstationen. Problemet är att avståndet från aktuellt dammläge till närmaste vindstation ofta är stort vilket medför att omgivande topografi och vegetationstäthet inverkar. Problematiken med för stora avstånd uppdagas även i denna studie. Därför bör vindstationen ha liknade topografiska förhållanden och ligga på ungefär samma nivå som magasinet. *Cedervall och Bergh (1995)* anser att svårigheten ligger i att beräkna den faktiska vinden vid magasinet med utgångspunkt från vindstationens mätningar.

RIDAS (2008) rekommenderar att värdena i Tabell 5 bör användas om inte tillförlitlig vinddata finns tillgänglig för magasinet eller närliggande område. Fall 1 innebär vind i samband med dimensionerande flöde och företräder vindar med återkomsttiden 50-100 år. Fall 2 betraktar vind då magasinet ligger vid dämmningsgränsen och angivna vindar har en uppskattad återkomsttid av storleksordningen 10 000 år.

Tabell 5. Vindhastigheter för vågberäkningar.

Källa: RIDAS (2008)

Terrängtyp	Vindhastigheter på 10 meter höjd (m/s)	
	Fall 1	Fall 2
Kalfjäll	25	35
Lågfjäll/Skogsland	20	30

Belastningsfallen gäller fyllningsdammar i konsekvensklass 1A och 1B som klargjordes i kapitel 2, Dammkonstruktioner. Dammar i konsekvensklass 2 behöver endast dimensioneras för Fall 1.

5.1.2 Saville (1962)

Metoden grundar sig på mätningar av våghöjder och vindhastigheter på dammreservoarer i USA under åren 1950-1954 och gäller för vattenområden med begränsad bredd och längd. Terrängen i studien sluttar svagt mot reservoaren och är i huvudsak trädbevuxen ned till ca 1 m över dämmningsgränsen.

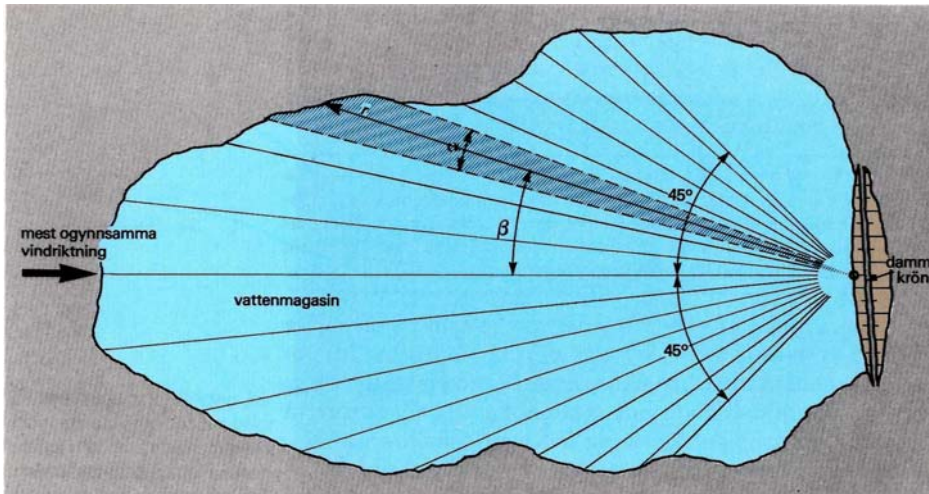
För att beräkna den effektiva stryklängden delas vattenområden upp i två sektorer med 45 grader på var sida om den mest ogynnsamma vindriktningen, se Figur 10. Delsektorer konstrueras enklast genom att dra radiella linjer från en punkt vid dammen till närmaste strand, vanligen med en vinkel på 6° mellan linjerna. Den effektiva stryklängden F_e för vindriktningen beräknas enligt Saville (1962) genom:

$$F_e = \frac{\sum_i (r_i \cos^2(\beta_i))}{\sum_i \cos(\beta_i)} \quad (5.1)$$

där F_e = effektiv stryklängd, m

r_i = längden hos delsektorns bisektris, m

β_i = bisektriens vinkel mot vindriktningen, grader



Figur 10. Beräkning av effektiv stryklängd enligt Saville (1962).

Källa: Jord- och Stenfyllningsdammar, Vattenfall (1988)

Vågstorlekarna kan sedan beräknas med ledning av vindförhållandena och den effektiva stryklängden med metoder som tillämpas för öppna vattenområden.

5.1.3 Vågparametrar

Vågor i vattenkraftmagasin bedöms ofta utifrån tre nyckelparametrar, våglängden, signifikanta våghöjden och perioden. Signifikanta våghöjden används vid beräkning av våguppspolning och vindnivellering. Vid de stryklängdsförhållanden som råder vid dammreservoarer skall våglängden, vågperioden och våghöjden enligt Saville (1962), med ledning av effektiva strykländen och vindhastigheten, beräknas genom:

$$H_s = 7,76 \cdot 10^{-4} \cdot V^{1,06} \cdot F_e^{0,47} \quad (5.2)$$

$$T_s = 0,0889 \cdot V^{0,44} \cdot F_e^{0,28} \quad (5.3)$$

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T_s^2 = 1,56 \cdot T_s^2 \quad (5.4)$$

där H_s = signifikant våghöjd, m
 T_s = signifikant vågperiod, s
 L_0 = våglängd på djupt vatten, m
 F_e = effektiv stryklängd enligt Saville, m
 V = vindhastighet 10 m över vattennivån, m/s
 g = tyngdacceleration, m/s²

Ekvation (5.2), (5.3) och (5.4) avser vågor på djupt vatten, dvs. $d/L > 0,5$. Man förutsätter även att stryklängden är bestämmande för vågstorleken. Alltså, vindens varaktighet antas vara tillräcklig för att de största vågor som svara mot stryklängden skall hinna bildas. För stryklängdsförhållandena i Svenska magasin ligger denna varaktighet i storleksordningen en halv till en timme. Botten påverkar de vågor som genereras på grunt vatten, dvs. $d/L < 0,5$, genom att våghöjden och vågperioden blir lägre.

5.1.4 Rekommendationer

Cedervall och Bergh (1995) förespråkar Savilles metod för beräkningar av effektiv stryklängd, signifikant våghöjd och period. Mycket eftersom undersökningarna baseras på begränsade vattenområden i samma storleksordning som hos de aktuella Svenska vattenkraftmagasinen. *Cedervall och Bergh (1995)* trycker på att vindriktningarna är viktig ur dimensioneringssynpunkt eftersom högst vågor genereras då vindriktningen är parallell med längdriktningen.

I övrigt rekommenderar *RIDAS (2008)* att det i vissa fall kan vara lämpligt att utföra noggrannare beräkningar med hänsyn till läverkan, diffraktion, refraktion och vattendjupets inverkan vilket är starkt kopplat till just detta examensarbete.

5.2 Våguppspolning

Våguppspolning definieras som det vertikala måttet från vattenytans medelnivå till den högsta punkten på dammslätten dit en våg når. Uppspolningshöjden beror av parametrar som våghöjden, infallsvinkel, släntlutning, erosionsskyddets råhet och permeabilitet. Många av parametrarna är svåra att uppskatta vilket ger osäkerheter i uppspolningsberäkningarna. *RIDAS (2008)* föreslår att beräkna våguppspolningen med den så kallade $H_{0,05\%}$ vågen, dvs. den våghöjden som statistiskt sätt överskrids 1 av 2000 vågor. Om H_s är känt beräknas $H_{0,05\%}$ genom:

$$H_{0,05\%} = 1,95 \cdot H_s \quad (5.5)$$

Undersökningar visar att slänter med erosionsskydd av oordnade stenblock inom intervallet 1V:1,8H och 1V:2,0H ger en maximal uppspolning på 105 % av den för uppspolningen dimensionerande vågens höjd. Utifrån uppspolningen för en slänt av tippade likformade stenblock och genom uppspolningsfaktorn R kan uppspolningen för andra dammslänter råhet

och genomsläpplighet uppskattas. Tabell 6 anger uppspolningsfaktorn för dammslänter. Utifrån detta kan våguppspolningen för slänter med andra material beräknas genom:

$$H_{upp} = 1,05 \cdot R \cdot H \quad (5.6)$$

där H_{upp} = aktuell uppspolningshöjd, m

R = uppspolningsfaktor

H = dimensionerande våg för uppspolning, m ($H_{0,05\%}$)

Slätare yta ger en högre uppspolningsfaktor vilket i sin tur leder till högre uppspolningshöjd.

Tabell 6. Korrektionfaktor för släntytor i relation till oordnat erosionskydd.

Källa: RIDAS (2008)

Beskrivning av dammsläntens råhet och genomsläpplighet	Uppspolningsfaktor, R
Slät, tät yta (t.ex. slänt av glaci, asfalt, betong, trä eller tätt murad betongsten)	2-2,5
Ordnat erosionskydd med hålrummen i släntens yta tätade med mindre block och sten.	1,5-1,7
Ordnat erosionskydd i form av block i stabilt förband i god kontakt mellan blocken.	1,2-1,5
Oordnat erosionskydd i form av tippade ensartade stenblock.	1,0

5.3 Vinddenivellering

Som nämnts tidigare är vinddenivellering, eller snedställning, ett fenomen som snedställer vattenytan till följd av ihållande vind. Snedställningen kan medföra att den uppskattade höjd som vågorna kan komma att påverka erosionskyddet måste justeras. Snedställning kan vid normalfallet, enligt *RIDAS (2008)*, beräknas med Zuider Zee-formeln:

$$H_{sned} = \frac{V^2 \cdot F}{4800 \cdot D} \quad (5.7)$$

där H_{sned} = snedställning av vattenyta, m

V = vindhastighet, m/s

F = maximala stryklängden i av magasinet i vindriktningen, km

D = magasinets medeldjup, m

Burstedt et al (1995) skriver att magasin med stora medelvattendjup, större än 10 m, ger en ringa snedställning, ofta mindre än 10 cm. Vid dessa förhållanden är ovannämnda beräkningssätt tillräckligt. Fall då magasinet är av långsmal plan karaktär och starkt avviker från rektangulär form föreslår *RIDAS (2008)* att noggrannare undersökningar och beräkningar utförs.

5.4 Fribord med hänsyn till vågor

Erfordrat fribord beräknas med hänsyn till vattenytans snedställning och våguppspolning vid den mest ogynnsamma vindriktningen samt eventuell överdämning i samband med dimensionerande flöde. Erforderligt fribord H_{fri} beräknas som:

$$H_{fri} = H_{\text{överd}} + H_{\text{sned}} + H_{\text{upp}} \quad (5.8)$$

där $H_{\text{överd}}$ = överdämning i samband med dimensionerande flöde, m

H_{sned} = snedställning på gund av ihållande vind, m

H_{upp} = uppspolningshöjd, m

Beräkning av $H_{\text{överd}}$ genomförs utifrån den tekniska avbördningskapaciteten tillsammans med dimensionerande flöden. Rapport som behandlar detta är Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar av Svensk Energi, Svenska kraftnät och SveMin.

6 VÅGMODELLERING

I detta kapitel orienteras läsaren om modellverktyget. Vidare beskrivs grundläggande begrepp inom vågmodellering och vilka kalibreringsparametrar som MIKE 21 SW erbjuder. Som sista del i kapitlet behandlas huruvida modellen är lämpad för vattenkraftmagasin eller ej.

6.1 Modelleringsverktyg

MIKE är en serie modellverktyg producerad av Danish Hydraulic Institute (DHI). DHI är en global oberoende forskning- och konsultorganisation som har specialiserats sig inom områden som vattenresurser, kust och hav, vattenförsörjning och avloppsteknik. MIKE är resultatet av mer än tjugo års forskning och utveckling av modelleringsverktyg. Serien av produkter har utvecklats specifikt för modellering av vattenrelaterade frågor och täcker hela hydrologiska cykeln.

I denna studie användes MIKE 21 som är tvådimensionell serie för simulering av flöden, vågor, sediment och ekologi i floder, sjöar, flodmynningar, hamnar, kuster och hav.

Modelleringsystemet är uppbyggt av en modulintegrerande struktur med en rad instickningsmoduler så att användaren lätt kan sätta samman ett eget modellpaket som passar just dennes behov. MIKE 21 innehåller en serie av vågmoduler som var och en är anpassad för ett specifikt användningsområde. Vågmodulen som användes i denna studie är MIKE 21 Spectral Wave 2008.

6.2 MIKE 21 SW

MIKE 21 SW är en tredje generation spektral vågmodell som simulerar vindgenererade vågors utbredning, dissipation och transformation till havs och vid kustnära områden. Spektrala vågmodeller är den vanligaste typen av modeller när det gäller att modellera storskaliga vågrörelser, *Lin (2007)*. MIKE 21 SW inkluderar följande fysiska fenomen:

- Ökad vågstorlek till följd av vind
- Ickelinjär våginteraktion
- Dissipation till följd av bildande av gäss
- Dissipation till följd av bottenfriktion
- Dissipation till följd av vågbrytning initierad av djupförändringar
- Interaktion med strömmar
- Effekter av förändringar i vattenstånd

6.2.1 Teori

Spektrala vågmodeller bygger på antagandet att vågmönstret, vid en slumpmässigt utvald tidpunkt, är uppbyggt av oändligt många linjära fortskridande vågor och att våghöjden är en funktion av vågfrekvens och riktningen, *Lin (2007)*.

Vid antagandet att varje vågkomponent är av linjär natur, representeras vågorna av ett tvådimensionellt spektrum över vågaktionen som varierar i tid och rum. Oberoende variabler är relativa frekvensen σ och vågriktningen θ . Vågaktionen N är relaterad till vågenergin E genom:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (6.1)$$

Vågaktionsspektrumets förändring beskrivs av ekvationen för konservering av vågaktion, eng wave action conservation equation, enligt *Komen m.fl. (1994)*. MIKE 21 SW erbjuder två formuleringar; riktad fränkopplad parametrering, eng directionally decoupled parametric formulation, och full spektral formulering, eng fully spectral formulation. Formuleringen riktad fränkopplad formulering bygger på en parametrering av ekvationen för konservering av vågaktion. Enligt *DHI (2008b)* följer parametreringen Holthuijsen m.fl. (1989) och sker i frekvensdomänen. Full spektral formulering baseras på ekvationen för konservering av vågaktion som beskrivs i *Komen m.fl. (1994)*. Ekvationen för konservering formuleras antingen i kartesiska koordinater för småskaliga tillämpningar, eller i sfäriska koordinater för storskaliga tillämpningar. Källtermen S i ekvationen för konservering av vågaktion beskriver energin för olika fysiska fenomen. Funktionen S beskrivs av:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (6.2)$$

där S_{in} = generation av energi pga vind

S_{nl} = energitransport till följd av ickelinjär våginteraktion

S_{ds} = dissipation av energi till följd av bildande av vita gäss

S_{bot} = dissipation av energi till följd av bottenfriktion

S_{surf} = dissipation av energi pga vågbrytning initierad av djupförändringar

Vindens energipåverkan bygger på Janssens (1989, 1991) teori där momentet till följd av vinden inte enbart beror på vindstress utan även på vågmönstret och vågornas ålder. Den ickelinjära energiinteraktionen mellan vågor anges med fyrdubbel och tredubbel våginteraktion. Spektrumets utveckling domineras på djupt vatten av interaktion mellan fyra vågor, dvs. fyrdubbel interaktion, och innebär att tre vågor påverkar varandra ickelinjärt och överför energi till en fjärde våg. Triad eller tredubbel interaktion motsvarar samma fenomen med två vågor istället för tre och behandlas vid grunt vatten. I MIKE SW approximeras fyrdubbel, eng quadrupled, interaktion med DIA (Discrete Interaction Approximation) Hasselmann m.fl. (1985). DIA begränsar antalet möjliga interaktioner till de mest dominerande. Dissipation till följd av bildande av vita gäss bygger på teorier av Hasselmann (1974) och Janssen (1989). Termen S_{bot} approximeras med teorin av Johnson och Kofoed-Hansen (2000) och beror av våg- och sedimentförhållandena. Källtermen som beskriver dissipation på grund av vågbrytning initierad av djupförändringar baseras på formuleringen av Battjes and Jassen (1978) och termen skriven av Eldeberky and Battjes (1996).

En detaljerad beskrivning av de ovan nämnda källtermerna och referenser kan hittas i *Komen m.fl. (1994)*. Läsare med brinnande intresse för vågmodellering och goda kunskaper i matematik hänvisas till denna litteratur. Mer översiktlig läsning hittas i *DHI (2008b)*.

6.2.2 Numerisk implementation

För att lösa den matematiska modellen, ekvationen för konservering av vågaktion, diskretiseras ekvationen i geografiska och spektrala domänen med en cell-centrerad finit volym metod, FVM. Djupet definieras i beräkningsnätets hörn och resultatet beräknas i cellernas centrum. I

frekvensrummet används antingen en ekvidistant eller logaritmisk diskretisering. Båda formuleringarna använder ekvidistant diskretisering för riktning i rummet.

6.2.3 Beräkningsnät

I geografiska domänen erbjuder MIKE 21 olika alternativa beräkningsnät för att optimera modellen. För denna studie användes ostrukturerade beräkningsnät, på engelska Flexibel Mesh (FM) som karakteriseras av trianglar. MIKE 21 SW, eller mer korrekt MIKE 21 SW FM, är den enda vågmodulen i serien som bygger på ostrukturerat beräkningsnät. Ett ostrukturerat beräkningsnät medför, enligt *DHI (2008c)*, optimal flexibilitet av områden med kraftigt varierande struktur och medför mjuka representationer av randvillkor.

Beräkningsnäten skapas i MIKE:s egna arbetsmiljö med editorn Mesh Generator. Vid upprättandet av nätet väljs bl.a. lämplig stort område att modellera, batymetrins upplösning, definiering av land och öppna randvillkor och framförallt lämplig upplösning av beräkningsnät. Upplösningen av nätet är en central del vid uppställning av modellen eftersom den påverkar simuleringstiden, stabiliteten och noggrannheten. Eftersom beräkningsnätet är ostrukturerat och flexibelt kan trianglarna anta olika storlekar upp till en viss maxarea, som är valbart. Ovan nämnda egenskap tillsammans med andra metoder möjliggör att upplösningen på nätet kan minskas eller ökas beroende på intresset för området.

6.2.4 Kalibreringsfaktorer

Noggrannheten av data är en vital faktor vid kalibrering, *DHI (2008a)*. Följande parametrar kan kalibreras i MIKE 21 SW:

- Upplösningen i geografiska och spektrala rymden
- Bottenfriktion
 - En ökning av koefficienterna för bottenfriktion i grunda vatten leder ofta till en minskad våghöjd och en ökad vågperiod. I djupa vatten ger inte bottenfriktionen någon effekt eftersom vågorna inte känner botten.
- Parametrar för vågbrytning initierad av djupförändringar
 - I vissa fall kan även parametrarna för vågbrytning användas vid kalibrering, dock anger *DHI (2008a)* att dessa parametrar bör kalibreras varsamt.
- Parametrar för bildande av vita gäss
 - I regel används de förinställda värdena på parametrarna enligt *Komen m.fl.(2004)*.
- Vinddata
 - Exaktheten för MIKE 21 SW är starkt kopplad till noggrannheten för mätningarna i vindhastighet och enligt *DHI (2008a)* leder ett fel på 10 % i vindhastighet till ett 20 % fel i korresponderande våghöjd.
- Strömmar och vattenstånd
 - Påverkan av strömmar och vattenstånd gäller främst applikationer i grunda vatten.
- Randvillkor

6.3 MIKE 21 SW applicerbart för vattenkraftmagasin?

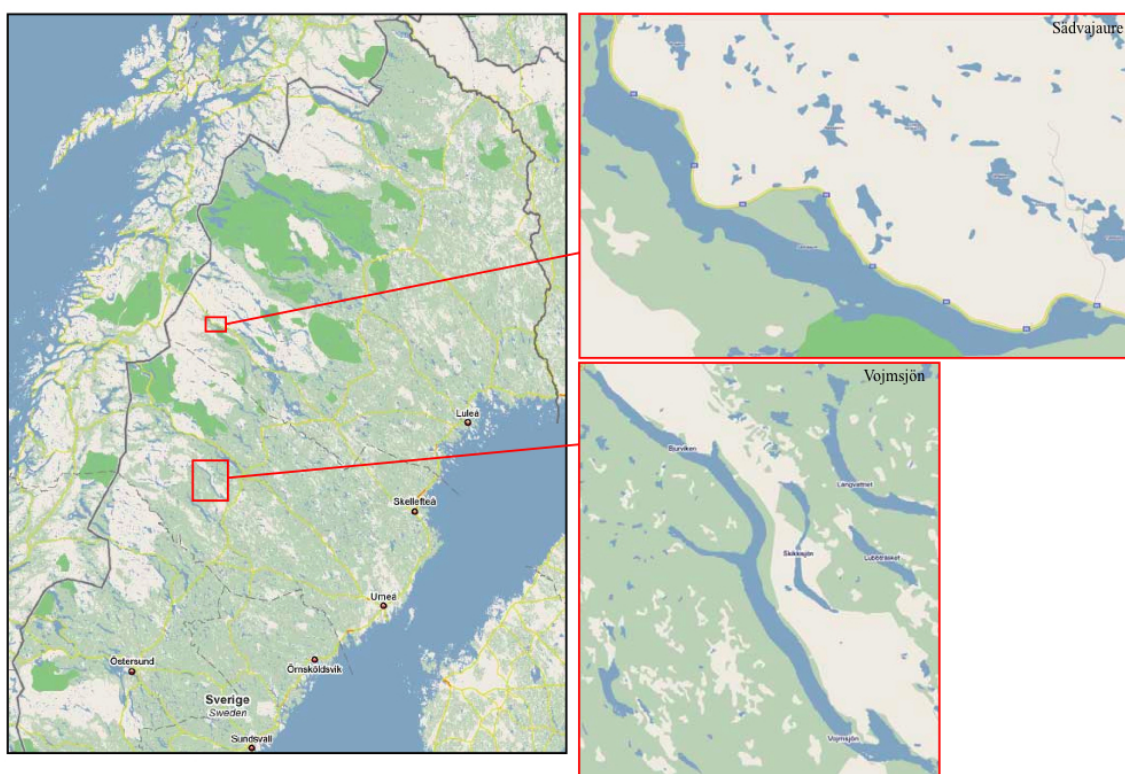
Som nämnts tidigare innehåller serien MIKE 21 ett antal vågmoduler. Vid arbetets uppstart spekulerades det i vilken av modulerna som skulle passa simuleringar i vattenkraftmagasin bäst. En dialog upprättades med tillverkaren DHI där uppgiften och problemen framställdes och efter samråd gjordes bedömningen att MIKE 21 SW var den mest lämpade modulen. Som nämnts ovan bygger modellen på ostrukturerat beräkningsnät vilket är en viktig egenskap eftersom vattenkraftmagasin kan anses ha relativt komplicerade former.

7 UTFÖRANDE

Detta kapitel ger en introduktion till de magasin som studerats och genomförandet i stora drag. Databearbetningen beskrivs mindre ingående samtidigt som uppställningen av de viktigaste parametrarna i modellen presenteras. Som sista del utförs beräkningar för att kunna jämföra dagens metoder med modellens simulerade resultat.

7.1 Ingående objekt

För att verifiera modellen erfordrades vågmätningar för ett liknande begränsat vattenområde som Vojmsjön. Åren 1982-83 utförde SMHI vågmätningar i Sädvajaure som har ett liknande utseende som Vojmsjön. Eftersom vågmätningar för begränsade vattenområden i Sverige är sällsynta var Sädvajaure det enda alternativet till att utföra någon form av verifiering. Figur 11 visar Vojmsjön och Sädvajaures form och lokalisering i Sverige.



Figur 11. Vojmsjön och Sädvajaures form och orientering i Sverige.

Källa: Google Maps

7.1.1 Sädvajaure

Sädvajaure ligger i Skellefteälvs övre del och är en reglerad sjö som fungerar som ett magasin. Vid magasinets södra del ligger Sädva Kraftstation som ägs av Skellefteå Kraft (Skellefteå Kraft, 2008). Magasinet har en kapacitet på 600 Mm^3 och är av långsmal karaktär, ca 2,5 mil. Medeldjupet, enligt SMHI:s sjöregister, är 23 m och maxdjupet ligger på ungefär 120 m beroende på dämmningsnivå. Dämmningsgräns och sänkningsgräns är +477,00 m.ö.h. respektive +460,70 m.ö.h.

7.1.2 Vojmsjön

Vojmsjön ligger i Ångermanälvens övre system och är en långsmal sjö med längden ca 5 mil i riktning sydost-nordväst. Sjön fungerar som ett stort magasin och regleras i söder av Vojmsjöns regleringsdamm. Vojmsjön har ett maxdjup på ca 130 m och tillhör Sverige 9:e djupaste sjö.

Medeldjupet, enligt SMHI:s sjöregister, är 39 m. Dämningsgränsen +417,00 m.ö.h och Sänkingsgräns +409,00 m.ö.h. ger en magasinskapacitet på 594 Mm³.

Vojmsjöns regleringsdamm tillhör enligt RIDAS konsekvensklass 1-3 och består av fyra dammenheter varav den fjärde består av två dammar och ett flodutskov. Totalt består anläggningen av 5 st. jorddammar med en total längd på 1152 m. Den för studien intressanta enheten är dammenhet 3 eftersom den har högsta konsekvensklassen och längst effektiv stryklängd. Figur 12 visar dammenheternas placering i området. Dammen är totalt ca 335 meter lång och har funktionen som en invallningsdamm. Jordfyllnadsdammen är ca 8,65 meter ovan mark.

Wetterholt m.fl. (2007) menar att efter utförd besiktning i maj 2006 konstateras att erosionskyddet på uppströmslätten utgörs av sten och block inom intervallet 50 á 400 mm med varierande d_{50} i genomsnitt 100 mm samt enstaka block inom 600 á 700 mm. Erosionskyddet är ställt i lutning 1V:3H och sträcker sig från nivå ca +416,7 m.ö.h. till +413,8 m.ö.h. Stenstorleken tenderar till att minska längre ned och under +413,8 m.ö.h. utgörs fyllningen av sandigt grus med en något brantare lutning, Figur 13. Dammkronets nivå varierar mellan +419,20 m.ö.h. och +419,79 m.ö.h.



Figur 12. Dammenheternas orientering i området.

Källa: SWECO



Figur 13. Erosionskydd uppströmslänt dammenhet 3.

Källa: Wetterholt m.fl. (2007)

7.2 Databearbetning

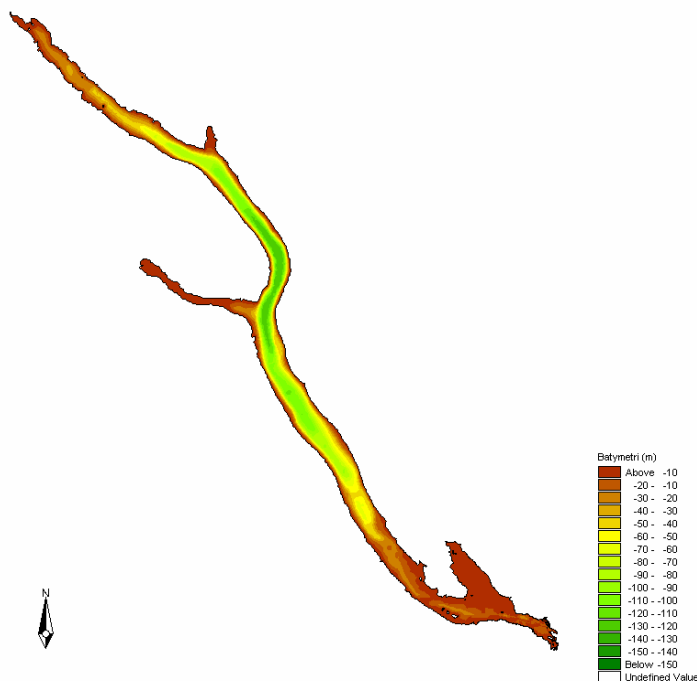
För att tillhandahålla modellen med tillförlitlig indata krävdes omfattande databearbetning. I regel har andra program och verktyg använts för att iordningställa och sätta samman data från olika källor. Kvaliteten på datat har varierat och i vissa fall har mindre förenklingar erfordrats.

7.2.1 Batymetri

God data över en sjös batymetri erhålls främst genom ekolodning. Ofta är mätningar gjorda framför dammbyggnationerna men sällan heltäckande för hela magasinet. Ekolodningarna kompletteras vanligen genom att digitalisera sjödjupkartor och topografiska kartor. Digitaliseringen och sammanställningen av batymetri har utarbetats i ArcGIS 9.3.

Sädvajaures batymetri erhöles genom digitalisering av en sjödjupkarta från 1958 och 1959, skala 1:16 100 SMHI. Sjödjupkartan angavs utifrån vattenytan, altituden +467 m.ö.h. Domänen upprättades med djupintervallet 0 m till -120 m, dvs. +347 m.ö.h. till +467 m.ö.h. I Vojmsjön utfördes ekolodningar i södra delen av magasinet, ca 3,5 km uppströms dammenhet 3. Batymetrin i övriga delar av magasinet kompletterades utifrån; sjödjupkarta lodad 1944, 1947 och 1948 skala 1:50 000 SMHI, terrängkartan skala 1:50 000 Lantmäteriet, fastighetskartan skala 1:25 000 Lantmäteriet, ortofoto Lantmäteriet och en topografisk karta från byggnationen av Vojmsjöns regleringsdamm. För att kunna köra modellen över dämmningsgräns bearbetades data till en altitud på +420 m.ö.h. Djupintervallet för domänen blev följaktligen 0 m till -137 m, dvs. +283 m.ö.h. till +420 m.ö.h.

Med utarbetad data över batymetrin för de båda magasinerna upprättades två stycken modelldomäner i MIKE:s Mesh Generator. Figur 14 visar modelldomän Vojmsjön visualiserade i MIKE.



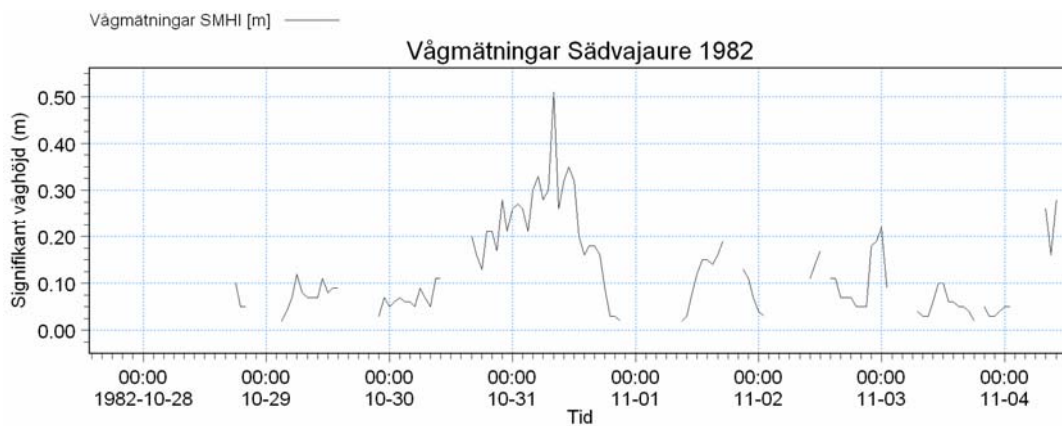
Figur 14. Modelldomän Vojmsjön med batymetri.

7.2.2 Vågmätningar

Kontinuiteten av mätningarna som SMHI utförde i Sädvajaure åren 1982-83 är bristfällig vilket medförde att lämpligt tidsintervall valdes ut för att minimera luckor i vågdata, Figur 15.

Mätningarna utfördes med en vågboj, Wave Rider, som bl.a. registrerade signifikanta våghöjden, medelvågperioden och största vågen. Specifikationerna från SMHI anger att data genomgått viss kvalitetskontroll.

För att ge modellen en ärlig chans fodrades uppgifter om bojens exakta position. Efter samråd med Henrik Lindh, mannen som utförde mätningarna, konstaterades att den exakta positionen inte var registrerad vilket medförde att en ungefärlig position fastställdes. Djupet där bojen var placerad uppgick till ca 45 m.

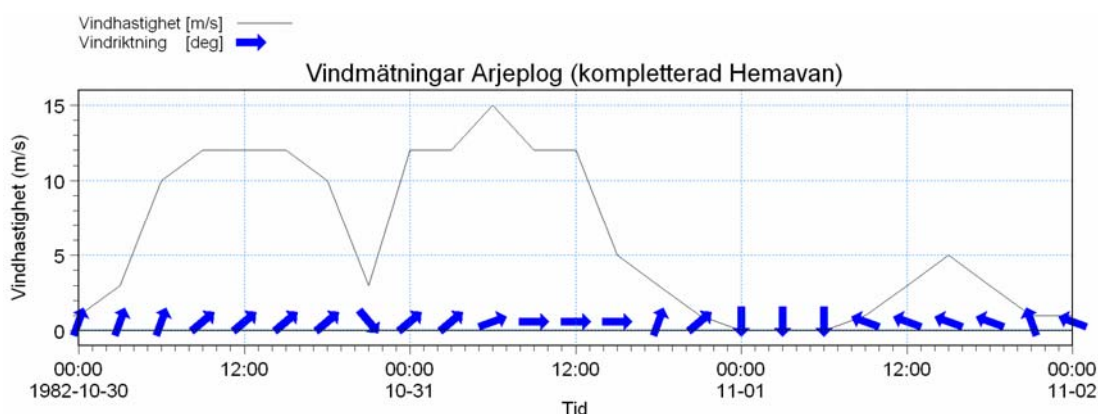


Figur 15. Vågmätningar i Sädvajaure 1982.

7.2.3 Vinddata

För simuleringarna i Sädvajaure behövdes vinddata under samma tid som vågmätningarna utfördes. Eftersom det inte fanns några lokala vindobservationer hämtades vindmätningar från Arjeplog och Hemavan. Vindstationen i Arjeplog ligger ca sju mil sydöst om platsen i Sädvajaure där vågmätningarna utfördes medan vindstationen i Hemavan ligger ca tio mil sydväst om platsen. Vinddata laddades ned från SMHI:s databas (SMHI, 2008). Mätningarna redovisar data för var tredje timma där vindriktningen och vindhastigheten är medelvinden som observerats under tio minuter. För båda vindstationerna antogs att mätningarna var gjorda på U_{10} , dvs. tio meter över marken.

Mätningar från vindstationerna i Arjeplog och Hemavan användes för simuleringarna. Den närmare av de två, Arjeplog, saknar observationer vid tidpunkten kl. 21:00 för samtliga dygn under åren 1982-83. Observationerna för denna tidpunkt hämtades istället från Hemavans vindstation så att en komplett vindserie för Arjeplog kunde användas. Hemavans vindstation har en komplett mätserie för samma period. Figur 16 visar vindserien med observationerna från station Arjeplog som kompletterats med observationer från Hemavan.



Figur 16. Vindobservationer vid Arjeplog station, kompletterad med Hemavan station.

7.2.4 Övrig data

Eftersom vattenståndet kan påverka vågförhållandena användes registrerad vattenståndsdata från Sädva kraftstation. Vattenståndsförändringarna för tänkt simuleringsperiod var små.

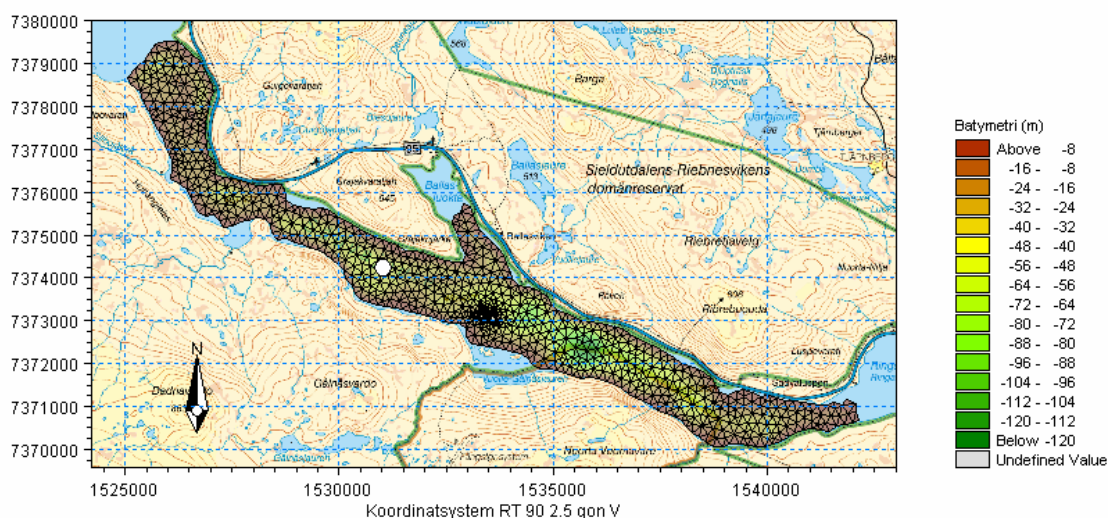
7.4 Modelluppställning

Uppställningen av indata och parametrar i MIKE 21 SW har utförts mycket efter övningar och rekommendationer från *DHI (2008a)* och en liknande undersökning *Moeini et.al (2007)*. Nedan följer en redogörelse av uppställningen för de viktigaste parametrarna och indata som används vid simuleringarna för Sädvajaure och Vojmsjön.

7.4.1 Simulering Sädvajaure

En 72 timmars lång tidsserie valdes ut för simuleringarna, från den 30 okt 1982 till 2 nov 1982. Ett ostrukturerat beräkningsnät sattes upp med en maximal triangel area på 30 000 m² och med ett djupintervall på 0 m till -120 m, altitudintervall +347 m.ö.h. till +467 m.ö.h. Figur 17 visar det ostrukturerade beräkningsnätet och batymetrien som användes vid simuleringarna.

Bakgrundbilden representerar Sädvajaure vid dämningens grän, dvs. +477 m.ö.h. Vita punkten i figuren representerar ungefärlig position för vågmätningar. Hela magasinet behandlades ej och förenklingar med avseende på strandkant och öformationer var nödvändiga för att minimera simuleringstiden. Nätets tätare område beror på öformationer.



Figur 17. Beräkningsnät Sädvajaure och ungefärlig position av vågboj.

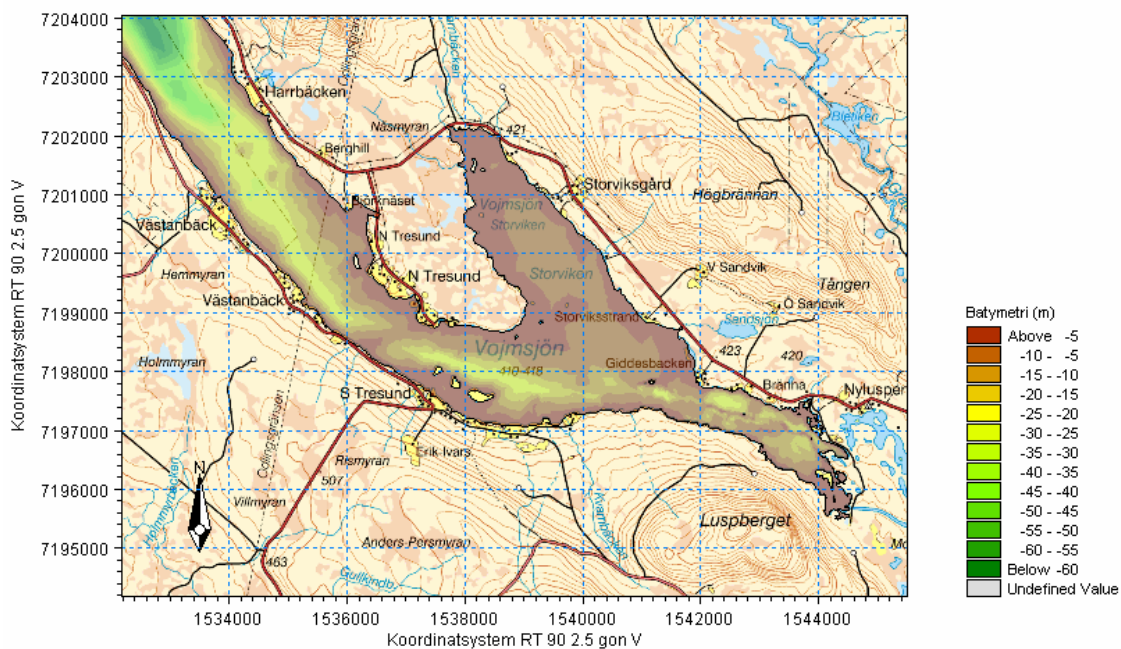
Källa: © Lantmäteriet Gävle 2009. Medgivande I 2008/1962

Full formulering användes och den spektrala diskretiseringen i rummet delades upp i 20 lika stora propageringsriktningar för en 360° ros, $\Delta\theta = 360^\circ/20^\circ$. Diskretisering i frekvensplanet angavs med en minimum frekvens på 0,05 Hz och en frekvensfaktor på 1,105 (logaritmisk diskretiseringstyp) och 30 st. frekvenser. Detta gav en maximal frekvens på 0,9 Hz. Följaktligen genomfördes simuleringar med en minsta vågperiod på 1 s och en högsta på 20 s.

Två pådrivande vindserier användes vid simuleringarna i Sädvajaure, dels serien av mätvärden från Arjeplog som kompletterats med värden från Hemavans station dels en vindserie från enbart Hemavan. Vinden angavs som varierande i tiden och konstant i domänen. Fyrdubbel våginteraktion var aktiverad. Olika simuleringar genomfördes med avseende på dissipation till följd av bottenfriktion, vågbrytning, bildande av gäss och vattenståndsförändring. Strömmarna i magasinet antogs vara små varefter vågsimuleringarna genomfördes utan inverkan av strömmar. För att kontrollera simuleringstidens påverkan genomförde en simulering med en längre tidsserie.

7.4.2 Simulering fallstudie Vojmsjön

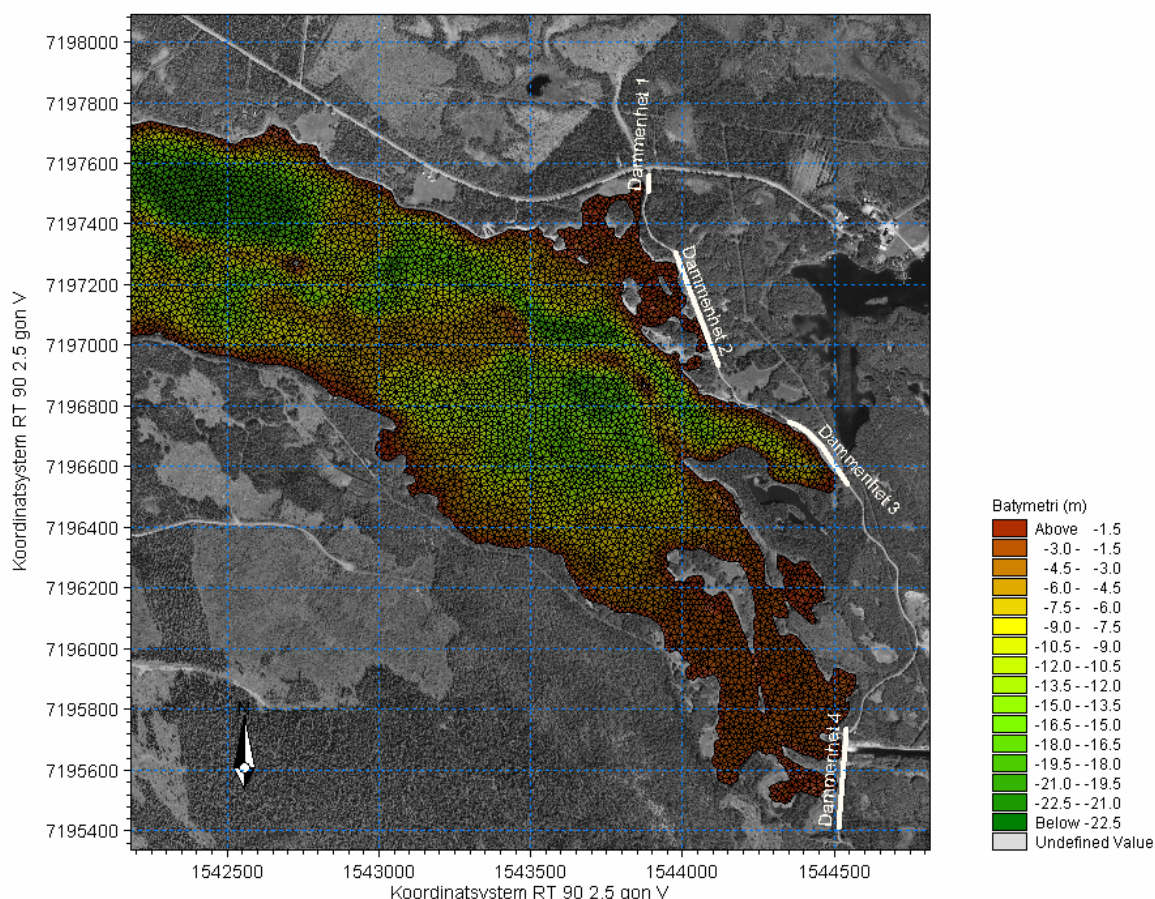
Full formulering användes vid simuleringarna och tidsserien valdes tillräckligt stor för att största vågorna som svarade mot stryklängden skulle hinna bildas. Triangelnätet delades upp i tre områden med olika täthet. Ett tätare triangelnät framför dammenheterna med samma utsträckning som den genomförda ekolodningen, ungefär 3,5 km uppströms. Ett något glesare nät användes för området uppströms ekolodningarna men samtidigt inom stryklängd från dammenhet 3. Resterande del av magasinet behandlades ej eller upprättades med ett markant glesare triangelnät. Majoriteten av simuleringarna genomfördes med följande maximala storlek på nätet; i fallande ordning 20 000 m², 3 000 m² och 300 m². Figur 18 visar batymetrien för södra delarna av Vojmsjön med nollnivån +417 m.ö.h



Figur 18. Djupförhållandena i Vojmsjöns södra delar.

Källa: © Lantmäteriet Gävle 2009. Medgivande I 2008/1962

Figur 19 visar det täta beräkningsnätet, maximal area 300 m², och batymetrien i närområdet framför dammenheterna.



Figur 19. Djupförhållandena och beräkningsnätet i Vojmsjöns södra delar.

Källa: Bakgrundskarta SWECO

Samma uppställning av spektrala diskretisering i rummet och frekvensplanet som för simuleringarna i Sädvajoure användes. Simuleringar med olika vindstyrkor och riktningar genomfördes. Gemensamt för dessa var att vinden angavs som konstant i tid och rum. Vindstyrkorna angavs utifrån riktlinjerna i *RIDAS (2008)*, dvs. 20 m/s och 30 m/s. Dessutom genomfördes simuleringar med vindhastigheten 40 m/s, orkanstyrka, för att skaffa en uppfattning om vågförhållandena vid högre hastigheter. Vidare genomfördes simuleringar med olika uppställningar av dissipation till följd av vågbrytning, bottenfriktion och bildande av vita gäss. Fyrdubbel våginteraktion var aktiverad. Förändringar av magasinets form genomfördes. Simuleringarna utfördes utan inverkan av strömmar.

7.6 Beräkningar enligt RIDAS

Vågberäkningar har utförts för Vojmsjöns regleringsdamm, dammenhet 3, utifrån riktlinjerna som *RIDAS (2008)* rekommenderar. Riktlinjerna återfinns i kapitel 5, vågberäkningar i vattenkraftmagasin. Dammenheten har konsekvensklass 1 varvid samtliga beräkningar har utförts med vindhastigheter för Fall 1 och Fall 2. Uträkningarna har genomförts vid dämmningsgräns, dvs. +417 m.ö.h.

Effektiva stryklängden beräknades med ekvation (5.1) genom att en ros med 6 graders vinkel mellan radiella linjerna upprättades. Linjerna drogs från en godtycklig punkt vid gränsen mellan dammens uppströmslänt och vattenytan. Våglängden, signifikanta våghöjden och vågperioden beräknas med ekvation (5.2), (5.3) och (5.4). Våguppspolningen beräknades utifrån $H_{0,05\%}$ vågen med ekvation (5.5). Som nämnts innan resulterade platsbesöket att erosionskyddet utgörs av

oordnad fyllning och att en uppspolningsfaktor R på 1,0 har bedömts. Utifrån uträknad $H_{0,05\%}$ våg och bedömd uppspolningsfaktor beräknades uppspolningen med ekvation (5.6). Snedställningen beräknades utifrån ekvation (5.7), Zuider Zee-formeln. Upprättad ros gav en maximal stryklängd på ca 9,550 km och från modelldomänen för Vojmsjöns södra del kunde ett medeldjup ca 8 m beräknas. Erforderligt fribord beräknades genom ekvation (5.8). För Fall 1 summerades uppspolningshöjden, magasinets vindnivellering och överdämning i samband med dimensionerande flöde som enligt *Wetterholt m.fl. (2007)* uppgår till 1,44 m. För Fall 2 summerades uppspolningshöjd och vindnivellering. Samtliga beräkningar och upprättad ros hittas i Bilaga 1.

8 RESULTAT OCH OBSERVATIONER

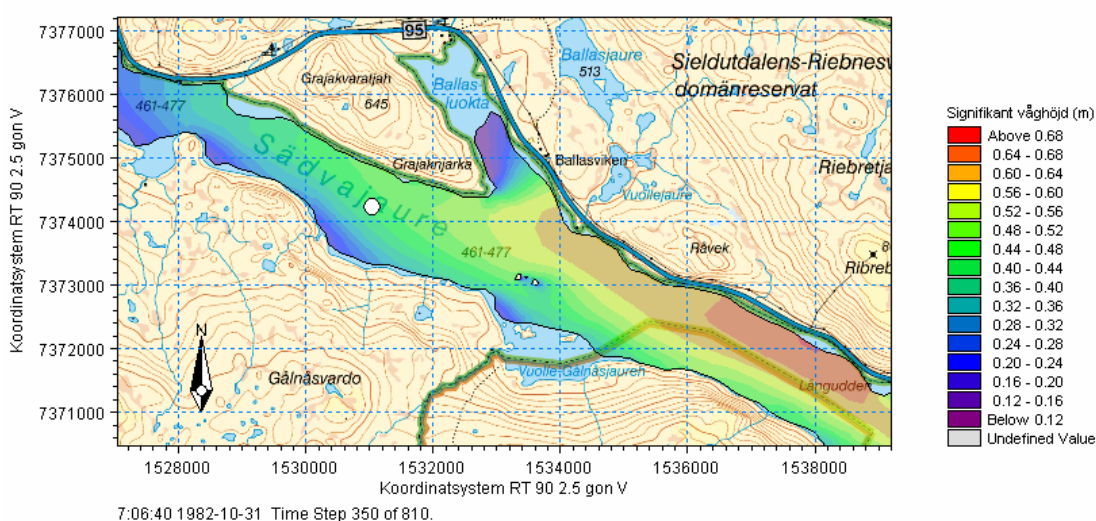
Kapitlet tjänar till att presentera de resultat och observationer som gjorts under arbetets gång. Inledningsvis belyses de simulerade resultaten och därefter presenteras de enligt riktlinjerna beräknade resultaten. Vidare dras paralleller till andra rapporter och undersökningar.

8.1 SIMULERING

Serien MIKE erbjuder god kompatibilitet med ArcGIS vilket medför att resultaten för hela domänen kan visualiseras med bakgrundskartor. Med MIKE:s egna editor Plot Composer finns möjligheter att i grafer presentera olika parametrar, antingen för en linje eller också en punkt i domänen. Nedan följer resultaten för simuleringarna i MIKE 21 SW.

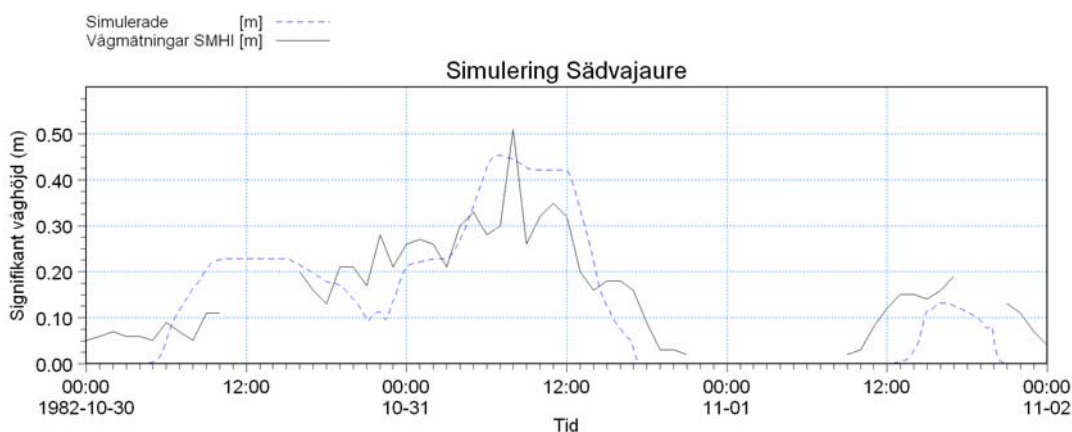
8.1.1 Sädvajaure

Genom att registrera simulerade parametrar i en punkt med samma position som vågbojen kunde uppmätta värden jämföras mot simulerade. Signifikanta våghöjden valdes som jämförande parameter. Figur 20 visar punkten för registreringarna samt signifikanta våghöjden i området. Figur 21 visar tidsserien med uppmätta och simulerade värden.



Figur 20. Resultatbild över signifikanta våghöjden.

Källa: © Lantmäteriet Gävle 2009. Medgivande I 2008/1962



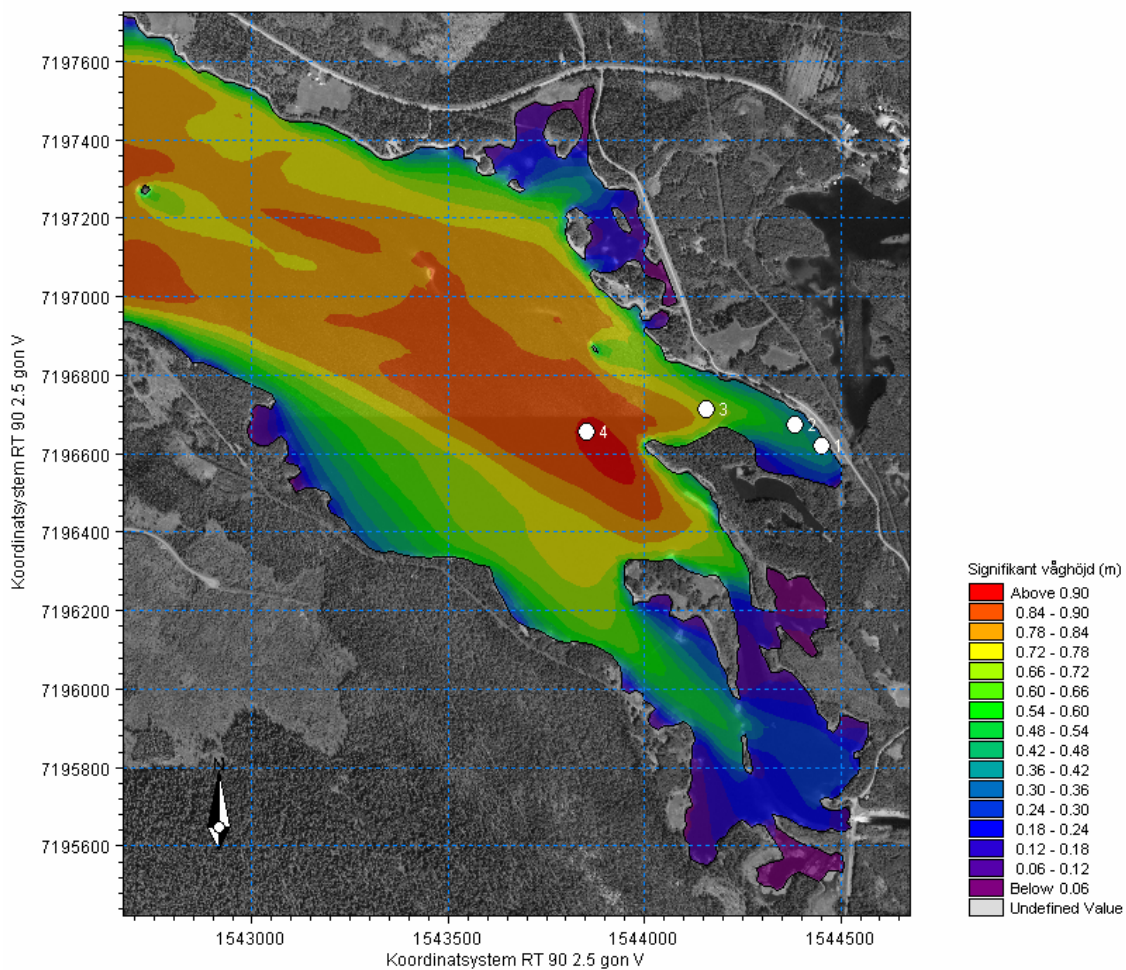
Figur 21. Resultatgraf för simuleringen i Sädvajaure.

Simuleringen med vindobservationer från endast Hemavans vindstation gav sämre korrelation mellan uppmätta och simulerade värden. Andledningen till den sämre överensstämmelsen antas bero på det stora avståndet mellan vindstationen och positionen där vågmätningarna utfördes. Avståndet medförde stora fel i faktisk vind mycket på grund av de topografiska skillnaderna mellan platserna. Som nämnts tidigare genomfördes simuleringar med längre tidsserier för att kontrollera om simuleringstidens längd påverkade resultatet. Simuleringarna med längre tidsserier gav samma resultat som de med kortare.

Moieni et.al (2007) erhåller en bättre överensstämmelse mellan uppmätta och simulerade värden för signifikanta våghöjden. Indata som användes vid den undersökningen hade betydligt högre noggrannhet. I undersökningen användes bl.a. vågbojar som registrerade både våg- och vindförhållanden medan denna studies vinddata hämtades från närmast närliggande vindstation, ca sju mil bort.

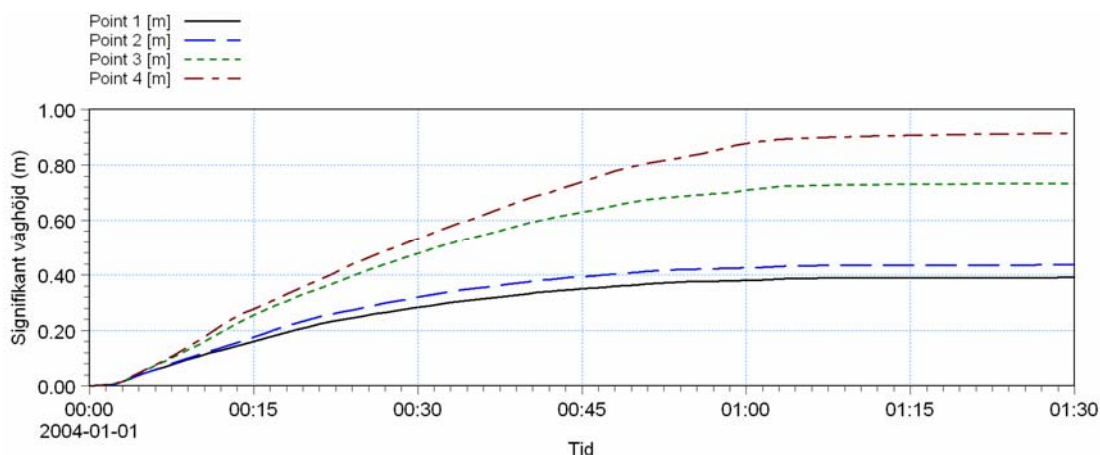
8.1.2 Fallstudie Vojmsjön

För att lätt kunna utvärdera vågorna i området runt dammenhet tre registrerades parametrar i fyra punkter. Figur 22 visar punkternas placering och signifikanta våghöjden i området vid vindriktningen 290° och vindhastigheten 20 m/s. Figur 23 visar signifikanta våghöjden i de fyra punkterna.



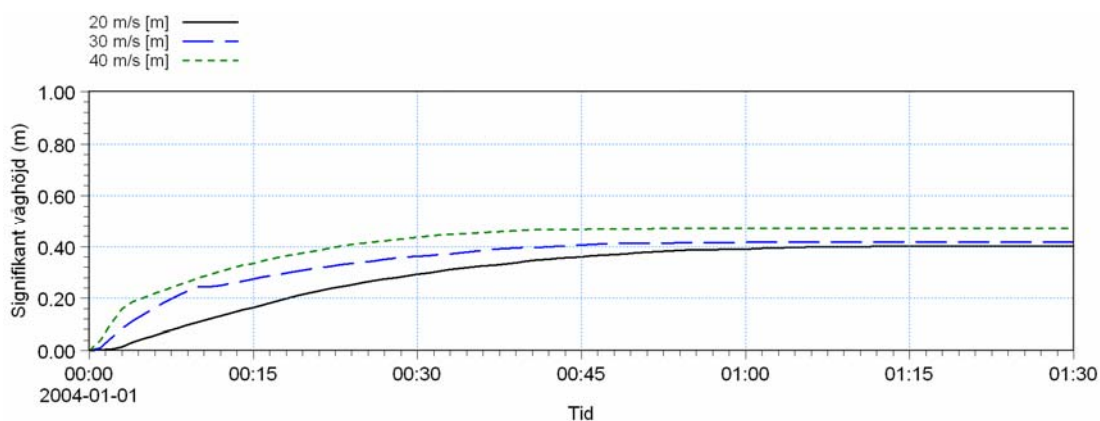
Figur 22. Resultatbild över signifikanta våghöjden och registrerande punkter.

Källa: Bakgrundskarta SWECO

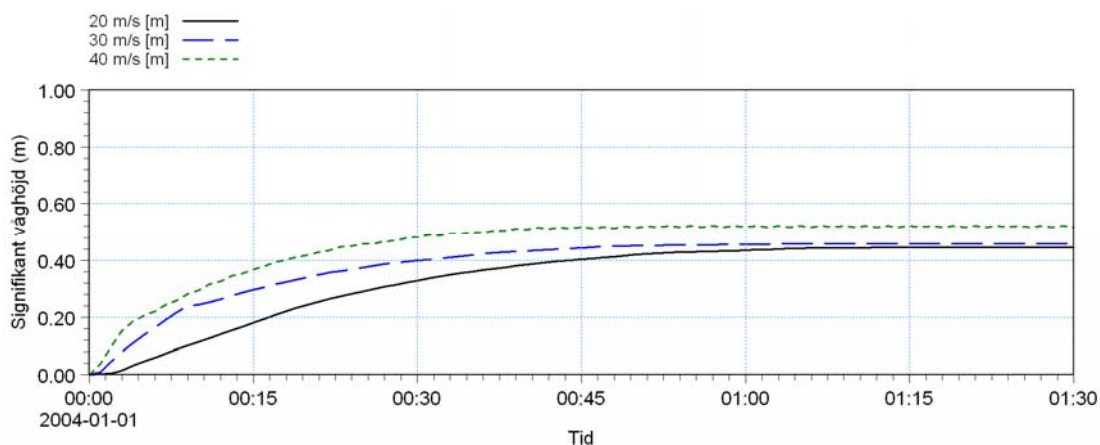


Figur 23. Signifikanta våghöjden vid vindriktningen 290° och vindhastigheten 20 m/s i de olika punkterna.

Skillnaderna i signifikant våghöjd i de olika punkterna var påtagliga. Lägst våghöjd påträffas i punkt 1, dvs. mitten av dammenhet 3. Dammenhetens norra del, punkt 2, påverkas aningen mer eftersom delen är mer exponerad. I punkt 3 och 4 erhöles de högsta våghöjderna. Figur 24 och 25 visar signifikanta våghöjden för olika vindhastigheter i punkt 1 och punkt 2.



Figur 24. Signifikanta våghöjden i punkt 1 med vindhastigheterna 20 m/s, 30 m/s och 40 m/s.



Figur 25. Signifikanta våghöjden i punkt 2 med vindhastigheterna 20 m/s, 30 m/s och 40 m/s.

Vindhastighetens tillväxt medförde ingen större skillnad i signifikant våghöjd i punkt 1 och 2. Däremot visar Figur 24 och Figur 25 att tiden minskade för att de största vågorna som svarade mot stryklängden skulle hinna bildas. Resultaten av simuleringarna visade att den mest ogynnsamma vindriktningen var ca 290° från norr räknat, dvs. västnordväst. Tabell 8 sammanfattar registrerade parametrar i punkt 1 och 2 utifrån riktlinjerna Fall 1 och Fall 2 enligt *RIDAS (2008)*.

Gemensamt för samtliga simuleringar är att skillnaden i signifikant våghöjd mellan vindhastigheten 20 m/s och 30 m/s är liten, i förhållande till ökningen mellan 30 m/s och 40 m/s. Genomförda simuleringar med registrerande punkt längre ut i magasinet visade att skillnaden i signifikant våghöjd mellan vindhastighetsförändringarna 20 m/s och 30 m/s ökade. Simuleringarna gav även en anvisning om vilken maximal våghöjd och vågperiod som kan förväntas i punkt 1 och 2 vid vindhastigheterna 20 m/s och 30 m/s. Det hade varit önskvärt att genomföra en statistisk analys för återkomsten av maximala våghöjden.

Tabell 8. Simuleringsresultat av vågparametrar i punkt 1 och 2.

	Vind- hastighet, V (m/s)	Signifikant våghöjd, H _s (m)	Maximal vågperiod, T _{max} (s)	Maximal våghöjd, H _{max} (m)
Punkt 1				
Fall 1	20	0,40	1,94	0,83
Fall 2	30	0,42	2,07	0,87
Punkt 2				
Fall 1	20	0,45	1,98	0,92
Fall 2	30	0,46	2,15	0,94

8.2 Känslighetsanalys

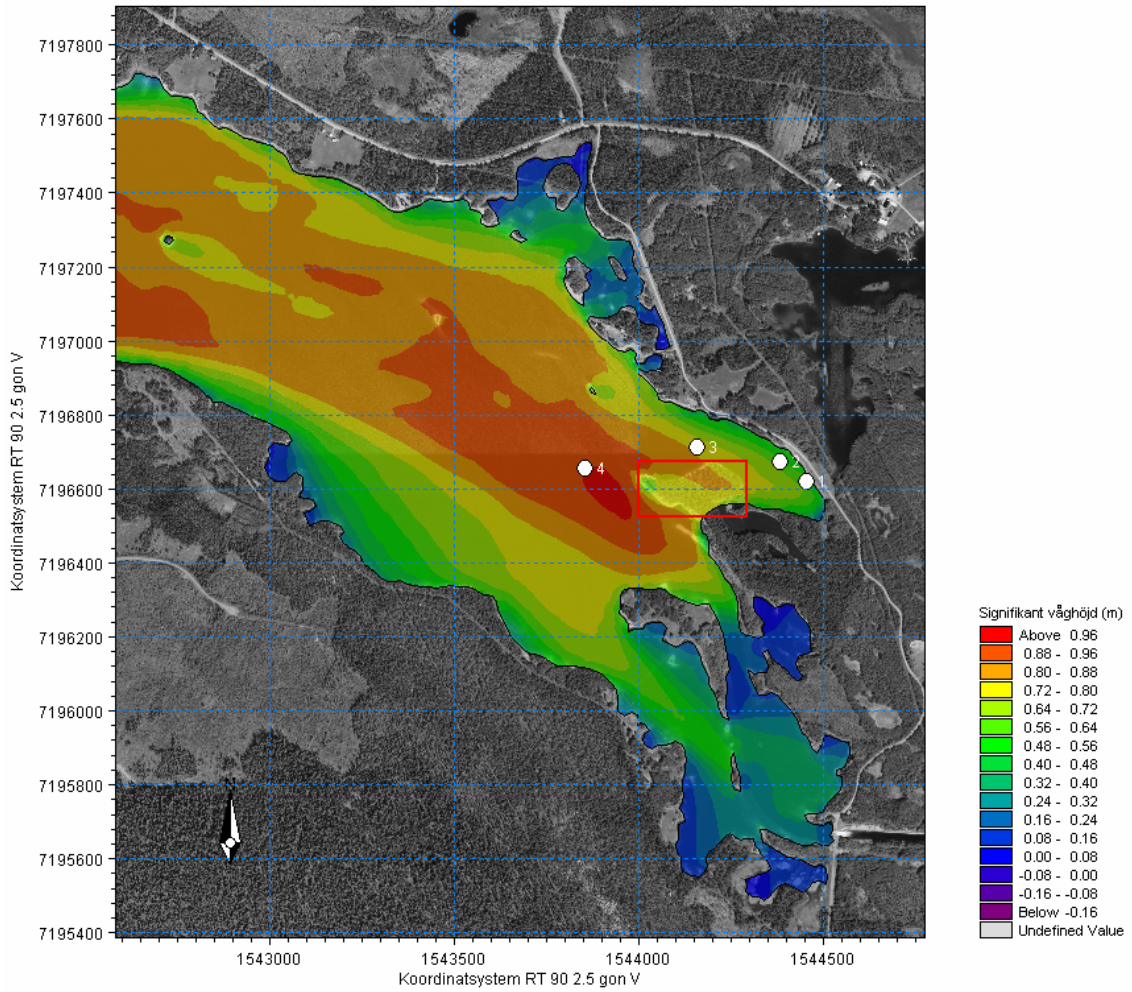
Simuleringarna i Sädvajaure visade att beräkningsnätets maximala area påverkade signifikanta våghöjden i punkten för vågmätningarna. Tätare beräkningsnät gav aningen lägre signifikant våghöjd och vice versa. Beräkningsnätet optimerades med avseende på simuleringstid och upplösning av batymetri genom att börja simulera med ett relativt tätt nät för att successivt minska tätheten. När steget mot ett alltmer glesare nät medförde en betydande skillnad i signifikant våghöjd återtog nätets upplösning två steget innan.

Uppställningen av diskretiseringen i rummet hämtades till stor del från *Moeini et.al (2007)* och ingen analys av denna faktors påverkan har undersökts. Beträffande diskretisering i frekvensplanet, avslöjar vågmätningarna i Sädvajaure på vågperioder mellan ca 1,7 s till 18 s. *Moeini et.al (2007)* använder intervallet 1 s till 20 s, vilket hävdas är de typiska vågperioderna för den sjö som undersöks. Utifrån *Moeini et.al (2007)* och med SMHI:s vågmätningar som referens användes intervallet 1 s till 20 s för samtliga simuleringar i Sädvajaure och Vojmsjön. Vidare visade både simuleringarna i Sädvajaure och Vojmsjön att dissipation till följd av vågbrytning och bottenfriktion inte hade någon signifikant effekt på vågförhållandena i undersökta punkter. Den ringa skillnaden i vattenstånd medför inte heller någon betydande effekt i signifikant våghöjd. Två parametrar kan kalibreras för dissipation till följd av bildande av gäss. Känslighetsanalysen för dessa parametrar begränsades till följd av otillräcklig

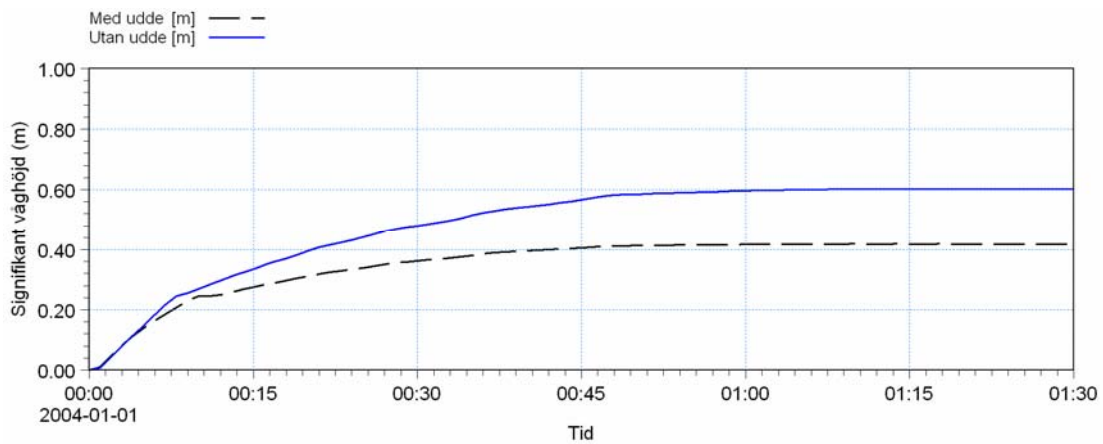
noggrannhet på vinddata. Simuleringar genomfördes med några olika kombinationer av parametrarna men konflikter uppstod mellan bäst stämmande parametervärden och rekommenderade. Inga konkreta uppgifter kunde hämtas från *Moeini et.al (2007)* eftersom det råder oklarheter vilka parametervärden som används. Slutligen genomfördes samtliga simuleringar med förinställda och rekommenderade parametervärden enligt *Komen m.fl. (1994)*. Huruvida strömmar skulle påverka vågförhållandena hade självklart varit önskvärt att undersöka. Strömmar och vågor influerar varandra genom linjär och icke linjär interaktion. Interaktionen förändrar både vågor och strömmars karakteristiska, *Lin (2007)*. Antagandet att genomföra simuleringar utan inverkan av strömmar anses ändå vara en rimlig förenkling eftersom strömningen, under normala förhållanden, är ringa.

Sammanfattningsvis har det varit svårt att analysera och dra några slutsatser för de olika parametrarnas värden främst till följd av dålig noggrannhet hos indata. Intresserade läsare hänvisas till *Moeini et.al (2007)* som utför en kalibrering och en kvantitativ utvärdering av modellen.

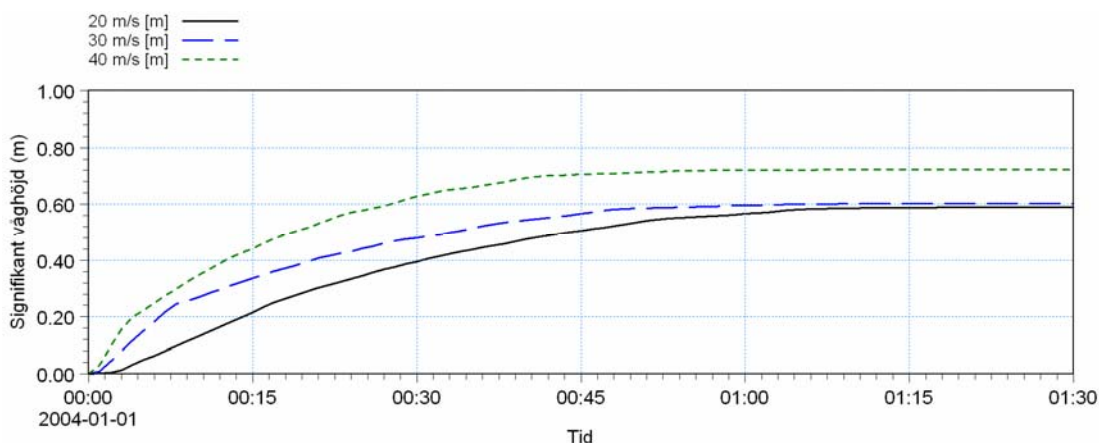
Hur magasinets form påverkar vågorna analyserades genom att skära av udden framför dammenhet 3 vilket medförde att dammen blev mer utsatt. Figur 26 visar magasinets form utan udde och resultatet av simuleringen med vindriktningen 290° och vindhastigheten 30 m/s. Röd ruta markerar bortagen udde, jämför med Figur 22. Figur 27 redogör för skillnaden i signifikant våghöjd för samma simulering. Signifikanta våghöjden i punkt 1 med olika vindhastigheter och utan udde redovisas i Figur 28.



Figur 26. Resultatbild över signifikanta våghöjden med förändrar form av magsin.
Källa: Bakgrundskarta SWECO



Figur 27. Signifikanta våghöjden i punkt 1 med och utan udde, vindhastigheterna 30 m/s och vindriktning 290°.



Figur 28. Signifikanta våghöjden i punkt 1 utan udde, vindhastigheterna 20 m/s, 30 m/s och 40 m/s.

Uddens frånvaro påverkade våghöjden signifikant vid dammenhet 3. Figur 27 visar att signifikanta våghöjden ökar med ca 20 cm vid vindhastigheten 30 m/s. Uddens frånvaro bidrar även till en större ökning i signifikant våghöjd mellan 30 m/s och 40 m/s.

8.3 Vågberäkningar i Vojmsjön enligt RIDAS

Tabell 9 och 10 redovisar en sammanställning av de resultat som beräknats utifrån *RIDAS* (2008). Som tidigare nämnts behandlar beräkningarna och resultaten endast dammenhet 3.

Tabell 9. Resultattabell över vågparametrar för dammenhet 3.

	Vind- hastighet, V (m/s)	Effektiv stryklängd, F_e (m)	Signifikant våghöjd, H_s (m)	Signifikant vågperiod, T_s (s)	Våglängd, L_0 (m)
Fall 1	20	1417	0,56	2,53	10,01
Fall 2	30	1417	0,86	3,03	14,31

Tabell 10. Resultattabell över våguppspolning, vindnivellering och erforderligt fribord för dammenhet 3.

	Vind- hastighet, V (m/s)	Våg- uppspolning, (m)	Vind- denivellering (m)	Erforderligt fribord (m) och nivå (m.ö.h.)
Fall 1	20	1,15	0,10	2,69 +419,69
Fall 2	30	1,77	0,22	1,99 +418,98

Resultaten ovan skiljer sig från *Wetterholt m.fl. (2007)* som genomfört vågberäkningar för samtliga dammenheter tillhörande Vojmsjöns regleringsdamm. Resultatet av vågberäkningarna är starkt kopplade till signifikanta våghöjden som beror av effektiva stryklängden. Effektiva stryklängden är i sin tur starkt kopplad till upprättandet och uppmätningen av delsektorerna. I *Wetterholt m.fl. (2007)* erhålls en effektiv stryklängd på 960 m och därmed lägre signifikant våghöjd och våguppspolning. Vidare antas värdet 10 m som medeldjup, istället för denna studies framräknade 8 m, vilket leder till lägre vindnivellering.

Dammkrönets lägsta nivå är enligt *Wetterholt m.fl. (2007)* +419,2 m.ö.h. Med stöd av resultatberäkningarna som redovisas i Tabell 10 skulle vindstyrkor på 20 m/s och samtidig överdämning leda till att dammen bitvis överspolas. *Wetterholt m.fl. (2007)* kommer fram till samma slutsats.

9 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Det här kapitlet behandlar författarens tankar och funderingar angående studiens resultat och vad den kan användas till samt förslag på framtida forskning.

9.1 Sädvajaure

Vid all modellering skall resultatet beaktas med hänsyn till noggrannheten för indata. Som nämnts tidigare uppger *DHI (2008a)* att 10 % fel i vindhastighet leder till 20 % fel i korresponderande våghöjd. Eftersom pådrivande vind i simuleringarna vid Sädvajaure hämtades ca 7 mil från aktuell plats där vågmätningarna utfördes torde vinddata vara en av de stora felkällorna. Omständigheterna med opålitlig vinddata medförde dåliga förutsättningar för en kalibrering. Eftersom vågorna i registrerande punkt var djupvattenvågor påverkades inte dessa av dissipation till följd av bottenfriktion och vågbrytning. Faktorerna bottenfriktion och vågbrytning har således inte undersökts eller kalibrerats. Istället var det främst vinden, upplösningen i geografiska och spektral rymden och dissipation till följd av bildande av vita gäss som gav utrymme för kalibrering. Felet i vind medförde dock osäkerheter mellan rekommenderade och bäst stämmande parametervärden. Det fanns inget underlag för att genomföra en validering vilket självklart hade varit önskvärt.

Sammanfattningsvis korrelerade simulerade värden med uppmätta relativt bra och trenden följs. Mer exakt vinddata hade förmodligen givit bättre samband mellan uppmätta och simulerade värden, samtidigt som en bättre kalibrering och verifiering kunde ha genomförts.

9.2 Fallstudie Vojmsjön

Modellen kunde inte kalibreras eftersom inga vågmätningar i Vojmsjöns magasin fanns att tillgå. Istället användes uppställningar av faktorer från liknade studier och de parametrar som någotsånär kalibrerats vid simuleringarna i Sädvajaure.

I regel karakteriseras batymetrin framför dammbyggnader av tvärt sluttanden kanter samtidigt som vågorna ofta är små. Förutsättningarna medför att vågorna i allmänhet tillhör djupvattenvågor, $d/L > 0,5$. Vojmsjöns batymetri är inget undantag och simuleringarna visade att dissipation till följd av bottenfriktion och vågbrytning inte hade betydande effekt på våghöjden i registrerande punkter 1-4. Bristande noggrannhet på indata och utforskade parametervärden för faktorerna bottenfriktion och vågbrytning gav begränsningar för att undersöka vågförhållandena precis vid gränsen mellan vattnet och dammens uppströmslänt. Mer exakt batymetri framför dammenhet 3 och kalibrerade parametrar för vågbrytning och bottenfriktion hade medfört möjligheter att utvärdera vågförhållandena precis vid uppströmslänten. Det hade gett en mer sannenlig bild över vilka våglaster som kan tänkas påverka dammenhet 3.

För att modellen skall kunna leverera bra resultat betonas vikten av god indata över batymetrin, särskilt vid simuleringar som inkluderar dissipation till följd av bottenfriktion och vågbrytning. Batymetrins upplösning är i synnerhet viktig för områden med uppgrundande partier där vågförhållandena påverkas av botten.

Det framgår tydligt att vindar på 20 m/s nästintill genererar lika höga vågor som vindar på 30 m/s i Punkt 1 och 2. Resultaten från en annan punkt längre ut i magasinet visade på större skillnad i signifikant våghöjd mellan samma vindhastighetsförändringar. Den marginella skillnaden i våghöjd för olika vindhastighetsförändringar tros bero på den begränsade stryklängden tillsammans med magasinets smala form. Dock borde ytterligare undersökningar genomföras för att utröna bakgrunden till företeelsen.

Enligt simuleringarna i Vojmsjön beror vågförhållandena i högsta grad på magasinets form. Uddens närvaro framför dammenhet 3 gav signifikant lägre våghöjder. Figur 24, 25 och 27 redogör för skillnaderna i signifikant våghöjd mellan vindhastighetsförändringarna 20 m/s och 30 m/s. Iakttagelserna är viktiga eftersom man länge varit osäker på hur störningarna påverkar vågförhållandena. Uddens närvaro medför en smalare passage för vågorna att propagera in genom och vågornas refraktion blir mer påtaglig vilket medför lägre våghöjder.

9.3 Jämförelse mot publikationen RIDAS

Beräkningsmetoden som används idag överskattar förmodligen signifikanta våghöjden, främst på grund av att beräkningarna genomförs med grova förenklingar av magasinets form och med antagandet att vågorna propagerar fritt utan inverkan av refraktion och uppgrundande partier. Tabell 11 redogör för skillnaderna i resultaten mellan de olika metoderna.

Tabell 9. Resultattabell över vågparametrar för dammenhet 3.

	Vind- hastighet, V (m/s)	Signifikant våghöjd enligt RIDAS, H_s (m)	Signifikant våghöjd enligt simuleringar i MIKE 21 SW, H_s (m)	
			Punkt 1	Punkt 2
Fall 1	20	0,56	0,40	0,45
Fall 2	30	0,86	0,42	0,46

Enligt *Wetterholt m.fl. (2007)* slutsatser och åtgärdsförslag skulle dammkrönet för dammenhet 3 behöva höjas och denna studies beräkningar tyder på samma sak. Att beakta är att beräkningen av den signifikanta våghöjden är starkt kopplad till upprättandet och längdmätningen av rosens delsektorer. Rekommendationer att upprätta en diskussion kring detta förordas. Modellen levererade lägre signifikant våghöjd än beräkningsmetoden. Resultatet av simuleringarna innefattar ej dissipation till följd av vågbrytning och bottenfriktion. Detta, något konservativa, tillvägagångssätt valdes eftersom inga vågmätningar för kalibrering fanns tillgängliga. Inverkan av vågbrytning och bottenfriktion skulle förmodligen leda till ännu lägre simulerade våghöjder. Inga beräkningar har genomförts utifrån de simulerade resultaten. Men eftersom modellen ger lägre våghöjder skulle uträkningarna leda till mindre våguppspolning och lägre erforderligt fribord.

Liknande mer genomgående undersökningar skulle kunna användas vid tveksamheter angående erforderligt fribord vid dimensionering av erosionsskydd. Metoden med att använda en numerisk modell som MIKE 21 SW speglar verkligheten bättre jämfört med beräkningsmetoderna. Särskilt vid fall då magasinet har säregen karaktär. Förfaringssättet skulle kunna erbjuda bra underlag för att kunna fatta bättre beslut såväl dammsäkerhetsmässigt som ekonomiskt.

9.4 Slutsatser

Simuleringarna i Sädvajaure visar på en relativt god korrelation mellan simulerade och uppmätta värden. Därav dras slutsatsen att tillvägagångssättet är en ny möjlig metod för att utvärdera vågförhållanden i vattenkraftmagasin. Beträffande jämförelsen mellan RIDAS beräkningsmetoder och simuleringarna i MIKE 21 SW är slutsatsen att metoderna ger betydande skillnader i signifikant våghöjd. Ytterligare undersökningar anses vara befogade för att fullt ut förstå modellens beskaffenhet och detta examensarbete kan användas som en vägledning.

9.5 Framtida studier

Vindnivellering kan också simuleras i MIKE 21. Modulen Hydrodynamik, HD, erbjuder möjligheter att utvärdera vattenståndsförändringarna bl.a. till följd av ihållande vind. På grund av tidsbrist genomfördes inga simuleringar i modulen HD. Allt material finns för att genomföra simuleringarna och SWECO i Stockholm kommer inom kort att utföra undersökningen. HD tillsammans med SW möjliggör även att våggenerering i kombination med vindnivellering kan simuleras och analyseras. Med HD skulle även strömmars och vågors interaktion i samband med avbördning kunna simuleras.

En grundligare utredning för att verkligen kunna kontrollera modellen skulle vara önskvärt. En sådan utredning skulle kräva vågmätningar och vindobservationer i något av de Svenska magasinerna. I denna studie genomfördes inga observationer för eventuella skillnader mellan tillvägagångssätten för mer öppet vattenområden. En sådan studie vore intressant framförallt vid tillfällen då dammar ligger mer exponerade utan störningar framför dammbyggnad.

Som nämnts tidigare innehåller MIKE 21 flera vågmoduler. Modulerna har var och en sitt specifika användningsområde men kan kombineras för att effektivt lösa problem. Som nämnt tidigare är MIKE 21 SW främst framtagen för storskalig vågmodellering men har begränsningar vid detaljerad modellering. MIKE 21 Boussinesq Wave Module (BW) är framtagen för att studera och analysera vågförhållanden i hamnar och kustnära områden och besitter full surf- och skvalpzon dynamik. BW används vid detaljerad vågmodellering. MIKE 21 SW och BW kombinerat, där BW skulle användas för den mer detaljerade vågmodelleringen framför dammbyggnaden, skulle förmodligen ge bättre förutsättningar för att bedöma angripande våglaster.

MIKE serien erbjuder även andra möjligheter att genomföra undersökningar. Med Modulen Mud Transport kan sediment transporten simuleras. En sådan undersökning kanske skulle kunna avslöja något om den förväntade sedimentationsprocesserna vid dammkonstruktioner och i magasin.

10 REFERENSER

- Bergh, H. Kurskompendie 1M1401 Vattenbyggnad, Institution för mark- och vattenteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Burstedt, K., Nilsson, R., Paulsson, S-E., (1995). VASO 11-Erosionskydd för fyllningsdammars uppströmslänter., Elforsk, Stockholm, 29 sidor.
- Cedervall, K., Bergh, H., (1995). VASO 10-Vågor i vattenkraftmagasin., Elforsk, Stockholm, 17 sidor.
- DHI, (2008a). MIKE 21 Spectral Wave FM Module, User Guide, 116 sidor.
- DHI, (2008b). MIKE 21 Spectral Wave Module, Scientific Documentation, 60 sidor.
- DHI, (2008c). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM-Hydrodynamic Module, Short Description 12 sidor.
- Garrison, T., (1999). *Oceanography*, 3rd ed., International Thomson Publishing, USA.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. och Janssen, P.A.E.M., (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press, UK.
- Lin, P., (2008). *Numerical Modeling of Water Waves*, Pengzhi Lin, Taylor & Francis, London.
- Moeini, M.H., Etemad-Shahidi, A., (2007). Application of two numerical models for wave hind casting in Lake Erie., *Applied Ocean Research*, Volume 29, 137-145.
- Vallander, P., (1977). *Vågor i skärgårdsvatten*, Bull. No. 94., Institution för Vattenbyggnad, KTH, Stockholm.
- Vattenfall, (1988). *Jord- och Stenfyllnadsdamm*., Happy printing AB, Stockholm, 242 sidor.
- Wetterholt, L., Larsson, C-H., Johansson, U., Ekström, T., Nilsson, K., Bergström, A., (2007). Vojmsjöns Regleringsdamm-Fördjupad dammsäkerhetsutvärdering., Carl Bro AB, Stockholm, 74 sidor.
- Reeve, D., Chadwick, A., Fleming, C., (2004). *Coastal Engineering-Processes, theory and design practice.*, Spon Press, Taylor & Francis Group, London and New York.
- Rytter, K., (1999). Dammsäkerhet -Erosionsskydd för svenska fyllningsdamm., Rapport nr 99:22, 61 sidor.
- Skellefteå Kraft, 2008. Information om Sädva Kraftstation, <http://www.skekraft.se>, (2008-12-10).
- SMHI, 2008. Vinddata, <http://www.smhi.se/cmp/jsp/polopoly.jsp?d=11636&l=sv>, (2008-11-12).
- Spade, B., (1999). *De Svenska vattenkraftverken-teknik under hundra år*. Riksantikvarieämbetet m.fl., Örebro.
- RIDAS, (2008). Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet-Tillämpningsvägledning, Reviderad., Svensk Energi, Stockholm, Avsnitt 7.2, 60 sidor.

Svenska Kraftnät, (2007). Dammsäkerhet-Egenkontroll och tillsyn HANDBOK., Teknikredaktörerna AB, Stockholm, 50 sidor.

Muntliga referenser

Lindh, Henrik, Observation Department SMHI.

Övriga källor

www.kuhlins.com - Privatägd hemsida om vattenkraft.

www.dhigroup.com - Danish Hydraulic Institute hemsida, producent av mjukvaran MIKE.

www.ne.se - Uppslagsverk och ordbok.

www.smhi.se - Insamling av vinddata och information om vindgenererande vågor.

www.lantmateriet.se - Inhämtad information av kartor och dylikt.

www.maps.google.se - Kartor och lokalisering av ingående objekt.

www.sciencedirect.com - Nedladdning av referens *Moeini et.al (2007)*.

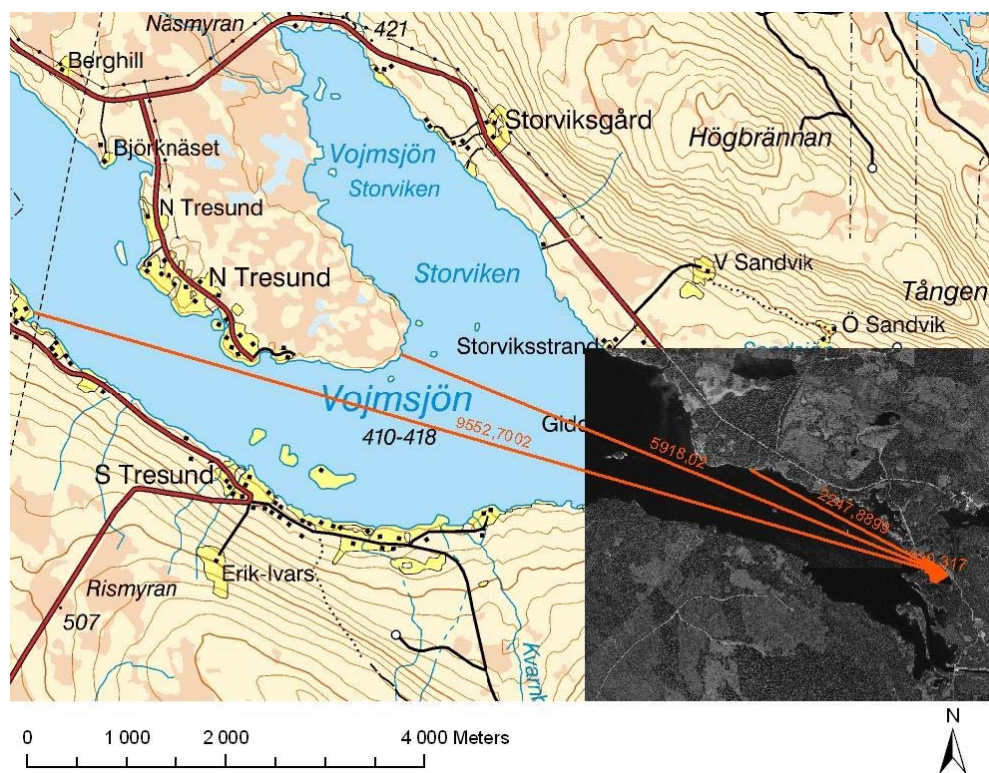
Ahlman, Stefan	DHI
Ascila, Romanas	SWECO
Björk, Mathias	Vattenregleringsföretagen
Isaksson, Nils	SWECO
Lindgren, Sofia	SWECO
Lundin, Urban	Uppsala universitet
Markland, Lennart	Vattenregleringsföretagen
Staub, Carsten	SWECO
Wingqvist, Else-Marie	SMHI
Ygland, Dag	SWECO

BILAGA 1

Vågberäkningar i Vojmsjön

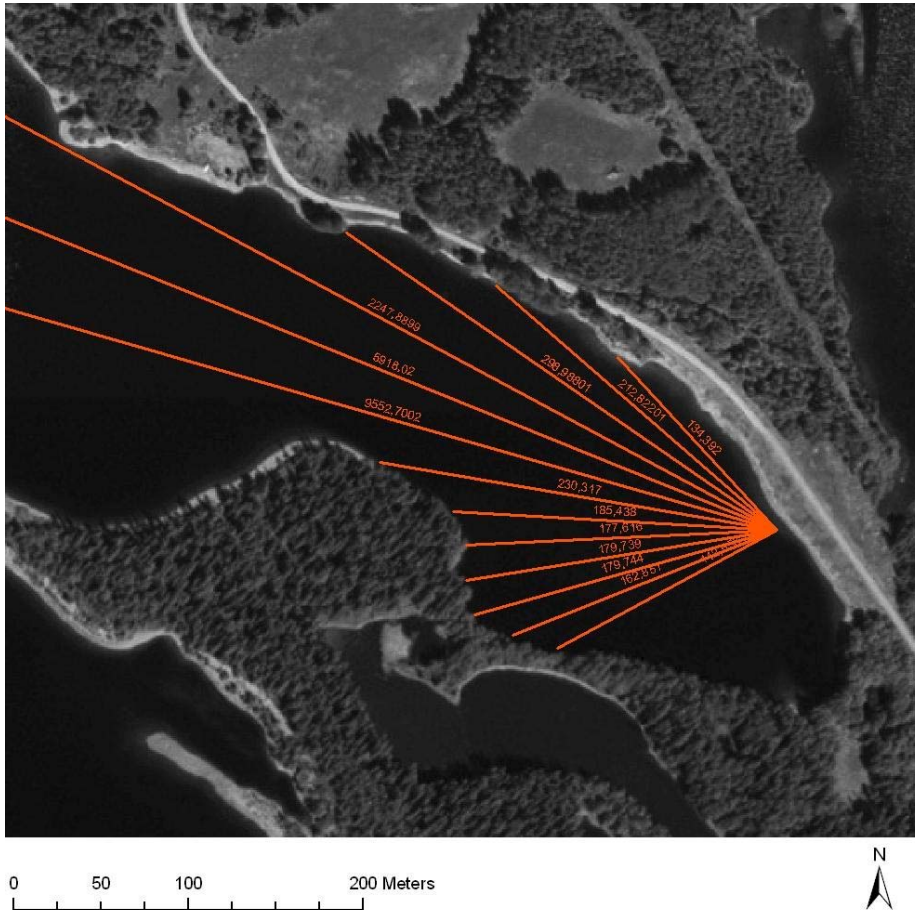
Effektiv stryklängd enligt Saville

Figur 29 och 30 presenterar ros med längder för delsektorer och Tabell 12 visar beräkningarna.



Figur 29. Delsektorer för beräkning av effektiva stryklängden, Vojmsjön.

Källa: © Lantmäteriet Gävle 2009. Medgivande I 2008/1962



Figur 30. Delsektorer framför dammenhet 3.
Källa: Bakgrundkarta SWECO, ArcGIS 9.3

Tabell 12. Beräkningar effektiv stryklängd, Saville.

Grader	$\cos \beta_i$	$\cos^2 \beta_i$	r_i (m)	$r_i \cos^2 \beta_i$ (m)
42	0,74	0,55	0	0
36	0,81	0,65	0	0
30	0,87	0,75	134	101
24	0,91	0,83	213	178
18	0,95	0,90	299	270
12	0,98	0,96	2248	2151
6	0,99	0,99	5918	5853
0	1,00	1,00	9553	9553
-6	0,99	0,99	230	227
-12	0,98	0,96	185	177
-18	0,95	0,90	178	161
-24	0,91	0,83	180	150
-30	0,87	0,75	180	135
-36	0,81	0,65	163	107
-42	0,74	0,55	143	79
Summa	13,51			19142

$$F_e = \frac{\sum_i (r_i \cos^2(\beta_i))}{\sum_i \cos(\beta_i)} = \frac{19142}{13,51} = 1417 \text{ m}$$

Dimensionerande vindhastigheter

Dimensionerande vind i samband med dimensionerande flöde, $V = 20 \text{ m/s}$.

Vind då magasinet ligger vid dämmningsgräns, $V = 30 \text{ m/s}$.

Vågparametrar

Beräkningar av vågparametrar för Fall 1 och Fall 2 med ovan nämnda vindhastigheter.

Fall 1, $V = 20 \text{ m/s}$:

$$H_s = 7,76 \cdot 10^{-4} \cdot V^{1,06} \cdot F_e^{0,47} = 7,76 \cdot 10^{-4} \cdot 20^{1,06} \cdot 1417^{0,47} = 0,56 \text{ m}$$

$$T_s = 0,0889 \cdot V^{0,44} \cdot F_e^{0,28} = 0,0889 \cdot 20^{0,44} \cdot 1417^{0,28} = 2,53 \text{ s}$$

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T_s^2 = 1,56 \cdot T_s^2 = 1,56 \cdot 0,86^2 = 10,01 \text{ m}$$

Fall 2, $V = 30 \text{ m/s}$:

$$H_s = 7,76 \cdot 10^{-4} \cdot V^{1,06} \cdot F_e^{0,47} = 7,76 \cdot 10^{-4} \cdot 30^{1,06} \cdot 1417^{0,47} = 0,86 \text{ m}$$

$$T_s = 0,0889 \cdot V^{0,44} \cdot F_e^{0,28} = 0,0889 \cdot 30^{0,44} \cdot 1417^{0,28} = 3,03 \text{ s}$$

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T_s^2 = 1,56 \cdot T_s^2 = 1,56 \cdot 3,03^2 = 14,31 \text{ m}$$

Våguppspolning

Aktuell uppspolningshöjd för ovan uträknade signifikanta våghöjder.

Fall 1, $H_s = 0,56 \text{ m}$:

$$H_{0,05\%} = 1,95 \cdot H_s = 1,95 \cdot 0,56 = 1,09 \text{ m}$$

$$H_{upp} = 1,05 \cdot R \cdot H = 1,05 \cdot 1,0 \cdot 1,09 = 1,15 \text{ m}$$

Fall 2, $H_s = 0,86 \text{ m}$:

$$H_{0,05\%} = 1,95 \cdot H_s = 1,95 \cdot 0,86 = 1,69 \text{ m}$$

$$H_{upp} = 1,05 \cdot R \cdot H = 1,05 \cdot 1,0 \cdot 1,69 = 1,77 \text{ m}$$

Vinddenivellering

Snedställning av vattenyta för vindhastigheterna i Fall 1 och Fall 2.

Fall 1, $V = 20$ m/s, $F = 9,553$ km, $D = 8$ m :

$$H_{sned} = \frac{V^2 \cdot F}{4800 \cdot D} = \frac{20^2 \cdot 9,553}{4800 \cdot 8} = 0,10 \text{ m}$$

Fall 2, $V = 30$ m/s, $F = 9,553$ km, $D = 8$ m :

$$H_{sned} = \frac{V^2 \cdot F}{4800 \cdot D} = \frac{30^2 \cdot 9,553}{4800 \cdot 8} = 0,22 \text{ m}$$

Erforderligt fribord

Erfordrat fribord beräknat utifrån Fall 1 och Fall 2 för vinddenivellering och våguppspolning samt eventuell överdämning i samband med dimensionerande flöde.

Fall 1:

$$H_{fri} = H_{överd} + H_{sned} + H_{upp} = 1,44 + 0,10 + 1,15 = 2,69 \text{ m}$$

Fall 2:

$$H_{fri} = H_{överd} + H_{sned} + H_{upp} = 0 + 0,22 + 1,77 = 1,99 \text{ m}$$