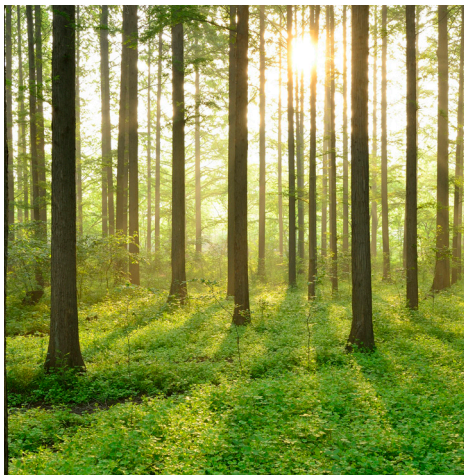


VATTENFÖRINGSMÄTNING I VATTENKRAFTTILLÄMPNINGAR

RAPPORT 2015:210



Vattenföringsmätning i vattenkrafttillämpningar

Nulägesbeskrivning och vägledning

OLA HAMMARBERG

ISBN 978-91-7673-210-6 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

I vattenkraftsammanhang är vattenföringsmätning och -bestämning av intresse för olika syften. Rapporten beskriver kortfattat de vanligaste principerna för vattenföringsmätning i yttre vattenvägar och naturliga vattendrag. Syftet är att en tänkt beställare härigenom skall få den grundläggande kunskap som behövs för att förstå de osäkerheter som är förknippade med respektive metod samt säkerställa att en upphandlad vattenföringsmätning får förväntad kvalitet.

Projektet har ingått i HUVA - Energiforsks arbetsgrupp för Hydrologiskt UtvecklingsArbete vars huvudinriktning är att förbättra vattenkraftindustrins prognosmodeller. HUVA innehåller utvecklingsprojekt, omvärldsbevakning, utbildning inom vattenkrafthydrologi (HUVA-kursen), HUVA-dagen och standardisering. I HUVA-gruppen ingår:

Peter Calla, Vattenregleringsföretagen (ordf.)
 Björn Norell, Vattenregleringsföretagen
 Stefan Busse, E.ON Vattenkraft
 Johan E. Andersson, Fortum
 Emma Wikner, Statkraft
 Knut Sand, Statkraft
 Susanne Nyström, Vattenfall
 Mikael Sundby, Vattenfall
 Lars Pettersson, Skellefteälvens vattenregleringsföretag
 Cristian Andersson, Energiforsk

E.ON Vattenkraft Sverige AB, Fortum Generation AB, Holmen Energi AB, Jämtkraft AB, Karlstads Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sollefteåforsens AB, Statkraft Sverige AB, Umeå Energi AB and Vattenfall Vattenkraft AB deltar i HUVA.

Ett stort tack riktas till Ola Hammarberg, Vattenhushållning, Dammsäkerhet & Miljö, VDM AB som genomfört projektet och till Magnus Lövgren, Vattenfall, Emma Wikner, Statkraft, Jonas Carlsson, E.ON Vattenkraft samt Christer Rönngren, Vattenregleringsföretagen som utgjort referensgrupp i projektet.

Stockholm, november 2015



Cristian Andersson

Sammanfattning

Rapporten beskriver kortfattat de vanligaste principerna för vattenföringsmätning i yttre vattenvägar och naturliga vattendrag. Både momentana och kontinuerliga metoder redovisas. Syftet är att en tänkt beställare härigenom skall få den grundläggande kunskap som behövs för att förstå de osäkerheter som är förknippade med respektive metod samt säkerställa att en upphandlad vattenföringsmätning får förväntad kvalitet. Vägledning och praktiska tips inför planering, beställning, utförande och rapportering av en vattenföringsmätning redovisas. Resultat från praktiska tester av en förenklad metod att uppskatta osäkerheten i resultatet från en ADCP mätning presenteras också.

Erfarenheter från arbetet:

- Första steget i en utredning av en vattenkraftanläggnings vattenföringsbestämning bör alltid vara att säkerställa att indata till beräkningen är korrekt, detta förenklar avsevärt den fortsatta utredningen och kan i många fall göra att onödiga kostnader för tex vattenföringsmätning undviks.
- Nyttan av en korrekt vattenföringsbestämning är stor men den är svår att kvantitativt bestämma.
- Momentan vattenföringsmätning i yttre vattenvägar kan, rätt utförd, vara ett värdefullt verktyg i arbetet att höja kvaliteten på vattenföringsbestämning i utskov och turbiner.
- De tre mest använda momentana mätmetoderna i Sverige och Norden är ADCP, flygelmätning och utspädningsmetoden med NaCl.
- En förenklade metod att uppskatta osäkerhet för ADCP gav rimliga resultat vid praktisk jämförelse med välverifierad turbintappning. Sektionsvis stationär ADCP mätning gav bra resultat i den turbulenta strömningen nedströms ett vattenkraftverk.
- Antagande om logaritmisk vertikal hastighetsfördelning kan ge stora fel vid flygelmätning speciellt om bottenens råhet är stor i förhållande till vattendjupet. Osäkerheten i hastighetsfördelningen är viktigt att ta med i osäkerhetsanalysen.
- För utspädningsmetoden bör risken för förlust av spårämne mellan injektionspunkt och mätplats undersökas vidare. Detta för att klarlägga vilken påverkan olika förhållanden (såsom bottenens materialsammansättning och växtlighet samt förekomst av snö och is) har på resultatet.
- Volymetrisk metod har stor potential för platser med de rätta förutsättningarna men osäkerhet i magasinstabeller och vattenståndsmätning behöver beaktas och utredas vidare.

Summary

This report briefly describes the principles of the most common methods for discharge measurements in natural waterways with free water surface. Both instantaneous and continuous methods are presented. The aim of the report is to give the reader the basic knowledge that is needed to understand uncertainties associated with each measurement method and to ensure that the results from a discharge measurement meets expected quality. Guidance and practical tips for preparation, execution and reporting of a discharge measurement is given. The report also includes results from practical tests with a simplified method of estimating the total uncertainty in ADCP measurements.

Innehåll

1	Introduktion	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Syfte	8
1.3	Avgränsningar	8
1.4	Medverkande	9
2	Momentan vattenföringsmätning	10
2.1	Hastighets-area metoder	10
2.2	Flyttbar mätsektion	15
2.3	Utspädningsmetod (Tracer dilution)	15
2.4	Volym-tidmetoden	17
3	Kontinuerlig vattenföringsmätning	18
3.1	Vattenstånd-vattenföringssamband	18
3.2	Mätning i befintliga vattenkraftanläggningar	20
4	Mätning av vattenstånd	23
5	Vägledning, tips och råd	24
5.1	Säkerhet	24
5.2	Val av mätmetod och mätplats	24
5.3	Planering utifrån mätobjekt	25
5.4	Utförande	26
6	Rapportering	28
6.1	Generellt	28
6.2	ADCP	28
6.3	Flygel	29
6.4	Utspädningsmetoden (NaCl)	30
7	Praktiska försök	31
7.1	ADCP	31
7.2	Lösningsmetoden	33
8	Nytta med vattenföringsmätning	34
8.1	Produktionsplanering	34
8.2	Dammsäkerhet	34
9	Behov av fortsatta studier	35
10	Referenser	36
	Bilaga 1 Relevanta ISO standarder	38
	Bilaga 2 Krav på mätplats för olika mätmetoder	41
	Bilaga 3 Testplatser ADCP	44
	Bilaga 4 Uppskattning osäkerhet hos ADCP	46

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Mätning av vattenföring är centralt i vattenkraftsammanhang eftersom det är vattnets lägesenergi som omvandlas till elektrisk ström i vattenkraftverken. För att kunna uppfylla vattendomar och optimera användningen av vattnet är det fundamentalt att vattenföringen bestäms på ett tillräckligt noggrant sätt hela vägen från det översta magasinet till det sista kraftverket i älven. Behovet kommer troligtvis öka i framtiden då ökad hänsyn skall tas till miljön samtidigt som vattenkraftens styrka att kunna motreglera andra kraftslag såsom vind och sol kommer att behöva nyttjas mer. En bra kvalitet på vattenföringsbestämningen gynnar daglig drift, kort- och långtidsplanering, dammsäkerhetsarbete och utveckling av prognosmodeller. Kvaliteten är också något som är viktigt då kraftbolagen kommunicerar med övriga samhället speciellt vid flödessituationer. Ett lämpligt första steg i att höja kvaliteten är att förutsättningslöst gå igenom beräkningar och indata till vattenföringsbestämningen. Om man finner att underlaget är undermåligt eller felaktigt krävs ofta någon form av vattenföringsmätning för att komma vidare. För att kunna bedöma om en vattenföringsmätning kan vara till nytta krävs att man har en uppfattning om osäkerheten i både befintligt underlag och den mätmetod man tänker använda.

1.2 SYFTE

Syfte med denna rapport är att ge en tänkt beställare ett stöd vid planering, upphandling, genomförande och analys av en vattenföringsmätning. Målet är att innehållet skall kunna öka kvaliteten på och nyttan av de vattenföringsmätningar som utförs.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Arbetet avgränsas till att summariskt beskriva de metoder som idag används vid vattenföringsmätning i yttre vattenvägar och naturliga vattendrag. Flera av de grundprinciper metoderna använder har tidigare beskrivits i en rapport från Elforsk [5], men då för användning i inre vattenvägar, vid mätning i yttre vattenvägar och naturliga vattendrag är geometrin inte lika väldefinierad samtidigt som hänsyn måste tas till fler oberäkneliga faktorer såsom vindpåverkan, lokaltillrinning, magasinering osv. Teknikutvecklingen är snabb, framförallt inom de metoder som använder ultraljudsteknik, varför information i en sådan här rapport snabbt riskerar att bli inaktuell. I denna rapport hänvisas istället till uppdaterade handböcker, föreskrifter, manualer och standarder som finns tillgängliga på internet. Den grundläggande informationen om olika mätmetoder är till stor del hämtad från litteratur utgiven av U.S. GEOLOGICAL SURVEY, USGS och World Meteorological Organization, WMO se referens [1][2][3][4].

1.4 MEDVERKANDE

Följande personer har under arbetet varit tillgängliga som referensgrupp:

Magnus Lövgren, Vattenfall AB

Emma Wikner, Statkraft Sverige AB

Jonas Carlsson, E.ON Vattenkraft Sverige AB

Christer Rönngren, Vattenregleringsföretagen

Statkraft Sverige AB och Statkraft AS har givit möjlighet till praktiska tester där ADCP teknik verifierats mot utvalda kraftstationer med speciellt god vattenföringsbestämning. Statkraft har också tillhandahållit en del av den mätutrustning som använts vid testerna. Även Fortum Generation AB har bidragit med data för referensmätning.

2 Momentan vattenföringsmätning

Vattenföring kan inte mätas direkt utan måste beräknas ur mätbara variabler såsom vattenhastighet samt vattendragets bredd och djup. Nedan följer en kortfattad beskrivning av de fysikaliska principer olika mätmetoder lämpade för fältbruk utnyttjar, vilka för- och nackdelar metoderna har, vilka standarder som är kopplade till respektive metod samt vilka grundläggande krav som ställs på mätplatsen. En diskussion förs även kring metodernas lämplighet för kontinuerlig respektive momentan mätning. Mätobjektet är vanligen ett utskov, vattenkraftverk eller en avbördningskurva som används av en sk Qpegel för att omvandla uppmätt vattenstånd till vattenföring. Mätobjekten kan även användas som flödesmätare, i sig själva, om de har en vattenföringsbestämning av tillräckligt hög kvalitet. De momentana mätmetoder som idag används frekvent i Norden är ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), flygel (mekanisk eller ultraljuds), lösningsmetoden och flyttbart Thomsonöverfall. Volymetrisk metod förekommer också men har i Sverige endast testats för att uppskatta maxflöden vid några få provtappningar, metoden används på försöksstadiet även för verkningsgradsprov men användningen förväntas öka nu när nya metoder för framställning av noggranna magasinstabeller finns tillgängliga.

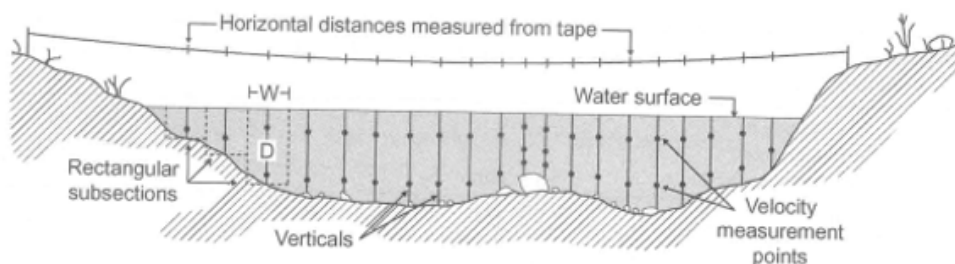
Ett mätresultats osäkerhet är som tidigare påtalats väldigt viktig för att det skall kunna användas i vattenkraftsammanhang. Oavsett vilken mätmetod man väljer så är osäkerhetsanalysen komplex när det gäller vattenföringsmätning i yttre vattenvägar och naturliga vattendrag. Detta gäller speciellt för ADCP vars osäkerhet beror av väldigt många faktorer. För ADCP finns ännu inte heller något väldefinierat förfarande standardiserat för detta. Empiriska försök har därför utförts i syfte att undersöka om en förenklad metod kan ge värdefull information, se avsnitt 7. Generella metoder för beräkning av osäkerhet redovisas i ISO 5168 och 25377.

2.1 HASTIGHETS-AREA METODER

Beräkning sker enligt principen att vattenföring är lika med mätsektionens medelvattenhastighet multiplicerad med dess tvärsnittsarea. Akustiska metoder har i Sverige i princip helt ersatt mätning med mekaniska flyglar som tidigare varit förhärskande.

2.1.1 Punktmätningssmetoder

Om punktmätningar används för att beräkna medelhastigheten delar man upp ett tvärsnitt av vattendraget i segment, i varje segment mäts vattendjup och hastighet enligt figur 1. I Sverige mäter man vanligen på två nivåer (0,2 och 0,8 gånger vattendjupet) i varje segment enligt den sk tvåpunktsmetoden. För den vertikala hastighetsfördelning metoden förutsätter blir medelvärdet av hastigheten i dessa punkter lika med medelhastigheten i vertikalen.



Figur 1 Illustration av mätning med 2 -punktsmetoden (midsection varianten). Illustration från Gordon et al 2004.

När alla punkt- och djupmätningar är utförda kan totalflödet beräknas som summan av alla delflöden. Två olika metoder finns för att beräkna dessa, midsection- och mean-section method, den första är enklast att beräkna och ger ett något noggrannare resultat [3], båda finns beskrivna i ISO 748. Val av mätplats görs efter rekommendationer i samma standard, se bilaga 2.

I naturliga vattendrag används normalt bara ett mätinstrument som flyttas för att vattenhastigheten i hela tvärsnittet skall kunna mätas vilket innebär en osäkerhet om strömbilden förändras under mätningen. Vid verkningsgradsprov för turbiner mäts vattenhastigheten simultant över hela tvärsnittet genom att använda många strömhastighetsmätare monterade på en ram, metoden ligger utanför omfånget av denna rapport men beskrivs i standarden IEC60041.

Resultatets osäkerhet beror av en mängd faktorer såsom instruments mätnoggrannhet (hastighet och djup), mätplats och mätsektionens karakteristik, antal vertikaler och antal punktmätningar i varje vertikal, vindpåverkan, förändring i vattenstånd. Osäkerheten kan antingen analyseras kvalitativt, kvantitativt eller både och, kvantitativ analys beskrivs i ISO 748 och ISO 1088.

USGS använder en femgradig skala, poor (>8%), fair (8%), good (5%) och excellent (2%) för att beskriva kvaliteten av en mätning, SMHI gör på liknande sätt så också Norges vassdrags- og energidirektorat, NVE, som använder en tregradig skala dålig, middels och god där betyget till stor del grundar sig på kvalitativa bedömningar av förhållanden på mätplatsen samt på mätningens delresultat.

Fördelar med metoden är att det är en etablerad och välkänd teknik. Relativt enkel och billig utrustning kan användas.

Nackdelar med metoden är att den är tidskrävande för stora vattendrag. Om mätplatsen inte uppfyller standardiserade krav kan osäkerheten i resultatet bli väldigt stor eftersom en så stor andel av vattenhastigheten måste extrapoleras.

Mekanisk flygel

Vertikal eller horisontal rotor vars rotationshastighet är proportionell mot vattenhastigheten, beskriven i standard ISO 748, 2537 och 3455. Har till stor del ersatts av punktmätare av dopplertyp men används fortfarande frekvent där vattnet har väldigt lågt partikelinnehåll och vid verkningsgradsprov för vattenkraftturbiner.

Fördelar med metoden är att den bygger på enkel välbeprövad teknik och att den till skillnad mot ultraljudsmetoderna även fungerar i vatten utan partiklar och inte heller är så känslig mot luftbubblor.

Nackdelar med metoden är att mätarna måste kalibreras och att den fungerar dåligt i mätsektioner som innehåller mycket skräp och vattenväxter. Noggrannheten sjunker också vid riktigt låga hastigheter.

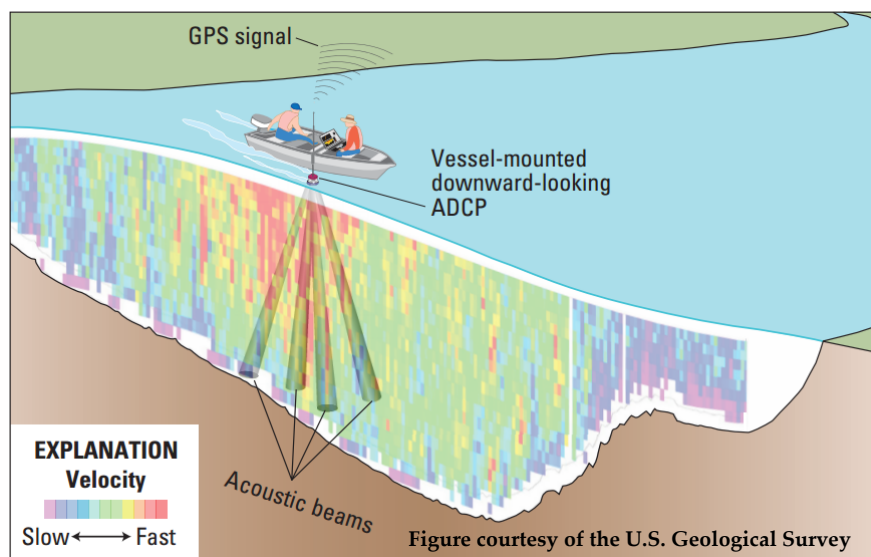
Acoustic Doppler Velocimeter, ADV

Sänder ut pulser med ultraljud som reflekteras på partiklar i vattnet, partikelhastigheten beräknas ur frekvensändringen i den reflekterade ljudvågen. Kräver att vattnet har ett visst partikelinnehåll, när så är fallet har metoden stora fördelar gentemot en mekanisk flygel i och med att den inte har några rörliga delar och inte behöver kalibreras, den stör flödet minimalt och kan användas vid riktigt låga vattenhastigheter (0,0015 m/s) och på små vattendjup (3cm). Vid små vattendjup bör man dock vara observant på att bottenstenar inte hamnar inom den volym vari hastigheten mäts för då kommer vattenhastigheten att underskattas. Metoden finns i utföranden för både 2- och 3-dimensionell mätning där den 2-dimensionella är lämplig för vattenföringsmätningar. Metoden finns ännu inte beskriven i någon ISO standard men det redogörs för instrumenttypen i WMO och USGS handböcker [1] och [3].

Elektromagnetisk strömningsmätare

Instrument utan rörliga delar som nyttjar det faktum att en ledare (i detta fall vatten) som förflyttas i ett magnetiskt fält producerar en elektrisk ström (Faradays princip) som är proportionell mot hastigheten [1]. Metoden kalibreras i mättrännor likt mekaniska flyglar men har visat sig mindre noggranna än dessa. Används framförallt i riktigt smutsigt vatten eller där det är gott om vattenväxter. Beskriven i ISO/TS 15768.

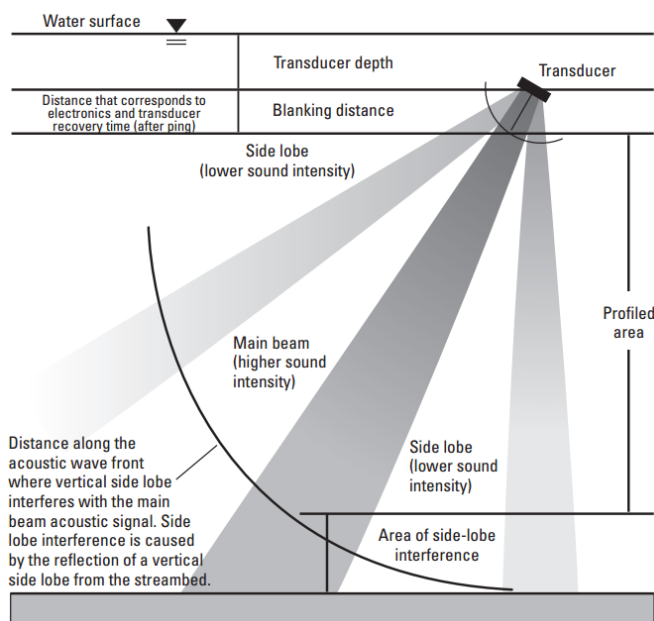
2.1.2 ADCP-moving boat



Figur 2 Bilden visar en båtmonterad ADCP halvvägs genom en överfart, färgerna illustrerar uppmätt vattenhastighet i varje mätcell.

ADCP är den för större vattendrag i Sverige överlägset mest använda momentana mätmetoden. Den använder samma grundprincip som ADV beskriven ovan. Tekniken bygger på att instrumentet sänder ut pulser med ultraljud och analyserar det ljud som reflekteras av små partiklar i vattnet med avseende på frekvensändring (dopplereffekt). Frekvensändringen används för att bestämma partiklarnas och därmed vattnets

radiella hastighet i förhållande till transducern. Genom mätning i minst 3 olika riktningar snett ut från lodlinjen kan, med antagande om homogent flöde, en 3 dimensionell hastighetvektor för en punkt, nedan kallad cell, rakt under instrumentet bestämmas, se figur 2. Mätning av hastighet sker simultant i ett antal celler mellan instrument och botten. Samtidigt med vattenhastighet mäts även vattendjup och instrumentets position. Den senare bestäms med ultraljud relativt botten eller med GPS i det fall botten inte är stabil. De mer avancerade instrumenten har även kompass och lutningssensorer (för pitch och roll). Då både instrumentets rörelse och vattenhastigheten relativt detta är känd kan den absoluta vattenhastigheten bestämmas. Genom att förflytta instrumentet över vattendragets bredd kan integrering av vattenhastigheter och djup i en tvärsektion utföras för att få totalflödet, se figur 2. Ofta görs 4-8 överfarter men om spridningen i uppmät flöde mellan dessa är stor (>5%) utförs fler överfarter. På grund av interferens och andra fysikaliska begränsningar kan området vid botten, ytan och stränderna inte mätas upp, där måste istället vattenhastigheten extrapoleras, se figur3.



Figur 3 Illustration av varför vattenhastighet inte kan mätas närmast ytan och botten, hämtad från Simpson 2002.

I en bra mätsektion kan ofta över 70 % av mätsektionen mätas upp vilket ger en överlägsen uppfattning om den vertikala hastighetsfördelningen jämfört med tidigare beskrivna punktmätningssmetoder.

De på marknaden förekommande ADCP:erna använder olika frekvenser vilket medför att prestanda skiljer sig åt. Allmänt gäller att låga frekvenser ger ett större maximalt mät djup medan höga frekvenser gör det möjligt att mäta mindre celler dvs i grundare vattendrag och närmare ytan. Mät noggrannheten för hastigheten i varje cell bestäms till stor del av instrumentets inställningar. Olika mätstrategier finns för olika typer av mätförhållanden (vattenhastighet, turbulens, bottenförhållanden och mät djup). De modernaste instrumenten är sk autoadaptiva och sköter dessa inställningar automatiskt. Ett av instrumenten har även möjlighet att automatiskt byta mellan två olika frekvenser vilket maximerar uppmätt andel av tvärsnittet. Utförliga

beskrivningar av ADCP-tekniken och de på marknaden på tillgängliga instrument finns att ladda ner från internet [13][6]. USGS testar i princip alla nya instrument som kommer ut på marknaden och delger resultat på sin hemsida (<https://hydroacoustics.usgs.gov/>).

Önskemål och krav på mätplats styrs delvis av vilket instrument man har till sitt förfogande, några allmängiltiga punkter är samlade i bilaga 2.

För ADCP mätning finns inte någon fullständig standard utan bara en teknisk rapport, ISO/TR 24578. Osäkerhet för vattenföringsmätningar beskrivs generellt i ISO 5168 och lite mer specifikt i ISO/TS 25377 men att utifrån dessa beräkna någon fullständig osäkerhet för en ADCP mätning är ytterst komplext. I väntan på en eventuell standard föreslås att förenklad osäkerhetsanalys som följer ett förslag utgivet av USGS används, se bilaga 4.

Fördelar med metoden bland annat att den är snabb och noggrann vid bra mätförhållanden. Det är oftast möjligt att utföra en mätning utan att personal behöver beträda vattendraget vilket ökar personalsäkerheten. Ofta är ADCP den enda tekniken som är rimlig att använda i större vattendrag. Den ger förutom totalflödet även detaljerad information om vattenhastigheter i tre dimensioner vilket kan vara värdefullt vid kalibrering och verifiering av två- och tredimensionella hydrauliska modeller.

Nackdelar med metoden är att det saknas standard för osäkerhet och att den inte klarar att mäta riktigt klart vatten (utan partiklar) eller vatten med väldigt mycket luftbubblor eller vattenvegetation.

2.1.3 ADCP-stationär mätning i vertikaler

Ett alternativ till ovan beskrivna metod är att hantera ADCP-utrustningen som vid en vanlig flygelmätning, dvs dela upp tvärsnittet i ett antal vertikaler och mäta stationärt på dessa. Med detta upplägg kan positionsbestämningen ske med måttband och därmed vara oberoende av ostabila bottenförhållanden och dålig satellittäckning. Tiden för mätning på varje vertikal kan väljas fritt vilket gör det möjligt att minska osäkerhet uppkommen av ett fluktuerande och turbulent flöde. Metoden har därför visat sig lämplig att använda nedströms vattenkraftverk, se avsnitt 7. Nackdelar är främst att metoden ofta tar något längre tid och att en inte lika stor andel av tvärsnittet mäts upp jämfört med "moving boat-metoden". Osäkerheten kan beräknas på liknande sätt som för en vanlig flygelmätning enligt standard ISO 748, detta utförs automatiskt i den mjukvara som följer med instrumenten. Noteras bör att det ofta finns betydande osäkerheter som inte tas med i den automatiska beräkningen.

Med den stationära metoden går det även att utföra mätning under islagd tid genom borrarade hål i isen, förfarandet beskrivs utförligt i rapport utgiven av Water Survey of Canada [7].

Fördelar med förfaringssättet är att känsligheten för turbulens och fluktuerande flöde minskar.

En nackdel jämfört med "moving boat-metoden" är att en lägre andel av tvärsnitt mäts upp, detta gäller både area och vattenhastighet.

2.1.4 Mätning av ytvattenhastighet

Flottörmetoden

Det primitivaste sättet att bestämma ytvattenhastighet är att mäta hur lång tid det tar för ett flytande objekt att färdas en viss sträcka, objektet (sk flottör) kan vara mer eller mindre sofistikerat för att kunna beskriva vattenhastigheten på ett visst djup. Vattenföringen kan beräknas om ythastighet mäts stationsvis över hela vattendragets bredd och man dessutom har kännedom om mätsträckans bottenpografi och vertikal hastighetsfördelning. Metodens fördel är dess enkelhet och snabbhet i utförandet bortsett från kartläggningen av bottenpografien som kan utföras vid valfritt tillfälle om bottenförhållandena är stabila. Nackdelen är resultatets stora osäkerhet, för optimala mätställen och liten yttre påverkan av tex vind kan den ändå bli så låg som $\pm 10\%$ men för sämre uppåt $\pm 25\%$ [4]. Metoden är beskriven i ISO 748.

Optiska metoder och ultraljudsmetoder

Optik och ultraljud (dopplerradar) kan också användas för momentan vattenföringsmätning, fördelarna med dessa metoder visar sig framförallt vid kontinuerlig mätning men de är också användbara under extremflöden då beröringsfria metoder kan vara de enda mätningar som är möjliga att utföra. Ett relativt nytt tillvägagångssätt för sådana tillfällen är att utrusta en helikopter med en högfrekvent dopplerradar för mätning av ytvattenhastighet och en markradar för att mäta upp vattendjup. Ett alternativ till dopplerradarn skulle kunna vara en digital filmkamera varur ytvattenhastigheten kan bestämmas med bildanalys, även helikoptern torde kunna bytas ut mot en drönare vilket drastiskt skulle kunna minska kostnaderna. Om bottenförhållandena anses stabila kan markradarn uteslutas och tvärsektioner mätas upp i efterhand. Vattenföringen kan, även utan mätning av vattenhastighet, med hjälp av energiekvationen, beräknas i efterhand om data på vattenstånd längs vattendraget, tvärsektioner och råhet finns att tillgå [3]. Osäkerheten i resultatet bör bli bättre än med flottörmetoden men är starkt beroende av kvaliteten på tillgänglig information kring tvärsnitt och vertikal hastighetsfördelning, metoderna behandlas i standard ISO 9825 samt ISO 1070.

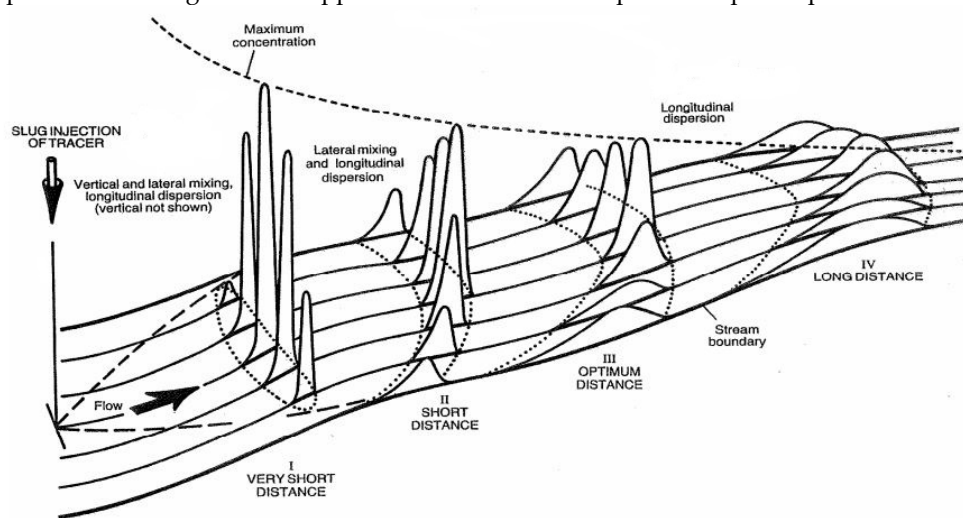
2.2 FLYTTBAR MÄTSEKTION

Metoden är vanligast för kontinuerlig mätning men kan även användas för momentan mätning. Principen går ut på att montera ett tillfälligt överfall eller ränna med känd avbördningsförmåga i aktuell bäck, vattenföringen beräknas med ledning av vattenståndet uppströms mätsektionen. Metoden är lämplig för små vattenföringar såsom läckageflöden eller i väldigt små bäckar tänkta för indikatorstationer. Skarpkantade överfall ger den högsta noggrannheten men är känsliga för störningar i form av skräp och sediment. Rännor klarar den formen av störning bättre. Med skarpkantade ej översvämmade överfall kan vattenföring mätas med en osäkerhet så låg som $\pm 3\%$ [3]. En mängd olika standarder behandlar överfall och rännor med olika form, ISO 3847, ISO 4359, ISO 4371, ISO 9826, ISO 9827, ISO 8368, ISO 4377, ISO 1438-1.

2.3 UTSPÄDNINGSMETOD (TRACER DILUTION)

Grundprincipen är att tillföra en känd mängd spårämne till vattendraget och på en plats nedströms, där tillräcklig omblandning skett, mäta koncentrationens variation över tid och illustrera denna med en responskurva, se figur 4 [8]. Med kunskap om

vattendragets naturliga koncentration kan vattenföringen beräknas. Spårämnet kan tillföras momentant eller kontinuerligt, där den senare metoden anses ge det säkraste resultatet med en nackdel att den vanligen kräver något större totalmängd spårämne och mer utrustning för jämn tillförsel av denna. Vid momentan tillförsel beräknas vattenföringen, Q , som $Q=M/A$ där M är massan av tillförd spårämne och A är arean under responskurvan. Vid kontinuerlig tillförsel mäter man koncentrationen då responskurvan planat ut och jämvikt uppnått. Vattenföringen, Q , kan då beräknas som $Q=q*C/c$ där q är flödet av tillförd spårämne, c är koncentrationen hos tillförd spårämneslösning och C är uppmätt koncentration av spårämnet på mätplatsen.



Figur 4 Illustration av omblandning längs med och tvärs för strömningsriktningen nedström en punkt där momentan injektion av spårämne utförts. Med ledning av ovanstående principskiss kan man få en uppfattning om man mätt koncentrationen på ett lagom avstånd från injektionspunkten, från Kilpatrick 1982.

Spårämnet kan vara av kemisk, radioaktiv eller fluorescerande typ. I Norden används främst NaCl. I Norge är lösningsmetoden mycket vanlig på grund av den rikliga förekomsten av branta vattendrag där andra mätmetoder är svåra att använda. Fördelarna med NaCl är bl.a. lågt pris och att det inte är skadligt för miljön i de låga koncentrationer som uppstår vid mätning. NaCl har en begränsning i att det för mätning av större vattenföringar måste tillsättas i väldigt stora mängder (ofta minst 1 kg/m^3 och mer om naturliga konduktiviteten är hög i vattendraget) och på grund av den låga lösligheten måste tillsättas i fast form. Vid stora flöden är det istället normalt att ett spårämne av fluorescerande typ används, exempelvis Rhodamin WT, Rhodamin B och Fluorescein. Dessa kan användas utan tillstånd men man bör informera aktuell kommun innan mätning [15]. Alla spårämnen har sina för- och nackdelar som tillsammans med utförandebeskrivningar finns utförligt beskrivna i standard ISO 9555-1, 9555-2, 9555-3 och 9555-4. I dessa finns även förslag på hur osäkerheten kan uppskattas. En särskild svårighet i osäkerhetsanalysen är att bedöma risken för förlust av spårämne på sträckan för omblandning. Bottens materialsammansättning, växtlighet och förekomst av snö och is på stränderna kan ha betydelse. Jämförelser med traditionella flygelmätningar har visat på god överensstämmelse med lösningsmetoden och att osäkerheten vid bra förutsättningar bli mindre än 5% [13].

Utspädningsmetoden är ett utmärkt komplement till övriga mätmetoder eftersom den, i princip, ställer motsatta krav på mätplatsen, utspädningsmetoden gynnas nämligen av turbulent flöde och kan utföras utan kännedom om tvärsnittsarea.

Nackdelar med metoden är att den kräver ganska lång sträcka för tillräcklig omblandning (tumregel 30-50 gånger vattendragets bredd) samt att flödet på denna sträcka helst bör vara turbulent, fritt från lugnvatten och tillrinning, vattendraget bör inte heller innehålla material eller växter som kan reagera med eller ta upp spårämne.

2.4 VOLYM-TIDMETODEN

För att momentant mäta tex läckage genom dammar eller vattenföring i riktigt små bäckar för underlag till tex avbördningskurva för indikatorstation kan "hink och klocka-metoden" vara ett bra alternativt. För större flöden kan samma princip användas men med ett vattenmagasin som mätvolym. Normalt bestäms inledningsvis lokaltillrinningen till magasinet genom att stänga in- och utlopp till magasinet och mäta stigningshastigheten ur vilken vattenföringen kan bestämmas med hjälp av magasinstabellen. När lokaltillrinningen är känd kan sedan tappning från mätobjektet mätas med samma metodik. Även ett magasin uppströms mätobjektet kan användas med den nackdelen att överytan då inte kan hållas konstant. Metoden kan även kombineras med rapporterad tappning i turbiner och utskov som har god kvalitet på vattenföringsbestämningen. Metoden ställer stora krav på vattenståndsmätning, precision i magasinstabell och möjlighet till korttidsreglering av både vattenstånd och flöde. Ett specialfall kan vara att hålla vattenståndet i magasinet konstant och enbart bestämma vattenföringen utifrån tappning i närliggande kraftstation och lokaltillrinning. Osäkerheterna kan minskas om mätningen utförs under islagd tid då vindpåverkan är minimal och tillrinningarna vanligtvis är låga. Under optimala förutsättningar bör osäkerheten i resultatet kunna komma ner mot och kanske till och med under $\pm 2\%$. [14]. Relevanta standarder IEC 60041 och ISO 4373

Fördelar med metoden är att den är noggrann vid rätt förutsättningar. Mätutrustningen och metoden i sig är enkel och billig att utföra. Den kan tillsammans med metoder som utgår från mätning av ytvattenhastighet vara den enda som fungerar vid extrema provtappningar.

Nackdelar med metoden är att den ställer väldigt stora krav på att rätt förutsättningar är uppfyllda i form av magasin med lämplig storlek och noggrann magasinstabell. Metoden är relativt oprövad med begränsad erfarenhet av mätning i magasin som ej är artificiella.

3 Kontinuerlig vattenföringsmätning

I Sverige sker kontinuerlig vattenföringsmätning normalt med en så kallad Q pegel. Andra i Sverige ej så vanliga metoder är gångtidsmätning med ultraljud och sk indexstationer. Även befintliga vattenkraftanläggningar såsom utskovsanordningar och vattenkraftturbiner kan användas. De metoder som befunnits relevanta i detta arbete beskrivs kortfattat nedan.

3.1 VATTENSTÅND-VATTENFÖRINGSSAMBAND

3.1.1 Avbördningskurva

En Qpegel består av en vattenståndsmätare och en avbördningskurva som beskriver sambandet mellan vattenstånd och vattenföring. Om möjligt anläggs Qpegeln uppströms en tröskel i vattendraget där vattenhastigheten är högre än vågutbredningshastigheten (bestämmande sektion), på sådana platser är det relativt enkelt att via en serie momentanmätningar ta fram ett entydigt samband (avbördningskurva) mellan vattenstånd uppströms tröskeln och vattenföringen genom sektionen. Ibland är det inte en tröskel utan en längre sträcka av vattendraget som är bestämmande och inte sällan kan olika trösklar och kanalsektioner vara bestämmande vid olika vattenstånd vilket komplicerar avbördningskurvans utseende.

Osäkerheten i beräknad vattenföring beror av en mängd olika faktorer såsom mänskliga avläsnings och dataprocessfel, mätosäkerhet i vattenföring och vattenstånd, icke stationära bottenförhållanden (sedimentation, erosion osv), extrapoleringsfel och antaganden vid anpassning av kurvan mot uppmätta data [3].

Metoden behandlas i standard ISO 1100-2 (framtagning av en avbördningskurva), ISO 18365 (etablering och drift av Qpegel), ISO 748 (vattenföringsmätning) och ISO 4373 (vattenståndsmätning).

Fördelar med metoden är att den är enkel, billig och robust om förutsättningarna är de rätta.

Nackdelar är att vattenståndet kan påverkas av vind och att den bestämmande sektionen kan förändras av erosion eller sedimentation. Avbördningskurvan måste därför fortlöpande kontrolleras med momentana vattenföringsmätningar. Avbördningen kan också förändras pga årstidsbundna faktorer såsom isbildning och igenväxning. Ett annat problem för Qpegel som anlagts i relativt flacka vattendrag kan vara hystereseffekter vilket innebär att sambandet mellan vattenstånd och vattenföring påverkas av om vattenföringen är ökande eller minskande.

Anlagd mätsektion

Ett specialfall av ovanstående är när den bestämmande sektionen skapats artificiellt. Sambandet mellan vattenstånd och vattenföring kan då vara teoretiskt eller kalibrerat med hjälp av momentanmätningar. Strukturen kan vara speciellt konstruerad för att mäta flödet eller byggd med andra syften såsom tex grunddammar och andra typer trösklar utan luckor. Specialbyggda mätstrukturer passar bäst i mindre vattendrag eftersom anläggningskostnaderna blir väldigt höga i större vattendrag.

Förutom de standarder som listades för Qpegel tillkommer här ISO 4362, ISO 14139 och ISO 3846. Mätstrukturer speciellt anpassade för att inte hindra fiskvandring behandlas i ISO/AWI TR 19234 och ISO 26906.

Fördelar med metoden är samma som för en Qpegel vid en naturligt bestämmande sektion.

Nackdelar med metoden är: samma som för en Qpegel vid en naturligt bestämmande sektion. Risk finns också att en artificiell mätstruktur hindrar fiskars och vattenlevande insekters förflyttning i vattendraget.

Avbördningskurva för sektion påverkad av variabel nedströmsyta

I de fall den bestämmande sektionen blir indämd av tex en reglerad vattenyta fungerar inte en vanlig avbördningskurva. En utväg kan då vara att mäta vattenståndet på ytterligare ett ställe en bit nedströms Qpegeln för att kunna beräkna vattenytans lutning med vilken samband för vattenföringsberäkning kan tas fram, se standard ISO 9123. Vattenföringsbestämningen blir dock mer osäker än för en normal Qpegel. Vid förhållanden med variabel nedströmsyta kan istället en sk indexstation, se avsnitt 3.1.3, vara ett bättre alternativ.

3.1.2 Ultraljud gångtid

Akustisk gångtidmätning är en metod lämpad för mätning av vattenhastigheten i raka vattendrag med konstant tvärsnitt vilket gör att metoden främst används i artificiella kanaler utomlands. I Sverige används principen främst i vattenkraftstationers inre vattenvägar vid verkningsgradsprov. Principen utgår från att en akustisk våg som färdas motströms tar längre tid på sig att färdas en viss sträcka än en våg som färdas medströms. Utförandet går till så att sändare/mottagare monteras diagonalt på vardera sidan om vattendraget, genom att placera fler par givare på olika nivåer kan en större del av flödet mätas upp vilket minskar osäkerheten, metoden beskrivs i standard ISO 6416.

Fördelar med metoden är att det är en beprövad teknik som ger noggrant resultat om förutsättningarna är dom rätta.

Nackdelar är att metoden är känslig för sneda strömmar, luftbubblor, vattenväxter och temperaturgradienter. Ej uppmätta områden måste extrapoleras med lämpligt samband som vanligen bestäms med separata mätningar av hastighetsprofilen.

3.1.3 Indexstation

Vattenföringen i en indexstation beräknas utifrån uppmätt vattenstånd och vattenhastighet i en del av tvärsnittet. För att upprätta sambandet krävs dels inmätning av mätsektionen som ger samband mellan vattenstånd och tvärsnittsarea och dels momentanmätningar av vattenföringen som ger ett samband mellan den uppmätta indexhastigheten och medelhastigheten tvärsnittet. Vattenhastigheten kan mätas i en punkt men numera är det vanligare att man med ultraljudsteknik(doppler) mäter upp vertikala (bottenmonterad) eller horisontala hastighetsprofiler i delar av tvärsnittet. Osäkerheten är starkt beroende av förhållandena på platsen, använda instrument och

på osäkerheten i uppmätt flöde och vattenstånd. Metoden beskrivs i handböcker utgivna av WMO [3] [4].

Fördelar med metoden är att den fungerar även i långsamt strömmande vattendrag utan bestämmande sektion och även där nedströmsytan är reglerad eller påverkad på annat sätt (tex isdämma).

Nackdelar är att den liksom ADCP kräver ett tillräckligt vattendjup, att det finns tillräckligt med partiklar i vattnet och att ljudvågorna inte hindras av tex växtlighet. Om tvärsnittsarean i mätsektionen förändras av erosion eller sedimentation måste ett nytt samband tas fram.

Ytvattenhastighet

Istället för att vattenhastigheten mäts i en del av tvärsnittet under vattenytan kan ythastigheten mätas. Samband mellan vattenhastighet, vattenstånd och vattenföring kan bestämmas med hjälp av mätningar eller genom att anta en vertikal hastighetsfördelning. Storleken på sektionsarean vid olika vattenstånd måste dock i båda fallen mätas upp på plats. På marknaden finns smidiga lösningar med radarinstrument avsedda att fästas under broar för mätning av både vattenstånd och ytvattenhastighet. Osäkerheten bör vara större än för en normal indexstation.

Fördelar med metoden är samma som för övriga indexmetoder

Nackdelar är känslighet för vindpåverkan och att vattenytan inte heller får vara helt spegelblank om dopplerradar skall kunna används.

3.1.4 Elektromagnetisk metod

Metoden bygger liksom punktmätaren i avsnitt 2.1.1 på Faradays princip om elektromagnetisk induktion. Här skapas magnetfältet av en isolerad spole vanligen monterad på botten av vattendraget. Den inducerade spänningen, som mäts via elektroder placerade på vardera stranden, är proportionell mot medelhastigheten. Som indata till vattenföringsberäkningen behövs även vattendjupet i sektionen.

Vid val av plats bör man vara uppmärksam på att det inte finns anläggningar i närheten som kan orsaka elektriska störningar såsom kraftledningar eller elektrifierade järnvägar. Även radiostationer (och troligen även mobilmaster) kan störa och dessa bör inte ligga närmare än 2-3 km från mätstationen [3]. Typisk osäkerhet $\pm 5\%$, osäkerhet behandlas i ISO 5168. Metoden beskrivs i standard ISO 9213.

Fördelar med metoden är att den är okänslig för smutsigt vatten, vattenvegetation, luftbubblor, temperaturstratifiering, sediment, bakvatten, oregelbundna hasatighetsprofiler, snett inflöde, bakvatten, grunt vatten, låga vattenhastigheter.

Nackdelar är dyr installation och att vattenföringens samband med uppmätt spänning och vattenstånd måste kalibreras med hjälp av momentanmätningar. Den kan också vara känslig för elektriska störningar.

3.2 MÄTNING I BEFINTLIGA VATTENKRAFTANLÄGGNINGAR

Osäkerheten i rapporterad utskovs- och turbintappning är intressant av två skäl, dels för att veta vilken mätmetod som är lämplig för att kunna förbättra

vattenföringsbestämningen och dels för att bedöma om ett visst utskov eller turbin kan användas för att fastställa vattenföringen i en närliggande anläggning.

De uppenbara fördelarna med att använda befintliga anläggningar för vattenföringsmätning är att dessa redan finns på plats och att mätning kan ske kontinuerligt över en längre tid. Främsta nackdelarna är att det ofta blir avsevärda avstånd mellan "mätare" och mätobjekt vilket ökar osäkerheten samt att metoden ställer stora krav på kvaliteten på vattenföringsbestämningen hos de anläggningar som skall användas som mätare.

3.2.1 Utskov

Osäkerheten i beräknad tappning genom en utskovslucka beror dels på osäkerheten i indata till beräkningen (vattenstånd och lucköppning) men också av kvaliteten på de lucktabeller som används vid beräkningen. Lucktabellerna är i sin tur inte bättre än det underlag som använts vid framtagande. Ibland är tabellerna dessutom så förenklade att ytterligare fel uppkommer i rapporterad tappning. Det är relativt vanligt att givare för lucköppning inte ger rätt värde, men detta är lätt att kontrollera om det finns fasta skalor som kan avläsas manuellt (observera dock att även dessa kan vara felaktiga). Om indata antas vara korrekt kan nedanstående tabell användas för att uppskatta vilken osäkerhet rapporterad tappning genom en utskovslucka kan ha beroende på vilket underlag som använts för att ta fram lucktabellerna. Observera att tabellen gäller för helt öppen lucka. För delvis stängd lucka blir osäkerheterna betydligt större.

Tabell 1 Grova typvärden [16] på osäkerhet för beräkningsfall med helt öppen lucka, korrekt indata och ingen påverkan från närliggande luckor. *Egen uppskattning.

Underlag till lucktabell	Typisk osäkerhet	Anmärkning
Handräkning, my-värde valt efter utskov med liknande geometri	±5-10%	Endast för enkla beräkningsfall
Mike11/HECRAS, my-värde valt efter utskov med liknande geometri	±5-10%	Enkla endimensionella hydrauliska modeller ger inte mindre osäkerhet än handräkning.
Handräkning kalibrerad mha flödesmätning	±3-5%*	Följer mätningens osäkerhet, kan ge bra resultat även för delvis öppen lucka
Numerisk beräkning (CFD)	±5-20%	Den högre siffran avser mer komplicerade beräkningsfall.
Fysisk modell	±2-5%	Modellskalen har stor betydelse, större osäkerhet för delvis öppen lucka.

En standard ISO 13550 finns för beräkning av flöde under luckor men i denna är det förutsatt att luckan är placerad i en rektangulär kanal med horisontal botten vilket nästan aldrig är överensstämmande med de konstruktioner som används i vattenkraftsammanhang.

3.2.2 Vattenkraftturbin

Metoder för att ta fram verkningsgraden i en vattenkraftturbin faller utanför omfånget av denna rapport, men finns beskrivna i referenslitteratur [5] och standard IEC60041. Eftersom turbinflödet i vissa fall kan användas för att bestämma vattenföringen i närliggande anläggningar listas i tabell 2 vilken uppskattad osäkerhet rapporterad turbintappning från några olika typstationer kan förväntas ha.

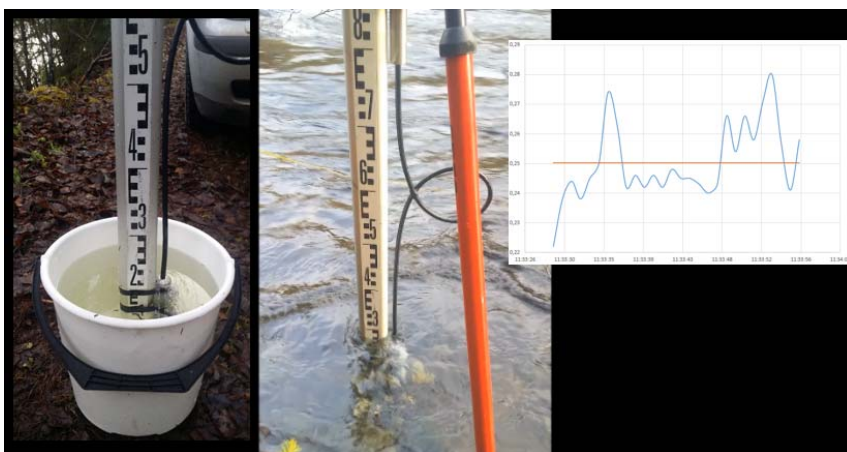
Tabell 2 Uppskattad osäkerhet i rapporterad tappning från tre olika typstationer förutsatt normala driftförhållanden och rimliga fel i indata, räknat på rapporterat dygnsmedel.

Turbintyp, fallhöjd, underlag till verkningsgradskurva	Typisk osäkerhet	Anmärkning
Kaplan, 10m, modellprov + indexprov	±4%	Känslig för fel i indata, fel vattenstånd och pådrag/skovelvinkel kan påverka verkningsgraden negativt.
Francis, 100m, modellprov + indexprov	±3%	Pga stor fallhöjd relativt okänslig för fel i vattenstånd, eventuella fel i indata påverkar ej verkningsgraden.
Francis, 100m, verkningsgradsprov (termodynamiskt eller ultraljud-gångtid)	±1,5%	Pga stor fallhöjd relativt okänslig för fel i vattenstånd, eventuella fel i indata påverkar ej verkningsgraden.

Ibland saknas bra underlag för framställning av verkningsgradskurvan och då kan tappningsbestämningen vara betydligt osäkrare än vad tabell 2 antyder.

4 Mätning av vattenstånd

Även om denna rapport behandlar vattenföringsmätning så är mätning av vattenstånd så nära knutet till detta att saken förtjänar att omnämnas i ett eget avsnitt. Det är uppenbart att vattenståndsmätningen är avgörande för resultatet från en Qpegel och för upprättandet av den avbördningskurva som används av denna. Även vid andra vattenföringsmätningar kan vattenståndet vara väldigt viktigt tex för att kunna korrigera för magasinering mellan mätobjekt och mätplats. För en vattenkraftstation ger ett fel i uppmätt fallhöjd ett direkt proportionellt fel i tappningsbestämningen, något som kan bli påtagligt för stationer med små fallhöjder. Kontroll av fasta vattenståndsgivare är ofta besvärlig eftersom en vattenyta alltid fluktuerar mer eller mindre. Speciellt besvärligt är kontroll av vattenkraftverkens nedströmsytor. Under projektets gång har de metoder som normalt används vid kontroll (avvägningsstång och ljuslod) visat sig vara undermåliga. Genom att komplettera en avvägningsstång med en tryckgivare har säkra medelvattenstånd kunnat mätas upp trots en orolig vattenyta, se figur 5.



Figur 5 Avvägningsstång utrustad med tryckgivare kan förbättra kontrollen av fasta givare för vattenstånd. Till vänster visas kalibrering i hink med stillastående vatten, i mitten "avvägning" av varierande vattenstånd och till höger resultatet i form av sekundvärden och medelvattenstånd under perioden.

På samma sätt har ljuslodet ersatts med tryckgivare för noggrannare mätning i djupa schakt, se figur 6. Utrustning för vattenståndsmätning behandlas i ISO 4373.



Figur 6 Vanligt ljuslod till vänster och alternativ med tryckgivare fäst på måttband till höger.

5 Vägledning, tips och råd

Nedan följer tips och råd inför planering, utförande och rapportering av en vattenföringsmätning med de i Sverige mest vanligt förekommande mätmetoderna.

Inga råd lämnas här för själva upphandlingen förutom att man noga bör precisera vem som skall göra vad. Det är annars mycket lätt att väsentliga uppgifter som tex att säkerställa korrektheten i loggade lucköppningar och vattenstånd faller mellan stolarna, vilket kan göra en utförd vattenföringsmätning helt värdelös.

Volymetrisk metod är inte medtaget i detta avsnitt eftersom den fortfarande kan anses befinna sig på försöksstadiet när det gäller att använda naturliga sjöar som mätvolym. För den som ändå planerar att använda metoden hänvisas till information i referenslitteratur [12][14] och standard IEC 60041.

5.1 SÄKERHET

Det är viktigt att redan i planeringsstadiet fundera över vad som kan göras för att mätningen skall kunna utföras på ett för personalen säkert sätt. Tillskillnad från tidigare då, i stort sett, all vattenföringsmätning utfördes med mekaniska flyglar numera mätmetod och mätplats väljas så att riskerna i princip elimineras.

5.2 VAL AV MÄTMETOD OCH MÄTPLATS

Först bör man bestämma vilken osäkerhet som accepteras i mätresultatet, utifrån detta kan en inventering av mätplatser för passande mätmetod göras. I bedömningen bör även kostnad och tidsaspekter tas med. Eftersom de flesta metoderna ger tillräckligt noggranna resultat om mätförhållandena är goda så avgör ofta strömningsförhållandena i vattendraget valet av metod. Tidsaspekten kan också vara viktig för val av metod både vad gäller möjligheten att utföra en mätning snabbt (tex vid provtappning) och att kunna utföra den under en viss tid på året. Om man skall mäta utskovstappning är det fördelaktigt att göra detta då det inte påverkar produktionen dvs under tid då det ändå spills förbi turbinerna (flöde eller revision). Som en hjälp att välja mätmetod kan tabell 3 användas, denna ger en översikt över vid vilka förutsättningar de olika mätmetoderna är lämpliga att använda.

Tabell 3 Översikt med generell bedömning av de vanligaste metodernas lämplighet vid olika förutsättningar.

Mätmetod	Mätförutsättningar												
	Vattenföring		Vattenhastighet		Djup		Bredd		Ojämn botten, branta stränder	Stark turbulens	Varierande strömnings- bild	Extremt klart vatten	Begränsat med tid
	Stor	Liten	Hög	Låg	Stort	Litet	Stor	Liten					
Flygel (mekanisk)	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-
ADCP	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+
Lösnings- metoden (NaCl)	-	+	+	-	-	X	-	+	+	+	X	+	+
Volymetrisk (mätning mha magasin)	+	-	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	-

Teckenförklaring: + Metoden passar bra - Metoden passar dåligt X Saknar betydelse

5.3 PLANERING UTIFRÅN MÄTOBJEKT

5.3.1 Qpegel eller indexstation

Upprättande av ny vattenföringsstation

Inventera tänkbara mätplatser i förväg så långt det är möjligt via satellitbilder och kartor, använd SMHI:s modell SHYPE för att bedöma mellantillrinning mellan vattenföringsstationen och alternativa mätplatser. Då restiden ofta är en stor del av kostnaden bör utrustning för alla tänkbara typer av förhållanden medföras till platsen. Med lite planering kan mätningen utföras under period med en prognosticerad snabb förändring av flödet så att flera mätningar på olika vattenstånd kan genomföras på samma resa. Viktigt att komma ihåg att mätning av vattenstånd är lika viktig som vattenföringsmätningen. Utrustning för att kunna avväga vattenståndet trots att ytan fluktuerar bör därför tas med liksom uppdaterade fixbeskrivningar.

Kontroll av befintlig vattenföringsstation

Som ovan men försök anpassa tidpunkt så att mätningen blir på en nivå som tidigare saknas eller där avbördningskurvan misstänks innehålla fel. Ta reda på tidigare använda mätplatsers belägenhet och vilka förhållanden som kan förväntas vid aktuellt flöde. Kom ihåg att ta med gammal kurva, fixbeskrivningar och nödvändiga nycklar.

5.3.2 Utskov

Kontroll och eventuell korrigering av indata till vattenföringsberäkningen bör göras så snart man bestämt sig för att genomföra en mätning, detta ökar möjligheterna för att statistik skall kunna användas till att verifiera nya avbördnings samband. Kontrollmät även höjder och luckgeometri i förväg och lita inte på att fasta skalor och ritningsunderlag är felfria. Påbörja arbetet i tid eftersom felsökning och åtgärder av eventuella fel ofta tar betydligt längre tid än vad man tror.

Grovinventera alternativa mätplatser via satellitbilder och kartunderlag, uppskatta mätförhållandena, gångtider och risk för magasinering mellan utskov och troliga mätplatser. Bedöm om platsbesök är nödvändigt innan mätdagen.

Fundera igenom vilka begränsningar vattenhushållningsbestämmelserna och eventuell annan hänsyn till miljö, människor, byggnader innebär för val av mätmetod och upplägg i övrigt.

Viktigt att komma ihåg att korrekta indata till tappningsbestämningen är minst lika viktig som resultatet från själva vattenföringsmätningen. Under mätning bör data i tillägg till det som loggas även noteras manuellt och jämföras med displayvärden och värden hos driftcentralen. Bra om någon har som speciell uppgift att notera vid vilken öppning luckan släpper vattenytan om det planeras att öppna luckan helt. Fotografier av strömningsförhållanden i anslutning till lucka och utskov kan också vara värdefulla vid framtagning av lucktabeller.

5.3.3 Turbin

Kontroll av indata till vattenföringsbestämning bör liksom för utskov göras så tidigt som möjligt. Ta reda på om frekvens- och eventuell nivåreglering kan kopplas ifrån eller minimeras. Planera tappningen i älven så att förhållandena för turbinen blir så

stationära som möjligt. Fastställ provschema där tider för tappningsändring och vem som ansvarar för vad framgår.

5.4 UTFÖRANDE

För utförande hänvisas i första hand till befintlig standard, om denna inte är uppdaterad hänvisas till handböcker och rekommendationer utgivna av USGS. Instrumentspecifika inställningar kan dock vara bäst återgivna i instrumenttillverkarnas manualer.

5.4.1 Tid

Innan start bör man synkronisera tidsangivelser mellan mätinstrument och mätobjekt samt hos personal som skall utföra tidsbestämda uppgifter. Om skillnader som kan ha betydelse kvarstår bör det nämnas i rapporten.

5.4.2 Säkerhet

Innan mätning bör man göra en säker jobb analys, SJA, för att undvika onödiga risker. Detta är mycket viktigt eftersom arbete i strömmande vatten kan vara livsfarligt i sig. Riskerna ökar dessutom markant om vattendragets botten är storstenig, om vattnet och/eller luften är kall och om arbetet innefattar hantering av linor. Det är självklart att de som är inblandade i mätningen har nödvändig utrustning och kunskap för att minimera riskerna.

5.4.3 Flygel

De olika utförandena är mycket väl beskrivna i ISO 748 I Sverige används som tidigare nämnts vanligen tvåpunktsmetoden men om man vill minska osäkerheten bör man kontrollera att hastighetsfördelningen verkligen är logaritmisk i mätsektionen. För mätning med ADV eller elektromagnetiska strömningsmätare hänvisas till [1], [3], [10] och instrumenttillverkarens manualer.

5.4.4 ADCP

Moving boat

Om vattendraget är stort återfinns den bästa mätplatsen enklast med hjälp av en båt men vid själva mätningen är det fördelaktigt om någon form av linbana eller rep kan spännas upp över mätsektionen så att varje överfart sker på samma ställe. Det blir då enkelt att hålla mätaren stilla i ändpunkterna och mäta upp sidotilläggen. Den stora fördelen med att hela tiden mäta i samma sektion tydliggörs dock vid behandling av rådata och utvärdering av osäkerheten. Om vattenföringen avviker kraftigt vid någon överfart är det då ofta lätt att hitta orsaken och bedöma om det beror på ett fel eller ej.

Själva utförande bör i övrigt följa föreskrifterna i USGS handbok [1]. Även efterbehandling och kontroll av data bör utföras efter appendix E i samma handbok. Ett tips är att skriva ut och medföra de komihåglistor som finns i handbokens appendix E. Även ISO/TR 24578 beskriver utförandet men inte lika noggrant och tyvärr är det inte heller möjligt att uppdatera en standard i tillräcklig takt för att hinna med utvecklingen inom ADCP tekniken.

Stationär mätning

Om mätning sker i sektion där man har ostabila bottenförhållanden (sk moving bed) eller i övrigt turbulenta och pulserande förhållanden kan det vara fördelaktigt att använda stationär metod. För att avgöra hur länge man bör mäta på varje vertikal är ett tips att börja med några stationära moving bed test och se hur hastigheten i vertikalen varierar, ofta kan man se någon form av "svängningsperiod". Tiden för mätning på varje vertikal bör vara minst lika med periodlängden, gärna längre men alltid hela multiplar av denna. I övrigt bör man följa de instruktioner som anges i den senaste versionen av instrumenttillverkarens manual, för mätning under islagd tid hänvisas till [7].

5.4.5 Lösningssmetoden (NaCl)

Grunderna för utförandet beskrivs i ISO 9555. På marknaden finns nu kompletta uppsättningar med mjukvara, loggers och givare för NaCl och fluorescerande spårämnen [13]. Med dessa förenklas handhavandet och eftersom standarden inte är uppdaterad så får man använda sig av tillverkarens manualer vid utförandet. För att uppfylla standard bör man använda sig av minst tre stycken givare. Råd från instrumenttillverkare är att resultatet från givarna inte bör skilja mer än 5%. Då rekommenderas att mätningen görs om med en längre omblandningsträcka [17]. För en mätning med NaCl rekommenderas att så mycket NaCl tillsätts så att konduktiviteten minst når 1,5 gånger bakgrunds-nivån. Placeringen av givarna bör göras i en sektion utan bakvatten och stillastående vatten, det bör inte heller vara för stor luftinblandning eftersom luft annars kan blockera givarna. Om vattenhastigheten är långsam och botten består av finmaterial skall givarna hängas upp så att de inte ligger på botten[13].

6 Rapportering

Nedan ges förslag på vad beställaren bör förvänta av en mätrapport. Först anges vad som gäller generellt och sen vad som är specifikt för respektive metod. Exakt vad rapporten skall innehålla bör man helst komma överens om redan vid upphandling av mätningen. Det kan vara mycket lämpligt att i rapporten ta med data för tex lucköppning, magasinsvattenstånd och liknande för att få allt samlat på samma ställe.

6.1 GENERELLT

- Metod, utförande, deltagare och resultat.
- Uppskattning av resultatets osäkerhet.
- Mätplatsens läge, koordinater och markering i flygbild.
- Klockslag för start och slut, om tidsskillnader noterats i tex systemtid och mät dator bör det anges.
- Väderförhållanden som kan ha haft betydelse tex vind.
- Luft- och vattentemperatur.
- Vattenståndsförändring på relevanta platser och uppgift om eventuell magasinering och tillrinning mellan mätobjekt och mätplats.
- Typ av utrustning och dokumentation från tester och jämförelser som visar att den är ok.
- Avvikelser från eventuell standard.
- Tillräckligt med rådata (om möjligt digitalt) för att i efterhand kunna kontrollera utförda beräkningar.

6.2 ADCP

6.2.1 Moving boat

I tillägg till ovanstående bör följande finnas med i rapporten:

- Totalflöde, och tvärsnittsarea.
- Relevanta instrumentinställningar.
- Relevanta data för enskilda överfarter såsom: tid för start och slut, uppmätta geometrier, vatten- och båthastighet, extrapolerade delflöden och uppmätt andel av tvärsnittet.
- Vald positioneringsmetod.
- Kompasskalibrering, systemtest och moving bed test.
- Figurer som visar uppmätt hastighet och bottendjup i mätsektionen, geometri.

- Transducerdjup och i förekommande fall djup på externt ekolod.
- Magnetisk deklination och salthalt, om relevant.
- Sidotillägg och form på stränderna.
- Val av extrapolationsmetod i topp och botten, underlag för valet bör vara utvärdering i USGS program Extrap eller motsvarande.
- Instrumenttyp, serienummer, versioner av mjuk och hårdvara, information om senaste kontrollmätningen som utförts med instrumentet, "beam alignment test" utfört enligt appendix D i [1].
- För ADCP där utvecklingen går så fort framåt är det även bra om rådata tillhandahålls digitalt så att man i framtiden kan räkna om resultat och osäkerhet enligt en eventuell standard.

6.2.2 Stationär mätning

- Totalflöde, och tvärsnittsarea.
- Kompasskalibrering, systemtest.
- Figur som visar uppmätt hastighet och bottendjup i alla vertikaler.
- Transducerdjup och i förekommande fall djup på externt ekolod.
- Magnetisk deklination och salthalt, om relevant.
- Relevanta instrumentinställningar.
- Sidotillägg och form på stränderna.
- Relevanta data för varje enskild vertikal såsom vald extrapolering, anströmningsvinkel, delarea, medelvattenhastighet, djup, mättid, bredd på segment.
- För ADCP där utvecklingen går så fort framåt är det även bra om rådata tillhandahålls digitalt så att man i framtiden kan räkna om resultat och osäkerhet enligt en eventuell standard.

6.3 FLYGEL

- Totalflöde, delflöden och delareor.
- En kvantitativ osäkerhetsberäkning enligt ISO 748.
- Typ av instrument, serienummer, senaste kalibrering (om relevant).
- Använd metod för beräkning av vattenföringen.
- Verifiering eller diskussion kring antagandet om logaritmisk hastighetsfördelning.
- Alla djup och punktdata.
- Tid på varje vertikal.

En kvalitativ osäkerhetsanalys bör behandla följande:

- Mätsektion - Bottenrâhet och vattendjup, bottenens materialsammansättning, enhetlighet i djup, förutsättning att mäta djupet korrekt.
- Strömningsbild - avvikelser från rekommenderat.
- Hastighetsförhållanden - likformighet i hastighet och om hastigheterna var väldigt låga eller höga, antal mätpunkter i varje vertikal, tid för varje punktmätning.
- Avståndet mellan vertikaler - Normalt rekommenderas 25 till 30 vertikaler fördelade så att ingen av dessa inrymmer mer än 5% av totalflödet (då detta kan vara svårt att åstadkomma kan 10 % accepteras).
- Vattenståndsförändringar - om mätobjektet är en Qpegel och vattenståndet ändras snabbt kan det vara nödvändigt att minska mättiden.
- Vind - vind kan skapa vågor, påverka strömningsriktningen och den vertikala hastighetsfördelningen speciellt nära ytan.
- Luft och vattentemperatur - förekomst av is i mätsektionen och risk för isbildning på utrustning.

6.4 UTSPÄDNINGSMETODEN (NACL)

Nedan följer en uppräknig av vad som bör rapporteras om mätningen utförts enligt "sudden injection" metoden med NaCl och konduktivitetsmätning direkt i vattendraget.

- Beskrivning av utförande.
- Injektionsplatsens koordinater.
- Plats för mätning av konduktiviteten samt omblandningssträcka.
- Mängd spårämne.
- Information om kalibrering av instrument inklusive tidpunkt och vattentemperatur.
- Vattenståndsförändring om relevant.
- Alla data på konduktivitet (och vattentemperatur) som ligger till grund för resultatet.
- Uppskattning av osäkerhet inklusive diskussion och bedömning kring risken för förlust av spårämne.

7 Praktiska försök

7.1 ADCP

Som tidigare påtalats är en teoretisk analys av osäkerheten för en ADCP mätning väldigt svår och komplicerad. Ett alternativ till en teoretisk analys kan därför vara att empiriskt jämföra ADCP resultat mot andra mätmetoder med låg osäkerhet. Många tidigare jämförande studier visar att uppmätt vattenhastighet med ADCP överensstämmer väl med andra mätmetoder, dessa studier behandlar dock inte osäkerheten i det beräknade totalflödet [9]. När det gäller totalflödet har de flesta jämförelserna utförts mellan olika ADCP:er och eller flygelmätningar. Värdet av sådana jämförelser är dock av begränsat värde om referenstappning med låg osäkerhet saknas. Några få studier har genomförts där man jämfört ADCP mot turbintappning men utan att precisera vilken osäkerhet som funnits i turbintappningen [9]. I en relativt ny studie i Frankrike 2010 [11] jämfördes en mängd ADCP-modeller mot en referenstappning bestämd med gångtidsmätning (Accusonic). Denna studie hade kunnat bli ännu intressantare om de olika instrumenten även jämförts i samma sektion och utförandet skett med linbana, istället användes båt som kördes på fri hand.

I och med bristen på studier med direkt koppling mot vattenkraft har egna tester genomförts för att ta reda på om en förenklad osäkerhetsanalys kan ge information om osäkerheten i resultatet från en ADCP-mätning. Tre skilda ADCP:er användes på både bra och dåliga mätplatser. Som referens användes turbintappning av god kvalitet.

7.1.1 Använda instrument

- TRDI StreamPro utan GPS och kompass
- TRDI Rio Grande med kompass, RTK-GPS och externt ekolod monterad på High Speed Riverboat från OceanScience.
- SonTek M9 med kompass, ekolod och RTK-GPS monterad på en Torrent Board

7.1.2 Referenstappning

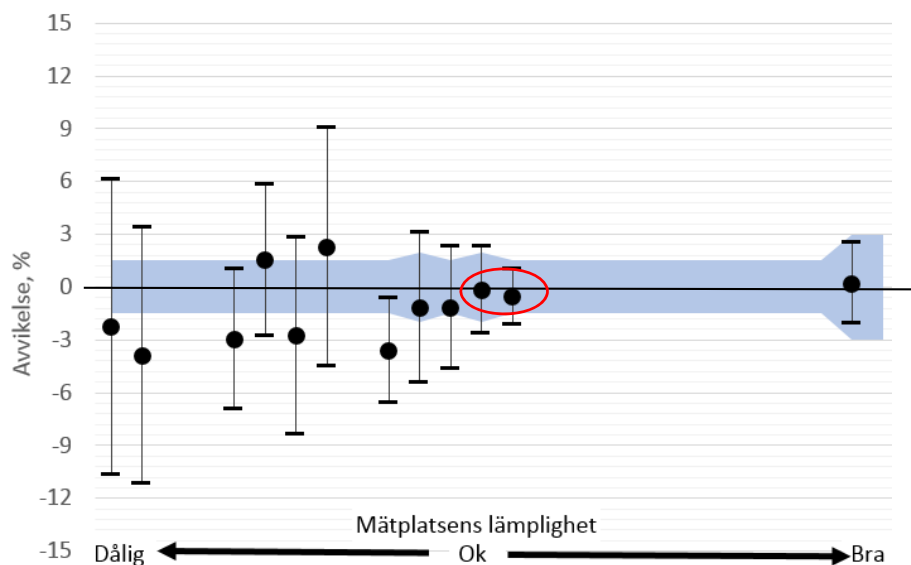
Som referens till ADCP mätningarna användes rapporterad turbintappning från Oldå och Krångede kraftverk i Sverige samt kraftverket Nedre Røssåga i Norge. Oldå och Røssåga har fallhöjder på kring 250 respektive 140m och verkningsgradskurvor framtagna med termodynamiska mätningar vilket borgar för en mycket god vattenföringsbestämning. Krångede har 60m fallhöjd och turbiner med verkningsgradskurvor som verifierats med gångtidmätning (Accusonic). Uppskattad osäkerhet på referenstappningarna har uppskattats till ca $\pm 1,5\%$ för Oldå och Røssåga samt ca $\pm 3\%$ för Krångede. Mätplatsernas läge och strömningsförhållanden visas i bilaga 3.

7.1.3 Utförande

Mestadels användes "moving boat metoden" och instrumenten traverserades fram och tillbaka över mätsektionerna med hjälp av tillfälligt uppspänd linbana. Två mätningar med "stationär-metod" utfördes. Osäkerheten uppskattades enligt metod beskriven i bilaga 4.

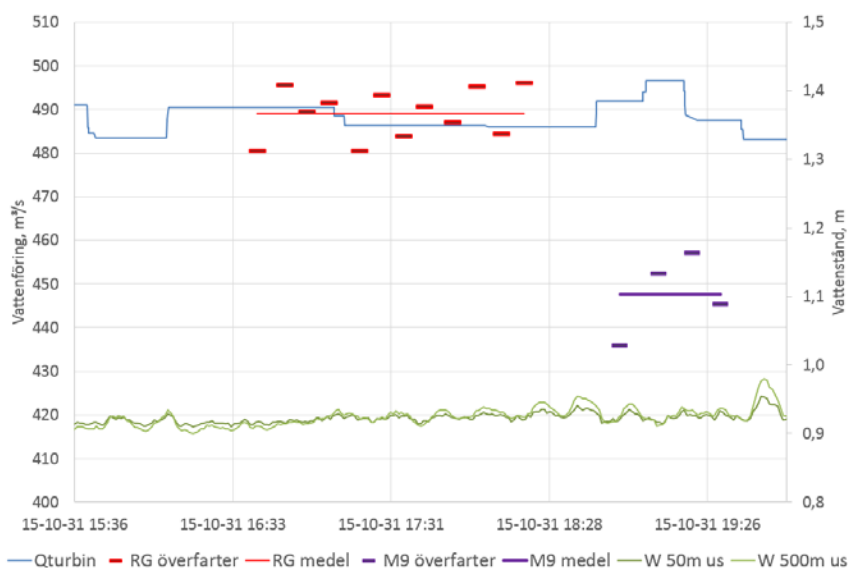
7.1.4 Resultat

Testmätningarnas avvikelse i procent från rapporterad turbintappning visas tillsammans med uppskattad osäkerhet i figur 7 nedan.



Figur 7 Testmätningarnas procentuella avvikelse från referenstappning vars osäkerhet anges av det blåa fältet. Uppskattad osäkerhet för ADCP-mätningarna illustreras av de horisontella svarta linjerna. Mätningarnas placering längs x-axeln grundar sig på en visuell bedömning av respektive mätplats lämplighet. De två stationära mätningarna är Inringade.

Inga nämnvärda skillnader mellan instrumentens resultat har noterats förutom vid den sista mätningen i Krångede då ett av instrumenten fick ett resultat hela 10% under referensen, se figur 8. Denna mätning utreds för närvarande av tillverkaren och är därför inte medtagen i figur 7. En teori är att underskattningen orsakats av kallt vatten i kombination med för instrumentet alltför låga partikelhalter (SNR<20dB) men fler tester under liknande förhållanden behövs för att säkerställa orsak.



Figur 8 Resultat från ADCP mätning uppströms Krångede (turbintappning, enskilda överfarter och medelvärden). De gröna linjerna nederst visar vattenståndsförändring mellan mätplats och kraftverksintag.

7.1.5 Slutsatser

- Metoden att uppskatta osäkerhet verkar ge rimliga resultat.
- För bra mätplatser fås väldigt liten avvikelse mellan ADCP och referens.
- Ingen mätning (utom den sista i Krångede) avvek från referensen med mer än 4% trots att strömningsförhållandena på några platser var direkt olämplig för ADCP mätning. Botten var dock relativt jämn på alla mätplatser (utom uppströms Oldå) och en stor del av mätsektionen kunde mätas upp på samtliga platser vilket tycks ha avgörande betydelse.
- Stationär metod i Nedre Rössågas utloppskanal gav väldigt liten avvikelse från referensen vilket är positivt eftersom mätning uppströms kraftverk sällan är möjligt i Sverige.

Kommentar

Antalet utförda testmätningar är för få för att dra säkra slutsatser. Angiven osäkerhet påverkas tyvärr i ganska stor grad av subjektiva bedömningar. USGS håller på att utveckla en programvara (Qrev) som via fastställda algoritmer är tänkt att beräkna osäkerheten "objektivt". Programmet skall även beräkna totalflödet från rådata så att de skillnader som finns i de olika instrumenttillverkarnas metoder att beräkna totalflödet elimineras [18].

7.2 LÖSNINGSMETODEN

Inledande test av mätning med NaCl som spårämne har utförts på turbintappning i Oldå kraftverk och på utskovstappning i Tåsjö. Resultaten är lovande men fler försök behövs för att säkra slutsatser skall kunna dras. Konstateras kan dock att både förhållandena på mätplatsen och noggrannhet vid utförandet är väldigt viktigt för att uppnå ett bra resultat. Metoden bör kunna vara ett alternativ speciellt för mätning av spilltappning på ställen där andra mätmetoder inte fungerar. För större tappningar är dock annat spårämne att föredra. Positivt för metoden är att god omblandning erhålls vid passage genom turbin och i utskovens energidödare.

Tillförseln av spårämne kan vara ett problem vid mätning av turbinvattenförlust men är oftast enkel när det gäller utskov där den största begränsningen snarare är att spillkanalerna ofta är alltför korta för att tillräcklig omblandning skall fås.

8 Nytta med vattenföringsmätning

I de fall en vattenföringsmätning förväntas kunna bidra till en verkningsgradshöjning är det enkelt att beräkna möjlig nytta men om mätningen enbart medför en noggrannare tappningsbestämning är det betydligt svårare eftersom frågan är extremt komplex. Sett på vattenkraften som helhet är det dock ingen tvekan om att en vattenföringsmätning kan bidra till ekonomisk såväl som miljö- och dammsäkerhetsmässig nytta. Svårigheten att kvantitativt bedöma nyttan är sannolikt orsaken till att både kända brister och förbättringspotential kan förbises. Nedan följer ett par resonemang kring produktionsplanering och dammsäkerhet i syfte att belysa saken.

8.1 PRODUKTIONSPLANERING

Fel i en tappningspunkts vattenföringsbestämning, som inte kan utjämnas i magasinen, påverkar den totala produktionen i nedströms liggande kraftverk. Felbestämningar av storleksordningen tio procent är inte ovanliga vid tillfällen då tappning läggs om från turbin till utskov. Normalt hanterar kraftbolagen en sådan felbestämning som en tillrinningsförändring och så länge som den inte orsakar något extra spill går händelsen ofta obemärkt förbi. Sannolikt är orsaken att en felbestämning i efterhand är svår att både bevisa och ekonomisk synliggöra eftersom den till stor del döljs av osäkerhet i lokaltillrinning och övriga stationers tappningsbestämning. Förmågan att fysiskt klara feltappningar är också relativt stor med hjälp av de marginaler som hålls i de korttidsmagasin som finns mellan kraftverken.

En kvalitetshöjning av tappningsbestämningen förbättrar möjligheterna att optimera kraftproduktionen i ett älvsystem på samma sätt som en säkrare hydrologisk prognos. Marginalerna i regleringsmagasinen kan minskas och en större andel av produktionen kan därmed förläggas till perioder med de högsta elpriserna.

Tillfälliga felbestämningar orsakas ofta av brister i drift och underhåll vilka förmodligen till stor del kan undvikas genom att informera och motivera driftpersonal samt synliggöra förbättringspotentialen för de som beslutar om resursfördelning. Konstanta felbestämningar orsakas vanligen av fel och osäkerhet i underlaget till framtagna avbördnings- och verkningsgradskurvor. För att åtgärda sådana fel räcker det inte med information, då krävs vanligen både nya beräkningar och vattenföringsmätningar.

8.2 DAMMSÄKERHET

Vattenkraftbranschen investerar miljardbelopp i dammsäkerhetshöjande åtgärder. Med tanke på de stora summorna är det angeläget att resurser också läggs på att säkerställa kvaliteten på den vattenföringsbestämning som ligger till grund för investeringsbesluten. Detta gäller både maximal avbördningsförmåga och den vattenförings- och tillrinningsstatistik som används för framtagandet av dimensionerande flöde och vattenstånd.

9 Behov av fortsatta studier

Följande föreslås som fortsättningsstudier baserat på erfarenheterna från denna studie:

- Fler tester av förenklad osäkerhetsuppskattning för ADCP-mätningar samt kontroll av effekterna av kallt vatten med litet partikelinnehåll.
- Undersöka i vilken omfattning mätmetoder i yttre vattenvägar kan användas för att förbättra verkningsgradskurvan för lågfallhöjdsstationer som saknar underlag i form av modellprov och garantier.
- Ta fram metoder för att uppskatta nyttan av en förbättrad vattenföringsbestämning.
- För utspädningsmetoden bör risken för förlust av spårämne mellan injektionspunkt och mätplats undersökas vidare för olika förhållanden (såsom bottens materialsammansättning och växtlighet samt förekomst av snö och is på stränderna).
- Volymetrisk metod har stor potential för platser med de rätta förutsättningarna men osäkerhet i magasinstabeller och vattenståndsmätning behöver utredas vidare.

10 Referenser

- [1] Mueller, D.S., et al. 2013, Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat(ver 2.0 December 2013): U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3–A22, 95p. (<http://pubs.er.usgs.gov/publication/tm3A22>)
- [2] Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using acoustic Doppler Current Profilers, USGS Scientific Investigations Report 2005-5183.
- [3] World Meteorological Organization, 2010: Manual on Stream Gauging (WMO-No. 1044). Volume I:Fieldwork, ISBN 978-92-63-11044-2
- [4] World Meteorological Organization, 2010: Manual on Stream Gauging (WMO-No. 1044). Volume II :Computation of Discharge. ISBN 978-92-63-11044-2
- [5] Cervantes m., et al, Flow Measurement in Low-Head Hydro Power Plants, 2012, Elforsk rapport 12:61
- [6] Simpson, M.R., 2002, Discharge measurements using a BroadBand Acoustic Doppler Current Profiler: U.S. Geological Survey Open-File Report 01–01, 123 p. (<http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr0101/>.)
- [7] P Campbell, Water Survey of Canada, Environment Canada, Ottawa, 2015., Standard Operating Procedures for under ice discharge measurements using ADCPs. Version 2 Water Survey of Canada
<https://hydroacoustics.usgs.gov/midsection/HydroacousticsUnderIceOperatingProcedures-v2.pdf>
- [8] Kilpatrick, F.A. and Wilson, Jr. (1982) Measurement of timetravel in streams by dye tracking Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Denver Book 3, Chapter 9 DC551.483
- [9] Oberg, K.A., and Mueller, D.S., 2007, Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers: Journal of Hydraulic Engineers, v. 133, no. 12, p. 1421–1432.
- [10] Turnipseed, D.P., and Sauer, V.B., 2010, Discharge measurements at gaging stations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods book 3, chap. A8, 87 p. (<http://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/>.) ISBN 978–1–4113–2969–0
- [11] K.Pobanz et al, Intercomparison of ADCPs on the Rhône downstream of Génissiat dam Groupe Doppler France. 2010
- [12] Duncan Mcconnachie, Magasinsberäkning och tillrinningsberäkning. Energiforsk 2015:205, ISBN 978-91-7673-205-2
- [13] User Manual TQ-Tracer. Mobile Discharge Measurement System. Version November 2012 Sommer GmbH
- [14] Sundström, J. , Application of the Volumetric Method on Low-Head Hydropower Plants. LTU 2013
- [15] Muntlig. Britta Munksten Miljöskyddshandläggare Länsstyrelsen Jämtlands län
- [16] Data från föreläsning 2013-02-12 med Mats Billstein, Vattenfall R&D AB.

[17] Muntlig. Claudio Cravos, Application Engineer, Sommer GmbH.

[18] David S. Mueller. Improving the Quality and efficiency of ADCP streamflow measurements. U.S. Geological Survey. 2014 Annual water resources conference 2014, American Water Resources Association.
http://www.awra.org/meetings/Annual2014/doc/pdfs/ANL_S26_Mueller_David.pdf

Bilaga 1 Relevanta ISO standarder

Beskrivning	Standard
ADCP	ISO/TR 24578:2012 Hydrometry -- Acoustic Doppler profiler -- Method and application for measurement of flow in open channels 60.60 ISO/TC 113/SC 1
Allmänt- beräkning vattenföring	ISO/DTR 21044-2 Hydrometry -- Stream gauging -- Part 2: Computation of discharge 30.20 ISO/TC 113
Allmänt- osäkerhet	ISO/TS 25377:2007 Hydrometric uncertainty guidance (HUG) 90.93 ISO/TC 113
Allmänt utrustning	ISO 11655:1995 Measurement of liquid flow in open channels -- Method of specifying performance of hydrometric equipment 90.20 ISO/TC 113/SC 5
Allmänt-fälmmätning	ISO/DTR 21044-1 Hydrometry -- Stream gauging -- Part 1: Fieldwork 30.60 ISO/TC 113
Allmänt-vokabulär och symboler	ISO 772:2011 Hydrometry -- Vocabulary and symbols 60.60 ISO/TC 113
Avbördningskurva	ISO 1100-2:2010 Hydrometry -- Measurement of liquid flow in open channels -- Part 2: Determination of the stage-discharge relationship 90.92 ISO/TC 113/SC 1
Djupmätning	ISO 3454:2008 Hydrometry -- Direct depth sounding and suspension equipment 90.93 ISO/TC 113/SC 5
Djupmätning	ISO 4366:2007 Hydrometry -- Echo sounders for water depth measurements 90.93 ISO/TC 113/SC 5
Flygelmätning	ISO 748:2007 Hydrometry -- Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats 90.93 ISO/TC 113/SC 1
Flygelmätning elektromagnetisk	ISO/TS 15768:2000 Measurement of liquid velocity in open channels -- Design, selection and use of electromagnetic current meters 90.93 ISO/TC 113/SC 1
Flygelmätning mekanisk	ISO 2537:2007 Hydrometry -- Rotating-element current-meters 90.93 ISO/TC 113/SC 5
Flygelmätning osäkerhet	ISO 1088:2007 Hydrometry -- Velocity-area methods using current-meters -- Collection and processing of data for determination of uncertainties in flow measurement 90.93 ISO/TC 113,
Gångtidsmätning	ISO 6416:2004 Hydrometry -- Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method 90.92 ISO/TC 113/SC 1
Kalibrering punktmätare	ISO 3455:2007 Hydrometry -- Calibration of current-meters in straight open tanks 90.93 ISO/TC 113/SC 5
Lutningsmetoden	ISO/AWI 1070 Liquid flow measurement in open channels -- Slope-area method 20.00 ISO/TC 113/SC 1
Mätstruktur	ISO 1438:2008 Hydrometry -- Open channel flow measurement using thin-plate weirs 90.92 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 3846:2008 Hydrometry -- Open channel flow measurement using rectangular broad-crested weirs 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 3847:1977 Liquid flow measurement in open channels by weirs and flumes -- End-depth method for estimation of flow in rectangular channels with a free overfall 90.92 ISO/TC 113/

Mätstruktur	ISO 4359:2013	Flow measurement structures -- Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes 60.60 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 4360:2008	Hydrometry -- Open channel flow measurement using triangular profile weirs 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 4362:1999	Hydrometric determinations -- Flow measurement in open channels using structures -- Trapezoidal broad-crested weirs 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 4371:1984	Measurement of liquid flow in open channels by weirs and flumes -- End depth method for estimation of flow in non-rectangular channels with a free overfall
Mätstruktur	ISO 4374:1990	Liquid flow measurement in open channels -- Round-nose horizontal broad-crested weirs 90.20 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 4377:2012	Hydrometric determinations -- Flow measurement in open channels using structures -- Flat-V weirs 60.60 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 8333:1985	Liquid flow measurement in open channels by weirs and flumes -- V-shaped broad-crested weirs 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 8368:1999	Hydrometric determinations -- Flow measurements in open channels using structures -- Guidelines for selection of structure 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 9826:1992	Measurement of liquid flow in open channels -- Parshall and SANIIRI flumes 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 9827:1994	Measurement of liquid flow in open channels by weirs and flumes -- Streamlined triangular profile weirs 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 13550:2002	Hydrometric determinations -- Flow measurements in open channels using structures -- Use of vertical underflow gates and radial gates 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 14139:2000	Hydrometric determinations -- Flow measurements in open channels using structures -- Compound gauging structures 90.93 ISO/TC 113/SC 2
Mätstruktur	ISO 26906:2015	Hydrometry -- Fishpasses at flow measurement structures 60.60 ISO/TC 113/SC 2
Qpegel med två vattenstånd	ISO 9123:2001	Measurement of liquid flow in open channels -- Stage-fall-discharge relationships 90.92 ISO/TC 113/SC 1
Qpegel- upprättande och drift av	ISO 18365:2013	Hydrometry -- Selection, establishment and operation of a gauging station 60.60 ISO/TC 113/SC 1
Qpegel-fritt överfall	ISO/CD 18481	Hydrometry -- Liquid flow measurement using end depth method in channels with a free overfall 30.60 ISO/TC 113/SC 2
Speciella förhållanden	ISO/DTR 9210	Measurement of liquid flow in open channels -- Measurement in meandering rivers and in streams with unstable boundaries 30.60 ISO/TC 113/SC 1
Speciella förhållanden	ISO 9825:2005	Hydrometry -- Field measurement of discharge in large rivers and rivers in flood 90.93 ISO/TC 113
Speciella förhållanden-is	ISO 9196:1992	Liquid flow measurement in open channels -- Flow measurements under ice conditions 90.93 ISO/TC 113
Speciella förhållanden-is	ISO/TR 11328:1994	Measurement of liquid flow in open channels -- Equipment for the measurement of discharge under ice conditions 60.60 ISO/TC 113/SC 5
Speciella förhållanden-ödvatten	ISO 2425:2010	Hydrometry -- Measurement of liquid flow in open channels under tidal conditions 90.20 ISO/TC 113/SC 1

Ultraljudsmätare	ISO 15769:2010
Utspärningsmetoden	Hydrometry -- Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods 90.93 ISO/TC 113/SC 1
Utspärningsmetoden	ISO 9555-1:1994
Utspärningsmetoden	Measurement of liquid flow in open channels -- Tracer dilution methods for the measurement of steady flow -- Part 1: General 90.93 ISO/TC 113
Utspärningsmetoden	ISO 9555-3:1992
Utspärningsmetoden	Measurement of liquid flow in open channels -- Tracer dilution methods for the measurement of steady flow -- Part 3: Chemical tracers 90.93 ISO/TC 113
Utspärningsmetoden	ISO 9555-4:1992
Utspärningsmetoden	Measurement of liquid flow in open channels -- Tracer dilution methods for the measurement of steady flow -- Part 4: Fluorescent tracers 90.93 ISO/TC 113
Vattenstånd	ISO 4373:2008
	Hydrometry -- Water level measuring devices 90.93 ISO/TC 113/SC 5

Bilaga 2 Krav på mätplats för olika mätmetoder

ADCP-moving boat

- Så homogen strömningsbild som möjligt, vid för stark turbulens är grundantagandet om homogen strömning i instrumentets "footprint" inte korrekt. Instrumentets tröskelvärden mot alltför stora avvikelser mellan ljudstrålarna gör att data från felaktiga mätceller inte medtas i beräkningen, färre godkända mätceller gör resultatet osäkrare.
- Vattenhastighet och vattendjup i mätsektionen måste vara inom det mätintervall instrumentet klarar av. Vattenhastigheter lägre än 0,10m/s bör undvikas om det finns alternativa mätsektioner med högre hastighet.
- Ej uppmätt flöde vid stränderna bör vara mindre än 5% av totalflödet
- Tillräckligt med partiklar måste finnas i vattnet.
- Platser med för mycket luftbubblor bör undvikas.
- Vattenföringen bör vara så jämn som möjligt och med en strömningsbild som inte varierar.
- Botten bör vara så jämn och fri från stora stenar och växtlighet som möjligt.
- Tvärsektionen och dessa hastighetsfördelning bör helst vara symmetrisk med störst hastighet och djup i mitten.
- Bottenlutningen bör vara konstant
- Stabil botten (ej lösa sediment som kan förflyttas nedströms av strömmen).
- Om GPS används bör det vara bra satellittäckning över hela mätsektionen, tät skog längs stränderna kan innebära problem, man bör även se upp med risk för sk tvåvägsproblem.
- Om kompass används (som tex när GPS positionering används) bör man undvika att mäta i närheten av konstruktioner som har ett eget magnetiskt fält (som tex broar, kraftledningar etc).
- Stränderna bör inte vara för branta eftersom interferensproblem då kan uppkomma.
- Vattenmassan bör ej ha någon termisk- eller salthaltsgradient.

ADCP-Sektionsvis stationär mätning.

Som ovan men man kan bortse från kraven som gäller positionering (GPS-problem och fast botten). Metoden tål även flödesfluktuationer bättre då det finns möjlighet att utjämna dessa genom att mäta tillräckligt länge på varje vertikal.

Flygelmätning

- Vattendraget vid mätsektionen bör vara rak och likformig vad gäller tvärsektion och lutning, om tillgänglig raksträcka är begränsad bör raksträckan uppströms mätsektionen vara dubbelt så lång som raksträckan nedströms densamma.
- Strömningslinjerna bör vara parallella och med rät vinkel mot mätsektionen, sektioner med konvergerande eller divergerande flöde bör undvikas.
- Botten och stränder bör vara stabila och väldefinierade för alla förekommande vattenföringar och inte innehålla stora stenar eller störande vegetation.
- Normal och stabil vertikal och horisontal hastighetsfördelning
- Sektioner med virvlar, bakvatten och stillastående vatten för undvikas.
- Vattendjupet bör vara tillräckligt och förekommande vattenhastigheter inom det intervall mätinstrumentet klarar av att mäta med tillräcklig noggrannhet.
- Mätplatsen bör ligga så nära mätobjektet som möjligt för att minimera risk för magasinering och tillrinning på sträckan mellan mätplats och mätobjekt.
- Om man tvingas välja ger ett accelererande flöde ofta en mer fördelaktigare strömningsbild än ett retarderande (utlopp från ett lugnvatten är ofta att föredra jämfört med inloppet till detsamma).
- Om återkommande mätningar skall utföras är det en fördel om mätsektionen är lätt åtkomlig.
- Utöver ovanstående kan speciella krav ställas beroende på vilken strömningsmätare som är tänkt att användas (mekanisk, doppler eller elektromagnetisk), se avsnitt 2.1.

Lösningsmetoden

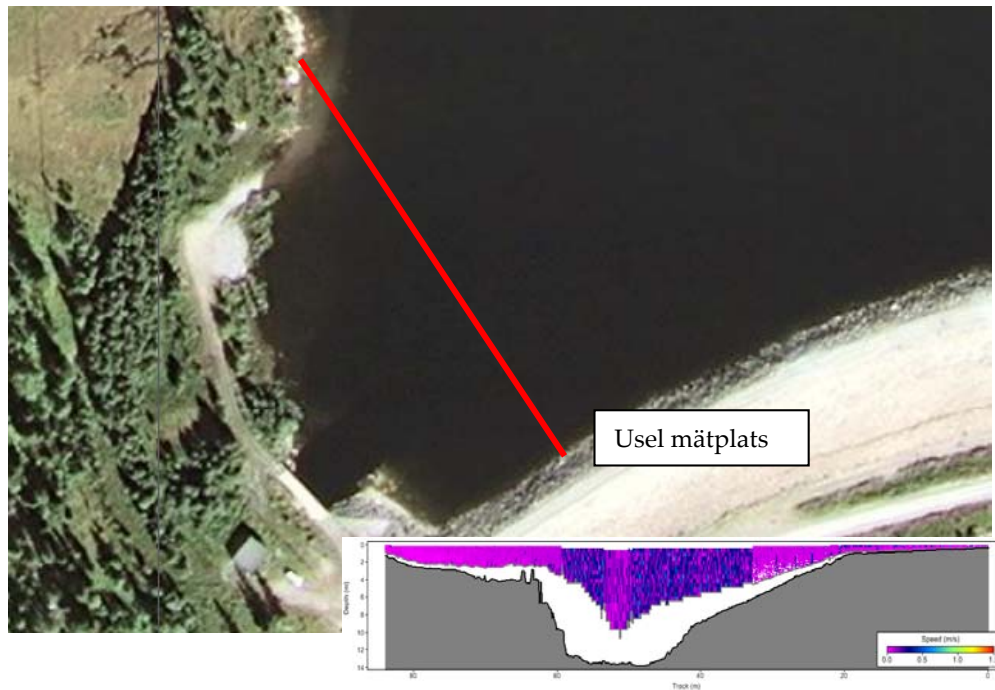
- Längden mellan injektionspunkten av spårämnet och mätplatsen måste vara så lång att tillräcklig omblandning hinner ske. Vid turbulenta förhållanden sker omblandning snabbare, en tumregel kan vara att sträckan bör vara 30 och 50 gånger vattendragets bredd. Före en bättre uppskattning av nödvändig omblandningssträcka hänvisas till standard ISO 9555-1. ofta behöver man ändå göra en provmätning.
- Sträckan bör helst inte innehålla utvidgningar, lugnvattenpartier, djuphålur och tillflöden.
- Bottenmaterial och vattenväxtlighet bör vara sådant att det inte reagerar med eller tar upp spårämne.
- Snabb ström och turbulenta förhållanden är även att föredra eftersom det minskar tiden för mätning och därmed risken att förlust av spårämne inträffar, förlust av spårämne ger en överskattning av vattenföringen.
- Injektionspunkten bör vara en plats med hög vattenhastighet, om tillförseln av spårämne sker från en av stränderna är det en fördel om strömmen i injektionspunkten är riktad mot den andra stranden.
- Mätsektionen bör vara en trång sektion utan bakvatten eller stillastående vatten men utan för stor luftinblandning som kan störa mätinstrumenten.

Volymetrisk metod

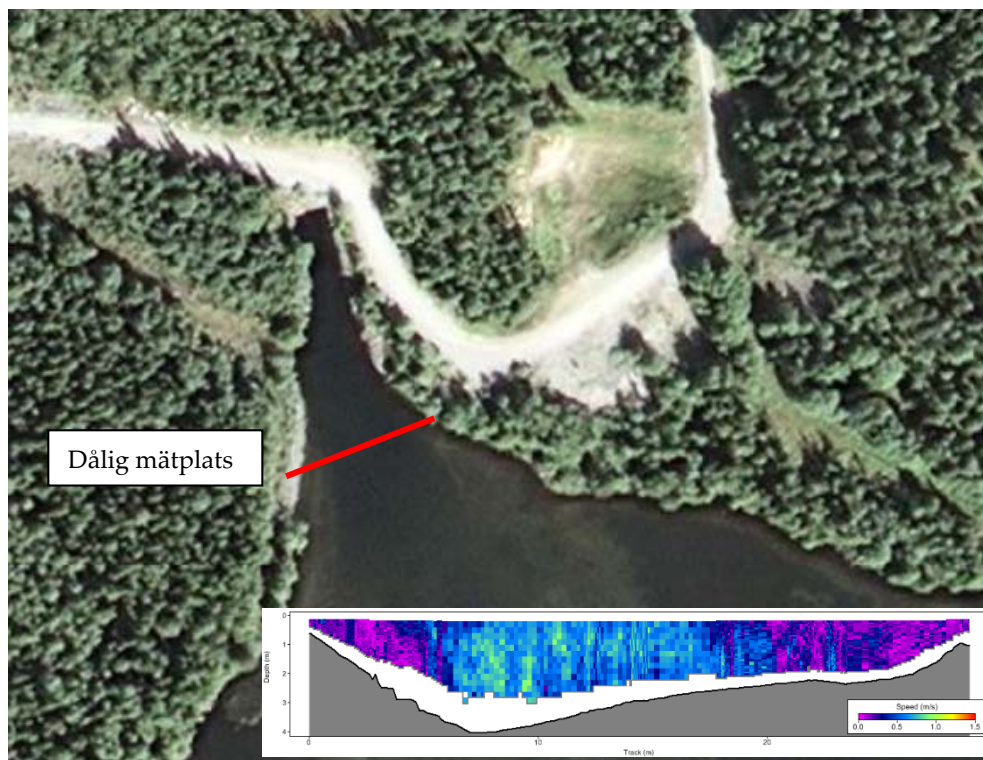
- Tillgång till magasin med lagom stor area och med en magasinstabell av god kvalitet.
- Tillrinningen mellan mätobjekt och magasin bör vara så liten som möjligt.
- Magasinet bör ha väldefinierade och gärna branta stränder (liten skillnad i area vid olika vattenstånd), flacka områden av våtmarkskaraktär är inte bra eftersom vatten där kan avges eller magasineras då vattenståndet förändras.
- Bra om magasinet har många lämpliga platser för mätning av vattenståndet och inte är så vindutsatt eller är känt för seichersvängningar.
- Kort sträcka (gångtid) mellan mätobjekt och magasin.
- Tillstånd för nolltappning och tillräcklig korttidsreglering av vattenföring och vattenstånd för att mätningarna skall kunna genomföras, om mätningen endast skall vara relativ försvinner behovet för nolltappning.

Bilaga 3 Testplatser ADCP

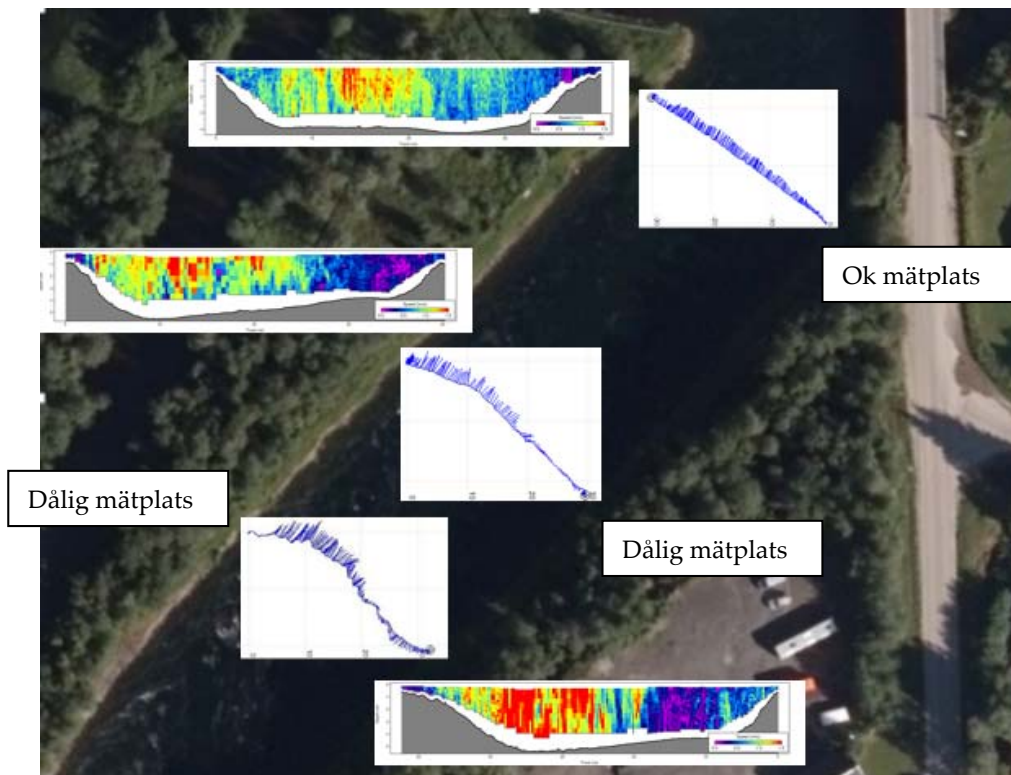
Oldå, uppströms



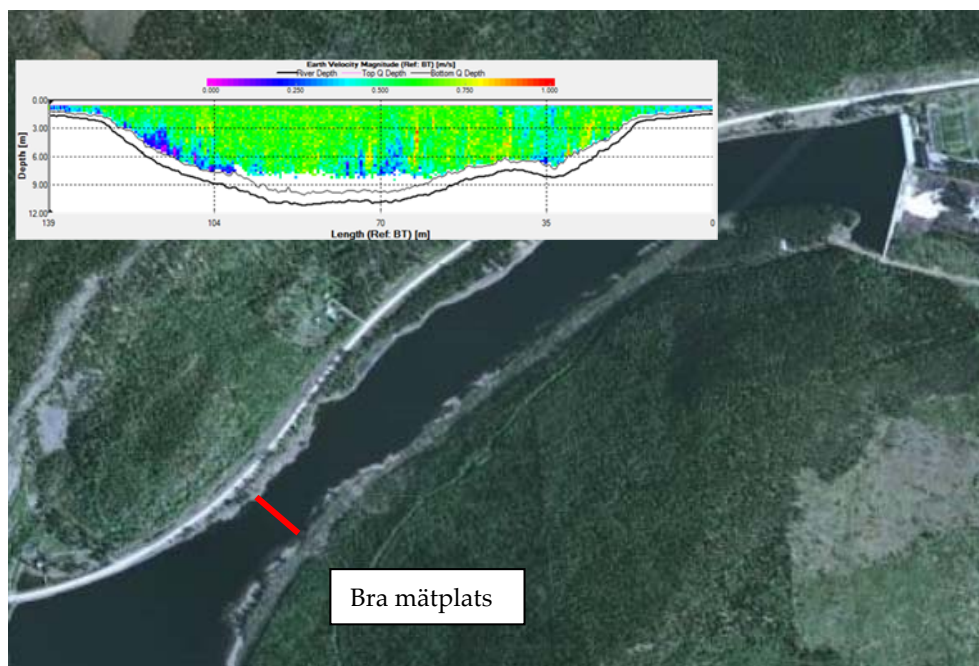
Oldå, nedströms



Nedre Rössåga



Krångede, uppströms



Bilaga 4 Uppskattning osäkerhet hos ADCP

Kortfattad beskrivning av det tillvägagångssätt USGS använder för att betygsätta en ADCP mätning. Metoden är utförligare beskriven i webinarret <https://hydroacoustics.usgs.gov/training/webinars.shtml>.

Först utförs en grov beräkning, se nedan, av osäkerheten som sedan ligger till grund för ett kvalitetsbetyg. Den skala man använder är Excellent(<2%), Good(<5%), Fair(<8%) och Poor(>8%) där siffran inom parentes syftar till den beräknade osäkerheten

Själva beräkningsmetoden går ut på att beräkna/uppskatta de olika delosäkerheterna och summera dessa enligt den statistiska regeln om att totala osäkerheten kan beräknas

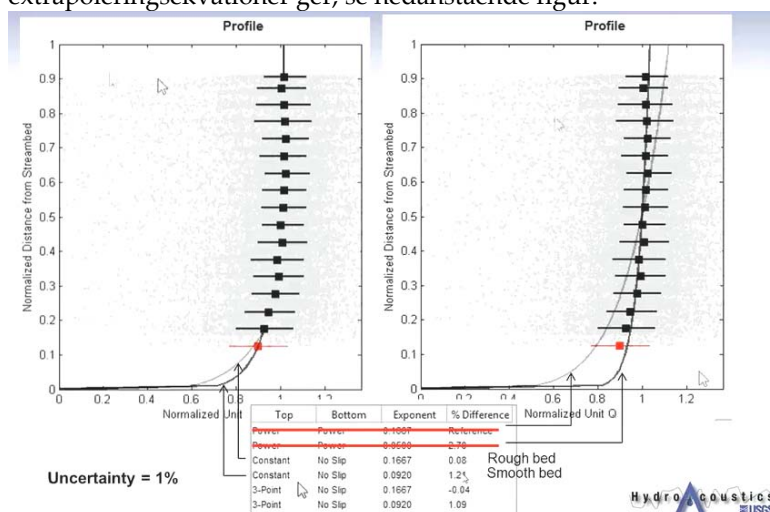
som $\sqrt{\sum(\text{delosäkerheterna}^2)}$ om delosäkerheterna är oberoende.

I analysen används standardavvikelsen för resultatet från enskilda överfarter, osäkerhet i botten, topp och sidoextrapolation, andel mätceller med felaktiga data, påverkan av moving bed och schablonmässigt tillägg för systematiska fel.

För att få fram en "bas osäkerhet" multipliceras standardavvikelsen för resultaten från överfarterna med ett tal som är beroende av antal överfarter, se tabell nedan, till denna adderas ett schablonmässigt systematiskt fel på 0,5 %. Som kan ses i tabellen väger antal överfarter tungt i osäkerhetsbedömningen vilket gör att lång mättid krävs för att erhålla högt kvalitetsbetyg.

Antal	Tal
4	1,6
6	1,0
8	0,8
10	0,7
>=12	0,6

Osäkerheten i topp och bottenextrapolation bedöms mha USGS programmet Extrap genom att undersöka vilken spridning på resultatet olika troliga extrapoleringsekvationer ger, se nedanstående figur.



Osäkerheten i sidoextrapolationen sker dels genom att studera standardavvikelsen för dessa i resultatsammanfattningen och dels genom subjektiv bedömning.

Påverkan av felaktig och utebliven data såsom "bad bins", "bad ensembles" och "lost data" sker genom subjektiv bedömning.

Exempel på sammanställning:

Tot Q, m ³ /s	28,3
Antal överfarter	4
Konst för antal överfarter	1,6
Std av/medel Q	2,2%
Random err	3,5%
Syst err	0,5%
Base uncertainty	4,0%
Invalid data	1,0%
Extrapolation	1,0%
Edges	0,1%
Moving bed	1,0%
Summa	<u>4,3%</u>

VATTENFÖRINGSMÄTNING I VATTENKRAFTTILLÄMPNINGAR

I vattenkraftsammanhang är vattenföringsmätning och -bestämning av intresse för olika syften. Rapporten beskriver kortfattat de vanligaste principerna för vattenföringsmätning i yttre vattenvägar och naturliga vattendrag. Syftet är att en tänkt beställare härigenom skall få den grundläggande kunskap som behövs för att förstå de osäkerheter som är förknippade med respektive metod samt säkerställa att en upphandlad vattenföringsmätning får förväntad kvalitet.

Vägledning och praktiska tips inför planering, beställning, utförande och rapportering av en vattenföringsmätning redovisas. Resultat från praktiska tester av en förenklad metod att uppskatta osäkerheten i resultatet från en ADCP mätning presenteras också.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se