

Indekshastighet. Måling av vannføring ved hjelp av vannhastighet

Av Kristoffer Dybvik

Kristoffer Dybvik er felthydrolog i Hydrometriseksjonen,
Hydrologisk avdeling, NVE

Sammendrag

På de fleste av NVEs målestasjoner kan vannføringen beregnes ved hjelp av den såkalte vannstand-vannføring-metoden. På disse stasjonene måles kun vannstand, mens vannføringen beregnes etter en formel som knytter vannstand til vannføring. På en del stasjoner er det ikke en entydig sammenheng mellom vannstand og vannføring, og her har vi begynt å måle vannhastighet i tillegg til vannstand. Vannføringer beregnes ved å bruke varianter av indekshastighetmetoden. NVE har testet to varianter som begge viser seg å fungere godt.

At most of NVE's streamgauging stations discharge is calculated by the stage-discharge method. On these stations only stage is measured, and the discharge is calculated by a formula connecting stage and discharge. On some stations there is no one-to-one relation between stage and discharge, and we measure water-velocity in addition. Discharge is calculated using the index velocity method. NVE has tested two different variants, and both perform well.

Innledning

NVE har ca 600 målestasjoner for vannføring i Norge. På de fleste av disse beregnes vannføringen ved hjelp av vannstand-vannføring-kurver, en metode som forutsetter at det er et entydig forhold mellom vannføring og vannstand. Dette entydige forholdet er svært gunstig, siden det er komplisert og tidkrevende å måle vannføringen, mens det å måle vannstand er forholdsvis enkelt.

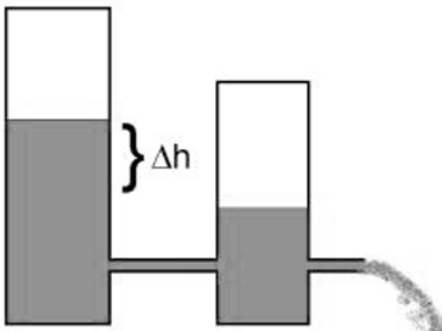
Vannstand-vannføring-kurver konstrueres ved å måle vannføringen for mange forskjellige vannstander. Kurven er logaritmisk, og parametrene som inngår bestemmes ved regresjon.

I noen tilfeller ønsker vi å måle vannføring på steder hvor det ikke er en entydig sammenheng mellom vannstand og vannføring, for eksempel i tidevannspåvirkede elver, i elver med reverserende strøm og i elver hvor målestedet påvirkes av vannstanden nedstrøms. På slike målesteder har NVE begynt å måle vannhastighet i tillegg til vannstanden for å beregne vannføringen.

Litt fysikk

Bevegelsen i en typisk norsk elv er alt vesentlig styrt av gravitasjon og friksjon. Lokalt vil effekter av vannets virvling være viktig, og i svært store elver vil effekter av jordrotasjonen spille inn.

Hvis strømmen i elva er stasjonær, i betydningen tidsinvariant, så vil gravitasjon balansere friksjon. Gravitasjonskraften kommer til uttrykk som en trykk-kraft, og denne trykk-kraften kan beregnes ved å se på nivåforskjeller i overflaten. Figur 1 viser en forenklet modell av en elv. Vekten av vannet i sylindringen til venstre som ligger høyere enn overflaten i sylindringen til høyre setter opp en trykk-kraft som driver vannet gjennom røret. På samme måte vil overflathellingen i en elv sette opp et trykkfelt som driver vannet gjennom elva. Sagt på norsk: Vannet renner nedover. Mot bevegelsen virker friksjonskraften, og siden friksjonen kan uttrykkes som en funksjon av bl.a. hastighetsfeltet, så vil vannføringen i prinsippet kunne beregnes som en funksjon av overflathellingen. NVE har forsøkt å beregne vannføringen direkte ved å måle overflathellingen, men det har vist seg vanskelig i praksis.



Det er enklere på lokaliteter med *kritisk hastighet*, dvs et sted i elva hvor strømmen stiller seg inn slik at nivået til overflaten på *ett* sted bestemmer hvor mye vann som strømmer. Dette skjer ved at vannet akselereres gjennom en innsnevring eller over en kant, se figur [2]. Når hastigheten øker så øker den kinetiske energien til vannet. Hvis ikke den tilgjengelige potensielle energien økes så må den økte kinetiske energien balanseres ved at den potensielle energien avtar. Men fordi den kinetiske energien øker med kvadratet av hastigheten, den potensielle energien avtar lineært med høyden og vannføringen varierer lineært med hastighet og vannstand, så vil vannhastigheten bare kunne øke til en gitt verdi, den kritiske hastighet, uten at vannføringen avtar. I så fall vil innsnevringen stuve opp vann oppstrøms slik at den tilgjengelige potensielle energien øker og en ny, noe høyere kritisk hastighet innstiller seg. Et sted med kritisk hastighet kalles *hydraulisk kontroll*.

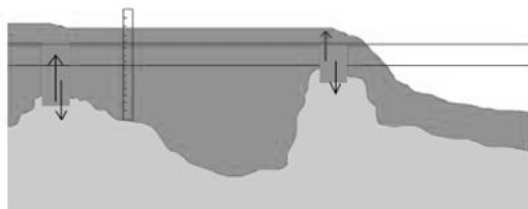
Figur 1. Trykk-kraft, tyngden til vannet i Dh driver vannet gjennom røret.



Figur 2. Kritisk hastighet over terskelen ut av kulpen. Vannføring kan beregnes vha kun vannstand



Figur 3. Oppstuvning nedstrøms kulpen. Vannføring kan ikke beregnes vha kun vannstand pga mottrykk nedstrøms terskelen



Figur 4. Damluker bestemmer vannivået. Vannføring kan ikke beregnes vha kun vannstand

Vannstand/vannføring

En typisk lokalitet for en vannstand-vannføring-stasjon er i kulpen ovenfor et stryk, som på figur 2. Vannet renner rolig gjennom kulpen og akselererer over terskelen. Vannstanden i kulpen er et godt mål for overflathellingen siden overflaten like nedfor terskelen ligger lavere enn overflaten i kulpen. Dessuten vil det som regel være kritisk hastighet ut av kulpen. Det vil uansett være tilstrekkelig å måle vannstanden for å beregne vannføringen.

For å finne sammenheng mellom vannstand og vannføring måler NVEs felthydrologer vannføringen for mange forskjellige vannstander. I utgangspunktet plotter man deretter vannstand mot vannføring for å prøve å finne en sammenheng. Fysikk og matematikk viser at vannføringen øker eksponentielt med vannstanden. Omforming av uttrykket gjør at vi likevel kan bruke lineær regresjon for å tilpasse parametrene som inngår.

Indekshastighet

På målesteder hvor det ikke er en entydig sammenheng mellom vannstand og vannføring er det ikke mulig å beregne vannføringen kun ved å måle vannstanden. Dette kan skje om terskelen i figur 2 og 3 helt eller delvis druknes, slik at vannet i som renner over terskelen bremses av vannet nedstrøms. Et menneskeskapt tilfelle er der hvor målestedet ligger mellom to dammer og både vannivå og overflathelling styres av regulering av dammene, se figur 4.

I tilfeller som disse kan det være mulig å beregne vannføringen ved å måle vannhastighet i tillegg til vannstand. Vannføring er lik middelhastigheten i et snitt av elva multiplisert med tverrsnittsarealet, så hvis det er mulig å beregne eller å modellere forholdet mellom målt hastighet og middelhastighet kan vannføringen beregnes.

Indirekte metode

Det mest intuitive er å sjekke om det er en god sammenheng mellom målt punkthastighet og målt middel-hastighet. I så fall vil måling av punkthastighet gi middelhastigheten, måling av vannstand gi tverrsnitts-areal og vannføringen er gitt ved produktet av de to. Denne metoden brukes av US Geological Survey, USGS.

Mer konkret utføres dette ved å velge et fast tverrsnitt av elva, et så-kalt standardtverrsnitt, i nærheten av stedet hvor man måler punkthastig-heten. Dette tverrsnittet må velges på et sted hvor bunn og bredder er stabile, og gjerne i tillegg har en enkel fasong. Standardtverrsnittet måles opp og man utvikler enten en formel for tverrsnittsareal som funksjon av vannstand, eller en tabell over tverrsnittsareal for alle vannstander. For et tilnærmet rektangulært tverrsnitt vil for eksempel arealet være gitt ved produktet av bredde ganget med dyp.

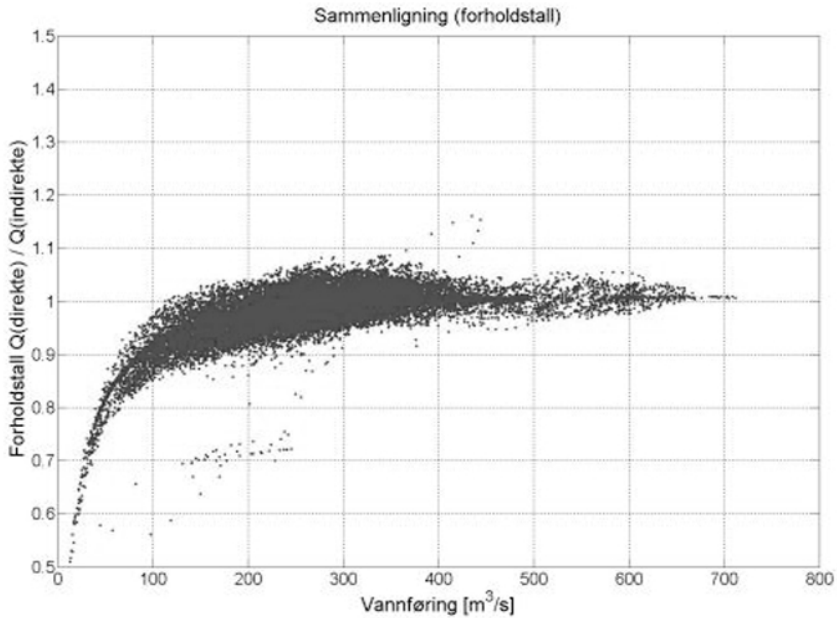
Neste steg er å måle vannføringen ved forskjellige vannstander og å beregne en middelhastighet som er lik målt vannføring dividert på stan-dardtverrsnittets areal. Deretter be-regnes sammenhengen mellom målt punkthastighet og middelhastigheten i standardtverrsnittet. Denne sammen-hengen er ofte lineær.

Nå kan vi beregne både areal og middelhastigheten, og da er vann-føringen, som før nevnt, produktet av de to.

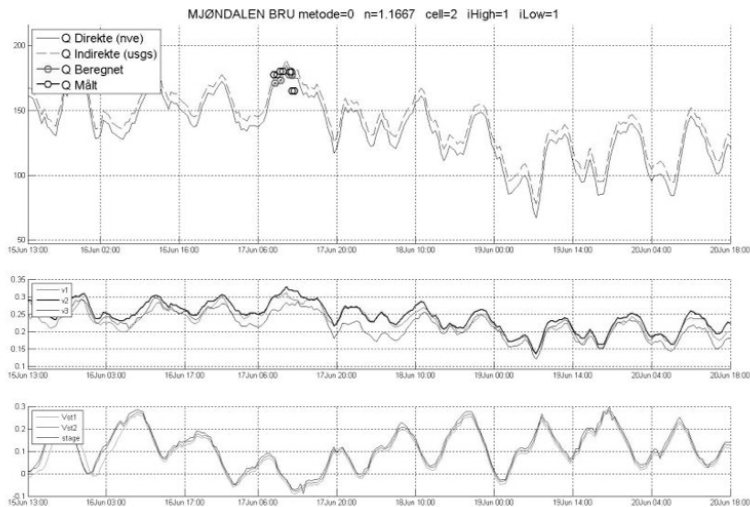
Direkte metode

En alternativ metode er å lage en enkel modell for vannføringen med punkthastighet og vannstand som parametere og å finne sammenhengen mellom modellert vannføring og målt vannføring. En slik modell tar ut-gangspunkt i *hvor* punkthastigheten måles i et teoretisk hastighetsfelt. Det teoretiske hastighetsfeltet blir konstruert ved å ta bruke den typiske fasongen for vertikal og horisontal hastighetsfordeling i en elv. Sammenhengen mellom modellert vann-føring og målt vannføring viser seg også å være lineær, slik at vi igjen får et uttrykk for vannføringen som en funksjon av vannstand og punkt-hastighet. Denne metoden er utviklet av Nortek og NVE.

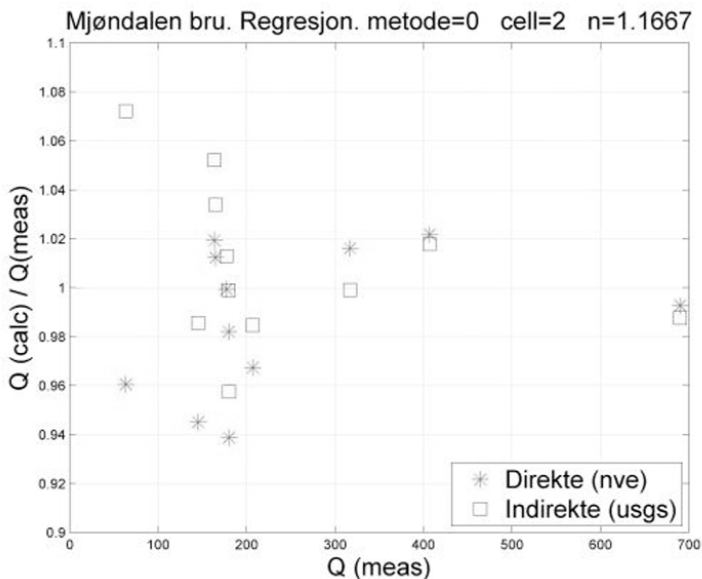
Begge metodene har blitt testet ut på målestasjonen Mjøndalen bru i Drammenselva, og de gir svært like resultater, spesielt for målinger fra 150 til 700 m³/s. Avviket mellom dem er mindre enn 5% i 84% av målingene og mindre enn 10% i 95% av målingene. Men på lave vannføringer, fra 0-150 m³/s er det forskjell i beregningene, og det viser seg at den ene metoden underestimerer mens den andre overestimerer. Vi må se nærmere på dette problemet før vi kan konkludere med hvilken av metodene som er best egnet.



Figur 5. Forholdet mellom de to metodene som en funksjon av vannføring. NVEs metode (direkte) estimerer lavere enn USGS' metode på lave vannføringer.



Figur 6. Plott av vannføring beregnet ved de to metodene, samt vannhastighet og vannstand. Eksempel fra Drammenselva som er sterkt påvirket av tidevann, slik at tradisjonell vannstand-vannføring-metode ikke kan brukes. Øverste plott: Vannføring. Midterste plott vannhastighet celle 1, 2 og 3. Nederste plott: Vannstand målt med trykkelde (vst 1 og 2) og med ekkolodd (stage)



Figur 7. Plott av målt vannføring delt på faktisk vannføring. Plottet viser at USGS-metoden underestimerer mens NVE-metoden overestimerer. Forholdstallet mellom målt og beregnet vannføring skal være lik 1. Verdier lavere enn 1 viser at metoden underestimerer. Verdier større enn 1 at den overestimerer

Teknologi

Vannstand måles på tre måter. Den første er et system med en flottør som er festet i en wire som går over et hjul og har et lodd i andre enden. En sensor registrerer omdreininger i hjulet og omdreiningene regnes om til vertikal bevegelse. Den andre er ved hjelp av en sensor som måler vanntrykket. Når vannets tetthet med god tilnærming er konstant, så gir vanntrykket dypet, mens den tredje metoden er et ekkolodd som måler avstanden fra instrumentet til overflaten.

Vannhastighet måles med akustiske dopplerinstrumenter. Disse instrumentene sender ut lydimpulser i vannet og måler dopplerskiftet i retursignalet. Dopplerskiftet gir vannhastigheten. Instrumenter av denne typen monteres

enten slik at de sender pulsene horisontalt ut i elva eller på bunnen slik at de måler hastigheter i vertikalplanet. De måler hastighetene i segmenter som kalles celler, og forskjellige instrumenter måler hastigheter i alt mellom 1 og 128 celler. De fleste av disse instrumentene måler også vann-dypet ved hjelp av ekkolodd.

Konklusjon

Ved å måle vannhastighet i tillegg til vanddypp har vi lyktes med å måle vannstanden på steder hvor det ikke er en entydig sammenheng mellom vannstand og vannføring. Flere metoder er testet, men det er ikke klart hvilken som fungerer best. NVE vil fortsette å utvikle disse metodene siden det gir oss mulighet til å måle på nye steder.