



NVE



VEILEDER NR. 1 / 2023

Veileder for innsamling av måledata til overvannsformål

SKREVET AV Lothar Wilhelm Dören og Rune Bratlie

NVE Veileder 1/2023

Veileder for innsamling av måledata til overvannsformål

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat
Redaktør: Rune Bratlie
Forfattere: Lothar Wilhelm Dören og Rune Bratlie

ISBN (tykt utg.): 978-82-410-2254-8
ISBN (online): 978-82-410-2255-5
ISSN (trykt utg.): 1501-0678
ISSN (online): 2704-0356
Saksnummer: 202221796
Opplag: 100 stk.

Sammendrag: Veilederen omhandler innsamling og kontroll av måledata til hydrologiske og hydrauliske beregningsformål. Veilederen gir i tillegg en innføring i innsamling av nedbørdata.

Emneord: Måledata, vannføring, vannstand, overvann, hydrometri, urbanhydrometri, urbanhydrologi

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
E-post: nve@nve.no
Internett: www.nve.no

Mars 2023

Innhold

Forord	5
Sammendrag	6
1 Innledning	7
2 Fra planlegging til gjennomføring.....	10
2.1 Planlegging og makrodesign	11
2.1.1 Prosjektavklaring.....	11
2.1.2 Etablere et målekonsept	11
2.2 Planlegging og mikrodesign	14
2.2.1 Måleprogram	14
2.2.2 Planlegging og befarings av målesteder	15
2.2.3 Viktige hensyn ved nivåmåling	16
2.2.4 Viktige hensyn ved vannføringsmåling	16
3 Installasjon av sensorer.....	17
4 Justering og validering av målesystemer	23
5 Drift av målesteder	24
5.1 Arbeidsinstruks for drifts- og funksjonskontroll	24
5.2 Dokumentasjon fra drifts- og funksjonskontrollen	25
6 Datakontroll og dokumentasjon.....	26
6.1 Datatyper	26
6.1.1 Måledata	26
6.1.2 Metadata	27
6.2 Datakvalitet	27
6.3 Mål for og gjennomføring av datakontroll	28
6.3.1 Manuell datakontroll.....	30
6.3.2 Automatisk støttet datakontroll	30
6.3.3 Trinn i datakontrollprosessen.....	31
6.3.4 Dokumentasjon av datakontroll, korrektur og komplettering	40
6.3.5 Datakorreksjon og rekonstruksjon	40
7 Måleteknologi.....	41
7.1 Måling som overføringsprosess.....	41
7.2 Måling av vannstand	44
7.2.1 Trykksonde.....	44
7.2.2 Ultralyd ekkolodd	46
7.2.3 Radar og mikrobølge ekkolodd.....	49
7.2.4 Flottør	50
7.2.5 Faktorer som påvirker vannstandsmåling.....	51

7.3	Måling av vannføring	52
7.3.1	Hydraulisk teori	52
7.3.2	Vannføring kan ikke måles direkte	58
7.3.3	Hydrauliske metoder	59
7.3.4	Metoder for måling av punkthastighet	67
7.3.5	Metoder for hastighetsmåling i deler av strømtverrsnittet	67
7.3.6	Metoder for hastighetsmåling i hele strømtverrsnittet	76
7.3.7	Fortynningsmåling	82
7.3.8	Volumetriske målemetoder	84
7.4	Måling av nedbør	87
7.4.1	Generelt	87
7.4.2	Plassering av nedbørmålere	87
7.4.3	Målemetoder	89
7.5	Måling av infiltrasjon	93
7.5.1	Generelt om infiltrasjon	93
7.5.2	Målemetoder	94
7.6	Måling av smeltevann	97
7.6.1	Snøsmeltebrett, snølysimeter	97
8	Målenøyaktighet	99
8.1	Grove feil	99
8.2	Tilfeldig og systematiske målefeil	99
8.3	Måleusikkerhet	100
9	Bibliografi	105
Vedlegg		109
Vedlegg1	Definisjoner	109
Vedlegg 2	Anbudskonkurranse og tildeling	112
Vedlegg 3	Eksempel på dokumentasjon fra målestedet	113
Vedlegg 4	Eksempel på driftsdokumentasjon	119
Vedlegg 5	Erfaringer fra test av målesystemer	120
Takk		121

Forord

Det er en nasjonal planforventning at våre byer og tettsteder bør fortettes fremfor å bre seg utover nye områder. Med denne utviklingen øker behovet for kunnskap om arealene som skal sikre trygg bortledning av regn- og smeltevann gjennom våre byer og tettsteder.

Det er også en nasjonal planforventning at naturbaserte overvannstiltak bør benyttes fremfor nedgravde overvannsløsninger¹. De hydrologiske prosessene i nedbørfeltet må dermed vektles høyere sammenliknet med den tradisjonelle forståelsen av overvann som et ledningshydraulisk anliggende.

Når kompleksiteten i overvannssystemene øker, øker også behovet for modellbasert kunnskap for å ta gode beslutninger. Modeller bygger på numeriske inndata og forutsetninger. Denne veilederen gir en praktisk innføring i hvordan hydrometriske data kan måles og hvilken kvalitet de får. Målgruppen er enhver som har behov for data til planlegging, modellering og prosjektering av overvannstiltak.

Vi håper veilederen vil være til nytte for alle som planlegger måleprosjekter og målesystemer eller ønsker å anskaffe måledata til overvannsformål. Vi tar gjerne imot synspunkter og forslag til forbedringer til nve@nve.no merket «Innspill til NVE veileder nr. 1/2023».

Oslo, mars 2023

Brigt Samdal
direktør
Skred- og vassdragsavdeling

Hege Hisdal
direktør
Hydrologisk avdeling

Dokumentet sendes uten underskrift. Det er godkjent i henhold til interne rutiner.

¹ [Statlige planretningslinjer for klima- og energiplanlegging og klimatilpasning - Lovdata](#)

Sammendrag

Det krever planlegging, ressurser og erfaring å samle inn måledata med rett kvalitet og kjent usikkerhet. Måleusikkerheten påvirkes av en rekke forhold. Den oppnådde måleusikkerheten kan lett overstige sensorens oppgitte måleusikkerhet. En kan heller ikke ta for gitt at målesystemets ytelse er det samme under ulike installasjons- og driftsforhold.

Det er derfor viktig å forsikre seg om at målekampanjen faktisk understøtter målebehovet. God planlegging er en forutsetning for gode innkjøp. God planlegging krever oversikt over målestedet, ulike målesystemers egnethet og driftstekniske forutsetninger for måling.

Både målestedet og målesystemets sensitivitet kan endre seg over tid. Det er derfor behov for kontinuerlig driftsoppfølging og dokumentasjon. Innsamlede data kan inneholde hull og avvik som må korrigeres før datasettene kan tas inn i modeller. For å sikre rett målekvalitet kreves gode kontrollrutiner for innsamlede måledata.

1 Innledning

Formålet med veilederen

Denne veilederen gir en detaljert innføring om hvordan samle inn og kvalitetssikre urbanhydrometriske måledata. Veilederen inngår i en samlet veiledningspakke til kommunenes arealplanlegging. Pakken inneholder følgende leveranser:

- veileder for innsamling av måledata til overvannsformål²
- veileder for modellering av overvann i arealplaner³
- rettleiar for handtering av overvatn i arealplanar⁴
- eksempelsamling for overvannstiltak⁵

Hvorfor samle inn måledata?

Å kunne tallfeste sammenhengen mellom nedbøren som faller over et areal og avrenningen denne nedbøren skaper er nyttig i mange sammenhenger. Om du skal kalibere en hydraulisk modell til en arealplan, gjennomføre en risiko- og sårbarhetsanalyse, sikre bygninger mot fremtidens klima, prosjektere et overvannssystem eller beregne tilførselen av miljøgifter til en resipient, vil det kunne bli behov for data som dokumenterer faktiske forhold.

Målgruppe og virkeområde

Veilederen retter seg mot konsulenter og kommunale etater som trenger måledata til overvannsformål. Veilederen kan også brukes til å kontrollere måledata innsamlet av andre.

Veilederen omhandler innsamling og kontroll av måledata til kvantitative hydrologiske og hydrauliske formål. Veilederen dekker ikke måling av vannmiljø og vannkjemi.

Det gis også en enkelt introduksjon til innsamling av nedbørdata. For detaljert informasjon om innsamling av værdata henviser vi til Meteorologisk institutt.

² https://publikasjoner.nve.no/veileder/2023/veileder2023_01.pdf (denne veilederen)

³ https://publikasjoner.nve.no/veileder/2023/veileder2023_02.pdf (under arbeid)

⁴ https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022_04.pdf

⁵ <https://veiledere.nve.no/eksempelsamling-for-overvannstiltak/>

Før du begynner å lese

Urbanhydrometri er et omfattende tema. Vi erfarer at måledata fra tid til annen benyttes på sviktende forutsetninger. I mangel av kjernelitteratur på norsk har vi derfor valgt å gi veilederen et visst lærebokpreg. Vi har forsøkt å skrive kapitlene med så få henvisninger til de øvrige kapitlene som mulig. Vi håper dette gir lesere med ulikt ståsted større mulighet til å utføre sine oppgaver i måleprosjekter på en god måte.

Våre anbefalinger bygger på internasjonalt anerkjente kilder. Vi gir i tillegg en del råd basert på egne erfaringer og kjøring av måleutstyr under kontrollerte forhold i en spesialbygget testrigg i NVEs kjellerlokale.

Du finner en liste over definisjoner og begreper i vedlegg 1.

Leseveiledning til deg som skal bestille måling

Du er antagelig ansatt i en kommune, innleid som rådgiver, utstysleverandør eller forsker som trenger data til et prosjekt. Det er også mulig du er utbygger, og har mottatt pålegg om å dokumentere avrenningen i forbindelse med et søknadspliktig tiltak.

Kapittel 2 gir deg en oversikt over arbeidsgangen i et måleprosjekt. Her finner du opplysninger om hva du selv må gjøre, og hva du kanskje trenger hjelp av andre til å få gjort. Til planlegging og innkjøp er det tilstrekkelig med en nokså grov oversikt over målebehov og forutsetninger. Dette dekkes i avsnitt 2.1. Når beslutningen om innkjøp er gjort må det i tillegg utarbeides et mer detaljert design for hvert enkelt målested. Dette arbeidet dekkes i avsnitt 2.2. Kapittelet dekker også grunnleggende hensyn ved installasjon og drift av ulike typer sensorer.

I kapittel 5 gir vi en kort innføring i drift og dokumentasjon på målestedet. Vi vil påpeke viktigheten av god driftsplanlegging. Du finner ulike eksempler på målested- og driftsdokumentasjon i vedlegg 3 og 4.

Kvalitetskontroll er en nødvendig del av investeringen. Du trenger ikke detaljert kunnskap om datakontroll for å gjøre innkjøp. Vi anbefaler imidlertid at du skumleser kapittel 6 for å sikre at datakontrontrroll blir tilstrekkelig ivaretatt.

Du finner informasjon om offentlige anskaffelser i vedlegg 2.

Leseveiledning til deg som skal utføre måling

Vi anbefaler at du gjør deg kjent med innholdet i hele veilederen. Det er sannsynlig at du må gjennomføre mye av planleggingen i samarbeid med oppdragsgiver. Du vil derfor måtte sette deg nøye inn i kapittel 2, slik at arbeidet mellom dere kan fordeles på en hensiktsmessig måte.

I kapittel 3 finner du informasjon om installasjon av sensorer. Vi beskriver noen viktige suksesskriterier for å oppnå gode måledata. Etter installasjon må målesystemet

kontrolleres og eventuelt justeres. Dette omtales i kapittel 4. Kapittel 6 gir utførlig informasjon om datakontrollrutiner som kan benyttes til å avdekke eventuelle feil.

Drift av målesteder dekkes i kapittel 5. Vi vil spesielt påpeke viktigheten av gode driftskontrollrutiner. Du finner eksempler på driftsdokumentasjon i vedlegg 4.

I kapittel 7 beskriver vi de mest brukte sensorteknologiene på markedet i dag. Kapittelet vil sette deg i stand til å vurdere hvilken sensorteknologi som egner seg på det aktuelle målestedet.

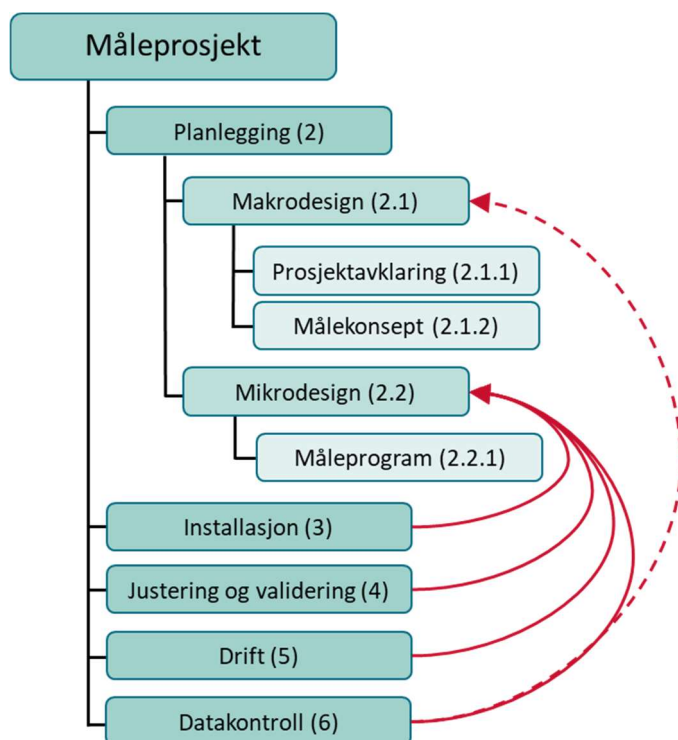
Avslutningsvis finner du en introduksjon til målenøyaktighet i kapittel 8. Dette kapittelet kan med fordel leses sammen med kapittel 6 om datakontroll.

2 Fra planlegging til gjennomføring

Prosjektets formål og omfang vil være styrende for hvordan arbeidet organiseres. I motsetning til andre offentlige innkjøp, er ikke rollefordelingen mellom bestiller og utfører alltid helt entydig i måleprosjekter. Dette skyldes at mye av måledesignet vil måtte gjøres i samarbeid mellom bestiller og utfører.

Figur 2-1 viser hvordan planlegging av måleprosjekter kan deles i to designfaser. Designfasene kan igjen inndeles i trinn, og vi vil i det følgende redegjøre for innholdet i de ulike trinnene. Helt enkle måleoppgaver kan selvsagt gjennomføres med mindre prosjektplanlegging enn beskrevet her. Vi anbefaler i så fall at aktuelle trinn gjennomføres i samme rekkefølge som vist i figuren.

Etter planleggingsfasen følger installasjon, justering og validering, drift og datakontroll. Resultatene fra disse fire fasene kan igjen føre til behov for endringer i både makro- og mikrodesign. Ettersom planlegging av måleprosjekter kan være iterative, anbefales det å avklare gjennomføring og omfang av disse fasene allerede under innkjøpsprosessen.



Figur 2-1 De ulike fasene i planleggingen og gjennomføringen av et måleprosjekt. Tallene i parentes peker til kapitlene i teksten, NVE

2.1 Planlegging og makrodesign

Makrodesign er grovplanlegging forut for en kjøpsbeslutning

Makrodesign er den planleggingen som behøves for å kunne fatte beslutning om innkjøp av en måleoppgave. Eksempler på måleoppgaver kan være:

- kalibrere hydrologiske og hydrauliske modeller
- planlegge og dimensjonere lokale overvannstiltak
- kalibrere og verifisere målesystemer eller anlegg i et overvannsnett
- vurdere effekten av lokale overvannstiltak
- avlaste overvannsnettet som ledd i klimatilpasning

2.1.1 Prosjektavklaring

I denne fasen defineres formålet med å samle måledata, og det gis grove føringer for gjennomføring. Designnivået planlegger valg av målevariabler, måleperiodens lengde og fordeling og plassering av målesteder i nedbørfeltet. Når formålet med måleoppgaven er avklart, må det avgjøres hvilke typer data og måleparametere som kreves for å oppfylle formålet. I denne sammenheng dukker det gjerne opp spørsmål som:

- på hvilke steder ønskes målingen gjennomført, om plassering og antall?
- med hvilket intervall skal måledata registreres?
- hvilke krav stilles til nøyaktighet og datakvalitet?
- hvor lenge skal målekampanjen vare?

Det vil som regel være nokså lett å svare ut disse spørsmålene dersom formålet med måleoppgaven er å kontrollere eller kalibrere måleutstyr og målesteder, eller undersøke effekten av et overvannstiltak. Dersom formålet med måleoppgaven er å kalibrere modeller eller avlaste overvannsnettet kan spørsmålene vise seg vanskeligere å besvare.

Måling bør ta mål av seg å levere representative, nøyaktige og fullstendige data. For å få til dette vil det som regel være behov for tverrfaglig involvering fra fagområder som hydrologi, hydraulikk, måleteknikk og elektroteknikk. Det samlede kompetansebehovet vil i praksis måtte dekkes gjennom et samarbeid mellom kommunen, et konsulentfirma eller leverandøren av målesystemet. Innretningen på samarbeidet bør beskrives mest mulig entydig.

2.1.2 Etablere et målekonsept

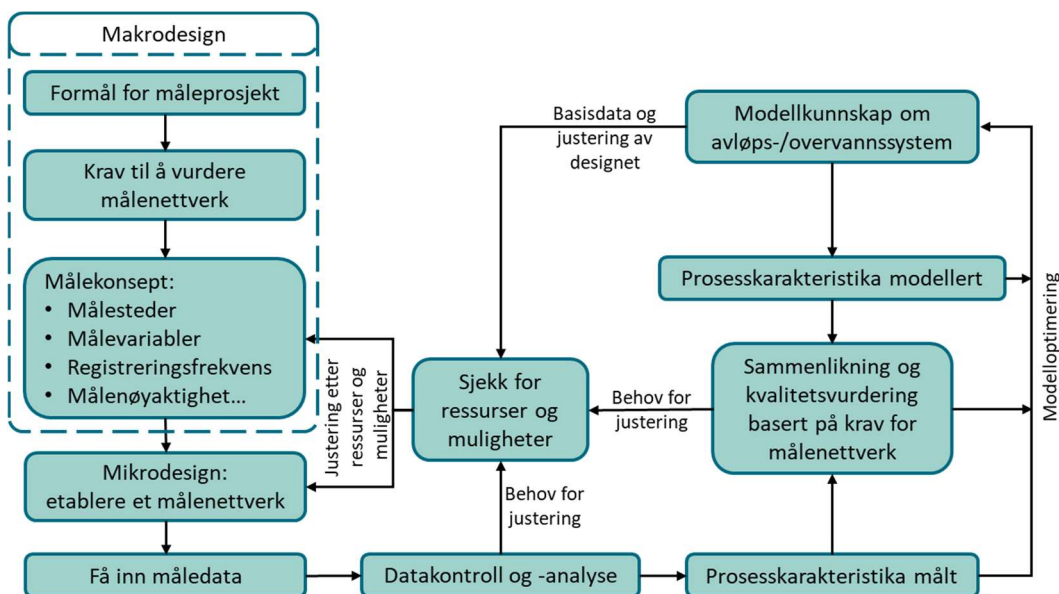
Målekonseptet danner grunnlag for anbudskonkurranser og innkjøp.

Det første trinnet innebærer å etablere et målekonsept som beskriver ønsket tilnærming. Målekonseptet bør minimum inneholde opplysninger om målestedenes antall og beliggenhet. Det er som regel behov for følgende opplysninger:

- oversiktskart over nedbørfelt og ledningsnett, gjerne digitalt
- beskrivelse av målenett, nedbørfelt og målestedenes tilsiktede oppgave og plassering i nedbørfeltet
- beskrivelse av fysiske og praktiske forhold som forventes ved hvert målested
- begrunnelse for valg og plassering av hvert målested
- oversikt over variablene som ønskes målt, slik som vannstand, vannføring, infiltrasjonshastighet og nedbør
- redegjørelse over måleinstrumenter og måldata som egner seg for målestedet (Kap. 7)
- informasjon om planlagt varighet for midlertidige målesteder
- oversikt over tiltak som vil kunne påvirke overvannssystemet under måling, slik som anleggsarbeid og rørspyling
- beskrivelse av driftskrav og hensyn som må ivaretas i vassdrag, slik som økologiske hensyn, tilgjengelighet, isdannelse og teknisk infrastruktur

Planlegging av målenett for større oppgaver

For større måleoppgaver kan det være hensiktsmessig å etablere et mer omfattende målenett. Planlegging av målenett krever ekspertkunnskap om systemet som overvåkes. Det er som regel behov for observasjoner eller, hvis tilgjengelig, en modell som beskriver systemets oppførsel (Figur 2-2).



Figur 2-2 Flytdiagram for design av komplekse målenett basert på modell eller annen form for a priori kunnskap om systemet som skal overvåkes. NVE etter Francois Clemens-Meyer (Deltares/TU Delft/NTNU) og Bertrand-Krajewski et al. (2021)

Målingers varighet

Det er vanskelig å fastslå ønsket varighet ved måling til overvannsformål. Varigheten vil avhenge av måleoppgaven. Momentane stikkprøvemålinger kan benyttes til å bestemme vannføringen eller kontrollere vannføringsmålinger med få timers eller dagers varighet. Kampanjemålinger varer som regel noen måneder, og tar sikte på å beskrive nåværende forhold og vannføringsmengder. Langvarig eller stadig måling brukes hovedsakelig til å registrere endringer i et overvannssystem over lengre perioder, gjerne over flere år.

Dersom målingene skal benyttes til modellkalibrering, er det viktig at målekampanjens lengde er lang nok til å omfatte representative hendelser. Bl.a. setter CIWEM (2016) pris på følgende faktorer:

- Det skal ha vært nok nedbør til å fukte nedbørfeltet tilstrekkelig slik at tap på overflaten ikke utgjør en vesentlig del av avrenningen.
- Hvis det brukes flere nedbørsmålere, bør en sammenligning av nedbørmengder være tilstrekkelig konsistent, slik at nedbøren på ethvert punkt i nedbørfeltet kan bestemmes ved interpolasjon.
- Det bør ikke ligge noe snø i nedbørfeltet som kan påvirke avrenning pga. snøsmelting.
- Det bør være en viss variasjon i varighet og intensitet i hendelser som skal brukes for at modellen skal kunne kalibreres og verifiseres over et så bredt spektrum av nedbørtyper som mulig.
- Det bør være tilstrekkelige perioder når nedbørfeltet er tilbake til tørre værforhold.
- Vannføring på målestedene bør være høy nok til å sikre at målingene er nøyaktige og innenfor det pålitelige måleområdet til målesystemene.

Anbefalingene egner seg derimot mindre til kalibrering av hydrologiske prosesser som påvirkes av årstid, snøsmelting og ikke minst initialtilstand. Målebehovet må dessuten vurderes i hvert enkelt tilfelle ettersom alle nedbørfelt og avløpsnett har sine egne feltkarakteristika.

Målingenes egnethet til formålet bør, så langt det er mulig, kontrolleres mens data samles inn. Det anbefales, om mulig, å benytte tre hendelser til kalibrering og ytterligere tre hendelser til validering av modellen.

2.2 Planlegging og mikrodesign

Mikrodesign er detaljplanlegging etter beslutning om innkjøp

Mikrodesign er detaljplanlegging av hvert enkelt fysisk målested med henblikk på tilgjengelighet, hydraulisk egnethet, valg av målemetode, strømforsyning, dataoverføringsmetode og teknisk installasjon. Denne planleggingsfasen går hånd i hånd med påfølgende installasjon av måleutstyr. Det er derfor behov for tett samarbeid mellom den som bestiller og den som skal utføre måling i denne fasen.

Kommunens innkjøpsavdeling bør involveres tidlig

Ved innkjøp anbefaler vi at kommunens innkjøpsavdeling involveres tidlig slik at ingen bestemt leverandør får konkurransefortrinn i anbudsprosessen. Se vedlegg 2 for tips om innkjøp.

Målesteder må befares

Ved planlegging av mikrodesign bør målestedenes egnethet først kontrolleres mot innledende plantegninger og tilhørende dokumenter, deretter ved befaring. Underjordiske målesteder bør befares over og under bakken. Målestedenes tilgjengelighet kan med fordel vurderes ved hjelp av fly- og gatebilder. Målesteder med uhensiktsmessig eller risikabel adkomst vil gjerne oppnå lavere datakvalitet som følge av redusert vedlikehold. De vil også utløse behov for formelle avtaler om adkomst med infrastruktureier. Det er fordelaktig at både bestiller og leverandør deltar i befaringen.

2.2.1 Måleprogram

Vi anbefaler at oppdragsgiver og leverandør samarbeider tett om å utvikle et gjensidig bindende måleprogram. Slik sikres et godt grunnlag for gode og kvalitetssikrede måledata, spesielt i prosjekter med stort omfang og flere målesteder i målenettet. Følgende elementer bør beskrives i måleprogrammet:

- hvilke(t) formål dataene er tiltenkt
- funksjonskrav og målekrav i samsvar med måleoppgaven
- nedbørfelt, målested og installasjon:
 - kart eller plantegninger over nedbørfeltet, gjerne digitalt
 - opplysninger av betydning for måling, som forventet vannstand, vannføring, vinterforhold mv. i nedbørfelt
 - hydrauliske forhold på målestedet. Det kan komme på tale å gjennomføre prøvemåling
 - det anbefales å ta bilder og videoopptak ved befaring
 - målestedenes tilgjengelighet og trafikksituasjon
 - mulighetene for dataoverføring og mobildekning
 - mulighetene for strømforsyning

- teknisk dokumentasjon om montering og installasjon av sensorer, fundamentering, innfesting i rørvegg, bruk av bolter mv.
- måletekniske krav
 - antall og type variabler som ønskes målt i hvert målested
 - valgt målemetode og måleteknologi
 - hvordan dataoverføring og datalagring skal gjennomføres
 - hensiktsmessig intervall for datanedlasting ved manuell datahenting
 - tillatt nedetid
 - driftsrutiner for tilstandskontroll
- valgt kalibreringsmetode
 - det anbefales, om mulig, å kalibrere målesystemet etter installasjonen. Ved måling av overvann er dette bare delvis, og i begrenset omfang, mulig. Det bør komme frem på hvilken måte målestedene kan kalibreres. Det må også gå klart frem om det er behov for tilleggsutstyr eller anlegg for kontrollmåling i form av for eksempel måleterskel eller fortynningsmåling
- måleperiodens lengde
 - tidspunkt for måleperiodens start og slutt
 - om, og hvor lenge, måleperioden eventuelt kan forlenges eller kortes ned
- krav til kvalitetssikring og dokumentasjon
- krav til helse, miljø og sikkerhet

Hvert målested bør evalueres og dokumenteres for seg. Dokumentasjonen bør inneholde:

- kort beskrivelse av målestedet
- fotodokumentasjon over og under bakken
- plandokumenter, oversiktskart og kart over ledningsnett og topografi
- måleresultater under befaring
- beskrivelse av strømningsforhold, observert og forventet vannivå
- merknader om arbeidssikkerhet
- kjente driftsproblemer med sediment/avleiring/dopapir

Vedlegg 3 viser eksempler på slik dokumentasjon. Det er viktig at dokumentasjonen holdes oppdatert, spesielt ved endringer eller etter spesielle hendelser.

2.2.2 Planlegging og befaring av målesteder

Dersom det foreligger data fra hydrauliske modeller, eksisterende måledata eller lignende, kan disse benyttes til å vurdere forventet måleområde, fyllingsgrad og faren for oppstuvning.

Vannstandsregninger kan med fordel benyttes til å vurdere hydrauliske forhold. Slike regninger er verdifulle ettersom målestedene vanligvis inspiseres under tørre værforhold. Under regnvær og ved økt avrenning kan derimot strømningsforholdene avvike markant fra tørrværsituasjonen. Det er derfor nødvendig å tenke gjennom tilgjengeligheten til sensorene også under regnvær.

Avleiring kan bygge seg opp over tid og føre til at tverrsnittarealet blir uklart definert. Avleiring kan også indikere at strømningshastigheten er for lav for strømningsmålingsmetoden som benyttes. I tillegg kan bunnmonterte sensorer tildekkes slik at de slutter å virke. Sjekk av avleiring krever inspeksjon uten forutgående spyling og rensing.

Tilstanden, spesielt oppstrøms måletverrsnittet, bør sjekkes med hensyn til sprekker, muffeskjøter, biofilm, begroing, murkvalitet og sjaktdannelse. Dette krever vanligvis optisk kontroll av kanalen. Det bør samtidig kontrolleres av tallfestede krav til måleprofil, nivellering osv. er ivarettatt.

Det bør observeres om det forekommer stående overflatebølger eller periodisk bølgedannelse. Det samme gjelder oppstuvingshøyder som smusskanter i kummer, eller tendenser til oppstuvning under ulike strømningsforhold.

Befaring kan gjøres med elektronisk bildeoverføring der fysiske besøk hindres av høy vannføring eller av andre sikkerhetsmessige årsaker.

2.2.3 Viktige hensyn ved nivåmåling

Målesteder for vannstandsmåling, f.eks. i kummer eller magasiner, er egnet dersom:

- Det verken observeres eller forventes dannelse av bølger, skum eller is
- Vannspeilet er tilnærmet horisontalt, spesielt ved bruk av radar- eller ultralydsensorer
- Det er lave strømningshastigheter, anbefalt for nedsenkede trykksensorer
- Det ikke observeres avleiringer

2.2.4 Viktige hensyn ved vannføringsmåling

Ved vannføringsmåling kreves gjerne en innledende hydraulisk vurdering. Målesystemer som baserer seg f.eks. på areal-hastighet-metoden er fra et hydraulisk synspunkt velegnet dersom det er tilstrekkelig avstand til:

- endringer i strømmingens tverrsnitt
- endringer i strømmingens retning
- endringer i strømmingens helning
- nivåforskjeller i sålen
- ventiler

Det er spesielt ufordelaktig dersom avstanden til oppstrøms kum er kort eller dersom oppstrøms stikkledninger er tilkoblet med kort avstand til målestedet. Ved større fallendringer, spesielt ved overgangen til lavere fall, kan det oppstå hydrauliske sprang ved større vannføringer enn de som observeres under befaringen.

Måletverrsnittet bør, under optimale forhold, helst være fritt for oppstuvning og ha tilstrekkelig innløpslengde.

3 Installasjon av sensorer

Korrekt montering er en forutsetning for pålitelighet

Korrekt montering av sensorene bidrar til økt pålitelighet, reduserte vedlikeholdskostnader og et bedre måleresultat. Når det viser deg i løpet av måleperioden at datakvalitet er ikke som forventet bør målesystemet flyttes et annet sted. Noen generelle anbefalinger:

- sensorer montering oppstrøms i kummer
- hastighetssensorer bør monteres midt i strømningsstverrsnittet, avleiringer kan kreve tilpasset plassering
- nivå- og hastighetsmåling monteres på samme sted
- det anbefales å etablere referansemærker for nivåkontroll
- optimere installasjonen slik at avleiringer og tråder ikke etablerer seg
- benytte profesjonell elektroinstallasjon
- benytte spesialister til å sette opp målesystemer og driftssetting

Sensorinnfestingen må sikre enkelt vedlikehold og utelukke systematiske målefeil som følge av installasjonsforhold som ikke lar seg reproducere pålitelig, se avsnitt 8.2. Sensorens posisjon må ikke kunne endre seg over tid. Etter utskifting og vedlikehold må det foretas kontrollmåling med tilhørende justering for å unngå måleavvik. Enhetsspesifikke egenskaper som måleområde og blindsoner må alltid tas i betraktning.

Krav til sensorer

«En ideell sensor er robust og krever lite vedlikehold. Den måler uten påvirkning på strømningsstverrsnittet, med høy langtidskonsistens upåvirket av ekstreme miljøforhold med god nøyaktighet i et relativt stort måleområde» (DIN 19559-1, 1983)

Sensorer som beskrevet i sitatet hører ikke til i den virkelige verden. En bør derfor se etter sensorer som kommer så nær egenskapene til en ideell sensor som mulig. Fra et driftsteknisk synspunkt bør følgende krav stilles til målesensorer:

- minst mulig funksjonssvekkelse som følge av avleiring, partikler, fibre og oppløste stoffer i vannet
- minst mulig påvirkning fra strømningsstverrsnitt, vannstand og strømningshastighetsprofil
- kabling som er motstandsdyktig mot løsemidler, korrosive stoffer, gnag fra rotter og UV-stråling
- minst mulig vedlikehold
- selvdetektering av funksjonsfeil, for eksempel ved bortfall av data eller urealistiske måleverdier
- stabil og langvarig målekarakteristikk
- kompensasjon for temperatur og miljøpåvirkninger

Plassering av sensorer basert på areal-hastighet-metoden

De fleste mobile målesystemer for vannføringsmåling bygger på areal-hastighet-metoden. Hastigheten blir målt i deler av tverrsnittet. Dette gjør det nødvendig å være påpasselig med sensorenes plassering.

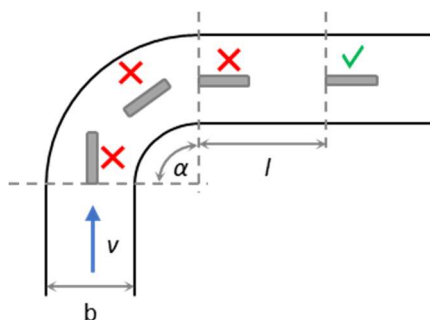
Som omtalt i avsnitt 7.3.5 bestemmes vannføringen fra strømnings tverrsnittareal og strømningshastighet. Å fastsette gjennomsnittlig strømningshastighet fra separate hastighetsmålinger i tverrsnittet krever en fullt utviklet, stabil og symmetrisk hastighetsprofil. I gjennomstrømte profilavsnitt dannes slike hastighetsprofiler over en tilstrekkelig lang og uforstyrret distanse. Forstyrrelser som følge av endringer i retning, tverrsnitt, laterale inn- og utløp, ventiler og pumpeinduserte virvler kan derimot føre til store måleavvik. Desto større profilet er, desto større blir distansen som trengs for å oppnå en uforstyrret hastighetsprofil. Om utslippet er trykksatt eller under selvfall vil også påvirke distansen. Produsentenes anvisninger må derfor overholdes nøye.

Plassering av bunnmonterte hastighetssensorer

I dette avsnittet ser vi nærmere på hvordan forstyrrelser og sensorers konfigurasjon i måleavsnittet påvirker beregnet gjennomsnittshastighet. Tallene må ikke betraktes som absolutte, men deres størrelsesorden kan brukes til å vurdere målesteders egnethet. De samme betingelsene gjelder stort sett også for sensorer som registrerer overflatehastighet.

Plassering ved retningsendring i renne

Figur 3-1 viser hvordan sensorens plassering avhenger av selve profiltversnittet, retningsendringens størrelse og vannets strømningshastighet. Tabell 3-1 viser hvor langt unna retningsendringer sensoren bør plasseres for å oppnå gode hastighetsmålinger.



Figur 3-1 Sensorplassering bak retningsendringer, NVE etter Nivus GmbH (2020)

Tabell 3-1 Avstand (l) fra retningsendringer ved bruk av areal-hastighet-metoden med måling av strømningshastighet i deler av tverrsnittet avhengig av profilbredden (b), NVE etter Nivus GmbH (2020)

Retningsendring (α)	$v < 1 \text{ m/s}$	$v > 1 \text{ m/s}$
$0^\circ - 15^\circ$	$l > 3 - 5 \cdot b$	$l > 5 - 10 \cdot b$
$15^\circ - 45^\circ$	$l > 5 - 8 \cdot b$	$l > 10 - 20 \cdot b$
$45^\circ - 90^\circ$	$l > 10 - 15 \cdot b$	$l > 15 - 40 \cdot b$

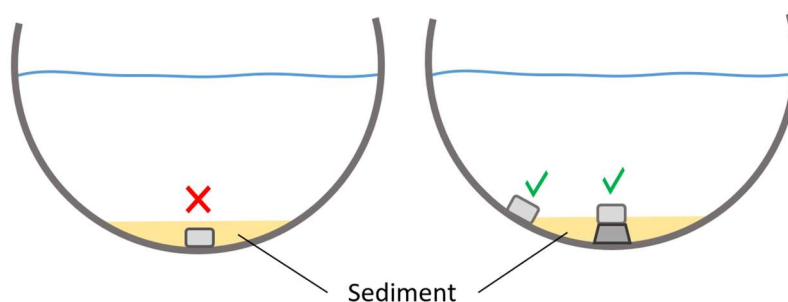
Plassering i måletverrsnittet

Sensoren må generelt plasseres midt i profilet og rettes parallelt med strømningsretningen som vist i Figur 3-2. Ved andre oppsett kan en forvente store måleavvik eller målesvikt.



Figur 3-2 Plassering av sensorer i måletverrsnittet, NVE etter Nivus GmbH (2020)

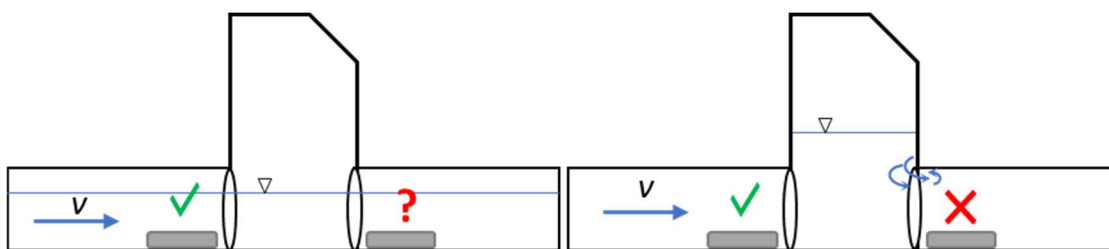
Sensoren kan imidlertid monteres på siden dersom det er fare for tildekning av sedimenter. Slik plassering gjør det nødvendig å korrigere den beregnede gjennomsnittshastigheten og tverrsnittsarealet. Enkelte leverandører tilbyr funksjonalitet for dette i sine systemer. Et godt alternativ kan være å løfte sensoren over sedimentene ved hjelp av en kile som vist i Figur 3-3. Sedimentets påvirkning på strømningsverrsnitte må tas hensyn til.



Figur 3-3 Plassering ved fare for sedimentering, NVE etter Nivus GmbH (2020)

Plassering i kummer

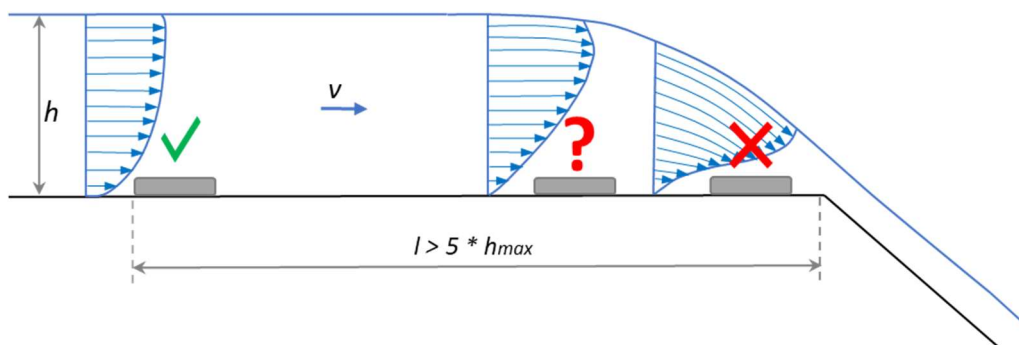
Sensortypene som omtales her blir som regel installert i kummer. De beste strømningsforholdene finner vi som regel på innløpssiden i kummen, og sensoren bør monteres lengst mulig inn i ledningen. Ved forventninger om oppstuvning i kummen, se Figur 3-4 (h), anbefaler vi på det sterkeste å plassere sensoren oppstrøms ettersom overgangen fra kum til rørledning kan skape strømningsforstyrrelser. Dette gjør det nødvendig å undersøke strømningsforholdene under ulike vannføringer. Særlig skaper overgangen fra kumvegg til rørledning virvler som gjør det vanskelig å fastslå hastighetsfordelingen med sensortypene som omtales her.



Figur 3-4 Plassering av sensorer i kummer, NVE etter Nivus GmbH (2020)

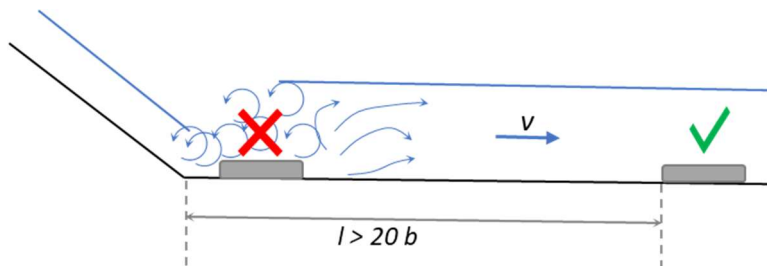
Plassering ved strømningsovergang og endret fall

Hastighetsfordelingen i strømningsstverrsnittet påvirkes av endringer fra strømmende til strykende strømning og omvendt. Figur 3-5 viser hvordan strømningsovergangen komprimerer og bøyer hastighetsprofilen slik at den empiriske sammenhengen mellom målt og gjennomsnittlig strømningshastighet brytes. Ved fall som forårsaker overgang fra strømmende til strykende strømning anbefaler vi derfor å plassere sensoren med avstand minimum fem ganger maksimalt forventet vannstand, h_{max} oppstrøms.



Figur 3-5 Plassering ved overgang fra lavt til høyt fall, NVE etter Nivus GmbH (2020)

I motsatt fall, med overgang fra strykende til strømmende forhold, blir hastighetsprofilen såpass forstyrret at hastighetsmålingen bør flyttes minst 20 ganger profilbredden (b) nedstrøms spranget, se Figur 3-6.

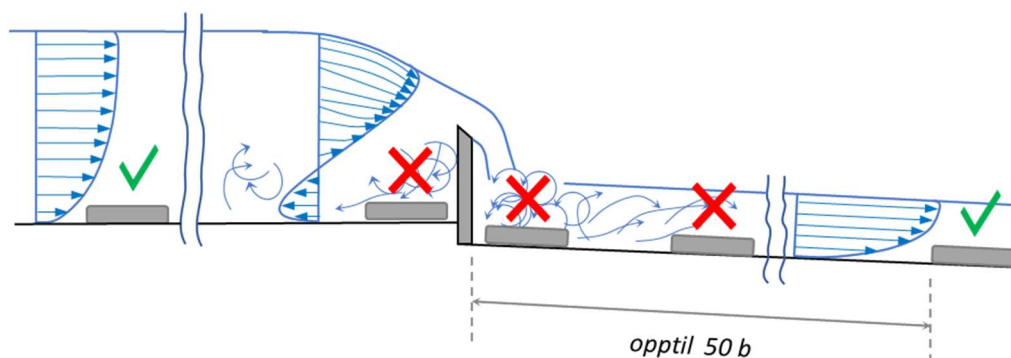


Figur 3-6 Plassering ved overgang fra høyt til lavt fall (hydraulisk sprang),
b – profilbredde, NVE etter Nivus GmbH (2020)

Plassering ved overløp og terskler

Overløp forstyrrer hastighetsprofilen i betydelig grad. Måling lar seg ikke gjøre rett bak overløp, se Figur 3-7. Vi anbefaler derfor å holde god avstand slik at hastighetsprofilen utvikles godt nok til å tillate gode vannføringsmålinger. Avstanden påvirkes av overløpshøyden og terskelhøyden, og kan utgjøre så mye som 50 ganger profilbredden (b).

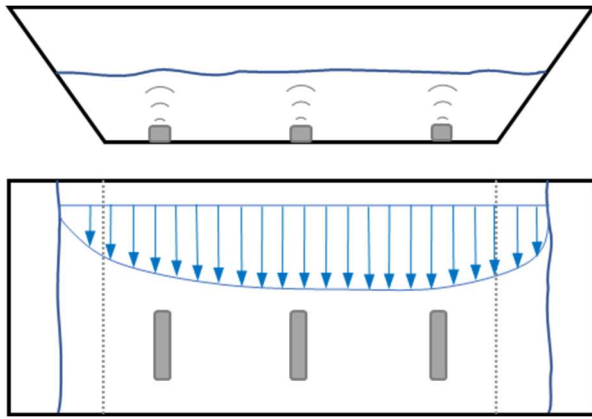
Måling rett foran overløp kan være problematisk. Under overløpshendelser kan det oppstå motstrømninger langs bunnen foran terskelen som vist i Figur 3-7. Dette hindrer måling med sensortyper som omtales i dette kapitlet.



Figur 3-7 Plassering foran og bak overløp og terskel, etter Nivus GmbH (2020)

Måling i store tverrsnitt

Ved vannføringsmåling i store profiler er det viktig å være oppmerksom på at hastighetsfordelingen kan være usymmetrisk. Figur 3-8 viser hvordan flere sensorer i profilet vil kunne kompensere for både dette og endret ruhet.



Figur 3-8 Plassering av flere sensorer ved måling i store tverrsnitt (profil/ovenfra), NVE

4 Justering og validering av målesystemer

Det er nødvendig å verifisere innsamlede måledata allerede ved idriftsetting for å kunne avdekke og justere eventuelle installasjonsfeil og nøyaktighetsavvik. Det er hensiktsmessig å gjennomføre en befarings under regnvær om mulig. Ved måling av spesielt urban vannføring kan dette være krevende. Det er imidlertid mulig å justere nivåmålere ved hjelp av sandsekker som hever vannstanden. Målinger basert på luft-ultralydmetoden kan justeres ved hjelp av en plate i kjent avstand til sensoren.

Vannføringsmålere kan kun justeres når det renner tilstrekkelig vann. Måleren må derfor enten justeres under regnvær eller med kunstig tilført vann. Innsatsen med kunstig tilført vann kan forsvares ved etablering av stasjonære målesystemer. For kortvarige målekampanjer oppveier innsatsen som regel ikke nytten.

Kontrollmåling bør ha høyere nøyaktighet enn målemetoden som kontrolleres

Metoder som benyttes til kontrollmåling bør være sikrere enn metodene som skal kontrolleres. Mobile målesystemer som benytter seg av areal-hastighet-metoden kan verifiseres ved hjelp av flerpunktmåling eller fortynningsmåling. Flerpunktmåling forutsetter tilstrekkelig profildybde, mens fortynningsmåling krever tilstrekkelig turbulens til å fortynne sporstoffet godt. Fortynningsmåling lar seg sjelden forene med ønsket om rolig og jevn strømningsprofil som kjennetegner areal-hastighet-metoden.

Kontrollmåling bør ikke påvirke den faktiske måleparameteren

Ved kontrollmåling er det nødvendig å forsikre seg om at den faktiske måleparameteren ikke blir unødig påvirket. Flerpunktmåling bør for eksempel ikke utføres rett foran en ultralydsensor. Ved vannstandsmåling i strømmende vann bør en benytte målesystemer som påvirker vannstanden minst mulig.

Det er vanligvis mulig å verifisere og justere vannstandsmålingene ved hjelp av enkle manuelle målinger mot et nivåmerke med kjent høyde. Det er da viktig at begge målingene utføres samtidig.

Grunnlaget for nøyaktige vannføringsmålinger hviler på nøyaktig oppmåling av måleprofilen. Dette bør alltid kontrolleres ved idriftsetting av målesystemet.

5 Drift av målesteder

Drift omfatter alle tiltak som understøtter vellykket måling, fra installasjon og datakontroll til avvikling av målesystemet. Datakontroll blir omtalt i kapittel 6.

God datakvalitet forutsetter regelmessig kontroll og vedlikehold av målested og måleutstyr. Dette gjelder for faste, så vel som for mobile målesystemer. Det er ikke mulig å gi entydige anbefalinger om valg av vedlikeholdsintervall. Vi anbefaler imidlertid å inspisere målestedet hyppig umiddelbart etter installasjon og deretter øke intervallene ettersom driftserfaringer opparbeides. For systemer med dataoverføring og jevnlig datakontroll kan kontrollintervallene utvides etter behov. For mobile målesystemer blir ofte batterikapasiteten styrende for vedlikeholdet. Intervaller på flere uker er ikke uvanlig.

5.1 Arbeidsinstruks for drifts- og funksjonskontroll

En arbeidsinstruks bidrar til økt målekvalitet

Vi anbefaler å utarbeide en arbeidsinstruks for drifts- og funksjonskontroll. Dette bidrar til et stabilt og høyt kvalitetsnivå. Instruksen bør beskrive hvordan kontrollen skal gjennomføres og dokumenteres. Vedlegg 4 viser et eksempel på en slik driftsprotokoll. Vi gir her noen tips:

Det bør gjennomføres en visuell tilstandskontroll på sensoren og det bør beskrives om sensorens orientering, braketter og festemidler er som de skal. Sensorer og festebraketter bør deretter rengjøres.

Strømforsyning og batterier, brudd, korrosjon og påvirkning på kabler og pluggforbindelser bør deretter kontrolleres nøye.

Systemets dato og tidsangivelse kontrolleres. Det samme gjelder for synkronitet ved bruk av flere måleenheter i en målekampanje.

Smuss og avleiringer i måletverrsnittet fjernes. Eventuelle sedimenter må dokumenteres og hensyntas i vannføringsberegningen. Dersom sedimentnivået er stabilt over tid kan det være mer hensiktsmessig å dokumentere sedimentnivået uten å rengjøre profilet.

Måleverdier bør kontrolleres mot andre målemetoder. Strømningshastigheten kan kontrolleres ved hjelp av enkelt- eller flerpunktmåling med håndholdt sonde⁶.

⁶ Visuell plausibilitetskontroll

Vannstanden kan kontrolleres med tommestokk eller andre nivåmåler. Offsetverdier bør kontrolleres og om nødvendig justeres.

5.2 Dokumentasjon fra drifts- og funksjonskontrollen

Driftsdokumentasjon bidrar til økt kvalitet

Dokumentasjon fra drifts- og funksjonskontrollen inngår i datakontroll og analyse. Dokumentasjonen bør minimum inneholde opplysninger om:

- dato og klokkeslett for kontrollen
- værforhold, spesielle hendelser, flommer, avleiringer og endringer i måleprofilen
- vedlikehold og inspeksjoner som er gjort på målestedet
- kontrollmålinger av vannstand, strømningshastighet og sedimentnivå
- eventuelle endringer i måleutstyr og parametre

Vedlegg 4 viser hvordan en kontrollrapport kan se ut. Det anbefales å dokumentere kontrollbesøkene i en database slik at resultatene kan innhentes enkelt ved datakontroll og analyse.

Driften av målestedet påvirker datakvaliteten. Det er derfor viktig å involvere driftspersonellet i planlegging, installasjon og idriftsetting. Det anbefales å gi driftspersonalet grunnleggende opplæring i måleteknikk slik at måleproblemer og avvik blir gjenkjent som dette ved kontrollbesøk.

Avløpsetatens driftsavdeling må involveres dersom måleoppgavene skal utføres av eksterne. Driftsavdelingen vil kunne gi viktige opplysninger om spyling, inspeksjoner, endringer i strømningsveier og strukturelle tiltak i avløpsnett. Slik informasjon er av stor betydning for målekampanjen og evalueringen av dataene som samles inn.

6 Datakontroll og dokumentasjon

Datakontroll er en sentral del av måleprosessen. Denne veilederen beskriver grunnleggende elementer i datakontroll. For mer uttømmende informasjon anbefaler vi IWA sin publikasjon *Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management* (Bertrand-Krajewski, et al., 2021).

Fremgangsmåten i kapittel 6.3 viser eksempler på hvordan datakontroll kan utføres. Omfanget av, og utvalget av kontrolltrinn, skal ikke oppfattes som obligatorisk. Omfanget av kontrollen må tilpasses kompleksiteten og kravene til måleoppgaven og målekampanjen.

6.1 Datatyper

Data deles i kategoriene måldata og metadata. Disse kan igjen deles i underkategorier som omtalt i det følgende.

6.1.1 Måldata

Med måldata mener vi de målte verdiene som beskriver prosessene vi ønsker å kartlegge. Måleverdier representerer tilstanden til fysikalske variabler og leveres av enhetene i et målesystem. Hydrometriske måldata foreligger gjerne som serier med tidsstempler (dato og klokkeslett) og tilhørende sensorverdi for hvert tidspunkt. Måldata kan igjen inndeles i ulike kvalitets- eller bearbeidingstrinn.

Rådata er data som registreres og sendes videre av en sensor eller et målesystem. Rådata bør arkiveres fullstendig og uprosessert i sin opprinnelige form og tidsoppløsning.

Avledede data lages fra rådata ved hjelp av referanselinjer eller hydrauliske beregninger. For eksempel kan vannføring fastsettes fra vannstand og strømningshastighet.

Primærkontrollerte data har gjennomgått første ledd i datakontrollen, og lagres med opprinnelig tidsoppløsning. I denne kontrollen fjernes eller justeres data som skyldes instrumenteringsfeil eller måleutstyr. Det foretas ingen rekonstruksjon av manglende data eller subjektive vurderinger. Mistenkelige data kan også gjenkjennes og merkes.

Sekundærkontrollerte data har gjennomgått både første og andre ledd i datakontrollen. Det utføres rekonstruksjon av for eksempel manglende data og oppstuvningseffekter for å oppnå komplette og mest mulig korrekte data. Rekonstruerte perioder i tidsserien markeres og kommenteres slik at de kan gjenfinnes ved bruk. Sekundærkontrollerte data kan enten lagres med opprinnelig tidsoppløsning eller som tidsaggregerte data.

6.1.2 Metadata

Metadata er data om data. Metadata er alle slags opplysninger om målinger og målesteder som ikke baserer seg på tidsserier, men som likevel kan endre seg over tid.

Systemspesifikke metadata er informasjon om overvannssystemet som påvirker datainnsamlingen. Eksempler kan være opplysninger om nedbørfeltets størrelse og utnyttelsesgrad, beskrivelse av overvannsnett, håndteringssystemer og hydrauliske egenskaper ved disse.

Målespesifikke metadata er informasjon som beskriver målesystemet som er i bruk, så som målemetode, sensortype, serienummer, logger og montasjemetode.

Dataspesifikke metadata beskriver måleverdien, så som måleenhet, tidsoppløsning og hvorvidt måleverdien representerer for eksempel momentanverdi, middelverdi, støyreduert verdi eller valgt filtreringsalgoritme.

Driftsspesifikke metadata beskriver målestedets drift og hensyn som kan påvirke måling. Eksempler på slik informasjon kan være resultatene fra driftskontroller, besøksprotokoller, kontrollmålinger, dokumentasjon på gjennomførte tiltak ved målestedet, sensorbytte og endret innfesting.

Datakontrollspesifikke metadata er dokumentasjon som blir lagret i forbindelse med datakontrollen. Dette kan være opplysninger om registrerte måleavvik, hull i data, korreksjoner og rekonstruksjon av data.

Metadata er dynamiske i sin natur. Det kan være utfordrende å følge med på alle endringer under en måleperiode. Gode og korrekte metadata er imidlertid like viktig som nøyaktige måledata. Det hender ofte at metadata forklarer irregulariteter i målingene som først blir oppdaget under datakontroll.

6.2 Datakvalitet

Kvalitetsbegrepet omfatter flere egenskaper ved datasettet

Målesystemene som omtales i denne veilederen vil som regel ikke levere 100 % feilfrie data. Feilkildene er mange, fra feil i selve målesystemet til menneskelig svikt, programvarefeil, installasjonsfeil, brudd i datakommunikasjon og strømforsyning eller annen ekstern påvirkning. Bruk av ukontrollerte måledata kan derfor ikke anbefales. Til å vurdere datakvaliteten benyttes begrepene konsistens, riktighet, plausibilitet, homogenitet og synkronitet.

Konsistens handler om at datasettene må være logiske og ikke motstridende i seg selv. Måleverdier utenfor systemets måleområde eller verdier som ikke kan oppnås fysisk er eksempler på inkonsistente data. Inkonsistens kan også forårsakes av endringer i målesystemet og driftsendringer på målestedet.

Riktighet er evnen til å levere korrekte data. Riktighet tilsier at det er samsvar mellom den faktiske og den målte tilstanden. Nedsatt riktighet kan oppstå ved bruk av feil

referanselinje (Kap. 7.1), måling utenfor systemets måleområde eller tiltenkt bruksområde. Nedsatt riktighet kan også oppstå ved at målesystemets parameteroppsett er feil eller at måling ikke utføres i henhold til leverandørens spesifikasjoner.

Plausibilitet angir om måleverdienes størrelsesorden er realistisk i forhold til hva som forventes på målestedet. Eksempler kan være om måleverdiene befinner seg utenfor forventet måleområde, om de endrer seg unormalt sakte eller raskt eller om det er motstrid mellom verdiene for nedbør og avrenning.

Homogenitet angir om måledata fra ulike perioder i samme målested er sammenliknbare. Endringer i avløpssystemet eller påvirkninger som ikke er knyttet til selve målestedet kan introdusere inhomogenitet. Inkonsistens og inhomogenitet kan ofte overlappe hverandre. Det kan derfor være tidsbesparende å først sjekke dataene for konsistens. Inhomogenitet kan forårsakes av endringer i klima og nedbørsmønstre. Andre årsaker kan være endringer i nedbørfeltet i form av nedbygging, frakobling av taknedløp, utslipp av drensvann fra anleggsarbeid, endringer i kanalsystemet som fordrøyningsvolum, ventilinnstillinger, nettforbindelser og renovering.

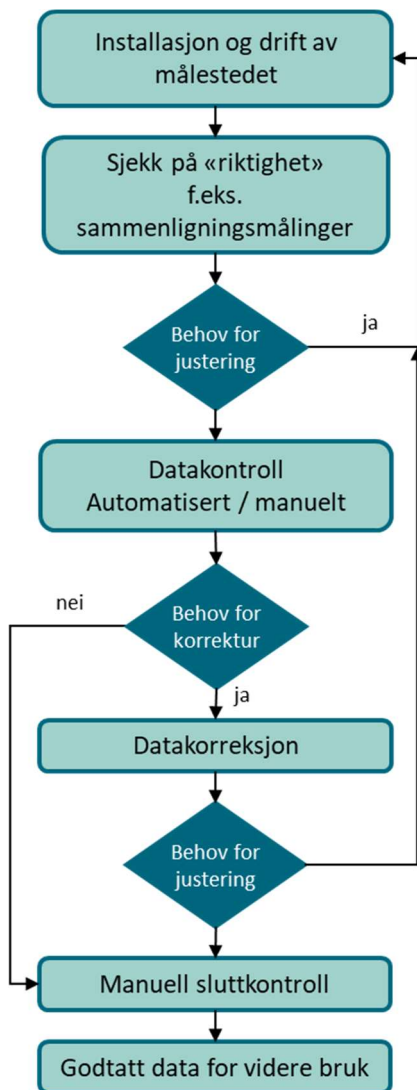
Synkronitet dreier seg om at systemtiden til enhetene i målenettet sammenfaller. Grove tidsavvik er relativt enkle å gjenkjenne, men dette kan vise seg vanskelig å oppdage dersom systemtiden bare avviker litt.

Representativitet beskriver datamaterialets evne til å representere individuelle prosesser tilstrekkelig godt. Representative data gjør det mulig å trekke statistiske konklusjoner om hele prosesser ved hjelp av stikkprøver fra deler av prosesser. Representativitetsfeil kan være av betydelig størrelse og mange ganger større enn øvrige målefeil eller usikkerheter.

6.3 Mål for og gjennomføring av datakontroll

Datakontroll bør starte så tidlig som mulig

Datakontrollen bør starte opp straks etter målesystemets idriftsettelse, og fortsette gjennom hele måleperioden., se Figur 6-1.



Figur 6-1 Arbeidsflyt for datakontroll, NVE

Sen eller mangelfull datakontroll kan føre til økte kostnader og ubrukelige data

Måleperioden er ofte tidsavgrenset. Tap av data fører som regel til at deler av datasettene blir ubrukelige, måleperioden må forlenges og kostnadene blåses opp. Datatap som følge av manglende eller sen datakontroll bør derfor unngås.

I tillegg til å motvirke datatap bidrar datakontroll til konsistente, riktige, representative, homogene og synkrone måledata. Datakontrollen identifiserer uregelmessigheter ved målesystemet, målestedet og målemetodene og dokumenterer hvorvidt dataene egner seg til den aktuelle måleoppgaven

Kontrollkonseptet bør bestemmes i planleggingsfasen og senere oppdateres. Innsats og omfang må tilpasses den aktuelle måleoppgaven og eventuelt senere bruk. Datakontrollen må dokumentere rettede feil og feil som ikke lar seg rette.

Måledata kan kontrolleres manuelt eller automatisert

Måledata kan kontrolleres både manuelt og ved hjelp av programvarestøtte. Fullautomatisert datakontroll er som regel ikke mulig, og vil gjerne medføre behov for manuell sluttkontroll.

6.3.1 Manuell datakontroll

Erfarne fagfolk kan raskt identifisere avvik og feil. Manuell inspeksjon gir innsikt i den typiske atferden til avrenningsprosessene på målestedet. Denne informasjonen kan brukes som inngangsparameter til automatisert kontroll. Manuell kontroll egner seg godt ved:

- registrering av anomalier som ikke kan beskrives av regler
- nyinstallerte målesystemer, identifisere typiske kjennetegn ved målestedet
- begrenset datamengde
- stikkprøvekontroll
- visuell inspeksjon
- etterkontroll av automatiserte datakontroller
- vurdering av samtidig målte variabler eller målesteder, f.eks. nedbør og avrenning

6.3.2 Automatisk støttet datakontroll

Automatisk støttet datakontroll kan være hensiktsmessig ved større datamengder. Metoden krever kontrollparametere som kan fastsettes ved manuell testing eller empiriske verdier. Parameterne kan også bestemmes fra måledataene selv, for eksempel ved hjelp av maskinlæring. Automatisert kontroll egner seg godt for sjekk av numerisk plausibilitet ved hjelp av følgende kontrollparametere, se også Tabell 6-2:

- hull i data
- konstans (constance)
- spenn (span)
- uteligger (outlier)
- gradient (gradient)
- støy (rush, noise)
- drift (drift)

Avvik er ikke nødvendigvis feil

Det trenger ikke bety at datasettet er feil dersom det oppdages feil eller avvik under den automatiserte kontrollen. Den automatiserte kontrollen skal heller ikke slette eller korrigere data som blir gjenkjent som feil. Hensikten er kun å markere slike data. Hvorvidt en numerisk bestemt feil faktisk er en feil, kan bare fastslås ved en siste manuell kontroll.

6.3.3 Trinn i datakontrollprosessen

Tabell 6-1 viser de ulike elementene i datakontrollprosedyren, og når kontrollelementet bør gjennomføres.

Tabell 6-1 Datakontroll og kvalitetstrinn etter DWA (2011)

Kontroll og kvalitetstrinn Tidspunkt							
	Plausibilitet	Riktighet hydraulikk	Nøyaktighet hydrologi	Konsistens hydraulikk	Konsistens hydrologi	Homogenitet	Representativitet
Under driftskontroll	•						•
Foreliggende måledata	•	•	(•)			(•)	•
Måledata over et lengre tidsrom	•	(•)	•	•	•	•	•
ANMERKNING (•) Kan av og til være hensiktsmessig							

6.3.3.1 Driftsbesøk

Jevnlig driftskontroll er avgjørende viktig for vedlikehold av måleutstyr og gode data. Slike kontroller gjør det mulig å rette eventuelle feil på stedet. Det anbefales sterkt at arbeidsinstruksen følges, og at resultatene dokumenteres nøye i besøksprotokollen. Du finner et eksempel på en slik besøksprotokoll i vedlegg 4.

Plausibilitetskontroll

Under driftskontrollen på målestedet er det mulig å sjekke måledataenes plausibilitet som vist i Tabell 6-1. Driftskontrollen gir også mulighet til å sjekke datasettene visuelt for hopp, hull og drift mv.

Riktighetskontroll

Driftskontrollen bør også verifisere målingene ved hjelp av sammenlignende målinger som omtalt i avsnitt 5.1. Om mulig bør kontrollmålingen utføres ved hjelp av systemer som er nøyaktigere enn målesystemene som kontrolleres, se avsnitt 4.

6.3.3.2 Kontroll av foreliggende måledata

Foreliggende måledata bør kontrolleres jevnlig under måleperioden. Det er viktig å ta tidlig grep for å sikre at tilpasninger og forbedringer gjennomføres straks det oppdages uregelmessigheter i målingene.

Kontroll av driftsdokumentasjon

Opplysninger som finnes i driftsprotokollene og antall driftsbesøk kan gi en oversikt, om målestedet blir driftet på en god måte og om det oppstår problemer ved målestedet, som sedimentering eller andre hendelser som kan påvirke datakvaliteten. Derfor bør kontroll av driftsprotokollene være en del av datakontrollprosessen.

Numerisk plausibilitetskontroll av hydrograf

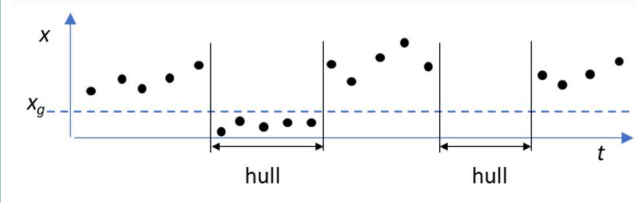
Alle typer måledata bør underlegges en innledende plausibilitetskontroll. Det er godt mulig å sjekke måledata automatisk på dette nivået, men mistenkelige data bør merkes og sjekkes videre manuelt.

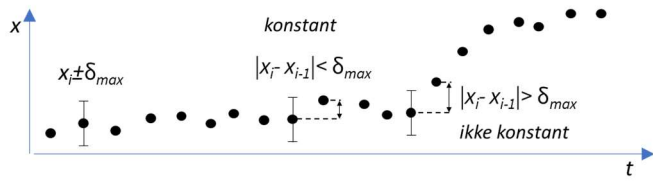
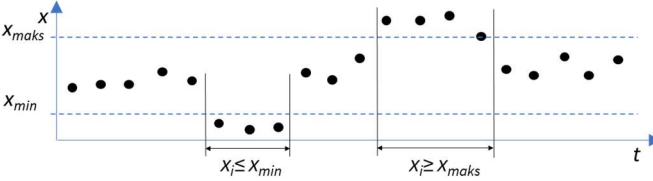
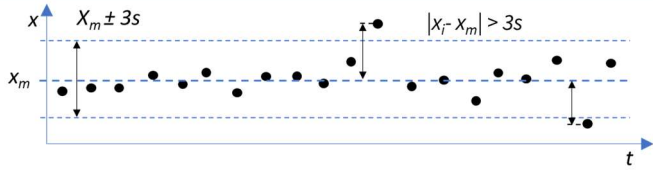
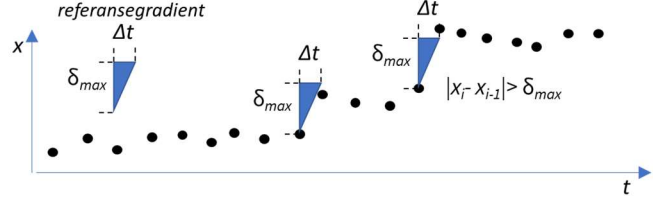
I Tabell 6-2 er det listet opp eksempler på ulike kriterier og grenseverdier som kan benyttes ved numerisk plausibilitetskontroll av dataserier. Kriteriene må tilpasses lokale forhold.

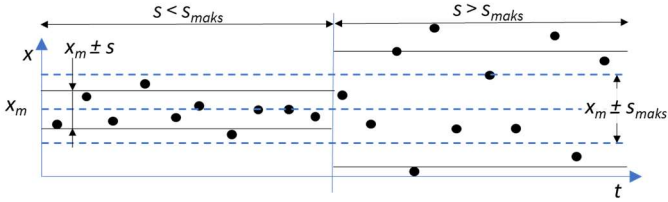
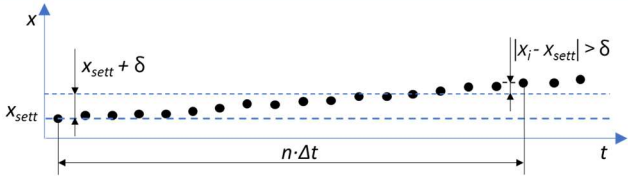
Visuell plausibilitetskontroll

Det krever litt erfaring å gjenkjenne måleavvik og deres mulige årsaker fra hydrografen. For visuell kontroll er det behov for grafisk inspeksjonsverktøy med zoom og panorering. Det bør også være mulig å markere (flagge) data som er mistenkelige eller feil. Det er en ulempe ved den visuelle kontrollen at den ikke lar seg gjennomføre objektivt. Uavhengig av hvor mange kontrollkriterier som settes opp vil hver enkelt kontrollør til syvende og sist vurdere datasettet utfra personlig kunnskap og erfaring. Visuell plausibilitetskontroll egner seg til små og moderat store datamengder. Metoden kan benyttes til å kontrollere data for hull, hopp, drift, konstans, feilsøk og sammenlikning av samtidige data.

Tabell 6-2 Kriterier og grenseverdier til numerisk plausibilitetskontroll, NVE etter DWA (2011)

Kriterium	Forklaring	Eksempel
Hull i data	Målt verdi når eller krysser en grenseverdi definert som hull	Målesystemet svikter
		$x_i \leq x_g$

Konstans	Absolutt endring i måleverdi, x_i i løpet av n tidsintervaller er mindre enn tillat maksverdi, δ_{max}	Konstant utløp fra f.eks. ventil Ikke konstant vannføring
		Konstant: $ x_i - x_{i-1} < \delta_{max}$ Ikke konstant: $ x_i - x_{i-1} > \delta_{max}$
Spenn	Måleverdiene over- eller underskider forventede eller fysisk mulige grenseverdier	Målt vannstand høyere enn maksimal vannstand i et fordrøyningsmagasin
		$x_i \geq x_{maks}$ $x_i \leq x_{min}$
Uteligger	Målt verdi større enn f.eks. tre ganger standardavviket for det glidende gjennomsnittet	Enkeltverdi som er uvanlig høy i vannstandsmåling
		$ x_i - x_m > 3s$
Gradient	Absolutt målt endring overstiger maksimumsverdien, δ_{max}	Urealistisk rask tømning av et fordrøyningsmagasin
		$ x_i - x_{i-1} > \delta_{max}$

Støy	Standardavviket til n målte verdier overskrider en fast grense eller en grense bestemt som flytende gjennomsnitt	Induktiv påvirkning på målesystemet fra øvrige elektrisk anlegg
		$s(x_1 \dots x_{i-n}) > s_{max}$
Drift	Målt verdi for et konstant settpunkt x_{sett} endres jevnt og sakte	Typisk nullpunkttdrift hos trykksensorer
		For $x_i \approx x_{sett}$ $ x_i - x_{sett} > \delta$ i $n \cdot \Delta t$

Riktighets- og konsistenskontroll ved hjelp av balansering, vannføringskurve og scatterplott

Riktighets- og konsistenskontrollen tar i bruk alle opplysninger om forhold som påvirker målingene fra driftsdokumentasjonen for målestedet.

Ved større målenett er det noen ganger mulig å balansere vannmengder og sammenligne måledata fra målesteder som er relatert til hverandre, f.eks. vannføringsmåler plassert etter hverandre i et nedbørfelt. Det er lurt å bruke slike data til riktighets og konsistenskontroll allerede under pågående målekampanjer.

Alle målesteder har sin egen hydrauliske karakteristikk. I teorien kan denne karakteristikken bestemmes ved å beregne vannføringskurven med f.eks. Mannings ligning ved hjelp av profilets parametere:

$$Q = M * A_{st} * R_h^{2/3} * \sqrt{I} \quad [1]$$

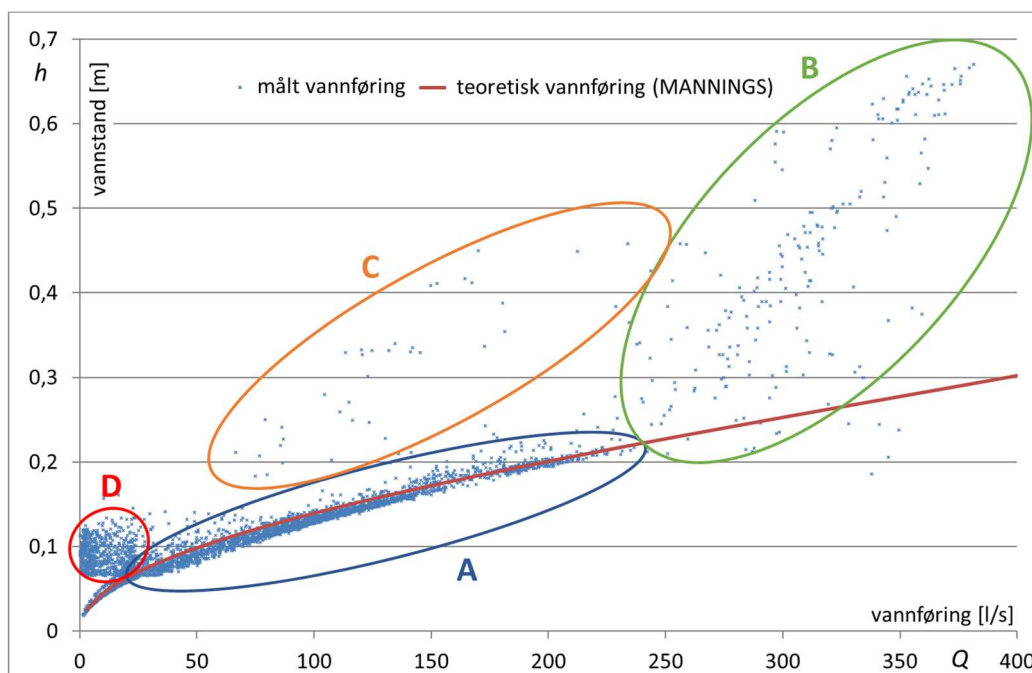
Hvor

M Mannings tall, ruhet
 A_{st} Strømningens arealtverrsnitt
 R_h Hydraulisk radius
 I Fall

Ved å fremstille verdiparene Q og h i et scatterplot som vist i Figur 6-2, kan det bestemmes i hvilken grad de målte dataene samsvarer med den teoretiske

vannføringskurven. I tillegg kan særtrekk ved målestedet identifiseres. I henhold til figuren kan metoden i prinsippet avdekke:

- A) områder hvor avrenningen ikke er påvirket av oppstuvning
- B) områder hvor avrenningen er påvirket fra nedstrøms av byggetekniske årsaker, f.eks. mindre fall
- C) områder hvor avrenningen er påvirket av høy hydraulisk utnyttelse nedstrøms grunnet sterke regnhendelser som fører til oppstuvning ved målestedet
- D) sedimentering ved målestedet (mulig forklaring)

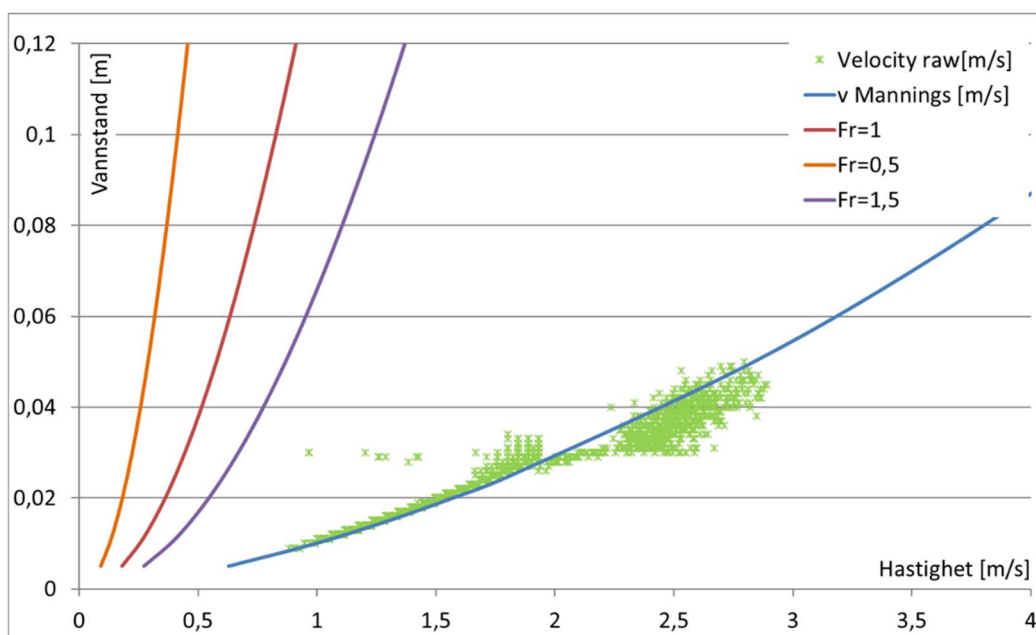


Figur 6-2 Scatterplott med teoretisk vannføringskurve beregnet ved hjelp av Manning. Se teksten for forklaring av bokstavene A – D, NVE

Det er ikke usannsynlig at lokale forhold får den teoretiske vannføringskurven til å avvike fra måleresultatene. Sedimentering og endringer i fall kan forårsake dette. I tillegg innvirker ruhet betydelig på forløpet til den teoretiske vannføringskurven. Dersom vannføringskurven skal brukes som kontrollparameter, bør en skaffe seg god oversikt over forholdene på stedet og justere kurven tilsvarende. Kontrollmålingene fra feltbesøkene bør benyttes. Denne prosedyren er spesielt egnet for område A. For hendelser i område B og C er det vanskelig å bekrefte måledata uten å benytte kontrollmålinger. Dersom det eksisterer en hydraulisk modell, kan en i det minste få en indikasjon på måleresultatenes plausibilitet. Område D viser tvilsomme data, muligens forårsaket av sedimentering.

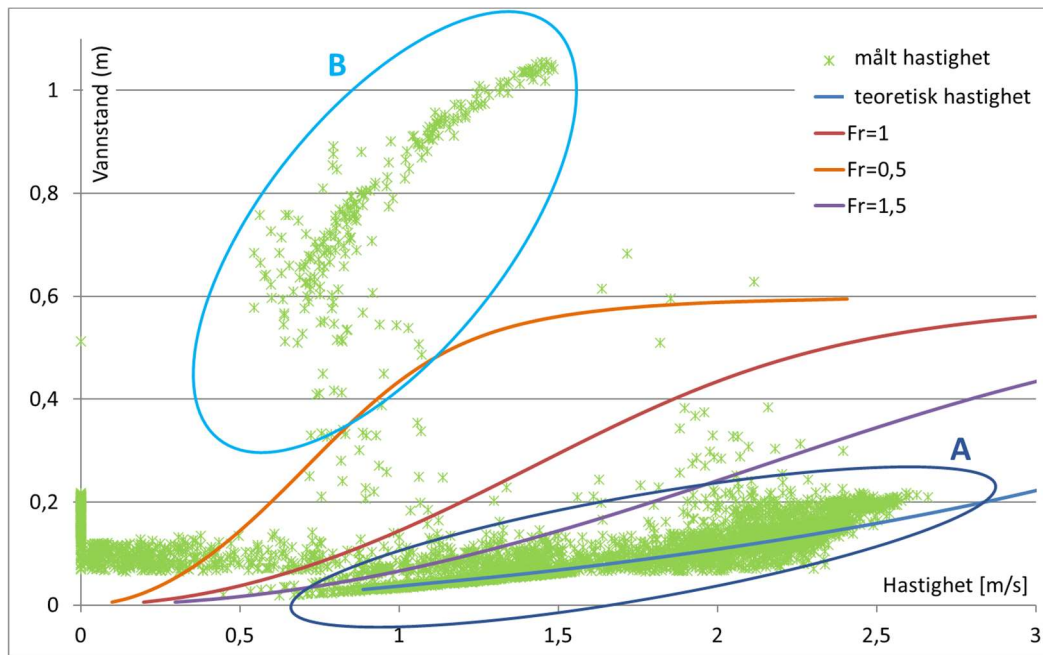
Ved bruk av Froudetall, se avsnitt 7.3.1.1, er det mulig å vurdere om målestedet er påvirket av endringer i strømningstilstanden som følge av endret fall eller oppstuvning nedstrøms. Figur 6-3 viser måledata fra et målested med god teoretisk sammenheng

mellom vannstand og strømningshastighet. Figuren viser også at målestedet er karakterisert av strykende strømning (Froudetall > 1 , Kap 7.3.1).



Figur 6-3 Sammenhengen mellom vannstand og strømningshastighet under entydig strykende forhold, NVE

Figur 6-4 viser derimot data fra et målested hvor strømningstilstanden ikke er like entydig definert. Område A viser tidsrom hvor sammenheng mellom vannstand og strømningshastighet er akseptabelt definert. Ved dette målestedet er det sannsynligvis strykende forhold forårsaket av endret strømningstilstand. Område B tyder på strømmende forhold gjennom deler av måleperioden. Data fra slike målesteder krever vanligvis mer oppmerksomhet når det gjelder datakontroll og analyse.



Figur 6-4 Sammenhengen mellom vannstand og strømningshastighet antyder endrede strømningsforhold, NVE

6.3.3.3 Kontroll av måledata over lengre tidsrom

Datakontroll over lengre tidsrom bør ha som siktemål å avdekke systematiske feil og endringer i overvannssystemet. I tillegg til kontrollparameterne nedenfor kan det være hensiktsmessig å bruke metodene som er beskrevet i avsnitt 6.3.3.2.

Konsistens- og riktighetskontroll ved hjelp av spredning rundt vannføringskurven

Avsnitt 6.3.3.2 beskriver hvordan vannføringskurven kan gjenspeile målestedets hydrauliske karakteristikk. Differansen mellom måledata og vannføringskurve kan brukes statistisk. Variasjonskoeffisienter og kvantiler kan benyttes til å analysere datasettets homogenitet, mens avvik fra middelerdi og median kan detektere systematiske avvik og endringer over tid.

Hydraulisk koeffisient

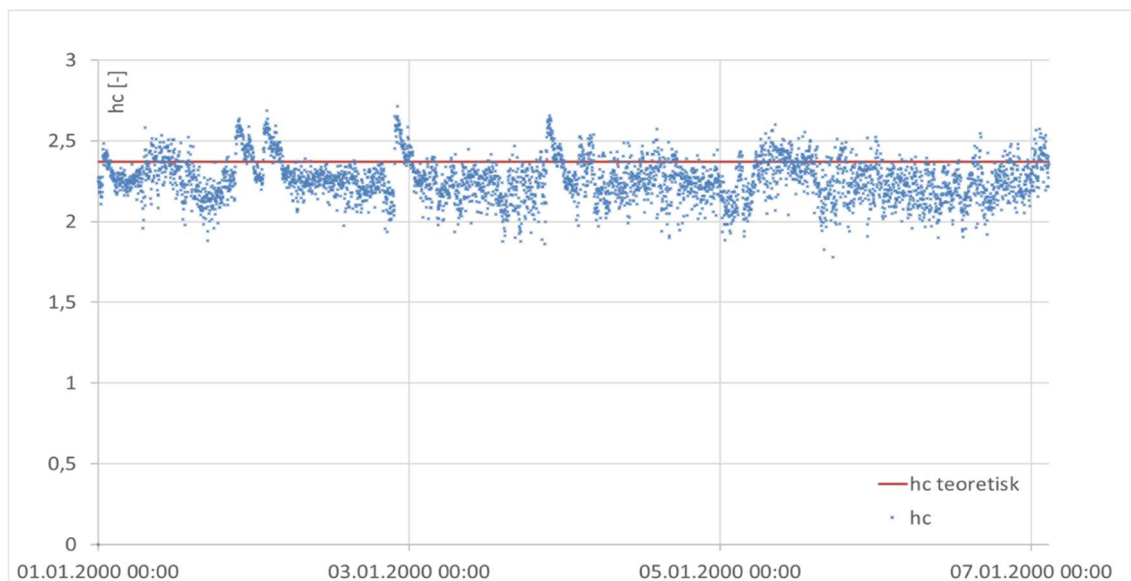
For data fra målesteder upåvirket av oppstuvning, se A i Figur 6-2, er det mulig å beregne den hydrauliske koeffisienten, h_c [2] basert på Mannings ligning [1]:

$$h_c = Q / (A_{st} \cdot R_{hy}^{2/3}) \quad [2]$$

Hvor

h_c	Hydraulisk koeffisient
Q	Vannføring
A_{st}	Strømningens arealtverrsnitt
R_{hy}	Hydraulisk radius

Hydraulisk koeffisient, h_c er upåvirket av profilet, som er kjent og oppmålt, og skal være konstant for alle målte vannføringsmengder. Tilnærmet konstant h_c over tid indikerer at datasettet er konsistent i dette tidsrommet. Uregelmessigheter bør undersøkes nærmere. Figur 6-5 viser et forløp som er forholdsvis konstant over tid, og som i tillegg nærmer seg den teoretiske hydrauliske koeffisienten etter Manning.



Figur 6-5 Hydrologisk koeffisient, h_c over tid, NVE

Plausibilitets- og konsistenskontroll av vannføringshydrografer og balanser

Kontroll av måledata ved hjelp av balansering er kun mulig med stor innsats. I slike tilfeller sammenlignes registrert nedbørvolum med målte vannføringsdata fra tilsvarende målesteder i nettet. Fra resultatene kan det trekkes konklusjoner om plausibiliteten til måledataene.

Metoden forutsetter presis kunnskap om nedbørfeltet og avløpsnettet, og antar jevnt fordelt nedbør i nedbørfeltet.

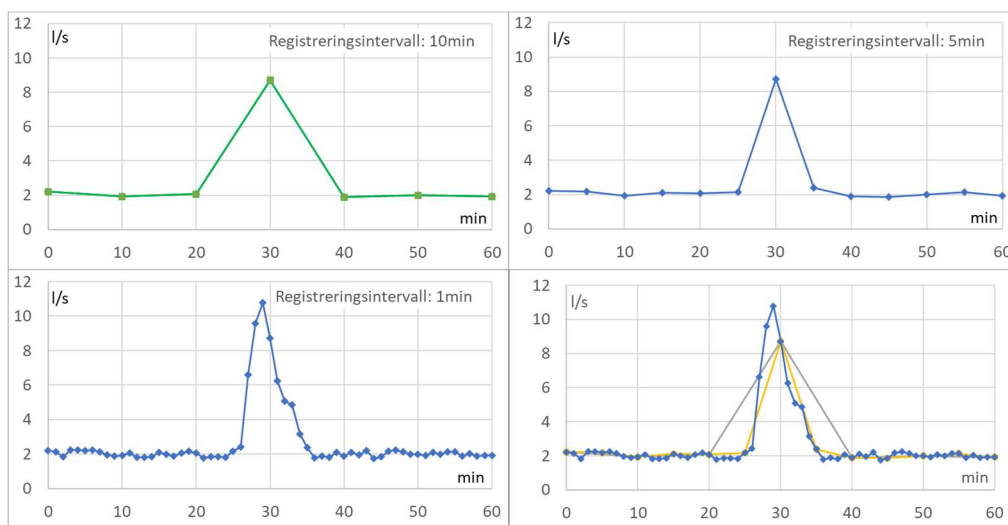
En må ta høyde for en viss usikkerhet ved måling av overvann i større nedbørfelt. Hovedtyngden av usikkerheten knytter seg til antagelsen om jevn nedbørfordeling, kunnskapsmangel om nedbørfeltet og systematiske avvik i vannføringsmålingene.

Sjekk for uteliggere

En uteligger er en målt verdi som avviker betydelig fra verdiene i umiddelbar tidsmessig nærhet. Mulige årsaker til uteliggere kan være hendelser som er atypiske for prosessene ved målestedet, vedlikeholdsarbeid og sensorfeil.

Uteliggere bør ikke ukritisk kategoriseres som feilaktige måleverdier. Dersom registreringsintervallet er valgt for grovt til svært dynamiske prosesser, kan det føre til at det kun registreres individuelle måleverdier innenfor en avrenningshendelse. Disse kan dermed fremstå som uten sammenheng til verdiene før og etter hendelsen, se Figur 6-6. I slike tilfeller vil måleverdiene ofte bli merket som uteliggere og utelatt til tross for at målesystemet har registrert faktisk korrekte måldata.

Det finnes en rekke muligheter til å detektere uteliggere numerisk. I tillegg til eksempelet i Tabell 6-2 henviser vi til håndboka «Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management» (Bertrand-Krajewski, et al., 2021).



Figur 6-6 Uteliggere vs. valg av registreringsintervall, NVE

6.3.3.4 Homogenitetskontroll

Homogenitetskontroll benyttes til å vurdere endringer i måleserien over tid. Inhomogenitet forårsakes gjerne av endringer i målesystemet, og bør vies oppmerksomhet ved lange målekampanjer og stadig måling.

Alle typer endringer i feltets nedbørsmønster, initialtilstand, arealbruk og overvannssystem kan føre til inhomogenitet. Avhengig av årsak, kan slike endringer føre til plutselige sprang eller sakte endringer over lengre tid (trend). Det er nødvendig å gjennomføre datakontroll som omtalt over forut for homogenitetskontrollen. Dette gjør det mulig å utelukke systemfeil og endringer på selve målestedet. Mulige inhomogeniteter bør dokumenteres sammen med tilsvarende data.

6.3.4 Dokumentasjon av datakontroll, korrektur og komplettering

Det bør dokumenteres entydig hvordan de ulike trinnene i datakontrollen er utført. Dokumentasjonen bør omfatte opplysninger om:

- kontrolldato
- resultatene av kontrollen
- valg av kontrollmetode, manuell eller automatisert
- kontrollens omfang, for eksempel hvilken tidsperiode (fra og til) av tidsserien som har blitt kontrollert
- hvem som har gjennomført kontrollen

Det kan bli behov for å rekonstruere data eller korrigere måleserien under datakontrollen som omtalt i avsnitt 6.3.5. Slike korreksjoner merkes som alle øvrige avvik som blir oppdaget under kontrollen. I tillegg må det dokumenteres på hvilken måte eller på hvilket grunnlag datasettet er korrigert eller rekonstruert.

6.3.5 Datakorreksjon og rekonstruksjon

Mulighetene til å korrigere eller rekonstruere data er vanligvis begrenset til kortere tidsperioder. Bertrand-Krajewski & al. (2021) anbefaler følgende fremgangsmåte:

- prøv å bruke perioder med «gode» data uten hull eller feil
- hvis det ikke lar seg gjøre, se etter tidsrom med så «bra» data som mulig
- hvis dette fører til for lite data for analyse, kan en starte med å tette hull og korrigere feilmålinger ved hjelp av interpolasjon
- større datahull, lengre enn noen få tidsskritt, kan rekonstrueres ved hjelp av kjente korrelasjoner med andre målesteder eller med modell

Til rekonstruksjon kan metodene nedenfor egne seg. Metodevalget må begrunnes fra sak til sak. Det anbefales å sjekke metodens egnethet i datamaterialet:

- interpolasjon, nye data beregnes mellom feilfrie data ved hjelp av
 - lineær interpolasjon
 - spline
- regresjon hvor nye data beregnes mot en annen målt variabel. Det anbefales å sette opp regresjonsmodellen for feilfrie data i nærhet til dataene som skal kompletteres:
 - lineær regresjon
 - ikke-lineær regresjon
 - multippel regresjon

7 Måleteknologi

Måledata etableres gjennom måling. Transformasjonen fra målt fysisk tilstand til faktisk måleresultat går gjennom fysiske, og noen ganger matematiske, prosesser som kan påvirke måleresultatet. Den målte fysiske variabelen overføres som regel fra en sensor til en evalueringsenhet eller en datalogger via et målesignal. Elektromagnetisk støy kan påvirke signalet, og dermed det endelige måleresultatet.

Noen variabler, som for eksempel vannstand, kan bestemmes direkte. Andre, deriblant vannføring, bestemmes indirekte fra målte variabler ved hjelp av matematiske beregninger. Måleresultatet består av den bestemte verdien og en tilsvarende enhet, for eksempel 0,5 m eller 0,3 l/s.

7.1 Måling som overføringsprosess

Måling kan forstås som en overføringsprosess som konverterer kontinuerlige prosessvariabler til tidsbestemte digitale data. Under registrering konverteres prosessvariablene til et kontinuerlig målesignal. Målesignalet blir vanligvis filtrert for interferens før konvertering fra analog til digital form. Konverteringen skjer diskontinuerlig, men med svært korte tidsintervaller. Det digitale signalet kan derfor betraktes som kvasikontinuerlig.

I etterkant blir det digitale målesignalet overført til måleverdier ved hjelp av karakteristiske kurver som beskriver sammenhengen mellom sensorens tilstand og den fysiske variabelen, se Figur 7-1. Konverteringen baserer seg som regel på en statistisk sammenheng. Samtidig logging av individuelle måleverdier og tidspunkter gjør måleverdiene tilgjengelig som digitale tidsserier.

Den karakteristiske kurven til et målesystem gjenspeiler forholdet mellom verdien til den fysikalske variabelen og måleresultatet. Karakteristikken er vanligvis beskrevet i form av en kontinuerlig funksjon, $y = f(x)$ eller en verditabell, (x_i, y_i) . Funksjonen kan være lineær eller ikke-lineær. Karakteristiske kurver må være så upåvirket som mulig av tid og ytre påvirkning.

Det skilles mellom følgende systematiske avvik fra målkararakteristikken, se Figur 7-1:

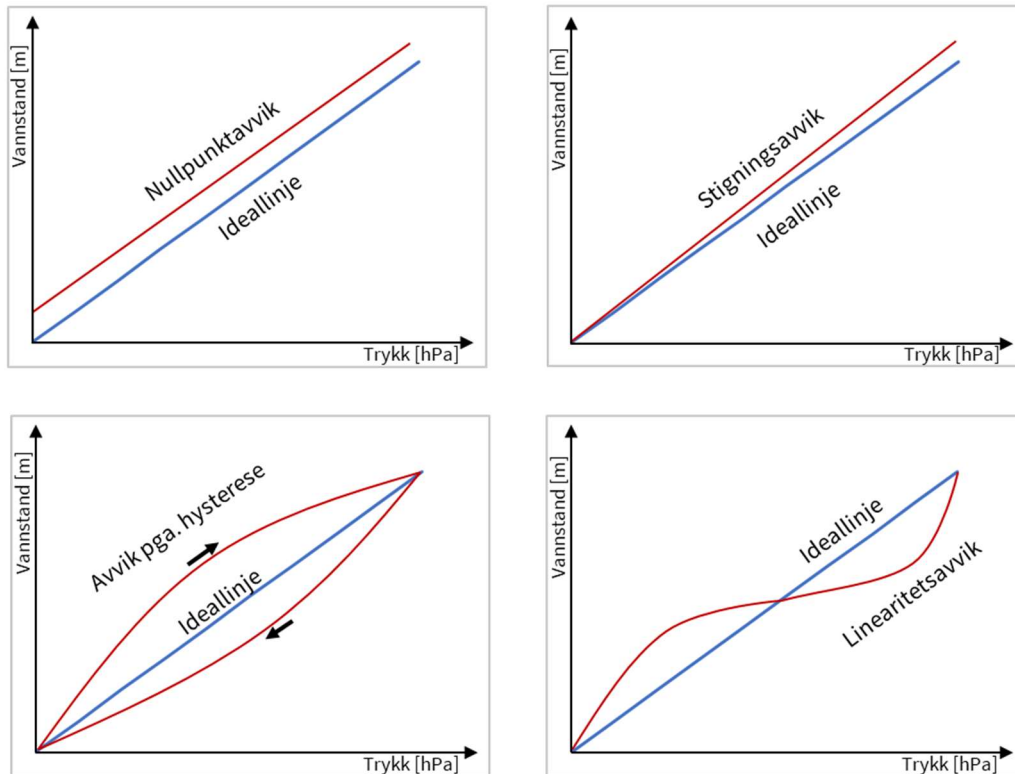
Nullpunktavvik beskriver avviket til den målte verdien fra en referanseverdi lik null. Det finnes sensorer som har en tendens til å utvikle nullpunktavvik over tid. Slik oppførsel kalles drift.

Drift er endringer i måleresultatet for en konstant inngangsvariabel. Dette er ikke vist i Figur 7-1. Drift kan påvirkes av både tid og temperatur eller en kombinasjon av begge.

Stigningsavvik beskriver avviket til stigningen til en karakteristisk kurve fra referanseverdien.

Hysteres inntreffer når et målesystem leverer ulike konverteringsforløp når den faktiske verdien stiger eller synker, f.eks. hos trykceller.

Linearitetsavvik betegner det systematiske avviket mellom den reelle ikke-lineære karakteristikken og den lineære karakteristiske funksjonen som legges til grunn. Slike avvik kan observeres hos blant annet trykksensorer.



Figur 7-1 Systemkarakteristiske kurver ved konvertering fra faktisk inngangsvariabel til måleresultat, NVE etter DWA (2011)

Datalagring og diskretisering

Målesystemer leverer kvasikontinuerlige måledata. For å gjøre datamengden håndterbar er det nødvendig å øke registreringsintervallet. Dette kalles diskretisering. Diskretiseringen deler opp kontinuerlig skiftende måleverdier til individuelle, kronologisk stigende enkeltverdier⁷. Registreringsintervallet må velges slik at prosessen som måleoppgaven beskriver lar seg reproducere. Det skilles generelt mellom to registreringsalternativer:

- tidsdiskret registrering, lagring med faste tidsintervaller
- verdiskret registrering, lagring med faste verdiintervaller

⁷ Diskrete måleverdier

Velg kort tidsoppløsning til urbanhydrologiske formål

Det er mulig å kombinere begge alternativer. Til urbanhydrologiske formål anbefaler vi en tidsoppløsning på et halvt til to minutter (DWA, 2011). Overvannssystemer responderer såpass dynamisk at lengre tidsintervaller ikke reproducerer prosessene som skal måles. Datamengden kan imidlertid begrenses ved hjelp av event-basert registrering. Metoden går ut på at måldata registreres med et forholdsvis grovt tidsintervall. Straks måleverdien overskrider en gitt grenseverdi endres registreringsintervallet. På denne måten vil f.eks. vannføringen under en regnhendelse registreres med minuttoppløsning, mens den i tørre perioder kun registreres hvert kvarter.

I tillegg til diskretiseringen, påvirkes måleverdiene av måten de fastsettes og lagres på. Fortløpende lagring av tidsbestemte enkeltverdier gir god prosessforståelse, men prosessdynamikken blir sårbar for kortsiktige svingninger i måleverdiene. Gjennomsnittsmåling over registreringsintervallet demper slike kortsiktige svingninger, men ivaretar ikke prosessdynamikken godt, spesielt ved lengre registreringsintervaller. Noen sensorer etablerer en gjennomsnittsverdi få sekunder før registrering. Dette demper kortsiktige svingninger i måleverdiene uten å forringe prosessdynamikken.

Vi anbefaler ikke å registrere glidende gjennomsnitt over flere registreringsintervaller for å dempe svingninger i måldata. Beregning av glidende gjennomsnitt kan være svært nyttig i dataanalyse. Ved registrering av rådata vil glidende gjennomsnitt imidlertid forfalske prosessdynamikken, og gjøre det vanskelig å vurdere kvaliteten på målestedet.

7.2 Måling av vannstand

Vannstand er inngangsparameter ved beregning av tverrsnittareal til vannføringsmåling eller beregning av fordrøyningsvolum. For stadig og permanent vannstandsmåling benyttes stort sett sensorer av typen trykk, ultralyd, radar eller flottør. For måling med kortere varighet og kontrollmåling er derimot peiling bedre egnet.

7.2.1 Trykksonde

Det finnes ulike typer trykksonder. Tabell 7-1 lister opp fordeler og ulemper ved ulike typer trykksonder. Trykksonder bestemmer vannstanden ved hjelp av en sensor som vanntrykket virker på via en beskyttende membran. Vannstanden bestemmes indirekte fra antagelser om den hydrostatiske trykkfordelingen i vannsøylen og vannets tetthet.

Vannstandsmålinger er sensitive for hydrostatisk trykk. Hydrostatisk trykk, $p(h)$ er trykket, p i en væske som dannes under påvirkning av jordens tyngdekraft ved vannstand, h . Trykket varierer med vannets tetthet. Ved konstant tetthet er trykket proporsjonalt med vannsøylens høyde som hviler på trykksensoren. Vannets tetthet påvirkes forholdsvis lite av temperatur. Til tross for at tetthetsdifferansen mellom 4 og 20 °C kun utgjør 1,7 ‰, kan sensorer temperaturkompenseres aktivt eller passivt. Under spesielle forhold, for eksempel ved innblanding av luft ved sterk turbulens, kan tettheten påvirkes i betydelig grad.

Den hydrostatiske trykkfordelingen påvirkes av strømninger i væsken. Dette inntreffer gjerne når væskestrømmen påvirkes slik at den ikke beveger seg i parallelle linjer. Strømningsbildet vil i slike tilfeller komprimeres eller strekkes slik at det oppstår over- eller undertrykk. Trykksensorer installert i raskt rennende vann kan være trykkpåvirket i betydelig grad. Det er derfor viktig at sensoren installeres mest mulig beskyttet mot strømninger i vannet.

Mest utbredt er sensorer med relativ trykkmåling. På den ene siden av membranen hviler et atmosfærisk trykk. På den andre siden hviler det hydrostatiske trykket til vannsøylen som skal måles. Konfigurasjonen gjør det nødvendig å kompensere for lufttrykkssendringer. Trykkutjevningen blir vanligvis gjort gjennom en tynn lufteslange i sensorkabelen. Det er viktig å forvise seg om at lufteslangen ikke knekkes eller blokkeres av fukt og kondens. Feil ved trykkutjevningen kan lede til grove måleavvik. Lufteslangen er derfor som regel utstyrt med luftavfukting.

Det finnes også målesystemer som kompenserer for atmosfærisk trykk ved hjelp av en ekstra trykkellet montert over vannoverflaten. Slike systemer har verken behov for lufteslange eller avfukting.

Trykksensorer kan være sårbare for drift

Trykksensorers sensitivitet kan endre seg over tid. Slik *nullpunktsdrift* motvirkes med jevnlig kontrollmåling, og om nødvendig, kalibrering og justering av sensoren.

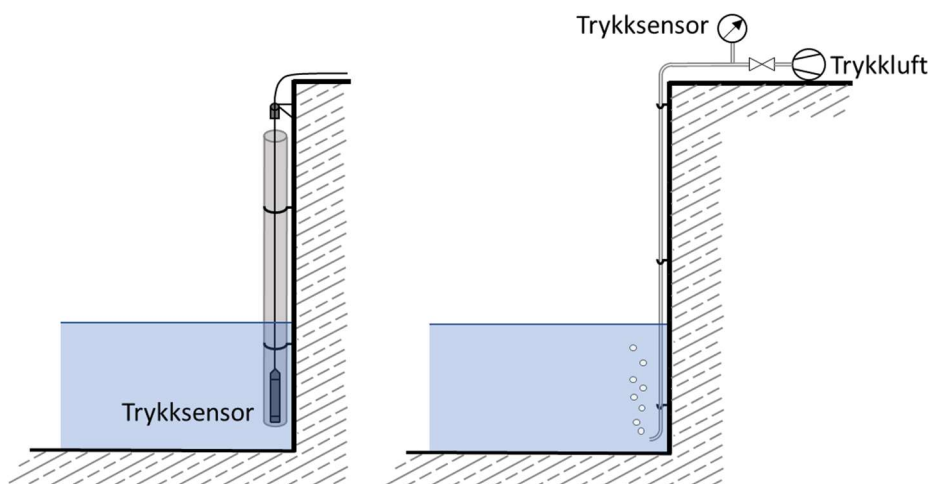
Nedsenkbar trykksensor

I urbanhydrometri er det vanlig å benytte nedsenkbare trykksonder som henger i føringsrør på en strekkfri kabel i vannet, se Figur 7-2 (v). Den vertikale posisjonen til sensoren må helst ikke kunne endres og være reproducerbar. Føringsrøret beskytter i noen grad mot mekanisk påvirkning, forurensning. I tillegg demper føringsrøret virkningen av dynamiske trykkendringer. Det er derfor viktig at trykkcellen dekkes av rørveggen, spesielt ved måling i strømmende vann.

Boblerør

Boblerør fungerer i kombinasjon med en trykkmåler utenfor selve målemediet. En liten gasstrøm⁸ ledes ned i vannet via et tynt boblerør⁹. Trykket måles ved åpningen av gassledningen som vist i Figur 7-2 (h). Boblerørets åpning må derfor festes godt, og i en definert høyde som kan reproduceres. Det er anbefalt å legge boblerør med jevn fall slik at kondensvann ikke samler seg på ett sted. Boblerør kan være et godt alternativ ved fare for innfrysing eller isdekking.

Ved vannføringsmåling benyttes ofte systemer hvor trykksensoren og hastighetssensoren er kombinert i en slags sensorkropp. Kombinerte sensorer blir vanligvis montert på bunnen.



Figur 7-2 Nedsenkbar trykksensor montert i føringsrør (v) og nivåmåling med boblerør (h), NVE etter Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2001).

⁸ Luft eller nitrogen.

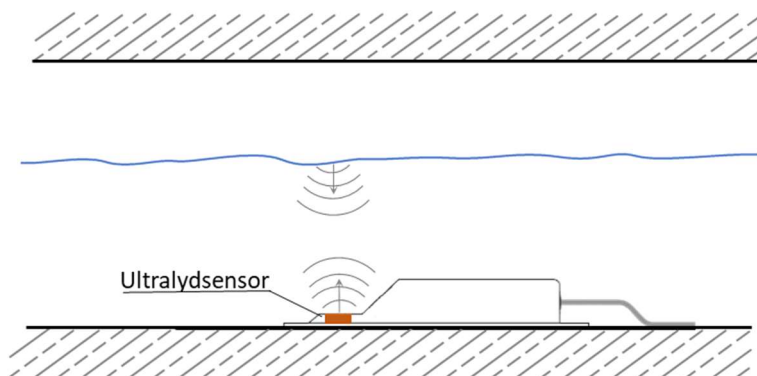
⁹ Diameter 5 – 15 mm.

Tabell 7-1 Fordeler og ulemper med ulike typer trykksensorer

Fordeler	Ulemper
Nedsenkbar trykksensor	
- ingen dødsone - forholdsvis lav investeringskostnad - lavt energiforbruk - beskyttet montering, for eksempel i føringsrør	- kontakt med mediet, følsom for tilsmussing - krever regelmessig vedlikehold. - måleverdier kan drifte - kan påvirkes av høy strømningshastighet - kan påvirkes av kondens i trykkutjevningsslange - tåler som regel ikke innfrysning
Boblerør med trykksensor	
- ingen dødsone - sensoren er ikke i direkte kontakt med mediet - tåler frost og innfrysning (slutter å måle under innfrysning)	- måleverdier kan drifte - kondens i sensorledningen kan påvirke måleverdiene (krever kontinuerlig fall i boblerør) - kan påvirkes av høy strømningshastighet

7.2.2 Ultralyd ekkolodd

Ultralydsensorer måler transittiden til lydpulser gjennom et medium. Lydpulsene reflekteres fra grenselagene mellom luft og vann, vann og luft eller vann og terreng. Måling foregår ved at ekkoloddet sender ut lydpulser og registrerer tiden som går til pulsene returnerer fra grenselaget, se Figur 7-3. Ettersom lydpulsenes hastighet gjennom ulike medier er kjent, kan avstanden til grenselaget, og dermed vannstanden, bestemmes.



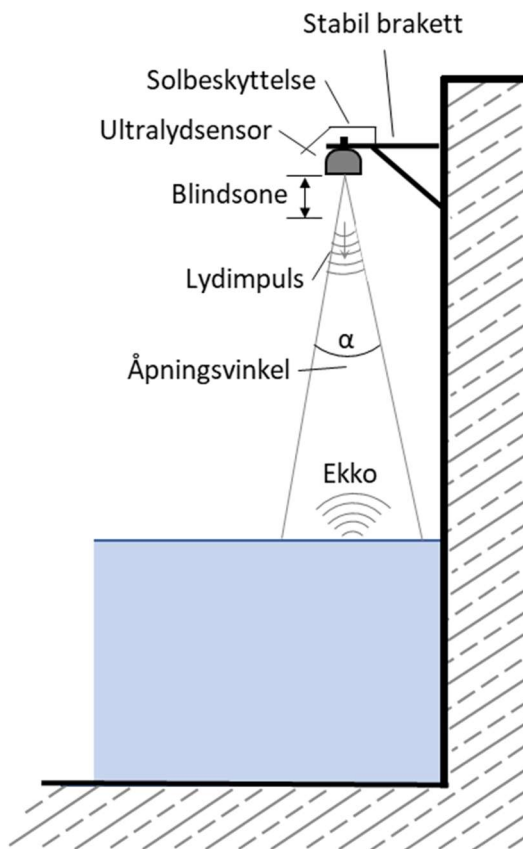
Figur 7-3 Nivåmåling med ultralyd i vann, NVE

Ultralydsensorer påvirkes av sol og varme

Hastigheten på lydimpulsens utbredelse er temperaturavhengig. Dette gjør det nødvendig å korrigere vannstandsmålinger ved hjelp av temperaturmålinger. Temperaturen blir gjerne målt i selve ekkoloddsonden. Dersom sensoren er montert på luftsiden, kan innfallende sollys føre til oppvarming og betydelige måleavvik. Det er derfor viktig å sikre tilstrekkelig skjerming dersom sensoren blir eksponert for sol.

Åpningsvinkel og feilekko

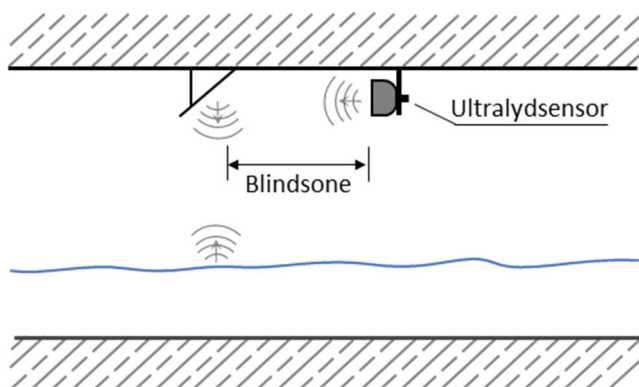
Ultralydsensoren sender lydimpulser innenfor en begrenset åpningsvinkel, se Figur 7-4. Spesielt ved installasjon i kummer er det ønskelig å ha så liten åpningsvinkel som mulig. For stor åpningsvinkel kan slike steder føre til ekko fra andre installasjoner og vegger. Miljøpåvirkninger i form av vind, spindelrev under sensoren, skum, drivgods og bølget vannoverflate kan også føre til feilekko.



Figur 7-4 Nivåmåling med ultralyd i luft, NVE etter Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2001)

Blindsone

Blindsone er minsteavstanden som må til mellom sensoren og vannoverflaten for at systemet skal virke. Blindsone avhenger av målemedium, sensormodell og måleområde, men ligger vanligvis i området 5-15 cm. Figur 7-5 viser hvordan vinkelspeil kan benyttes til å redusere blindsone.



Figur 7-5 Nivåmåling med ultralyd og vinkelspeil, NVE

Ultralydsensorer er stabile

Ultralydsensorer drifter ikke, og egner seg godt for langvarige måleoppgaver. Sensorene er relativt enkle å kalibrere, gjerne ved å måle avstanden mellom sensoren og vannoverflaten, eller ved hjelp av en plate med definert avstand til sensoren.

Tabell 7-2 Fordeler og ulemper med ulike typer ultralydsensorer

Fordeler	Ulemper
Ultralyd luft	
• sensor ikke i kontakt med mediet • enkel installasjon og vedlikehold • liten driftsinnsats • liten kalibreringsinnsats • rimelig målesystem	• blindsone, kan reduseres med speil Fare for feilekko ved: • bølget eller skrå vannoverflate • skumdannelse • sol og varierende temperatur • edderkoppnett i måleruten • for stor åpningsvinkel • kraftig vind
Ultralyd vann	
• enkel konstruksjon • enkel installasjon • enkelt vedlikehold	Fare for feilekko ved: • bølget eller skrå vannoverflate

• liten driftsinnsats • liten kalibreringsinnsats	• tydelige temperaturgradienter, f.eks. ved stående vann i bassenger • høy andel luft i vannet • sensitiv for begroing, sedimenter og tetting av sensor
--	---

7.2.3 Radar og mikrobølge ekkolodd

Radar og mikrobølge ekkolodd fungerer konseptuelt på samme måte som lydekkolodd. Tabell 7-3 viser en oversikt over fordeler og ulemper med radarsensorer.

Radarmålinger påvirkes i liten grad av ytre forhold

Motsatt til lydbølgene i kHz område, som ultralydsensorene baserer seg på, er radarmetoden stort sett upåvirket av egenskapene til mediet som bølgene passerer. Dette skyldes at radarsensorer sender ut bølger i GHz område. Dermed påvirkes radarmåling verken av temperatur eller vind, og tåler skum på vannoverflaten bedre enn ultralydmåling. Avhengig av sensortype, gjør måleprinsippet og bølgelengden det mulig å redusere eller fjerne blindsonen helt. Radarmåling fremstår dermed som et godt alternativ til ultralydmåling, spesielt under vanskelige installasjons- og måleforhold.

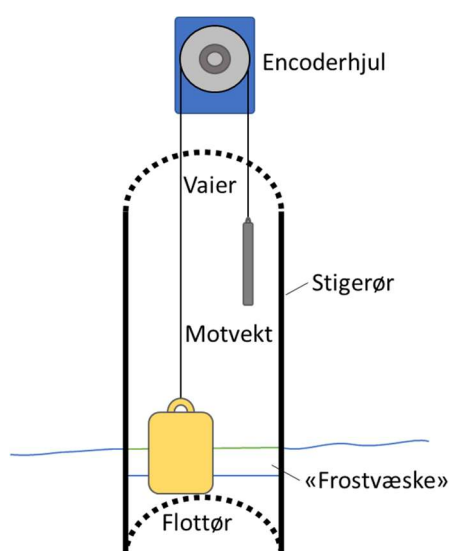
Tabell 7-3 Fordeler og ulemper med radarsensorer

Fordeler	Ulemper
• sensor ikke i kontakt med mediet • upåvirket av svingninger i temperatur, tåke, vind og skum • enkel installasjon • enkelt vedlikehold • liten kalibreringsinnsats • forholdsvis rimelig målesystem • liten eller ingen blindsoner	• minsteavstand mellom sensor og vannflate • mer energikrevende enn ultralydsensorer Fare for ekkofeil ved: • installasjon av stiger og utstyr under sensoren • bølget eller skrå vannoverflate

7.2.4 Flottør

Flottørmåling innebærer fysisk vannstandsmåling. Flottøren er koblet til et lodd via en wire som føres over et encoderhjul¹⁰ (Figur 7-6). Flottøren heves og senkes med vannstanden og dreier dermed encoderhjulet. Encoderen måler hvordan hjulet roterer, og dermed kan vannstandsendingen registreres.

Flottørmåling forutsetter at flottøren befinner seg i et frostfritt rør eller kum med stillestående vann. Kan frostfriheten ikke garanteres, må tilsvarende væske tilsettes i stigerør som beskytter mot innfrysning (Figur 7-6). Ved flottørmåling gjelder stort sett de samme fysiske hensynene som for trykkmåling. Flottørmåling er betydelig utsatt for åpninger som er rettet med- eller motstrøms, spesielt ved høye strømningshastigheter. Bevegelser eller strømninger på vannoverflaten kan også medføre måleavvik.



Figur 7-6 Nivåmåling med flottør, NVE

Tabell 7-4 Fordeler og ulemper med flottørmåling

Fordeler	Ulemper
• lite utsatt for tilsmussing • tilnærmet upåvirket av ytre forhold som sol, tåke, vind og temperaturer over frysepunktet • liten kalibreringsinnsats	• må beskyttes mot innfrysning • sårbar mekanikk, f.eks. wire som hopper av encoderhjul • forholdsvis stor byggteknisk innsats til stigerør eller kum • påvirkes av høye strømningshastigheter

¹⁰ Roterende pulsgiver

7.2.5 Faktorer som påvirker vannstandsmåling

Tabell 7-5 viser en samlet oversikt over hvordan miljøvariabler påvirker ulike typer vannstandsmålere.

Tabell 7-5 Virkningen av miljøvariabler på ulike typer nivåmålere

Påvirkning	Relevans					
	Radar	UL luft	UL vann	Nedsenket trykksonde	Boblerør	Flottør
Hysteres, drift	○	○	○	●	●	(●)
Soleksponering på sensor	○	●	○	○	○	○
Temperturlagdeling i vannet	○	○	●	●	●	○
Temperaturforskjeller og temperaturlagdeling over vannet	○	●	○	○	○	○
Inhomogen tetthetsfordeling (luftbobler, salt i vannet)	○	○	●	●	●	○
Sensor installert med loddavvik til vannoverflaten	●	●	○	○	○	(●)
Skum på vannoverflaten	(●)	●	○	○	○	●
Bunnsedimenter	○	○	●	(●)	(●)	○
Bølgete vannoverflate	●	●	(●)	(●)	(●)	(●)
Profiler med høy fall	●	●	●	●	●	●
Avløp under trykk, helt fylt profil	●	●	●	○	○	●
Høy strømningshastighet	○	○	(●)	●	●	●
● Påvirkning, (●) Liten påvirkning, ○ Ingen påvirkning						

7.3 Måling av vannføring

Parameter vannføring, Q er volum ført gjennom et strømtverrsnitt i løpet av en tidsenhet. Strømtverrsnittet kan være i form av helt eller delvis fylte rør, åpne kanaler eller naturlige vannløp. Typiske måleenheter for vannføring er l/s, m³/s eller m³/h.

7.3.1 Hydraulisk teori

Vannføring forstås som mediets gjennomsnittshastighet, v_g multiplisert med strømtverrsnittarealet, A_{st} . Kontinuitetsligningen gir følgende sammenheng mellom vannføring, gjennomsnittshastighet og vått strømtverrsnittareal:

$$Q = v_g \cdot A_{st} \quad [3]$$

Hvor

Q	Vannføring
v_g	Gjennomsnittshastighet i strømtverrsnittet
A_{st}	Strømtverrsnittareal

7.3.1.1 Ulike strømningstilstander

Stasjonær og ikke-stasjonær avrenning

Stasjonær avrenning kjennetegnes ved stabil vannføringsmengde over tid. Ved ikke-stasjonær avrenning endres derimot vannføringsmengden over tid.

Urbanhydrologiske avrenningsprosesser kjennetegnes av dynamiske og raskt endrede hydrauliske forhold. En kan derfor vanligvis anta ikke-stasjonære forhold for de fleste sammenhenger som berører overvann. For enkelhets skyld anses strømningsprosessene likevel som oftest å være kvasistasjonære¹¹. Dette gjør det mulig å benytte beregningsmetoder som egner seg for stasjonære forhold.

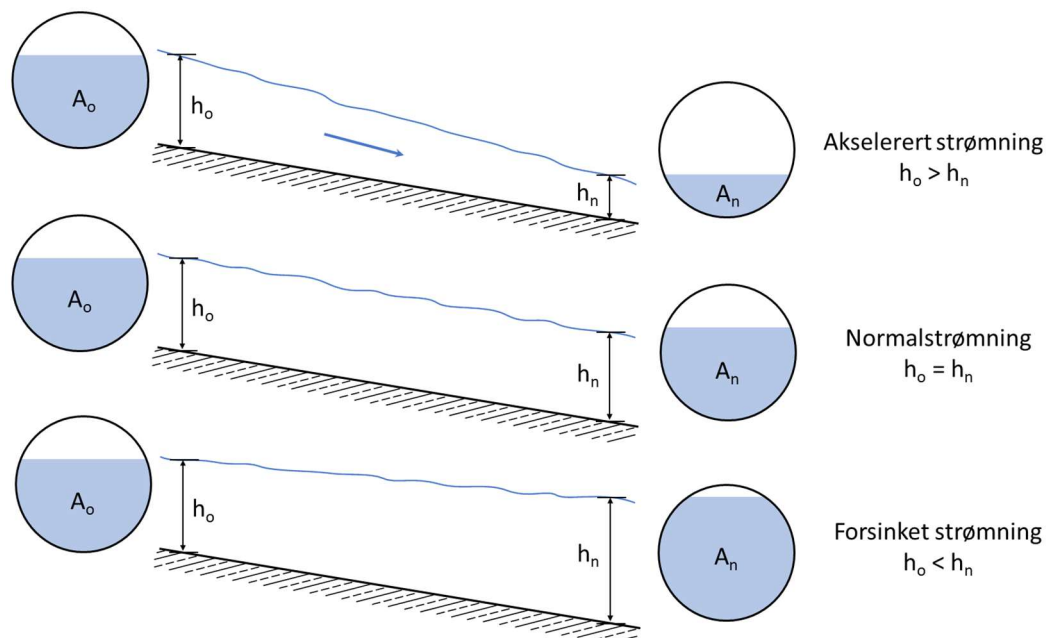
Uniform og ikke uniform strømning

For stasjonære avrenningsprosesser kan en videre skille mellom uniform og ikke-uniform strømning.

¹¹ Over et begrenset tidsrom

Ved uniform strømning er de hydrauliske betingelsene for vannstand, areal, hydraulisk radius og strømningshastighet stabile. Under slike forhold lar det seg gjøre å etablere et entydig beregningsmessig Q/h -forhold (normalstrømning). Uniform strømning kan ikke antas i tilknytning til overvann.

Ikke-uniform strømning kjennetegnes ved endringer i profil, bredde, dybde eller fall. Figur 7-7 viser hvordan raskt endrede hydrauliske betingelser kan føre til bakvannseffekter og vannstandsgradienter. Strømningen blir dermed enten akselerert eller forsinket slik at det blir vanskelig å etablere et entydig Q/h -forhold. I spesielle tilfeller kan en omtrentlig Q/h -kurve bestemmes gjennom forutgående langtidsmålinger. I slike tilfeller bestemmes vannføringen via en nivåmåling, men ukjente påvirkninger som opptrer i måleperioden medfører som regel høy grad av usikkerhet. Det er vanligvis nødvendig å måle både vannstand og strømningshastighet for å kunne bestemme vannføringer ved hjelp av kontinuitetsligningen. Det finnes bare få tilfeller hvor det er mulig å benytte seg av en pålitelig Q/h -korrelasjon f.eks. ved hydrauliske målemetoder som vist i avsnitt 7.3.3.



Figur 7-7 Vannspeil i åpne renner, uniform og ikke uniform strømning, NVE etter DWA (2011)

Strømmende og strykende strømning

Strømningstilstanden i åpne renner og delvis fylte rør kan skilles i strømmende (subkritisk) og strykende (superkritisk) avrenning, som vist i Figur 7-8. Tilstanden er hovedsakelig avhengig av fallet i rennen eller røret. Forenklet kan en si at samme vannføring, Q kan forekomme ved høy strømningshastighet og lav vannstand (stort fall) eller ved lav strømningshastighet og stor vannstand (lavt fall).

Strømningstilstanden kan bestemmes ved hjelp av Froudetallet, Fr som etablerer en sammenheng mellom vannets hastighet, v vannstand, h og gravitasjonen, g . Froudetallet er gitt ved:

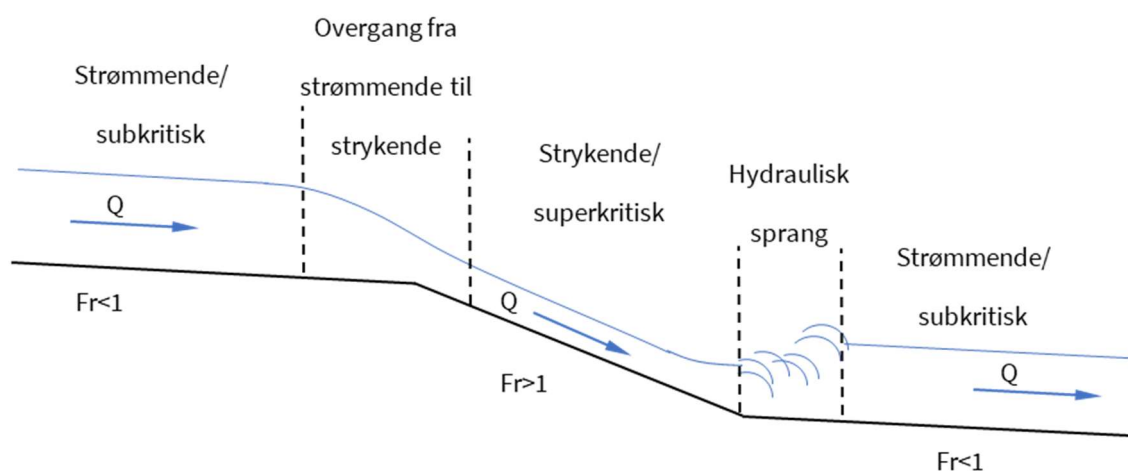
$$Fr = v / \sqrt{(g \cdot h)} \quad [4]$$

Hvor

Fr	Froudetall
v	Strømningshastighet
g	Gravitasjonskonstant
h	Vannstand

Ved subkritisk strømning, $Fr < 1$, er bølgehastigheten større enn strømningshastigheten, og strømningen påvirkes av forstyrrelser både oppstrøms og nedstrøms. Ved superkritisk strømning, $Fr > 1$, er derimot bølgehastigheten lavere enn strømningshastigheten. Strømning påvirkes av forstyrrelser kun nedstrøms.

Overgang fra strømmende til strykende avrenning skjer ved gradvis avtakende vannstandsending. Motsatt skjer overgangen fra strykende til strømmende avrenning gjennom plutselige hydraulisk sprang, som vist i Figur 7-8.



Figur 7-8 Strømningstilstander i åpne renner og delvis fylte rør, NVE

Hydraulisk sprang

Steder hvor en kan forvente hydraulisk sprang egner seg dårlig for måling av strømningshastighet og vannstand. På slike steder er den nøyaktige plasseringen av spranget ofte uforutsigbart, og spranget vil kunne flytte på seg ved endret vannføring. I selve spranget gir høy turbulens og kaotiske strømningsmønstre umulige forhold for de fleste måleinstrumenter. Slike forhold gir imidlertid gode muligheter for å fastsette

vannføringen ved hjelp av fortynningsmålinger som omtalt i avsnitt 7.3.7. I hydrauliske sprang blir nemlig mediet og sporstoffet spesielt godt blandet.

I tillegg til høydeendringer kan terskler forårsake overganger fra strømmende til strykende forhold. Bunnmonterte sensorer vil kunne ha samme effekt. I slike tilfeller er det viktig at nivå- og hastighetsmålinger blir utført på samme sted, se Figur 7-9. I motsatt fall vil kontinuitetslikningen kunne gi store feil i vannføringsberegningen.

Strømmende avrenning er generelt best egnet for måling av strømningshastighet. For det første kan det være krevende å måle hastigheter i områder med høy turbulens og høy strømningshastighet (strykende forhold). For det andre er nivåmåling mer krevende på grunn av høy strømningshastighet, turbulens og ujevn vannoverflate. Måleusikkerheten introduseres allerede ved kalibrering av vannstandsmålingen. Selv små avvik i nivåmålingen kan påvirke den beregnede vannføringen i betydelig grad sammenliknet med målesteder med lavere strømningshastighet og forholdsvis høy vannstand (strømmende forhold).

Praktiske hensyn ved plassering av målesystemer

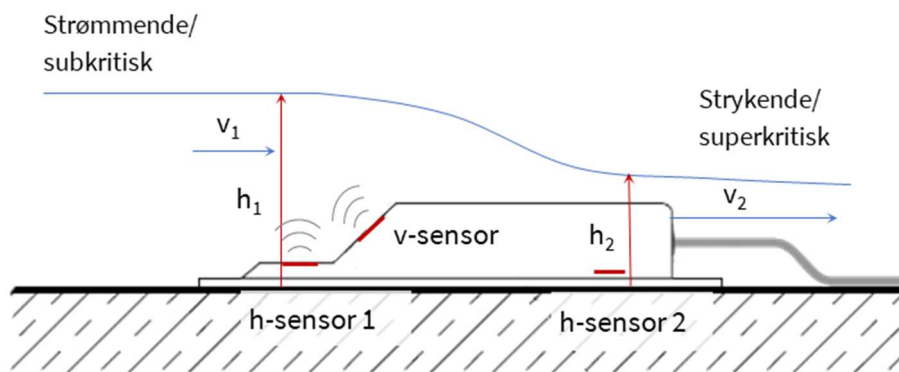
Figur 7-9 viser måling med hastighetssensor, *v-sensor 1*, og nivåsensor, *h-sensor 1*, på samme sted. Ved bruk av kontinuitetslikningen kan vannføringen beregnes ved:

$$Q = v_1 \cdot A_1(h_1) \quad [5]$$

Hvor

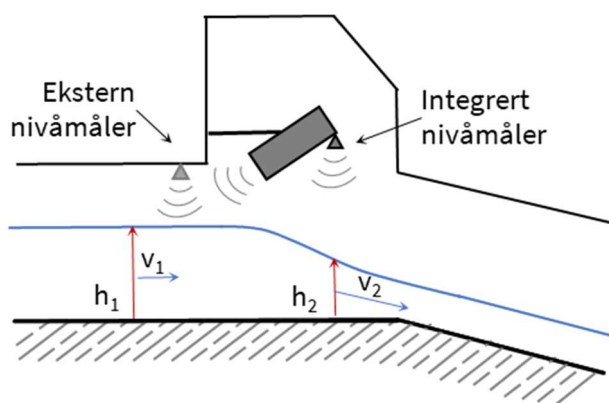
Q	<i>Vannføring</i>
v_1	<i>Strømningshastighet ved sensor 1</i>
A_1	<i>Strømtverrsnittareal ved sensor 1</i>
h_1	<i>Vannstand ved sensor 1</i>

Data fra *h-sensor 2* benyttes ikke i denne sammenheng ettersom tilsvarende strømningshastighet, v_2 ikke blir målt i dette opplegget. Ved høyere eller lavere vannføring kan overgangen fra strømmende til strykende strømning flyttes opp- eller nedstrøms slik at målingene fra *h-sensor 2* kan benyttes til vannføringsberegning. Dette forutsetter imidlertid at vannstanden er parallell med fallet og dermed at vanndybden er den samme på begge sensorene.



Figur 7-9 Bunnmonterte sensorer kan endre strømningstilstanden, NVE

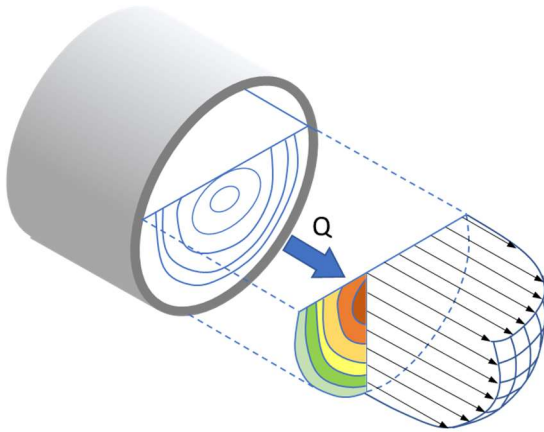
Tilsvarende viser Figur 7-10 et vannføringsmålesystem med kombinert måling av strømningshastighet og nivå. Systemet er montert i en kum med endret fall. Fallendringen fører til ikke-uniform strømning som følge av akselerert strømning og redusert vannstand. Dette gjør det nødvendig å ta i bruk en ekstern nivåmåler.



Figur 7-10 Utfordringer med kombinerte sensorer og endret fall, NVE

7.3.1.2 Hastighetsfordeling

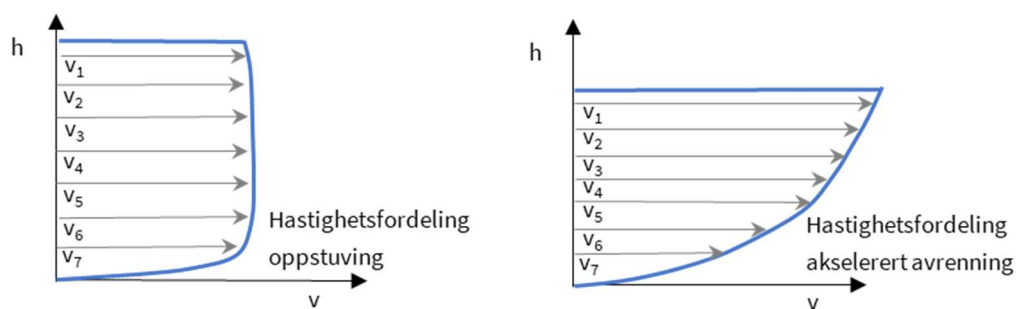
I åpne renner, gjerne etter lange uforstyrrede strømningsavsnitt, etableres som regel en nærmest aksialt symmetrisk hastighetsprofil som vist i Figur 7-11. I motsetning til helt fylte rørledninger er ikke hastighetsprofilen radielt symmetrisk, ettersom friksjonen på vannoverflaten er bortimot ubetydelig.



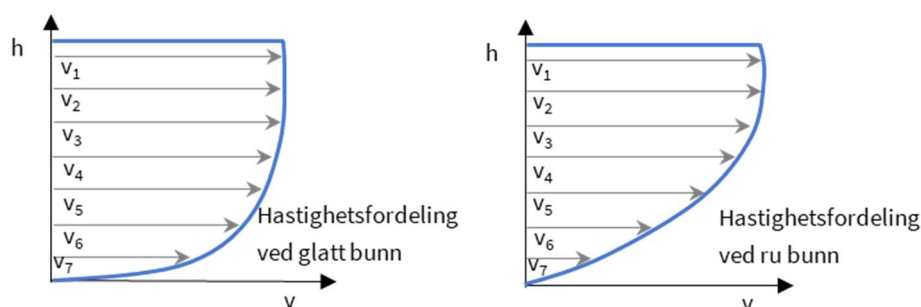
Figur 7-11 Aksialt symmetrisk hastighetsfordeling i delvis fylte rør, NVE etter DWA (2011)

Noen mye brukte metoder for bestemmelse av strømningshastigheten, spesielt metoder for hastighetsmåling i deler av strømtverrsnittet, se avsnitt 7.3.6, krever kunnskap om hastighetsprofilens utforming. Å måle hastighetsfordelingen over hele strømtverrsnittet er i praksis sjelden mulig. Derfor måles strømningshastigheten gjerne på ett eller noen steder i strømtverrsnittet, hvorpå gjennomsnittlig strømningshastighet, v_g beregnes. Nøyaktigheten til den beregnede vannføringen er dermed ikke bare avhengig av nøyaktigheten til selve hastighetsmålingen, men også i stor grad av beregningen av gjennomsnittlig strømningshastighet. Det funksjonelle forholdet som kreves vil variere fra målested til målested, og avhenger blant annet av følgende faktorer:

- fyllingsgrad
- strømingstilstand
- tverrsnittets utforming
- ruheten til bunn og vegger, se Figur 7-13
- påvirkninger fra nedstrøms som f.eks. oppstuvning, se Figur 7-12



Figur 7-12 Hastighetsfordeling i åpne renner og rør med påvirkning fra nedstrøms, NVE



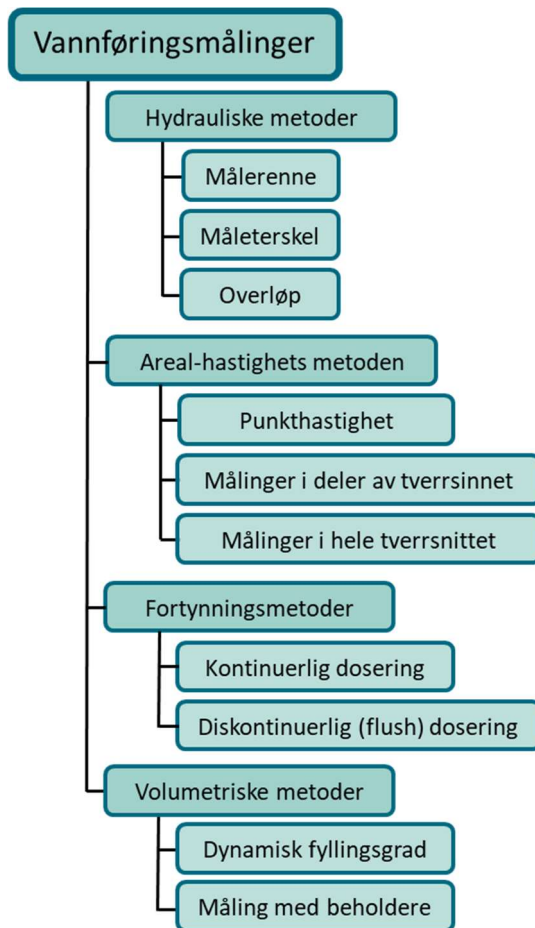
Figur 7-13 Hastighetsfordeling i åpne renner og rør med ulik ruhet, NVE

7.3.2 Vannføring kan ikke måles direkte

Vannføring kan stort sett ikke måles direkte. Det er derfor nødvendig å måle andre variabler og bestemme vannføringen ved hjelp av passende beregningsmetoder. Figur 7-14 viser ulike metoder som egner seg til å fremskaffe vannføringsdata. Alle de ulike metodene egner seg derimot ikke for alle bruksområder og betingelser.

Målemetoder må fange opp endringer i vannføringen tilstrekkelig raskt

Det er nødvendig at målemetodene som benyttes er i stand til å reproducere den urbanhydrometriske dynamikken på en god måte. Dette innebærer at måleinstrumentet må kunne detektere plutselige vannføringsendringer. For å få til dette er det ønskelig at målesystemet evner å vise den nye referanseverdien med et avvik innafor $\pm 10\%$ innen 10 sekunder og med et avvik innafor $\pm 1\%$ innen 20 Sekunder (DWA, 2011).



Figur 7-14 Vanlig brukte målemetoder for bestemmelse av vannføring, NVE

7.3.3 Hydrauliske metoder

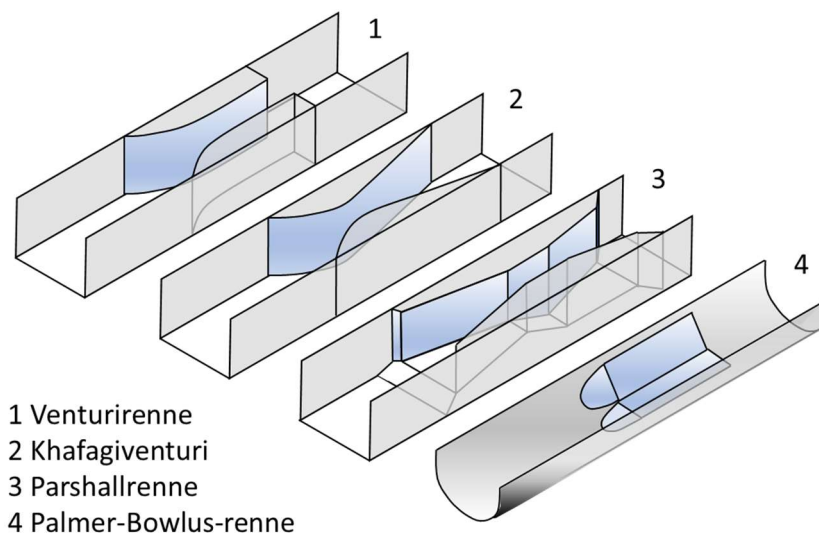
Det er under bestemte forhold mulig å etablere vannføringskurver som beskriver entydig sammenhengen mellom vannstand og vannføring. Det er da viktig å forsikre seg om at strømforholdene tilfredsstiller kravene til den hydrauliske metoden.

Flertallet av målemetodene i Figur 7-14 benytter seg av at vannet tvinges gjennom grensedybden ved hjelp av et redusert strømtverrsnitt eller over en terskel. Dette resulterer i en entydig bestemt sammenheng mellom vannføring og en lett målbar vannstand. Forutsetningen for bruk av hydrauliske metoder er subkritiske strømningsforhold oppstrøms, som kan påvises ved bruk av Froudetallet, som skulle være mindre enn 0,5 (Morgenschweis, 2018).

7.3.3.1 Målerenne

Målerenner snevrer inn strømtverrsnittet slik at det skapes en overgang fra strømmende til strykende forhold, se Figur 7-15. Det etableres dermed en sammenheng mellom vannføringen og vannstanden oppstrøms innsnevringen. Målerenner er for det meste ferdigproduserte elementer som monteres etter

produsentens anvisning. Det eksisterer ingen analytisk metode til å beregne vannføringskurven. Vannføringskurven må dermed bestemmes empirisk, og egenproduserte renner må kalibreres. Måleområdet er som regel relativt lite, med typisk Q_{max} / Q_{min} i størrelsesordenen 10 - 20 (DWA, 2011).



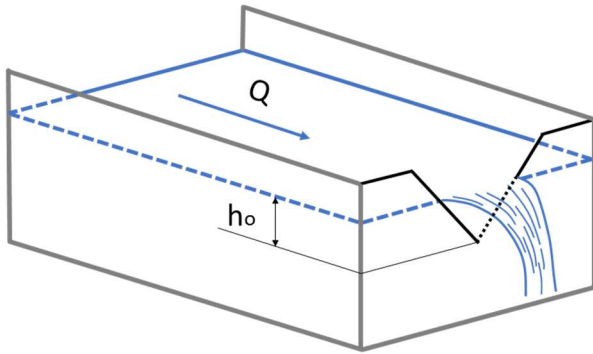
Figur 7-15 Noen ulike typer målerenner – NVE etter DWA (2011)

Tabell 7-6 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med målerenne

Betingelser for måling	
ISO 5167-4:2022, ISO 9826:1992, ISO 4359:2013	
- kontinuerlig målemetode - påvirkning fra nedstrøms må kunne utelukkes - produsentens inn- og utløpsbetingelser må overholdes	
Fordeler	Ulemper
- kun nivåmåling gir minimert måleavvik - enkel drift og vedlikehold - ferdig produserte renner krever ikke kalibrering etter installasjon	- stort plassbehov - begrenset måleområde - utsatt for sedimentering oppstrøms - krever byggeteknisk innsats - som regel kun aktuelt som fast måleinstallasjon

7.3.3.2 Måleterskel

Måleterskler plasseres på tvers av strømrretningen og fremtvinger en overgang fra strømmende til strykende forhold. Vannføringen kan dermed bestemmes empirisk, avhengig av måleterskelens geometri.



Figur 7-16 Skarpkantet trekantmåleterskel, NVE

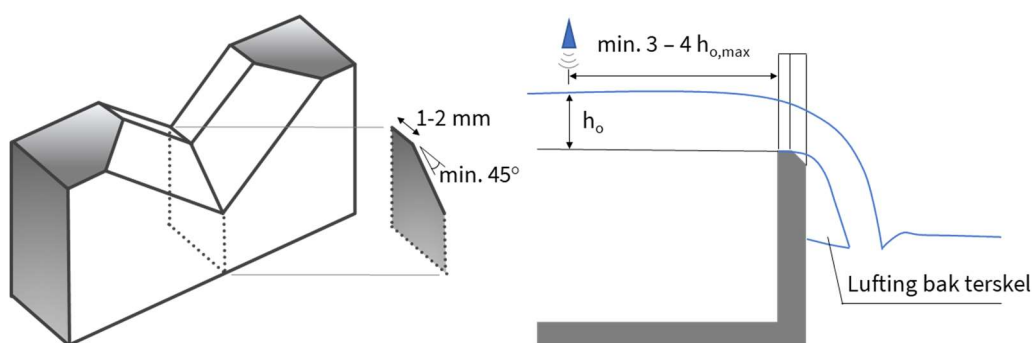
Måleterskler er utsatt for sedimentering oppstrøms

På grunn av lav strømningshastighet oppstrøms har måleterskler en tendens til å forårsake sedimentasjon foran terskelen. Målesteder med høyt sedimentinnhold i vannet kan derfor by på utfordringer med rengjøring og vedlikehold.

Skarpkantet måleterskel (thin plate weirs)

ISO 1438:2017 oppgir eksperimentelt verifiserte vannføringsverdier for skarpkantede måleterskler. For å oppnå gode måleresultater beskriver ISO 1438 en rekke betingelser som må overholdes. Spesielt viktig er formen på, og luftforholdene bak, overløpskanten, se Figur 7-17. Det er også viktig at vannstanden oppstrøms er upåvirket av vannstanden nedstrøms, slik at det etableres entydige overganger fra strømmende til strykende forhold. Hvis dette ikke er tilfelle er det mulig å korrigere beregningene, men det må da forventes lavere nøyaktighet. Slike korreksjoner krever i tillegg supplerende nivåmålinger nedstrøms terskelen (ISO 1438-4, 2017).

Vannstandsmåling bør foretas i en avstand til overløpskanten minst 3 til 4 ganger høyeste forventede overløpshøyde, se Figur 7-17. Det forutsettes at påvirkning fra nedstrøms ikke finner sted. For å forsikre seg om at vannstanden nedstrøms ikke påvirker avrenningen over terskelen, anbefales det å installere en nivåmåler også nedstrøms.



Figur 7-17 Skarpkantet måleterskel. Utforming (v) og vannstandsmåling (h), NVE etter Morgenschweis (2018)

Måleområdet til rektangulære måleterskler utgjør vanligvis $Q_{max}/Q_{min} = 25 - 30$, mens det for trekantede måleterskler ligger i området 150 - 500 med $Q_{min} \approx 0,2$ l/s (DWA, 2011). Trekantede måleterskler egner seg derfor godt på steder hvor en kan forvente små vannføringer. Om målebetingelsene overholdes kan en forvente måleavvik på inntil $\pm 1\%$ (Hersch, 2009).

Tabell 7-7 gir en samlet oversikt over fordeler og ulemper ved bruk av måleterskel.

Tabell 7-7 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med måleterskel

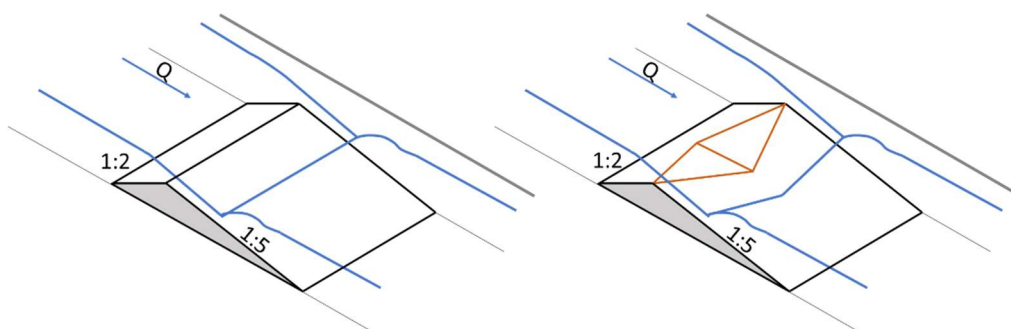
Betingelser for måling	
ISO 1438:2017	
- påvirkning fra nedstrøms må kunne utelukkes eller kompenseres - kompensasjon for påvirkning fra nedstrøms fører til nedsatt nøyaktighet - overløpsbetingelser som lufting bak terskel og avstand fra nivåsensor til terskel må overholdes	
Fordeler	Ulemper
- kun nivåmåling gir minimert måleavvik - nøyaktig målemetode - kontinuerlig målemetode - krever ingen kalibrering - forholdsvis enkel drift og vedlikehold	- krever som regel byggeteknisk innsats - utsatt for sedimentering oppstrøms - begroing av terskelen fører til måleavvik - kvister og drivgods kan samle seg foran terskelen og skape måleavvik og driftsproblemer

7.3.3.3 Crump-overløp

Crump-overløp er utformet som en trekantet terskel plassert på tvers av strømrretningen, se Figur 7-18 (v). Terskelens har entydig definert stigning oppstrøms og fall nedstrøms. Hvis overløpet er presist utformet kan vannføringen beregnes ved hjelp av empiriske studier (ISO 4360, 2020).

Sammenlignet med måleterskler krever Crump-overløp betydelig lavere fall, og faren for sedimentering reduseres. Ved ufullkomne overløp er det fortsatt mulig å bestemme vannmengdene som renner av, men dette krever ekstra vannstandsmålinger nedstrøms overløpet. Som for måleterskler fører slike forhold til nedsatt forventet målenøyaktighet.

For å kunne fastslå om overløpet er ufullkomment anbefaler vi å ta i bruk en vannstandsmåling nedstrøms. Det finnes Crump-overløp utformet med et v-profil i midten, se Figur 7-18 (h), som egner seg bedre ved lave vannføringer (ISO 4377, 2012). En må regne med lavere målenøyaktighet ved bruk av Crump sammenlignet med skarpkantede måleterskler. Tabell 7-8 viser fordeler og ulemper ved Crump-overløp ved vannføringsmåling



Figur 7-18 Crump-overløp (v) og modifisert Crump-overløp (h), NVE

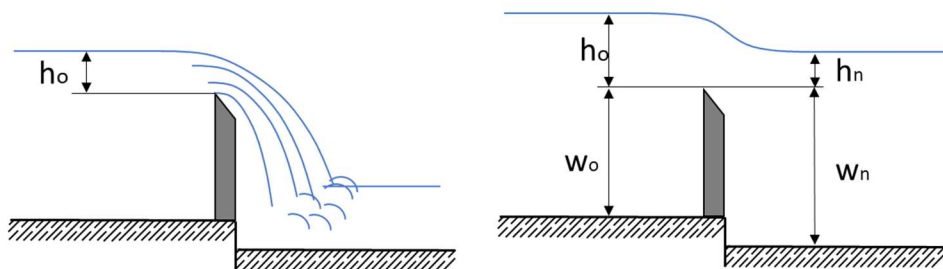
Tabell 7-8 Fordeler og ulemper ved bruk av Crump-overløp ved vannføringsmåling

Betingelser for måling	
ISO 4360:2020, ISO 4377:2012	
- påvirkning fra nedstrøms må kunne utelukkes eller kompenseres - kompensasjon for påvirkning fra nedstrøms fører til nedsatt nøyaktighet - overløpsbetingelser må overholdes	
Fordeler	Ulemper
- kun nivåmåling gir minimert måleavvik - kontinuerlig målemetode - forholdsvis enkel drift og vedlikehold - reduert fare for sedimentasjon oppstrøms - kan benyttes ved påvirkning fra nedstrøms, men det må forventes nedsatt nøyaktighet - krever lavere fall enn måleterskler	- krever byggeteknisk innsats - profilet må utformes veldig nøyaktig - begroing av terskelen fører til måleavvik - kvister og drivgods foran terskelen kan føre til måleavvik og driftsproblemer

7.3.3.4 Overløpsterskel

Det er mulig å måle vannføring ved hjelp av nivåmåling for overløp. Ujevne eller ikke-horizontale terskeloverkanter gir reduserte forventninger til målenøyaktighet, og selv ved gode måleforhold må en forvente målenøyaktigheter godt under det som kan forventes ved hjelp av måleterskel. En rekke betingelser må overholdes for å oppnå brukbare vannføringsdata:

- terskeloverkanten må være horisontal
- terskelens geometri og utformingen må være entydig definert og kunne beskrives med en terskelkoeffisient, μ
- det må være tilstrekkelig lufting bak terskelen
- det bør helst ikke være påvirkning fra nedstrøms
- vannoverflaten må være jevnt fordelt over hele terskelbredden. Dette kan være vanskelig å oppnå ved lateral strømming. Ved ujevn vannoverflate er det behov for minst to nivåmålere
- terskelen bør ikke være for lang i forhold til overløpshøyden
- vannstandsmålinger bør foretas i en avstand til overløpskanten minst 3 til 4 ganger høyest forventet overløpshøyde
- måling bør utføres med høy måleoppløsning¹² og høy nøyaktighet, tilpasset måleområdet til applikasjonen



Figur 7-19 Fritt overløp (v) og ikke fritt overløp med neddykket terskel (h), NVE etter Peter (2023) og MFT, Miljø- og Fluidteknikk (2019)

Vannføringsberegninger etter Poleni, se formel 6, baserer seg stort sett på vannstand, h og terskelkoeffisienten, μ . Tabell 7-9 viser hvordan terskelkoeffisienten endrer seg med terskelens geometri. Eventuelle skumbrett anbefales montert med avstand til overløpskantene minimum $2 \cdot h_{o,max}$. Det er mulig å forbedre den hydrauliske tilstanden ved hjelp av spesielle profiler som monteres på overløpet. Disse forbedrer hydraulikken og sikrer lufting bak terskelen, se Tabell 7-9.

¹² Helst millimeter

$$Q = \mu \cdot \varphi \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot b \cdot h_o^{3/2} \quad [6]$$

Hvor

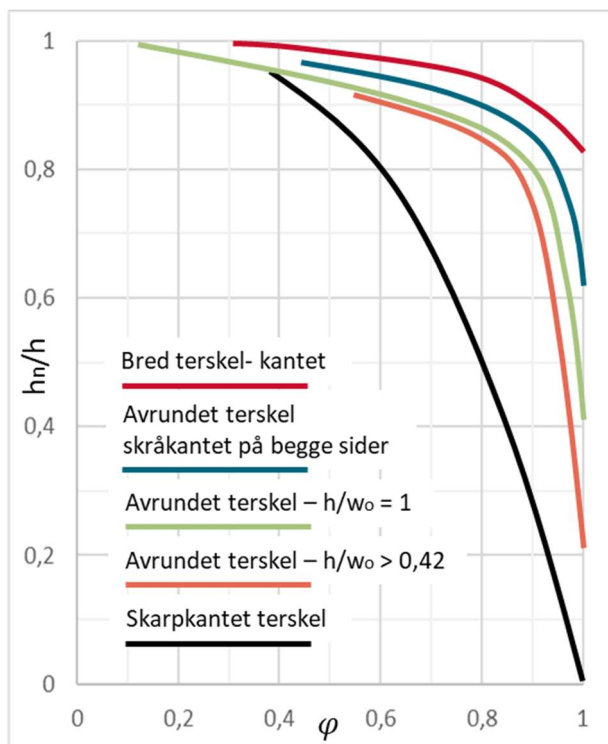
- μ Terskelkoeffisient, se Tabell 7-9
 φ Reduksjonsfaktor dykket terskel, $\varphi_{\text{fritt overløp}} = 1$
 b Terskelbredde
 h_o Overløpshøyde

Ved oppstuvning fra nedstrøms er overløpet ikke lengre fritt. Det er mulig å kompensere for slik påvirkning (Figur 7-20), men dette forutsetter registrering av vannstand også nedstrøms. Registrering av vannstand nedstrøms anbefales uansett ved overløpsmåling for å oppdage eventuelle oppstuvingshendelser, se Figur 7-19.

Usikkerheten som hefter ved valg av terskelkoeffisient og reduksjonsfaktor gjør det nødvendig å betrakte vannføringsmålinger fra «vanlige» overløp med noe skepsis. Tabell 7-10 viser noen ulike fordeler og ulemper ved bruk av overløpsmåling.

Tabell 7-9 Terskelkoeffisienten (μ) avgjøres av terskelens form, etter Peter (2023), MFT, Miljø- og Fluidteknikk (2019)

Terskelutforming		μ
	Bred terskel, kantet	0,49 - 0,51
	Bred terskel, avrundede kanter	0,5-0,55
	Skarpkantet terskel med lufting bak kant	0,64
	Avrundet terskel, skråning nedstrøms	0,75
	Avrundet terskel, skråning opp- og nedstrøms	0,79
	Spesialtilpasset terskel i vingeform, stål, kalibrert	0,65 - 0,73 produsentavhengig



Figur 7-20 Reduksjonsfaktor (φ) for neddykket terskel, NVE etter Peter (2023) og MFT, Miljø- og Fluidteknikk (2019)

Tabell 7-10 Fordeler og ulemper med vannføringsmåling ved overløp

Betingelser for måling	
ISO 3846:2008, ISO 4374:1990	
- påvirkning fra nedstrøms må kunne utelukkes eller kompenseres - overløpsbetingelser som lufting bak terskel og avstand fra nivåsensor til terskel må overholdes - fordelaktig med høy måleoppløsning ved lite overfallhøyde og flere nivåsensorer ved lange overløpstorskler - målesensor må monteres med tilstrekkelig avstand til overløpskanten, helst $3-4 \cdot h_{o, max}$	
Fordeler	Ulemper
- velegnet som tilleggsinformasjon om omtrentlige overløpsmengder - kontinuerlig målemetode	ikke spesielt nøyaktig målemetode

7.3.4 Metoder for måling av punkthastighet

Metodene som omtales i dette avsnittet gjør det mulig å bestemme strømningshastigheten i en svært begrenset romlig oppløsning. Kunnskap om lokal strømningshastighet inngår vanligvis i flerpunktmåling som omtalt i kapittel 7.3.6.4. Målesystemet er vanligvis festet til en stang med kjent sensorhøyde. Det er avgjørende at målesystemet er justert parallelt med strømningsretningen. Virvler oppstrøms må unngås, og det er normalt krav til minste vannstand, avhengig av målemetoden.

7.3.4.1 Flygel

Flygel overfører strømningshastigheten til rotasjonsbevegelse ved hjelp av en propell. Propellens omdreiningstall kan deretter regnes om til strømningshastighet ved hjelp av en karakteristisk kurve. Flygelmåling forutsetter minimumshastigheter på ca. 3-4 cm/s (Morgenschweis, 2018). I tillegg kreves det regelmessig kalibrering. Faste partikler og fibermateriale i vannet kan føre til problemer og målefeil.

7.3.4.2 EMF-sonde, elektromagnetisk flowmåling

EMF-sonde brukes på samme måte som flygel, men målingene påvirkes i betydelig mindre grad av faste partikler og fibermateriale i vannet. Til gjengjeld må det tas hensyn til at EMF-sonden krever litt tid til å oppnå stabile måleresultater. EMF egner seg bedre enn flygel ved måling nær bunnen, vannoverflaten og langs kantområder. I tillegg er regelmessig kalibrering av systemet ikke nødvendig, slik det er tilfelle ved flygelmåling.

7.3.4.3 Ultralydsonde

Ultralydsonder bygger på dopplermetoden og kan brukes på samme vis som flygel og EMF. I likhet med EMF-sondene egner også ultralydsondene seg godt til måling i kantområder. Ultralydsondene krever heller ikke regelmessig kalibrering.

7.3.5 Metoder for hastighetsmåling i deler av strømtverrsnittet

Som omtalt i avsnitt 7.3.1 bestemmes gjennomsnittlige strømningshastighet, v_g , ved hjelp av integralet over hele strømtverrsnittet. Et stort antall målesystemer baserer seg derimot på måling av strømningshastighet i kun deler av strømtverrsnittet. Gjennomsnittlig strømningshastighet blir dermed beregnet fra antakelser om hastighetsfordelingen i strømtverrsnittet.

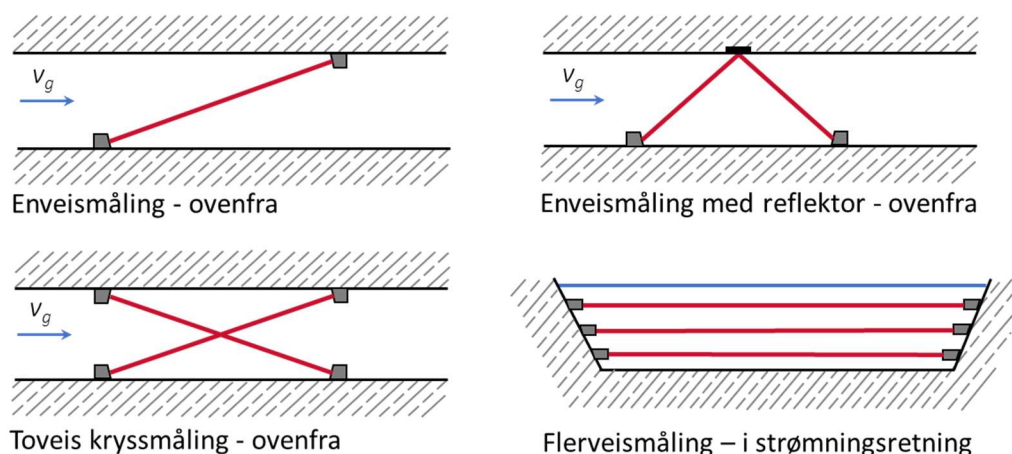
Bak slike beregningsmetoder ligger empiriske undersøkelser om sammenhengen mellom målt strømningshastighet ved et eller flere steder i strømtverrsnittet og den gjennomsnittlige strømningshastigheten. Nøyaktigheten til den beregnede vannføringen øker med antall målesteder i strømtverrsnittet.

Beregning av gjennomsnittlig strømningshastighet kan være i form av faste korreksjonsfaktorer eller vannstandsavhengige korreksjoner. Den empiriske tilnærmingen har ikke generell gyldighet. Dette gjør det nødvendig å kalibrere slike målesystemer ved målestedet, helst ved flere vannføringer. Mobil EMF, flerpunktmåling og fortynningsmåling egner seg godt til kalibreringsarbeidet.

7.3.5.1 Måling ved hjelp av transittid

Målemetoden bygger på transittiden til akustiske pulser gjennom væsker. Lydpulsene blir så å si dratt med av strømmen, og beveger seg dermed raskere med enn mot strømrretningen. Strømningshastigheten langs måleavsnittet kan dermed bestemmes fra forskjellen i transittid. Sensorene er justert i en vinkel mot strømrretningen. For å kunne beregne strømningshastigheten må vinkelen mellom strømrretningen, sensorenes retning og avstanden mellom sensorene være kjent.

Transittidmetoden kan brukes i åpne renner så vel som i delvis eller fylte rør. For visse rørmaterialer er metoden mulig å benytte som utvendige clamp-on-system. I slike tilfeller må også rørmaterialet og veggtykkelsen være kjent. Store gradienter i temperatur eller salinitet kan føre til måleavvik eller målesvikt. Det finnes flere sensorkonfigurasjoner for måling av transittid, se Figur 7-21.



Figur 7-21 Ulike sensorkonfigurasjoner for måling med transittid, NVE

Ved utvelgelse av målestед må det sørges for at strømmingen stort sett er jevn. Strømninger som ikke er parallelle med hovedstrømningsretningen kan føre til feil. Ved måling i naturlige profiler kan kryssmåling som vist i Figur 7-21 benyttes for å kompensere for slike forhold.

Det anbefales å benytte rettstrekk med lengder minst 5 - 10 ganger profilbredden foran målestedet og 1 - 2 til dels 5 ganger profilbredden bak målestedet (DWA, 2011), (Quantum Hydrometrie GmbH, 2011). Reflektorer kan benyttes ved montering av flere

sensorer på samme side. Dette minsker eventuelle måleavvik som følge av at strømretningen ikke er parallell med hovedstrømningsretning.

Ved større vanddybder benyttes vanligvis flerveis måling på flere nivåer for å registrere hastighetsfordelingen både vertikalt og horisontalt, se Figur 7-21. Tabell 7-11 lister opp ulike fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med hjelp av transittid.

Tabell 7-11 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med transittidmetoden

Betingelser for måling	
ISO 6416:2017, ISO 748:2021	
• krever jevn strømning med likeartede inn- og utløpsforhold • kreves en viss vannstand i profilet • rørmateriale og rørtykkelse må være kjent ved bruk av clamp-on-systemer • profilet ved målestedet må være kjent	
Fordeler	Ulemper
• kan brukes som kontinuerlig, stasjonær og mobil målemetode • nøyaktig målemetode, men om mulig anbefales kalibrering • mindre påvirket av begroing enn Doppler	• krever grundig installasjon • fast installerte sensorer utsatt for begroing • forholdsvis høy investeringskostnad • fare for feil og målesvikt ved høy andel luftbobler i vannet

7.3.5.2 Ultrasonisk Doppler, continuous wave

Dopplermetoden benytter seg av frekvensskiftet til lydbølger som reflekteres fra bevegelige objekter, lik endringen i tonehøyde som finner sted når en sirene passerer. Denne frekvensendringen kalles dopplereffekten, og kan brukes til hastighetsmåling i delvis fylte og fylte strømtverrsnitt.

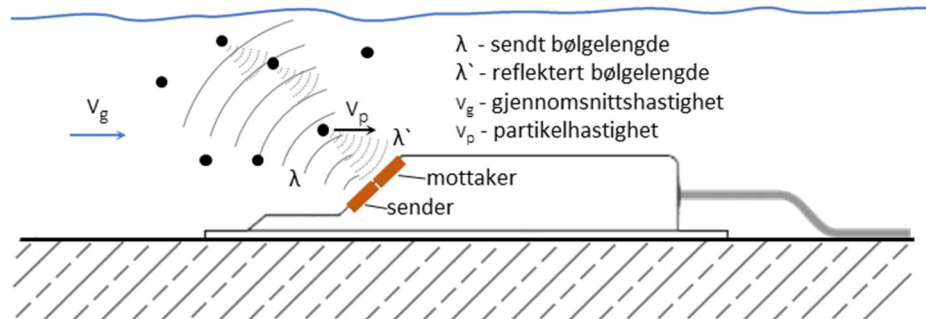
Den kanskje mest utbredte dopplermetoden kalles continuous wave, CW. Sensoren sender stadig bundne lydbølger med konstant frekvens inn i strømtverrsnitt. Lydbølgene reflekteres fra partikler og luftbobler i vannet, og det antas at disse beveger seg med omtrent samme strømningshastighet som vannet rundt, se Figur 7-22.

Frekvensanalyse gjør det mulig å bestemme karakteristisk eller maksimal strømningshastighet. Det er derimot ikke mulig å fastslå hvor i strømtverrsnittet den analyserte hastigheten finner sted. Gjennomsnittlig strømningshastighet fastsettes derfor som regel ved hjelp av faste korreksjonsfaktor uten hensyn til lokal hastighetsfordeling.

Korrekt måling forutsetter at ultralydsensorens minstevannstandskrav overholdes. I tillegg bør sensoren plasseres slik at lydbølgene passerer hele måltverrsnittet. Som for øvrige bunnmonterte sensorer er det viktig å være bevisst på sensorens innvirkning

på strømning og vannstand ved lave vannføringer. Slik påvirkning kan føre til systematiske feil. Det er vanlig å anta at avrenningen er stort sett upåvirket ved større vanddybder enn 3 ganger sensorhøyden (DWA, 2011)

Tabell 7-12 viser en oversikt over ulike fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med CW-Doppler.



Figur 7-22 Funksjonsprinsipp for CW-Doppler, NVE

Tabell 7-12 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med CW-Doppler

Betingelser for måling	
ISO 15769:2010, ISO 748:2021	
• krever en viss andel partikler eller luftbobler i vannet • krever minstevannstand over sensor • sensorens krav til inn- og utløpsbetingelser må overholdes	
Fordeler	Ulemper
• enkel konstruksjon og installasjon • håndterer store endringer i vannstand og vannføring • kan brukes som kontinuerlig, stasjonær og mobil målemetode	• sensitiv for begroing, sedimenter og tetting av sensor • krever større vedlikeholdsinnsats • krever kalibrering • ikke mulig å lokalisere strømningshastigheter i måletverrsnittet • spesielt feilutsatt ved oppstuing eller akselerert strømning • svikter ved lav strømningshastighet • krever en viss vannstand

7.3.5.3 Ultrasonisk pulsdoppler, Doppler velocity profiler

I motsetning til CW-Doppler sender pulsdoppler veldig korte lydimpulser. Dette gjør det mulig å fastsette strømningshastigheter i bestemte nivåer i vannsøylen. Den tilhørende signalanalysen gjør det mulig å bestemme opprinnelsen til de reflekterte impulsene ved å måle transittiden. Det er dermed mulig å estimere hastighetsfordelingen langs lydrefleksjonsbanen, som er en klar fordel sammenlignet med CW-Doppler. At pulsdoppler kan registrere den lokale, vertikale hastighetsfordelingen hever målenøyaktigheten i betydelig grad.

CW-Doppler og pulsdoppler har sammenlignbare bruksområder. Pulsdoppler er imidlertid mer følsom for endringer i strømprofilen og endret fordeling og konsentrasjon av partikler i strømtverrsnittet. Lav partikkelkonsentrasjon i veldig klart regnvann kan føre til målesvikt.

Tabell 7-13 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med pulsdoppler (Doppler velocity profiler)

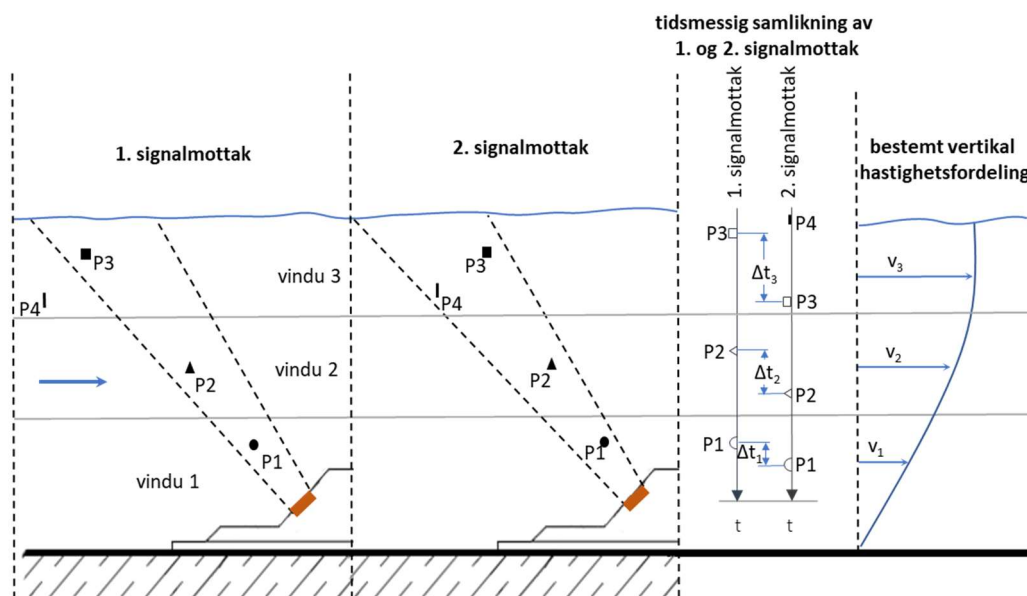
Betingelser for måling	
ISO 24154:2005, ISO 748:2021	
• krever en viss andel partikler eller luftbobler i vannet • krever minstevannstand over sensor • sensorens krav til inn- og utløpsbetingelser må overholdes	
Fordeler	Ulemper
• enkel konstruksjon og installasjon • håndterer store endringer i vannstand og vannføring • kan brukes som kontinuerlig, stasjonær og mobil målemetode • bestemmer gjennomsnittshastigheten, v_g ut fra hastighetsfordeling vertikalt over sensor • betydelig lavere måleusikkerhet enn CW-doppler	• sensitiv for begroing, sedimenter og tetting av sensor • krever større vedlikeholdsinnsats • kalibrering anbefales • forholdsvis høy investeringskostnad • registrerer kun hastigheten i aksene rett over sensoren. Flere sensorer må brukes ved usymmetriske strømninger eller brede tverrsnitt • svikter ved lav strømningshastighet • krever en viss vannstand

7.3.5.4 Digital mønstergjenkjenning (cross correlation)

Som for CW-Doppler og pulsdoppler, egner digital ekkomønstergjenkjenning seg godt til måling i fylte og delvis fylte måletverrsnitt. Til forskjell fra de to førstnevnte dopplermetodene, baserer ekkomønstergjenkjenningsmetoden seg ikke på frekvensskifter i reflekterte ekko.

Ultralydpulsen får partikler og luftbobler i vannet til å returnere et karakteristisk ekkomønster til sensoren. Ved å sende ut nye pulser med få millisekunders mellomrom returneres påfølgende ekkomønstre fra de samme partiklene og luftboblene til sensoren. Partiklene og luftboblene beveger seg langs ulike avstander på denne korte tiden, og ekkobildet i sensoren endrer seg tilsvarende. Ved å sammenlikne påfølgende bilder ved hjelp av såkalt krysskorrelasjon kan posisjonsendringen og dermed strømningshastigheten fastsettes. Det antas her at partiklene og boblene har samme strømningshastighet og bevegelsesmønster som vannmassene de forflytter seg i. Sammenlign med Figur 7-23.

Lydpulsenes transittid gjør det mulig å ta opp ekkobilder fra ulike nivåer i vannsøylen over sensoren. Det er dermed mulig å benytte metoden til å bestemme en vertikal hastighetsprofil. Tabell 7-14 viser ulike fordeler og ulemper med digital mønstergjenkjenning.



Figur 7-23 Hastighetsmåling ved hjelp av digital mønstergjenkjenning, NVE

Tabell 7-14 Fordeler og ulemper ved hastighetsmåling ved hjelp av digital mønstergjenkjenning

Betingelser for måling	
ISO 748:2021	
• krever en viss andel partikler eller luftbobler i vannet • krever minstevannstand over sensor • sensorens krav til inn- og utløpsbetingelser må overholdes	
Fordeler	Ulemper
• enkel konstruksjon og installasjon • håndterer store endringer i vannstand og vannføring • kan brukes som kontinuerlig, stasjonær og mobil målemetode • bestemmer gjennomsnittshastighet, v_g ut fra hastighetsfordeling vertikalt over sensor • betydelig lavere usikkerhet enn CW-Doppler	• sensitiv for begroing, sedimenter og tetting av sensor • krever større vedlikeholdsinnsats • kalibrering anbefales • forholdsvis høy investeringskostnad • registrerer kun hastigheter i aksen rett over sensor. Flere sensorer må brukes ved usymmetrisk strømning eller brede tverrsnitt • svikter ved lav strømningshastighet • krever en viss vannstand

7.3.5.5 Radar-Doppler

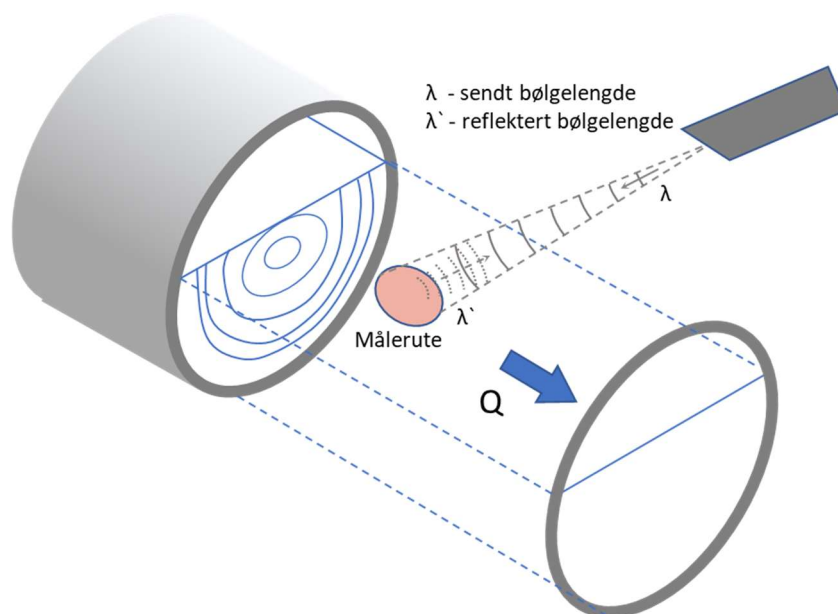
Radar-Doppler-metoden benytter elektromagnetiske bølger (mikrobølger). I motsetning til ultralydssystemene blir sensoren plassert over vannoverflaten. Hastigheten fastsettes ved måling av radarekko fra strukturer på vannoverflaten. Teknologien egner seg derfor kun til måling i delvis fylte strømtverrsnitt.

Under gode måleforhold¹³ utvikler det seg et relativt stabilt forhold mellom overflatehastighet og gjennomsnittlig strømningshastighet. For å kunne måle frekvensskiftet til ekkosignalet kreves en viss bølgedannelse på vannoverflaten. Det er generelt tilstrekkelig med bølgehøyder på rundt 3 mm. Målemetoden egner seg til måling av strømningshastigheter i området 0,15 - 15 m/s. I praksis er det manglende bølgedanning ved lave strømningshastigheter som begrenser måleområdet for minste hastighet til 0,2 – 0,5 m/s (DWA, 2011).

Størrelse til måleruten hvor overflatehastigheten blir målt avhenger av sensorens høyde og vinkel til vannoverflaten, se Figur 7-24. Spesielt ved store strømtverrsnitt er det viktig å sikre tilstrekkelig avstand til vannoverflaten.

¹³ Uforstyrret og fullt utviklet strømningsprofil uten oppstuvning

I kanaler og kummer kan overflatehastigheten påvirkes av vegger og konstruksjoner ved ulike vannstander. Dette vil uunngåelig føre til måleavvik. Tabell 7-15 viser fordeler og ulemper ved bruk av Radar-Doppler.



Figur 7-24 Vannhastighetsmåling med Radar-Doppler, NVE

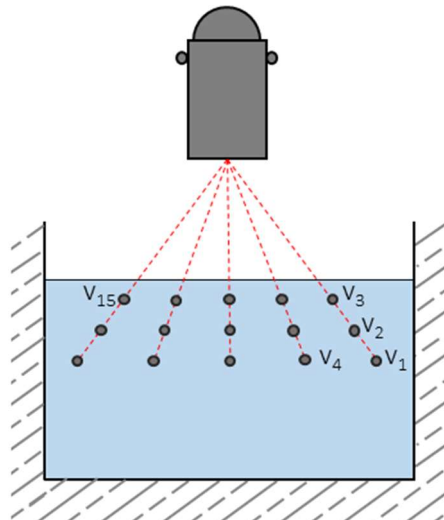
Tabell 7-15 Fordeler og ulemper ved vannhastighetsmåling med Radar-Doppler

Betingelser for måling	
ISO 748:2021	
• behov for småbølget eller ru vannoverflate • minste strømningshastighet bør overstige 0,2 - 0,5 m/s (DWA, 2011) • leverandørens krav til inn- og utløpsbetingelser må overholdes • minsteavstand til vannoverflaten må overholdes	
Fordeler	Ulemper
• forholdsvis enkel konstruksjon og installasjon • enkel drift • enkelt vedlikehold • sensor ikke i kontakt med mediet • kan brukes som kontinuerlig, stasjonær og mobil målemetode • betydelig måleområde, og kan måle strømningshastigheter opptil 15 m/s	• forholdsvis høy investeringskostnad • kan svikte ved lavere strømningshastighet enn 0,2 m/s • kalibrering anbefales • strømningshastigheten måles uten kunnskap om hastighetsfordelingen i vannsøylen • fare for målefeil hos integrerte nivåsensorer dersom strømningshastighet og nivå måles på ulike steder. Kan løses med ekstern nivåmåler

7.3.5.6 Laser-Doppler

Dopplerprinsippet kan kombineres med laser for fastsettelse av strømningshastigheter. Etter å ha bestemt vannstanden, som regel ved hjelp av en ultralydsonde, plukker systemet ut et bestemt punkt under overflaten. Sensoren fikserer laserstrålen på dette punktet og måler frekvensskiftet til det returnerte lyset. Dette kan gjentas på ulike steder for å bestemme hastighetsfordeling og gjennomsnittlig strømningshastighet.

Laserenheten installeres på samme vis som Radar-Doppler over vannoverflaten, se Figur 7-25. Laserlyset trenger gjennom vannsøylen, og gir derfor bedre informasjon om hastighetsprofilen i strømtverrsnittet. Det må imidlertid tas høyde for at målesystemet ikke registrerer hastigheter på ulike målesteder samtidig. Dette gjør at det kan ta noen minutter å samle inn representative data for hele strømtverrsnittet. Denne tregheten kan føre til betydelige måleavvik under dynamiske avrenningsforhold. Tabell 7-16 viser fordeler og ulemper ved måling av strømningshastighet ved hjelp av Laser-Doppler.



Figur 7-25 Vannføringsmåling med laser-doppler-metoden gjør det mulig å måle flere hastigheter i strømtverrsnittet, NVE

Tabell 7-16 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med Laser-Doppler

Betingelser for måling	
ISO 748:2021	
• minste strømningshastighet i størrelsesområdet 0,15 m/s • leverandørens krav til inn- og utløpsbetingelser må overholdes	
Fordeler	Ulemper
• forholdsvis enkel konstruksjon og installasjon • enkel drift • enkelt vedlikehold • sensor ikke i kontakt med mediet • kan brukes som kontinuerlig, stasjonær og mobil målemetode • måler hastighetsfordelingen på store deler av overflaten, i begrenset omfang også vertikalt	• forholdsvis høy investeringskostnad • svikter ved lavere strømningshastigheter enn ca. 0,15 m/s • hastighet måles i øvre delen av vannsøylen, mens hastighetsfordelingen nær bunnen forblir ukjent • kalibrering anbefales • fare for målefeil ved integrerte nivåsensorer dersom strømningshastighet og vannstand måles på ulike steder. Kan løses med ekstern nivåmåler • fare for målefeil ved flerpunktmåling under dynamiske vannføringssendringer

7.3.6 Metoder for hastighetsmåling i hele strømtverrsnittet

Som tidligere nevnt er vannføring, Q produktet av gjennomsnittlig strømningshastighet, v_g og strømtverrsnittarealet, A_{st} . Ettersom hastighetsfordelingen i vannsøylen er ujevn, må gjennomsnittlig strømningshastighet betraktes som integralet over strømmingens tverrsnittareal.

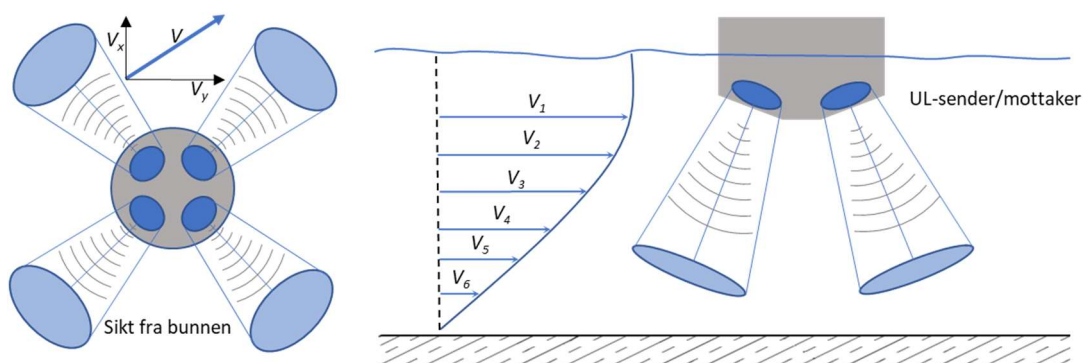
Elektromagnetisk vannføringsmåling er den eneste kontinuerlige målemetoden som gjenkjenner integralet til hastighetsfeltet i hele strømtverrsnittet. Ved flerpunktmåling registreres strømningshastigheten på så mange steder som mulig i strømtverrsnittet. Strømningshastigheten representerer dermed en tilnærming til den faktiske gjennomsnittlige strømningshastigheten over strømtverrsnittet. Fordelen med hastighetsmåling i hele strømtverrsnitt er at ujevne og spesielt usymmetriske hastighetsfordelinger blir mer nøyaktig registrert.

7.3.6.1 ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler

Som navnet tilsier benytter Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) seg av Doppler-prinsippet. Som pulsdoppleren sendes det ut korte lydpuiser som måler strømningshastigheten ved ulike vanndybder som vist i Figur 7-26 (h).

Konvensjonelle pulsdopplere monteres rett mot strømningsretningen. ADCP kan derimot bestemme strømnings hastighet og retning ved hjelp av tre eller helst fire transdusere, se Figur 7-26 (v). Metoden benyttes ofte til å bestemme momentan vannføring i vassdrag. Sensoren monteres da gjerne på en flåte som føres tvers over strømprofilen, og gir god oversikt over profilets hastighetsfordeling.

Tabell 7-17 lister opp fordeler og ulemper med ADCP. Metoden egner seg godt til kalibrering av målesystemer som bestemmer hastighetsfordelingen i deler av strømtverrsnittet. Systemet egner seg også ved kontroll av brede strømprofiler eller ved mistanke om ujevn eller usymmetrisk strømprofil. ADCP kan benyttes som kontinuerlig målemetode. Dette blir sjelden gjort ettersom fast montering, i likhet med konvensjonell pulsdoppler, kun registrerer strømningshastigheten i deler av strømtverrsnittet.



Figur 7-26 Skjematisk funksjon til ADCP nedenfra (v), fra siden (h), NVE

Tabell 7-17 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med ADCP

Betingelser for måling	
ISO 24578:2021	
• krever en viss andel partikler eller luftbobler i vannet • tåler ikke altfor turbulente strømningsforhold • krever en viss vannstand	
Fordeler	Ulemper
• enkel konstruksjon og installasjon • håndterer store endringer i vannstand og vannføring • kan brukes som kontinuerlig, stasjonær og mobil målemetode • bestemmer gjennomsnittshastighet, v_g over hele strømtverrsnittet unntatt ved fast montering • kan brukes som kalibreringsmetode • betydelig høyere nøyaktighet enn CW-Doppler	• forholdsvis høy investeringskostnad • uegnet ved lav vannstand eller altfor turbulente strømningsforhold

7.3.6.2 Elektromagnetisk strømningsmåling i fylte strømtverrsnitt (EMF)

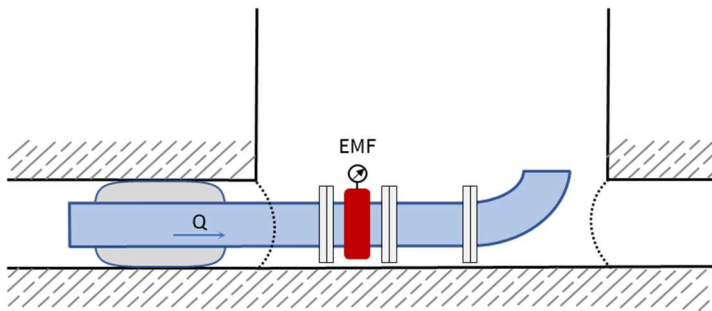
Målemetoden baserer seg på Faradys induksjonslov. Måleenheten etablerer et magnetfelt. Når vann, som er elektrisk ledende, beveger seg gjennom dette magnetfeltet induseres en spenning på måleelektrodene. Så lenge hastighetsfordelingen i røret er symmetrisk vil gjennomsnittlig strømningshastighet være proporsjonal med den induserte spenningen. Typisk måleområde for å oppnå gode måledata ligger i området 0,25 - 10 m/s (DWA, 2011).

Forutsetninger for gode måledata:

- rørledning må være fullstendig fyll og fri for gass og luftbobler
- påvirkning fra andre elektriske installasjoner må kunne utelukkes (jording)
- målesystemet må renses jevnlig innvendig når det er tendens til begroing
- det må unngås sedimentering som følge av lave eller intermitterende strømningshastigheter i ledningsavsnittet hvor målesystemet er installert
- det må unngås asymmetriske eller ujevne hastighetsfordelinger som følge av korte rettstrekk, ventiler og annen påvirkning.

Så lenge betingelsene overholdes, vil elektromagnetisk vannføringsmåling kunne oppnå veldig god nøyaktighet. Ikke minst skyldes dette at strømtverrsnittarealet er entydig definert av rørdimensjonen. Derimot krever installasjon av elektromagnetiske vannføringsmålere omfattende bygge- og elektrotekniske tiltak, se Figur 7-28.

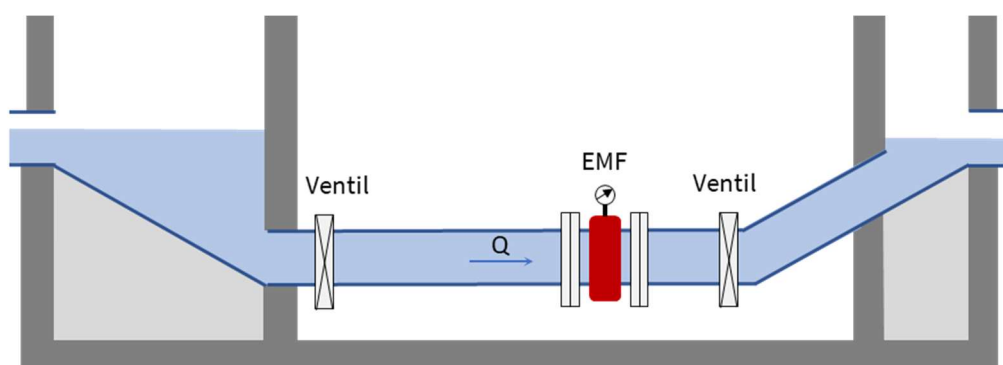
EMF blir som regel brukt til stasjonær måling, og sjelden i sammenheng med overvannshåndtering. Det finnes mobile systemer på markedet som kan innmonteres i rør for kortvarige måleoppgaver som vist i Figur 7-27. Ulempen med disse er at den reduserte rørkapasiteten kan føre til oppstuvning oppstrøms målestedet. Tabell 7-18 viser fordeler og ulemper med vannføringsmåling ved hjelp av EMF.



Figur 7-27 Innsats av mobil EMF i rørledning, NVE etter DWA (2011)

Tabell 7-18 Oversikt vannføringsmåling med elektromagnetisk strømningsmåler (EMF)

Betingelser for måling	
ISO 20456:2017	
• helt fylte rør • produsentens krav til inn- og utløpsbetingelser må overholdes • produsentens minstekrav til ledningsevne i vannet må overholdes	
Fordeler	Ulemper
• svært nøyaktig målemetode • kan brukes som kalibreringsmetode • ikke behov for nivåmåling • stort måleområde	• kostbare installasjoner • krever som regel byggeteknisk innsats • brukes hovedsakelig stasjonært • mobile systemer kan som regel bare brukes kortvarig. Reduserer røråpningen betraktelig og øker faren for oppstuvning og tetting • sensitiv mot begroing, sedimentering og luftbobler



Figur 7-28 Vannføringsmåling med EMF-metoden i fylte tverrsnitt, NVE etter DWA (2011)

7.3.6.3 Elektromagnetisk strømningsmåling i delvis fylte tverrsnitt (EMF)

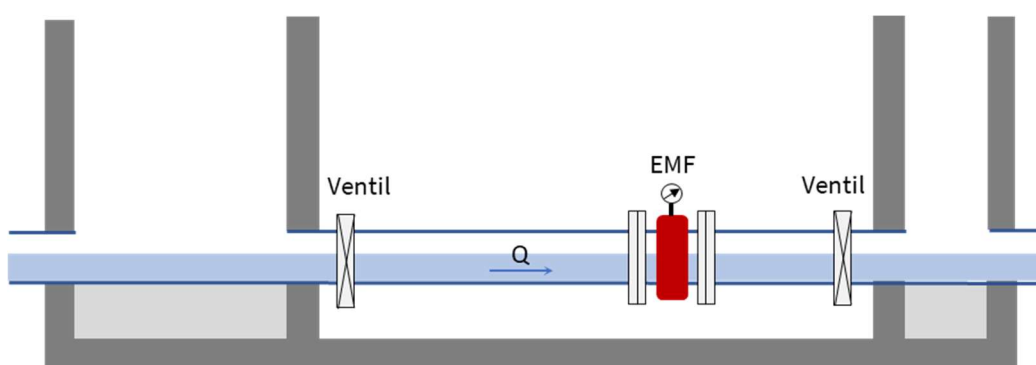
Markedet tilbyr fremdeles elektromagnetiske målesystemer som kan måle vannføringen i delvis fylte rør, se Figur 7-29. Betydningen av disse har imidlertid avtatt de siste årene. I tillegg til hastighetsmåling, som gjennomføres som ved vanlig EMF, kreves det en nivåmåling, som regel kapasitivt. Fyllingsgraden må overstige 10 % av rørdiameteren (DN) for å understøtte måling.

Nøyaktigheten som oppnås med dette systemet er imidlertid ikke så god som standard EMF. Kravet til rettstrekk foran og bak sensoren er mye høyere enn for måling

ved fylt strømtverrsnitt, helt opp i 10 ganger DN foran og 5 ganger DN bak målesystemet. I tillegg kan bølger eller ujevn hastighetsfordeling, spesielt i forbindelse med delfylling, føre til grove målefeil. Tabell 7-19 viser fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med EMF i delvis fylte tverrsnitt.

Tabell 7-19 Fordeler og ulemper ved vannføringsmåling med EMF i delvis fylte tverrsnitt

Betingelser for måling	
ISO 748:2021	
• minste vannstand $h_{min} = 0,1 \cdot \text{diameter}$ (DWA, 2011) • produsentens krav til inn- og utløpsbetingelser må overholdes. Disse er som regel lengre enn for EMF i fylte tverrsnitt • produsentens minstekrav til ledningsevne i vannet må overholdes	
Fordeler	Ulemper
• noe lavere byggeteknisk innsats sammenliknet med EMF i fylte tverrsnitt	• brukes hovedsakelig stasjonært • kreves som regel byggeteknisk innsats • kostbare installasjoner • sensitiv mot begroing, sedimentering og luftbobler ved fylt tilstand • svært sensitiv for bølger og ujevn strømming ved delvis fylt tilstand • nøyaktigheten ved delvis fylt tilstand er betydelig lavere sammenliknet med EMF for fylte tverrsnitt

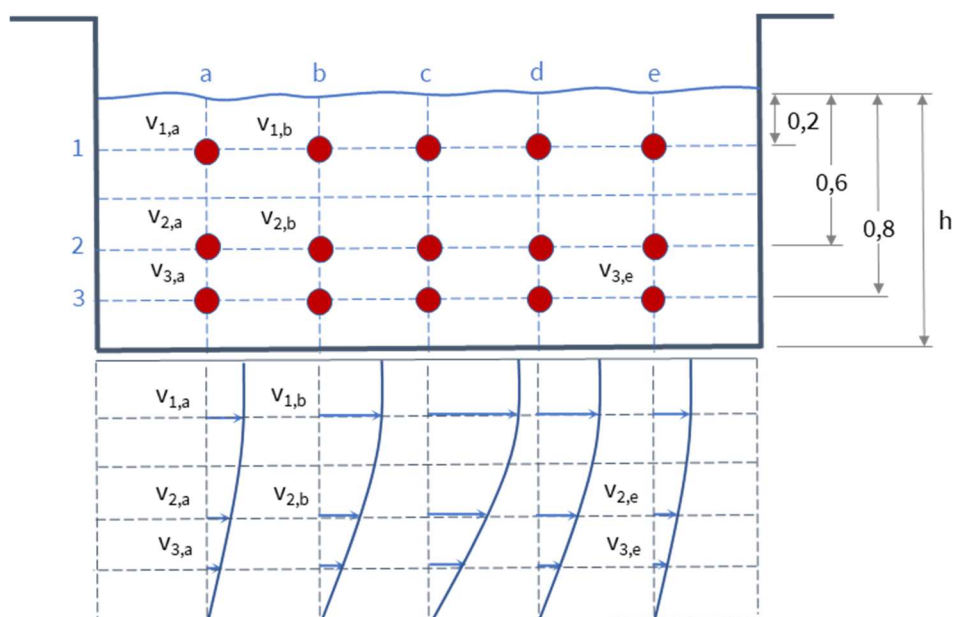


Figur 7-29 Vannføringsmåling med EMF i delvis fylte strømtverrsnitt, NVE etter DWA (2011)

7.3.6.4 Flerpunktmåling

Flerpunktmåling kan utføres med ulike måleteknologier. Konseptet dreier seg om å måle strømningshastigheten ved flere målesteder på en standardisert måte som beskrevet i ISO 748:2007, se Figur 7-30. Gjennomsnittlig strømningshastighet lar seg bestemme ved å kombinere flere hastighetsmålinger over hele strømtverrsnittet. Om disse suppleres med vannstandsregistreringer, vil vannføringen kunne bestemmes. Dette forutsetter imidlertid nøyaktig innmåling av tverrsnittsprofilen.

Tabell 7-20 viser fordeler og ulemper ved flerpunktmåling. Metoden er mindre egnet for dynamiske forhold med plutselig endrede vannføringer. Metoden er heller ikke utviklet for langvarige måleoppgaver. Flerpunktmåling er derimot velegnet til å kalibrere andre målesystemer ettersom metoden kan levere vannføringsdata av høy kvalitet gitt gode strømningsbetingelser og god kunnskap om profilutformingen.



Figur 7-30 Eksempel på flerpunktmåling og resulterende hastighetsfordeling, NVE

De vanligste teknologiene til bruk ved flerpunktmåling er flygel, EMF, og ultralydsonder for måling av punkthastighet som omtalt i avsnitt 7.3.4.

Tabell 7-20 Fordeler og ulemper ved flerpunkt vannføringsmåling

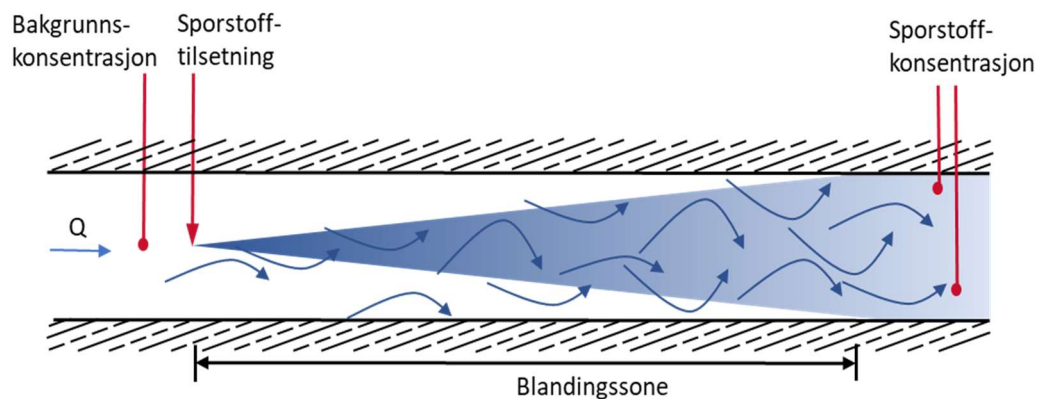
Betingelser for måling	
ISO 748:2021	
• krav til minstevannstand • jevne strømforhold	
Fordeler	Ulemper
• stort måleområde, for eksempel flygel 0,03 – 10 m/s • svært nøyaktig • kan brukes som kalibreringsmetode • gir god oversikt over hastighetsfordelingen i måletverrsnittet	• uegnet ved dynamiske strømforhold • kun egnet for temporære måleoppgaver • tidskrevende målemetode

7.3.7 Fortynningsmåling

Fortynningsmetoden bestemmer strømningshastigheten ved å måle fortynningsgraden til et sporstoff (tracer). Sporstoffet blir tilsatt vannet oppstrøms måleavsnittet, enten kontinuerlig eller momentant. Måling foregår tilstrekkelig langt fra tilsettingsstedet til at sporstoffet er fullstendig oppløst og utblandet i vannmassene, se Figur 7-31. Tilførsel i overløpsstrål eller rett nedstrøms overløp, fall og turbulens av alle slag er derfor fordelaktig.

Fortynningsmåling egner seg på vanskelige målesteder

En vesentlig fordel med fortynningsmåling er geometriuavhengigheten på målestedet. Metoden krever ingen måling av hastigheter, vannstander eller geometriske parametere. Fortynningsmålinger kan i tillegg utføres ved høye strømningshastigheter, store vannføringer og i kombinasjon med komplekse strømtverrsnitt.



Figur 7-31 Prinsippskisse for fortynningsmåling, NVE

Det kan være vanskelig å forsikre seg om at sporstoffet er fullstendig oppløst og utblandet på målestedet. Fortynningen kan forbedres ved hjelp av kunstige strømningsforstyrrelser. Det er mulig å overvåke fortynningen ved hjelp av samtidige sensormålinger på ulike steder i strømtverrsnitt. Alternativt kan sporstoff-konsentrasjonen analyseres fra samtidige vannprøver på ulike steder i strømtverrsnittet.

Gjennomsnittlig vannføring måles med momentant tilført sporstoff

Måling med momentan tilførsel av sporstoff resulterer i gjennomsnittlig vannføring for måleperioden. Vannføringen bør derfor være bortimot konstant i måleperioden. En kjent mengde sporstoff tilsettes oppstrøms, og ved målestedet nedstrøms registreres konsentrasjonen til det oppløste sporstoffet over et visst tidsrom. Fortynningsgraden gjør det mulig å beregne vannføringen for måleperioden. Registreringen bør være mest mulig kontinuerlig. Dersom det benyttes individuelle konsentrasjonsprøver, må disse tas med svært korte intervaller. Bakgrunnskonsentrasjonen av sporstoffet må heller ikke endre seg vesentlig under målingen. For å øke målenøyaktigheten kan bakgrunnskonsentrasjonen registreres kontinuerlig oppstrøms tilsetningsstedet.

Variabel vannføring måles med kontinuerlig tilført sporstoff

Ved kontinuerlig tilførsel tilføres det oppløste sporstoffet med kjent og konstant konsentrasjon og volumstrøm. Til dette trengs normalt en høypresisjons doseringspumpe og langvarig tilførsel. Bakgrunnskonsentrasjonen til sporstoffet må bestemmes kontinuerlig oppstrøms tilsetningsstedet. Vannføringen beregnes ved hjelp av blandingsligningen for vann og sporstoff fra målt konsentrasjonen ved målestedet nedstrøms. I praksis bestemmes tidsforløpet for sporstoff-konsentrasjonen i mediet fra en serie prøver innsamlet med kort tidsintervall, eller

gjennom kontinuerlige konsentrasjonsmålinger. Dette gjør det mulig å måle variable vannføringer.

Til sporstoff benyttes fortrinnsvis salt eller et fluorescerende fargestoff. Vanlig bordsalt¹⁴ har vist seg å være det enkleste alternativet ved vannføringsmåling på grunnlag av elektrisk ledningsevne. Den store mengden salt som trengs til måling av store vannføringer eller ved høye bakgrunnskonsentrasjoner kan være begrensende. Fluorescerende sporstoffer som uranin og rodamin kan påvises i svært små konsentrasjoner med spektrofluorometre. Dette gjør det mulig å måle større vannføringer og måle over lengre tidsperioder med betydelig lavere forbruk av sporstoff. Tabell 7-21 viser fordeler og ulemper med fortynningsmåling.

Tabell 7-21 Fordeler og ulemper ved måling av vannføring med fortynningsmåling

Betingelser for måling	
ISO 9555:1994	
- viktig å sikre tilstrekkelig utblanding av sporstoffet ved målestedet - vannføringen bør ikke være for dynamisk	
Fordeler	Ulemper
- stort måleområde - svært nøyaktig - kan brukes som kalibreringsmetode - ikke behov for nivåmåling - velegnet på målesteder hvor betingelsene til andre metoder ikke er oppfylt, som ved turbulente forhold, og hydrauliske sprang	- dynamiske endringer i vannføring kan være vanskelige å måle - stort sett egnet for kortvarig måling - kontinuerlig måling er mulig, men teknisk utfordrende - svært jevn strømming kan gi for dårlig utblanding av sporstoff

7.3.8 Volumetriske målemetoder

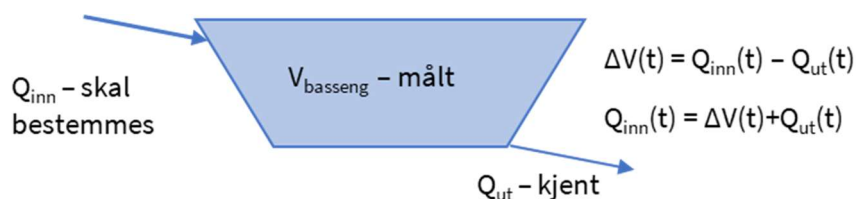
Volumetrisk vannføringsmåling kan gjøres gjennom kontinuerlig og diskontinuerlig måling. Ved kontinuerlig måling registreres endringene i et fordrøyningsvolum over tid. Måleprinsippet bygger på at vannstanden måles kontinuerlig i et basseng med kjent volum og kjent inn- eller utløpsmengde. Den tilsvarende vannføringen kan dermed bestemmes over tid fra målte vannstandsendringer. Korrekt vannføringsmåling betinger dermed nøyaktig vannstandsmåling kombinert med

¹⁴ NaCl

kunnskap om tilhørende bassengvolum. I bassenger med stort overflateareal kan bølger og vind føre til betydelige vannstandsavvik.

Ved diskontinuerlig måling samles volumstrømmen i en beholder eller et basseng over en tidsperiode (bøttemåling). Gjennomsnittlig vannføring for perioden kan dermed bestemmes fra samlet volum og forløpt tid. Denne metoden brukes ofte til kalibrering, spesielt for mindre vannføringer når forholdene tillater det.

Figur 7-32 viser en prinsippskisse for volumetrisk vannføringsberegning. Tabell 7-22 viser fordeler og ulemper ved denne målemetoden.



Figur 7-32 Prinsippskisse for volumetrisk vannføringsmåling, NVE

Tabell 7-22 Fordeler og ulemper ved volumetrisk fastsatt vannføring

Betingelser for måling	
- nøyaktig kunnskap om nivåavhengig kapasitet og volum - nøyaktig kunnskap om utløpsmengde eller kalibrert vannmengderegulator	
Fordeler	Ulemper
- svært nøyaktig metode ved mindre volumer og diskontinuerlig måling - kan brukes som kalibreringsmetode	- begrenset måleområde ved diskontinuerlig måling - diskontinuerlig metode leverer kun gjennomsnittlig vannføring for måleperioden - kontinuerlig målemetode er ikke spesielt nøyaktig. Avvik på vannmengderegulatoren kan gi store avvik. Nøyaktig nivåmåling kan være utfordrende

Tabell 7-23 Sammenlikning av kontinuerlige målemetoder

Hensyn	Måleterskel	Overløp	Transittid	Doppler	Pulsdoppler, cross correlation	Radar doppler	Laser Doppler	EMF fylt	EMF delvis fylt
Begroing i måleprofil	--	-	-	-	-	++	++	-	-
Tilstopping av måleprofil	-	-	-	--	--	++	++	++	++
Sedimentering i måleprofil	-	○	○	--	--	○	○	-	-
Mobilitet, fleksibilitet	--	--	○	++	++	+	+	-	-
Installasjonsinnsats	-	-	○	++	++	+	+	--	--
Mobil energiforsyning	++	++	-	++	++	++	++	--	--
Pris	++	++	-	○	-	--	--	--	--
Lav strømningshastighet	++	-	+	-	-	-	-	-	-
Høy strømningshastighet	-	○	++	○	○	++	++	+	+
Lav vannstand	+	-	○	--	-	+	○	○	--
Høy vannstand	-	○	++	-	+	○	○	++	+
Oppstuvning	--	--	+	-	-	--	--	○	○
Vedlikehold	++	++	+	-	-	+	+	++	++
Dimensjoner på utstyr	++	++	+	++	++	○	○	-	-
Forstyrrede strømningsforhold	+	+	○	-	-	--	--	○	○
Raskt endret vannføring	++	++	++	+	+	○	-	++	++
Nøyaktighet	++	-	+	○	+	○	○	++	○
Pålitelighet	++	++	+	○	○	+	+	++	++
Målemetoden betraktes som: + fordelaktig ○ gjennomsnittlig - ufordelaktig									

7.4 Måling av nedbør

7.4.1 Generelt

Nedbør er inngangsparameter til alle prosesser i det urbanhydrologiske kretsløpet. Nedbør har stor variabilitet over rom og tid og måles som regel på selektivt utvalgte steder. Målestedene kan påvirkes av uønskede hendelser, og vegetasjon og utbygging kan endre måleforholdene over tid. Valg av målested er derfor avgjørende for å oppnå nedbørdata med tilfredsstillende nøyaktighet og representativitet over tid.

Ved datafangst til urbanhydrologiske formål er det nødvendig å vurdere nedbørmålerens høydelag, eksposisjon og avstand til nedbørfeltet. Dersom måledataene skal brukes til modellkalibrering, bør nedbørmåleren plasseres i eller umiddelbart inntil nedbørfeltet. I større nedbørfelt anbefaler vi å benytte flere nedbørmålere, se Tabell 7-24.

Dynamikken i urbane nedbørfelt gjør det nødvendig å registrere nedbørdata i minutt oppløsning. Timedata er som regel uegnet til dette formålet.

7.4.2 Plassering av nedbørmålere

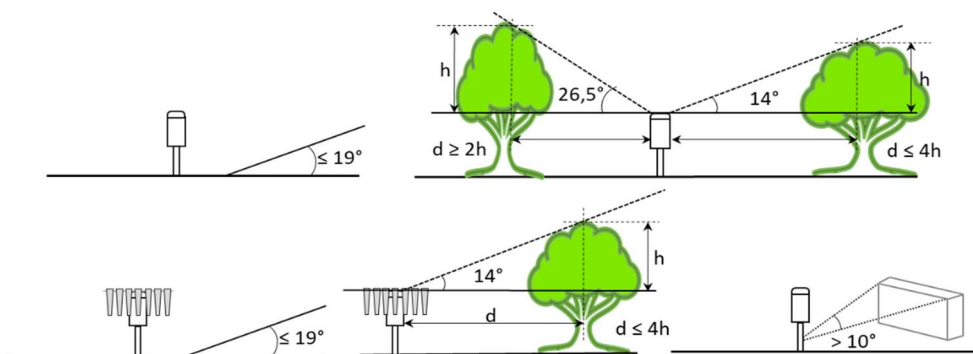
Vind og turbulens innvirker mye på målenøyaktigheten. Nedbørmålere bør derfor plasseres i flatt terreng med minst mulig direkte påvirkning fra bygninger og trær. Trær i nærområdet kan derimot innvirke positivt på vindforholdene. Anbefalingene nedenfor bygger på WMOs retningslinjer (World Meteorological Organization, 2018). Disse inngår også i Meteorologisk institutts veiledning om plassering av værstasjoner i norske kommuner (Meteorologisk institutt, u.d.).

Nedbørintaket bør heves ved store snødyp

Dersom det befinner seg hindringer nærmere stasjonen enn 1 ganger h , reduseres datakvaliteten så mye at det påvirker datasettenes egnethet for modellering, dimensjonering og lignende. Meteorologisk institutt anbefaler i tillegg at nedbørmålerens inntak plasseres 1,5 – 2 m over bakken, eller enda høyere dersom det forventes store snødybder.

Ønskelig plassering (Class 1)

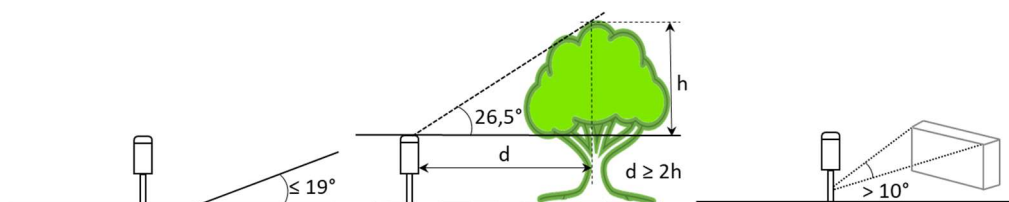
Klasse 1-stasjoner plasseres i flatt lende med inntil 19 grader helning, omgitt av lave hindringer i en avstand tilsvarende 2 til 4 ganger h , se Figur 7-33. Ved bruk av kunstig vindskjerm bør avstand til hindring være minst 4 ganger h .



Figur 7-33 Kriterier for plassering av klasse 1-stasjoner, NVE etter World Meteorological Organization (2018)

Grei plassering (Class 2)

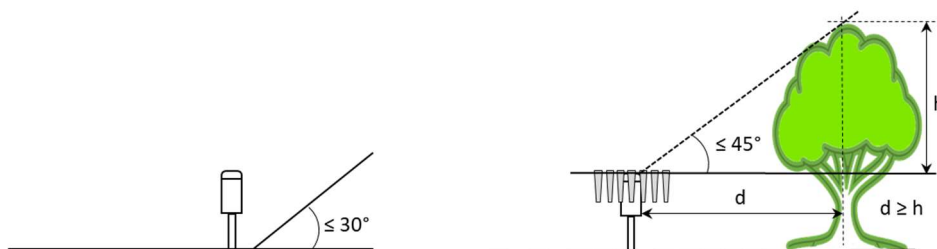
Klasse 2-stasjoner plasseres også i flatt lende, omgitt av åpne arealer med inntil 19 grader helning. Avstand til hindring bør være minst 2 ganger h , se Figur 7-34. Forventet målenøyaktighet er omtrent 5 % lavere enn for klasse 1.



Figur 7-34 Kriterier for plassering av klasse 2-stasjoner, NVE etter World Meteorological Organization (2018)

Minstekrav til plassering (Class 3)

Klasse 3-stasjoner plasseres på åpne arealer med inntil 30 grader helning. Avstand til hindring bør være minst lik h , se Figur 7-35. Forventet målenøyaktighet er omtrent 15 % lavere enn for klasse 1.



Figur 7-35 Kriterier for plassering av klasse 3-stasjoner, NVE etter World Meteorological Organization (2018)

Praktisk tilnærming til innsamling av nedbørdata til kalibrering og validering av modeller

I tettbygde strøk er det som regel vanskelig å finne velegnede målesteder. Målestedet må ikke kun understøtte rett datakvalitet, men også være skjermet mot hærverk og uønskede endringer i omgivelsene. Slike hensyn gjør at flate tak, ofte på offentlige bygninger eller industribygninger, benyttes til nedbørmåling. Skjermede steder pumpestasjoner, renseanlegg og private hager kan også egne seg til måling i tråd med kravene over.

Ideelt bør flere nedbørmålere fordeles i et grovt rutemønster over hele nedbørfeltet. I realiteten er ikke dette mulig. Det blir oftere slik at tilgangen til egnede målesteder blir styrende for målernes antall og plassering. Ved å installere to eller flere målere unngår en i det minste perioder uten måledata som følge av målesvikt.

Topografien påvirker anbefalt antall nedbørmålere per km². I hovedsakelig flate nedbørfelt kan det være tilstrekkelig med to nedbørmålere per fire km². I bratt terreng bør antallet økes, til dels betydelig, som vist i Tabell 7-24.

Tabell 7-24 Anbefalt antall nedbørmålere etter feltstørrelse (CIWEM Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2016)

Topografi	Antall nedbørmålere i nedbørfeltet
Flatt terreng	1 + 1 per 4 km ²
Middels bratt terreng	1 + 1 per 2 km ²
Bratt terreng	1 + 1 per 1 km ²

7.4.3 Målemetoder

Til nedbørmåling benyttes metoder med og uten oppsamling over tid. Den desidert vanligste metoden går ut på å samle nedbøren i en entydig definert åpning. Nedbørintensiteten bestemmes deretter ved å måle oppsamlet volum eller masse over tid. Metoder uten oppsamling bestemmer nedbørintensiteten kontaktløst eller ved hjelp av impulsmåling.

7.4.3.1 Måling med oppsamling

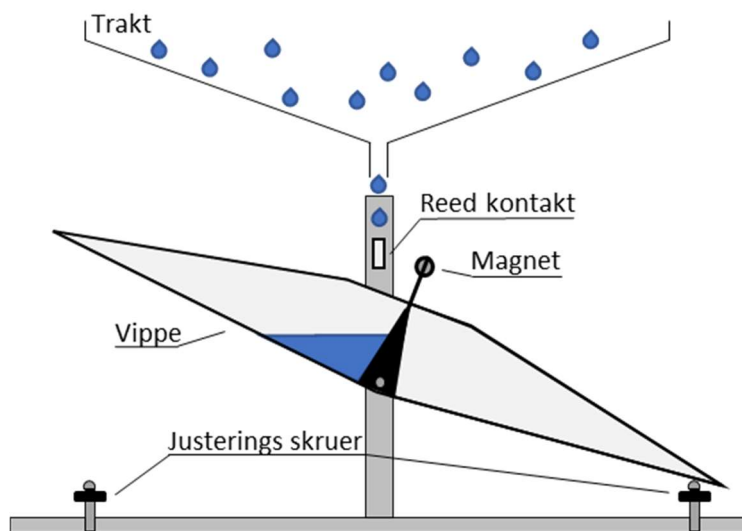
Måling med oppsamling er mest utbredt og kjennetegnes gjerne ved:

- nedbørsummen registreres i tidsintervaller fra få sekunder til flere minutter
- måleren kalibreres i laboratorium, og delvis i felt
- metoden har meget god reproducerbarhet og stabilitet over tid
- fare for undermåling som følge av vind - vindskjerming anbefales
- behov for regelmessig vedlikehold, kalibrering og service
- utsatt for målefeil som følge av fukting- og fordampningstap (tippet bucket)

Vippepluviometer (tippet bucket)

Regnvannet samles gjennom en sirkulær åpning og føres inn i vippen gjennom en trakt. Vippen har to identiske og kjente volumer som fylles og tømmes vekselvis. Hastigheten på vekslingen registreres via en elektrisk kontakt, se Figur 7-36. Metoden antar konstant vanntetthet på 1 g/cm^3 , slik at 1 g vann per 10 cm^2 oppsamlingsareal tilsvarer 1 mm nedbør.

Selve vippen er laget av metall eller plast med varierende oppsamlingsvolum. Designet gjør vippepluviometre sårbare for ikke-lineære måleavvik. Ved særlig lave eller kraftige nedbørintensiteter bør det derfor forventes negative måleavvik. I sistnevnte tilfelle kan feilen utgjøre så mye som 20 % for enkelte målesystemer (World Meteorological Organization, 2009). Flertallet av målesystemene korrigerer rådataene for å kompensere for slike systematiske feil. Slike korreksjoner løfter målenøyaktighet til $\leq 2 \%$ under laboratorieforhold (World Meteorological Organization, 2009).



Figur 7-36 Vippepluviometer, NVE

Vippepluviometre er utsatt for fordampingstap som følge av fuktighet som samler seg på overflaten i oppsamlingstrakt uten å renne av. For registrering av snø og sludd må oppsamlingskaret utstyres med et varmeelement. Dette fører ofte til ytterligere målefeil i form av fordampning fra traktoverflaten. I tillegg krever varmeelementet tilkobling til faststrøm. Vippepluviometre egner seg derfor dårlig til mobil vinterdrift. En oppvarmet ring rundt oppsamlingsåpningen bør også brukes på målesteder som er spesielt utsatt for kraftig snøfall.

Vektpluviometer (veiecelle)

Regnvannet samles opp gjennom en sirkulær åpning i en beholder. Produsentene tilbyr ulike løsninger til å bestemme vekten på oppsamlingsbeholderen. Felles for dem

alle er at nedbørintensiteten bestemmes fra vektendringen over en gitt tidsperiode. Ingen mekaniske eller bevegelige deler er nødvendig for å bestemme vektendringen. Det spiller heller ingen rolle om nedbøren faller i flytende eller fast form. Ved vinterdrift må imidlertid oppsamlingsbeholderen prepareres med frostvæske for å hindre et snølag i å danne seg i oppsamlingsbeholderen. Som for vippepluviometeret gjelder også her at en oppvarmet oppsamlingsring må benyttes på steder med kraftig snøfall.

Mens vippepluviometeret tømmer seg selv, må vektsystemene tømmes regelmessig. Kun noen få systemer tillater automatisk tømming av oppsamlingsbeholderen.

Vektpluviometre er lite utsatt for målefeil som følge av fordampningstap eller fuktighet som samler seg på overflaten uten å renne av. Ved sterk vind kan det derimot oppstå trykkendringer rundt oppsamlingsåpningen. Trykkendringene kan påvirke veiecellen og registreres feilaktig som regn. Rådata fra veieceller må som regel bearbeides og filtreres for å bestemme nedbørmengde og intensitet.

7.4.3.2 Måling uten oppsamling

Måling uten oppsamling er mindre utbredt og kjennetegnes gjerne ved:

- nedbørsummen registreres i tidsintervaller fra få sekunder til flere minutter
- kalibrering er enten ikke mulig eller kun mulig med stor innsats
- noen systemer registreres også på nedbørstypene regn, snø og sludd
- krever forholdsvis lite vedlikehold og få periodiske kontroller

Lave vedlikeholdskrav gjør at disse målesystemene hovedsakelig benyttes på steder med begrenset tilgjengelighet.

Optiske metoder

Metoden bygger på at regndråpene passerer en eller flere laserstråler og demper strålenes lysintensitet. Graden av demping er proporsjonal med regndråpenes diameter. Regndråpenes volum bestemmes fra diameteren til de detekterte dråpene ved hjelp av en størrelsesavhengig formfaktor. Ut fra dette kan nedbørintensiteten bestemmes for et gitt tidsintervall. Ved å bestemme fallhastigheten, dvs. tiden regndråpen demper laserstrålen, kan nedbørstypen også bestemmes ved hjelp av en statistisk evaluering.

Elektroakustiske metoder

Denne sensortypen måler påvirkningen av fallende nedbørpartikler på en plast- eller metallmembran. Når regndråpene treffer membranen utløses elektriske pulser. Ved hjelp av signalbehandling kan pulsene konverteres til antall og størrelse på de fallende dråpene. Disse kan igjen omregnes til nedbørsum og intensitet. Elektroakustiske metoder er uegnet til måling av små dråper eller snøflak med lav massetetthet (World

Meteorological Organization, 2009). Dette er imidlertid underordnet dersom nedbørdataene skal benyttes til urbanhydrologisk modellering.

Mikrobølgemetode (mikroregnradar)

I motsetning til tradisjonell værradar benytter denne metoden mikrobølger som sendes i vertikal retning. Systemet måler fallhastigheten og intensiteten til tilbakespredningen fra de utsendte mikrobølgene. Sammenhengen mellom regndråpenes fallhastighet og diameter er velkjent (VDI 3786 Blatt 7, 2010). Fallhastigheten detekteres fra frekvensforskyvningen til signalet. Intensiteten til det tilbakespredte signalet avhenger av antall partikler og partiklenes vanninnhold. Nedbørens intensitet kan dermed bestemmes fra disse variablene over et gitt tidsrom.

7.4.3.3 Værradar

Klassiske regnmålere registrerer kontinuerlig regnmengde og nedbørsum i et punkt. Selv om målestedet er valgt, uteblir opplysninger om nedbørfordelingen i feltet. Værradarens styrke ligger derimot i at den gir et tredimensjonalt øyeblikksbilde av regnintensiteten for et betydelig areal.

Roterende værradarer skanner himmelen over horisonten med pulserende mikrobølger. Pulsene reflekteres av regndråper, snø og is. Radaren måler deretter refleksivitet og avstand til partiklene fra pulsens transittid. Radarens rekkevidde bestemmes av topografiske hindre. I tillegg avtar pulsintensiteten med avstanden på grunn av strålingsvinkelen. Brukbar rekkevidde kan være rundt 200 km, men målingens kvalitet og romlige oppløsning avtar med økende avstand til radarstasjonen. Oppnåelig tidsoppløsningen er vanligvis i området 5-15 minutter (Bertrand-Krajewski, et al., 2021)

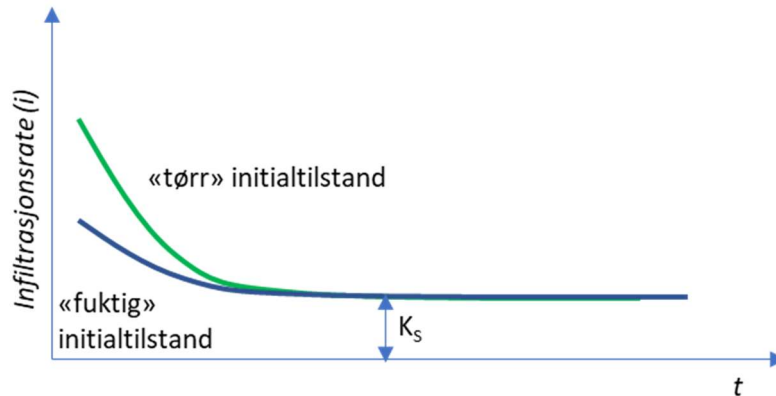
Nedbørintensiteten avledes fra partiklenes målte refleksivitet. Refleksiviteten påvirkes av partiklenes sammensetning, størrelse, fordeling og tilstand i tillegg til egenheter ved selve målemetoden. Radarmåling er derfor beheftet med en del usikkerhet. For å redusere usikkerheten kan en interpolere signaler fra overlappende radarstasjoner. I tillegg bør radardata justeres etter nedbørdata fra stasjonære nedbørmålere innenfor radarens dekningsområde. Det er viktig å sikre at de lokale måledataene er av god kvalitet. Avstanden til radarstasjonen har stor betydning. Ved å øke tettheten i målestasjonsnettene kan radarmålingenes kvalitet heves betraktelig.

Bruk av radardata anbefales i hovedsak for store nedbørfelt med ujevnt fordelt nedbør. Ujevnt fordelt nedbør oppstår gjerne om sommeren eller i områder med sammensatt topografi og store høydeforskjeller. Dersom det ikke finnes stasjonære nedbørmålinger i nedbørfeltet, bør radarens nedbørintensitetsverdier betraktes med varsomhet.

7.5 Måling av infiltrasjon

7.5.1 Generelt om infiltrasjon

Infiltrasjonsraten, i beskriver hastigheten til regnvann som trenger ned i jorda. Infiltrasjonsraten avtar gjennom regnhendelsen fordi jordas absorberende evne avtar etter hvert som jorda mettes. Når jorda er fullstendig mettet, tilsvarer infiltrasjonsraten mettet hydraulisk ledningsevne¹⁵, K_s . Infiltrasjonsraten i begynnelsen av en regnhendelse er svært påvirket av initialtilstanden, se Figur 7-37.



Figur 7-37 Infiltrasjonsraten avtar over tid ved tørr og fuktig initialtilstand, NVE

Jordas infiltrasjonsevne måles stort sett ved a) infiltrasjonsrate over tid, $i_{(t)}$, avhengig av initialtilstand, b) mettet hydraulisk ledningsevne, K_s eller kumulativ infiltrasjon i et gitt tidsrom, $\int i_{(t)}$, avhengig av initialtilstand.

Jordas infiltrasjonsevne påvirker arealavrenningen

K_s blir ofte brukt til å dimensjonere infiltrasjonstiltak, og innvirker derfor på tiltakets størrelse. Forskning viser at hydrologiske prosesser i grunnen har større innvirkning på overflateavrenningen enn tidligere antatt (NVE, 2022). Ettersom valg av parametere for infiltrasjon innvirker på dimensjoneringen av overvannstiltak, er det nødvendig å fremskaffe kunnskap om infiltrasjonsskapasiteten i urbane strøk.

¹⁵ Mettet hydraulisk konduktivitet

Jordas infiltrasjonsevne varierer i tid og rom

De viktigste årsakene til varierende mettet hydraulisk ledningsevne er:

- jordart og andel organisk materiale
- horisontalt vekslende løsmasser og aurbelle¹⁶
- jordstruktur, porøsitet og antropogen påvirkning, f.eks. komprimering
- grunnvannstand
- vegetasjonsdekke, også gjennom året
- jordbearbeidende insekter og meitemark
- vann- og jordtemperatur
- frossen jord

Infiltrasjonsmålinger er heterogene i tid og rom. Undersøkelser utført av NVE antyder likevel at en kan forvente mettet hydraulisk ledningsevne i området 10^{-3} – 10^{-5} m/s på grønne gressplener i urbane områder (NVE, 2022). Seip (2022) oppsummerer imidlertid den store usikkerheten som ligger i dagens målemetoder. Han fraråder generelt å legge enkeltmålinger til grunn for fastsettelse av mettet hydraulisk ledningsevne.

I urbane områder må en alltid ta høyde for at undergrunnen er påvirket av drenering, rørgater, masseutskifting og komprimering. Uten kunnskap om hva som befinner seg nede i bakken bør det gjennomføres en rekke målinger for å fastsette mettet hydraulisk ledningsevne. Den som samler inn slike data, bør ha et bevisst forhold til hvordan tidspunktet målingen gjennomføres og sesongvise endringer i temperatur og vegetasjonsdekke påvirker måleresultatet. Dette er godt redegjort for i Paus Muthanna, & Braskerud (2015) og Seip (2022). Det er heller ikke gitt at infiltrasjonsevnen er den samme før og etter overvannstiltakets etablering. Infiltrasjonsevnen kan også endre seg over tid som følge av tilførsel av slam, endret vegetasjonsdekke eller utvasking av finstoff.

7.5.2 Målemetoder

Vi vil her beskrive to målemetoder for infiltrasjon som kan utføres i felt med begrenset teknisk innsats, dobbeltringinfiltrrometer (DRI) og modifisert Philip-Dunne (MPD). DRI-metoden antas mest nøyaktig. MPD-metoden er så enkel i bruk at den tillater et større antall infiltrasjonsmålinger med moderat innsats. Det finnes også andre typer metoder som bygger bl.a. på andre parametere, disse nevnes ikke.

7.5.2.1 Dobbelttringinfiltrrometer, DRI

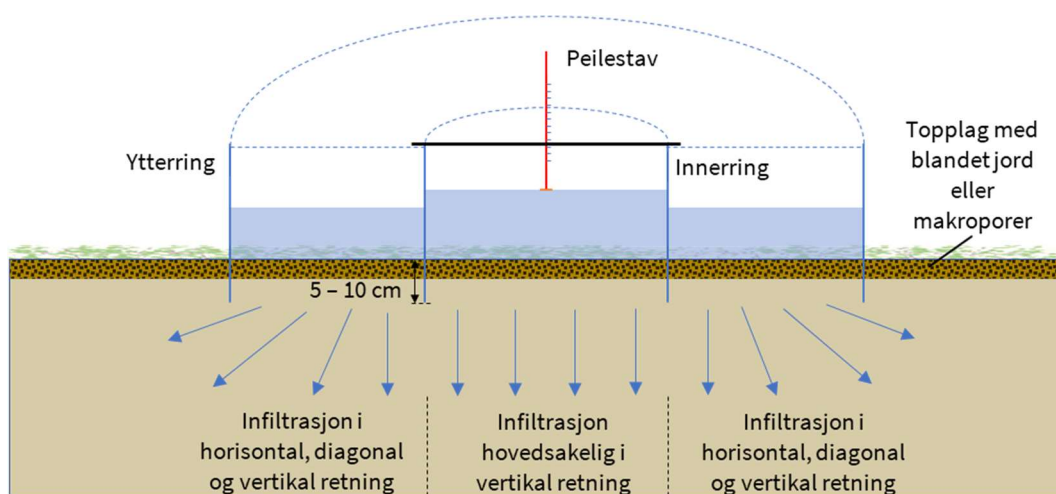
Dobbelttringinfiltrrometeret, se Figur 7-38, består av to metallringer med ulik diameter. Ringene sentreres nøyaktig utenpå hverandre og slås 5 - 10 cm ned i bakken. Det er viktig at ringene trenger gjennom et porøst jordlag med makroporer på toppen.

¹⁶ Hardt og ugjennomtrengelig jordlag under jordoverflaten

Målingen utføres i den indre ringen. Den konsentriske ringplasseringen sikrer at minst mulig vann fra den indre ringen infiltrerer horisontalt. Horisontal infiltrasjon fører til at infiltrasjonsevnen overvurderes.

Ringene fylles opp raskt med 5-10 cm vann. Vannstanden i den indre ringen måles deretter regelmessig. Når vannstanden er seget ned i grunnen fylles ringene på nytt. Ringene fylles til samme vannstand i begge ringene. Infiltrasjonsforsøket avsluttes når tømmetiden til indre ring er konstant over flere påfyllinger.

Målemetoden kan være tidskrevende, fra 1-2 timer og enkelte ganger opptil et døgn. Påfylling og registrering av vannstand og påfyllingstidspunkt krever tilstedeværelse. Det går også med store mengder vann, som må skaffes til veie og håndteres. Den store innsatsen gjør at det ofte blir utført flere DRI-målinger samtidig på området som skal undersøkes.

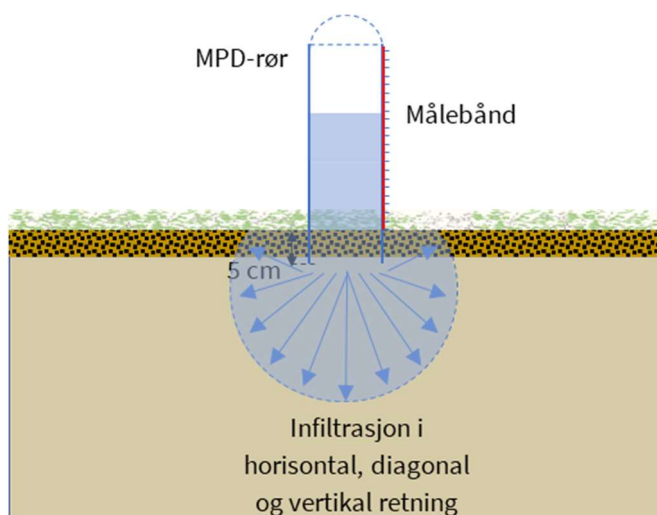


Figur 7-38 Infiltrasjonsmåling ved hjelp av DRI, NVE

7.5.2.2 Modifisert Philip-Dunne infiltrometer, MPD

MPD-infiltrometeret, se Figur 7-39, består av en enkel sylinder med et målebånd festet på siden. Dimensjonene til sylindren kan variere. Diameteren er ofte 0,1 m og høyden 0,5 m. Jordfuktigheten måles før infiltrasjonsmålingene tar til. Dette kan enten gjøres med en jordfuktighetsmåler eller i laboratoriet fra jordprøver tatt ca. 10 – 20 cm fra målesylindren.

Sylindren blir deretter slått loddrett ca. 5 cm ned i bakken. Etter påfylling av vann registreres jevnlig vannstand og tilhørende tidspunkt inntil hele vannsøylen er infiltrert. Avhengig av jordtype kan dette ta fra 20 minutter til flere timer. Registreringsintervallet velges slik at det blir gjennomført minst 5 til 10 avlesninger i løpet av infiltrasjonsforsøket.



Figur 7-39 Infiltrasjonsmåling ved hjelp av MPD, NVE

Til forskjell fra DRI, tillater MPD å gjennomføre et stort antall målinger samtidig innenfor et område med moderat innsats. Metoden krever dessuten betydelig mindre mengde vann sammenliknet med DRI.

Beregningen av K_s baserer seg på et formelsett som kan løses iterativt (Nestingen, 2007). Paus (2022) viser fremgangsmåten ved å bruke tilsvarende koding i MATLAB. Inngangsparameterne er bl.a. synkehastighet og jordfuktighet før og etter infiltrasjonsforsøket.

Det er også mulig å beregne hydraulisk ledningsevne på en forenklet måte ved hjelp av korreksjonsfaktorer for ulike jordtyper (Solheim, et al., 2017). Korreksjonsfaktoren multipliseres med observert infiltrasjonsraten f_{obs} :

$$f_{obs} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad [7]$$

Hvor

Δh observert vannstandsending i sylindren [cm]
 Δt observert tidsrom [h]

For finkornete jordarter med leirprosent > 18 %:

$$K_s = 0,6 \cdot f_{obs} \text{ - gyldighetsområde } 7 - 53 \text{ cm/h}$$

For grovkornete jordarter med leirprosent < 18 %:

$$K_s = 0,8 \cdot f_{obs} \text{ - gyldighetsområde } 25 - 73 \text{ cm/h}$$

7.6 Måling av smeltevann

I tillegg til nedbør i flytende form, spiller snø en viktig rolle i det hydrologiske kretsløpet. Snø på bakken renner først av når den smelter. Dette kan gi forsinket avrenning i både naturlige og urbane nedbørfelt. Den høyeste avrenningen fra snøsmelting faller ofte sammen med nedbør, og kan føre til betydelige avrenningstopper. Snøsmeltebrett benyttes til å fastsette mengden av smeltevann lokalt.

7.6.1 Snøsmeltebrett, snølysimeter

Målemetode

Snøsmeltebrett består av et oppsamlingskar hvor smeltevannet renner av og mengden registreres mer eller mindre kontinuerlig. Både størrelsen på oppsamlingskaret og metoden som benyttes til å fastsette smeltevannmengden kan variere, og må av og til tilpasses forholdene på målestedet.

Her beskrives et måleoppsett brukt av NVE i flere tiår (Figur 7-40). Selve smeltebrettet er laget av aluminium eller plast. Oppsamlingsområdet er 1,5 x 1,5 meter, og brettet er omgitt av en 10 cm høy kant (skvettbalansekant) rundt. Kanten skal hindre at sprøytevann skvetter inn på brettet fra utsiden og omvendt når det regner. I tillegg skal ikke noe smeltevann som samler seg på overflaten av smeltebrettet renne utover uten å bli registrert. Smeltevannet føres til avløpet i et av hjørnene med et fall på ca. 5 %. Avløpet har en diameter på ca. 50 mm. Avløpsledningen skal legges med en jevn fall på minst 1:10.

Smeltevannet som renner av brettet, samles i en beholder med kjent volum og samtidig vannstandsregistrering. Vannstandsendingen over tid gjenspeiler dermed smeltevannsavrenningen. Beholderen må tømmes regelmessig, som regel ved hjelp av en nivåstyrt pumpe. Beholderen må tømmes raskt ettersom vannstandsmålingene blir ubrukelige under tømmesekvensen. Det er viktig at oppsamlingsbeholderen dimensjoneres slik at den tar hensyn til både tømmefrekvens og oppløsning til nivåmålingene. NVE erfarer at beholdere med diameter i størrelsesorden 30 cm og volum som representerer en nedbørekvivalent på 100 mm kan være hensiktsmessig.

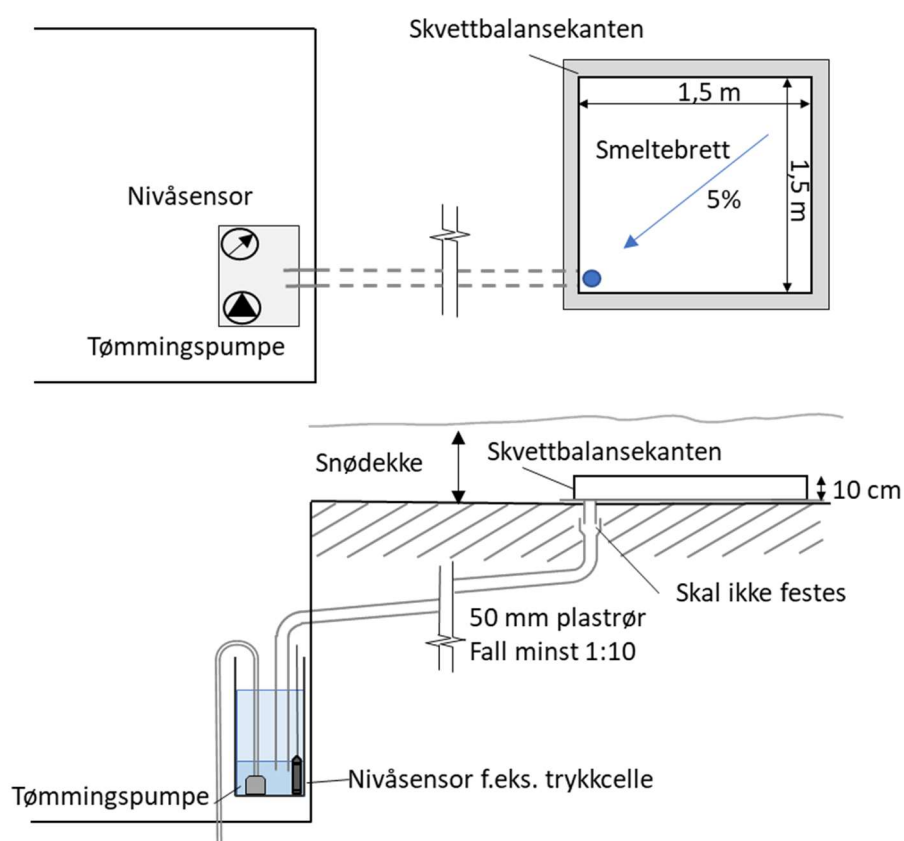
Smeltevannmengden kan også måles ved hjelp av et vippekar hvor vannmengden tilsvarer antall vipp. Målemetoden ligner et vippepluviometer (Kap. 7.4.3.1) med større volum.

Måleusikkerhet

Både oppsamling og måling av smeltevannmengden innebærer usikkerhet utover det som er vanlig for de fysiske sensorene som brukes. Det kan for eksempel strøme varme fra målestasjonen opp gjennom rørledningen til oppsamlingsbeholderen. Dette kan smelte snøen rundt sluket selv omgivelsene ellers har temperaturer under frysepunktet. Dette vil gi feil måleresultat.

For å unngå konstant varmestrøm gjennom ledningen fra den frostfrie målekummen/stasjonen, bør avløpsrøret føres inn i oppsamlingstanken under vannstanden. Spesielt om høsten kan det samle seg mye løv i snøsmeltebrettet. Ledningen bør derfor inspiseres og rengjøres jevnlig.

Ved bruk av vippesystemer kan det monteres en vannlås som hindrer varme i å trenge opp i ledningen til snøsmeltebrettet. Dette øker imidlertid faren for blokkering, spesielt ved mye løv på brettet. Som alle vippesystemer bør vippen kontrolleres regelmessig og justeres ved behov. Det er også viktig å være oppmerksom på at volumregistreringen kan bli unøyaktig i perioder med lav snøsmelting som følge av fordamping fra vippevolumet.



Figur 7-40 Prinsippskisse for snøsmeltebrett

8 Målenøyaktighet

Målenøyaktighet er et kvalitativt vurderingsbegrep. Under måling bør en ha et bevisst forhold til hvilken måleverdi som representerer sann verdi. Den sanne verdien, referanseverdien, kan som regel ikke fastsettes ved måling. Måleavvik er differansen mellom målt verdi og tilhørende referanseverdi. Måleavviket angis med en tallverdi og et fortegn, men gir ikke i seg selv noen indikasjon på målingens kvalitet ettersom de representerer enkeltverdier. Dette kapitlet beskriver ulike årsaker til måleavvik og statistisk tilnærming til å vurdere målingers kvalitet.

8.1 Grove feil

Grove feil er avvik som langt overskrider forventede avvik fra referanseverdien. Grove feil kan opptre midlertidig eller gjennom hele måleperioden. Vanlige årsaker kan være:

- feilavlesning
- feil håndtering av måleutstyr
- feil installasjon av måleutstyr
- beregnings- og evalueringsfeil
- feil ved dataoverføring
- defekter på måleutstyret uten fullstendig funksjonssvikt
- feil valgt målested
- bruk utenfor sensorenes måleområde
- feil oppmålt geometri ved målestedet

Grove feil gjør vanligvis måleresultatene ubrukelige. Det er derfor viktig å avdekke grove feil under datakontrollen slik at årsakene kan fastslås og mottiltak iverksettes.

8.2 Tilfeldig og systematiske målefeil

Avvik mellom målt verdi og referanseverdien inndeles i tilfeldige og systematiske feil.

Tilfeldige målefeil oppstår spontant

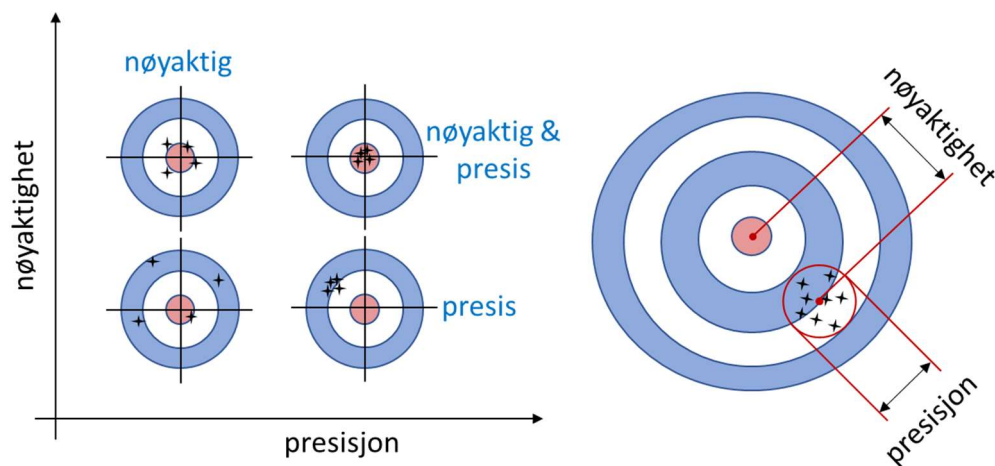
Tilfeldige feil forårsakes av uforutsigbare og tilfeldige tidsmessige og romlige endringer i målesystemets omgivelser. Tilfeldige målefeil kan ikke unngås helt. Under konstante forhold kan den tilfeldige målefeilen reduseres ved å øke antall observasjoner. Det statistiske gjennomsnittet av de tilfeldige målefeilene forventes dermed å gå mot 0 ettersom antall observasjoner øker. Den tilfeldige feilen uttrykker målingenes presisjon, se Figur 8-1.

Systematiske målefeil kan være konstante eller varierende over tid

Systematiske målefeil kan være i form av konstante avvik mellom målt verdi og referanseverdien. De kan også være i form av avvik som veksler med ytre påvirkninger som for eksempel trykk og temperatur. Mulige årsaker kan være:

- mangel ved måleinstrumentene, for eksempel utilstrekkelig justering
- ytre påvirkning i form av oppvarming, slitasje eller aldring
- avvik mellom antatt og faktisk påvirkende forhold, for eksempel ikke-symmetrisk hastighetsprofil
- påvirkninger på målevariabelen forårsaket av sensoren selv
- bruk av forhold mellom målevariabler som ikke samsvarer med den faktiske kombinasjonen til disse variablene

Det anbefales å legge ressurser i å identifisere og minimere systematiske målefeil. Målingene korrigeres for den systematiske feilen, men selv etter korreksjon oppnås kun et estimat på referanseverdien. Dette skyldes at det gjenstår måleusikkerhet som følge av tilfeldige feil og ufullkommenheter i korreksjonen. Den systematiske feilen uttrykker målingenes nøyaktighet, se Figur 8-1.

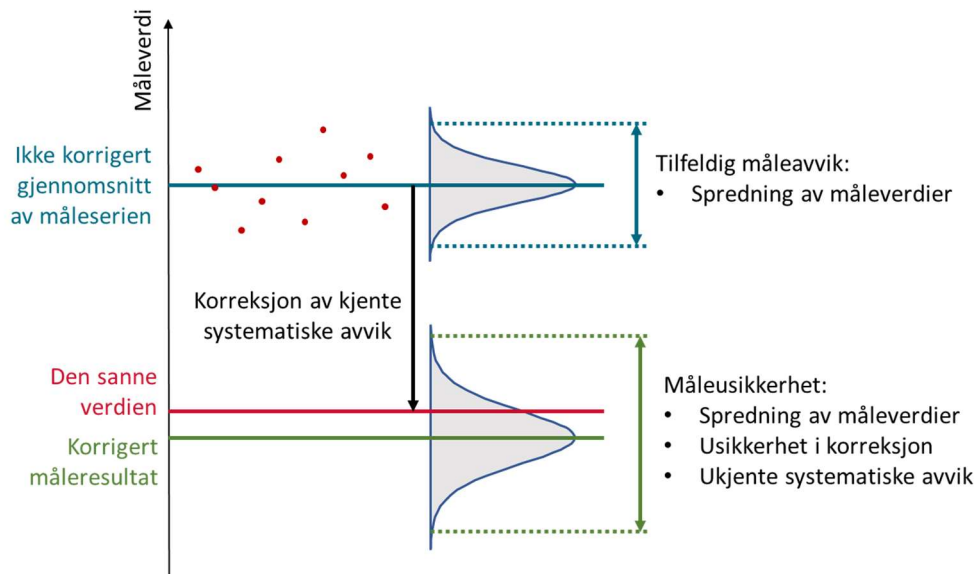


Figur 8-1 Forskjellen på målenøyaktighet og målepresisjon, NVE

8.3 Måleusikkerhet

Som beskrevet inneholder alle måleverdier feil. For å vurdere måleresultatenes kvalitet eller pålitelighet trengs et mål på deres måleusikkerhet. Måleusikkerheten utgjør summen av tilfeldige påvirkninger, uidentifiserte systematiske påvirkninger eller deres ufullkomne retting. Måleusikkerheten defineres som et estimat knyttet til et måleresultat, som angir området der det er rimelig å forvente at den sanne verdien ligger (ISO/IEC 98-3, 2008). Måleusikkerheten vil, dersom den er beregnet og

rapportert etter en enhetlig prosedyre, uttrykke graden av tillit til at den målte variabelen ligger innenfor et spesifikt verdiområde.



Figur 8-2 Måleavvik, korrektur og måleusikkerhet, NVE

Usikkerheten til en målt variabel fastsettes ved hjelp av standardusikkerheten, u ¹⁷. Denne tilsvarer det statistiske standardavviket til en variabel som blir målt gjentatte ganger. Standardusikkerheten kan bestemmes på to måter:

Metode A

Standardusikkerheten, u beregnes fra gjentatte måling av en variabel under tilsvarende måleforhold.

Metode B

Standardusikkerheten, u estimeres på bakgrunn av forkunnskaper.

For naturlige eller tekniske prosesser kan helt tilsvarende måleforhold vanligvis ikke gjenskapes. Bestemmelsesmetode B blir derfor vanligvis benyttet til å bestemme standardusikkerheten. Resultatene vil, med påpasselig bruk, tilsvare de for bestemmelsesmetode A.

¹⁷ Uncertainty

Dersom resultatvariabelen er sammensatt av flere inngangsvariabler, har standardusikkerhetene til de individuelle inngangsvariablene ulik virkning på resultatvariabelen. ISO/IEC 98-3: (2008) spesifiserer beregningsmetoder for dette.

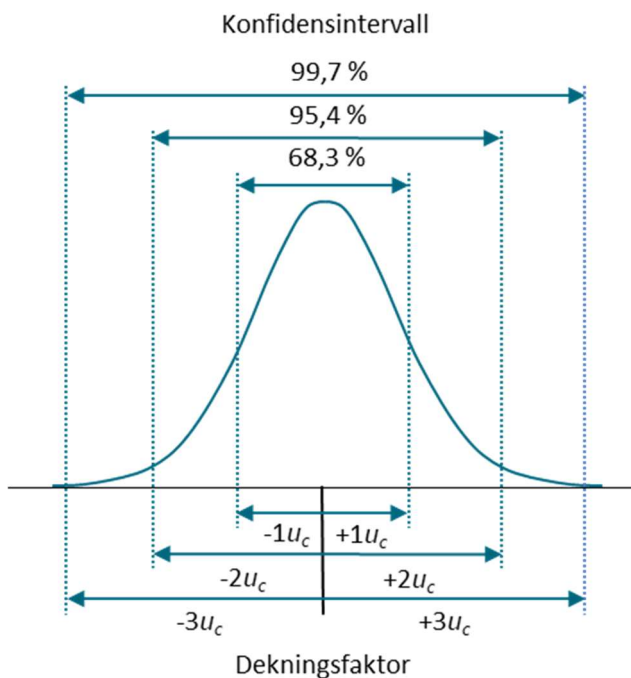
Den resulterende usikkerheten til resultatvariabelen, y kalles den kombinerte standardusikkerheten, u_c . Den utvidede måleusikkerheten, U spesifiserer et område (konfidensintervall) rundt måleresultatet som kan forventes å dekke en stor del av fordelingen av verdier som meningsfullt kan tilordnes målevariabelen Y , se Figur 8-3. Den oppnås ved å multiplisere den kombinerte standard måleusikkerheten $u_c(y)$ med dekningsfaktor k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad [8]$$

Hvor

U	Utvidet måleusikkerhet
k	Dekningsfaktor
u_c	Standard måleusikkerhet
y	Målevariabel

Ved bruk av dekningsfaktor $k = 2$ er det for eksempel ~95 % sannsynlig at den sanne verdien ligger innenfor konfidensintervallet rundt måleverdien $\pm$ den utvidede usikkerheten, U , forutsatt statistisk normalfordeling.



Figur 8-3 Sammenheng mellom konfidensintervall og dekningsfaktor, NVE

Måleavvik kan ha varierende størrelser innenfor måleområdet. Måleavvikene kan angis som absolutte (formel 9) eller relative (formel 10) verdier:

$$x_a = x - x_{ref} \quad [9]$$

$$x_a = \frac{x - x_{ref}}{x_{ref}} \quad [10]$$

Hvor

x_a	Avvik
x	Målt verdi
x_{ref}	Referanseverdi

Litt om praktiske usikkerhetsvurderinger

Usikkerhet knyttet til selve sensoren

Det er vanskelig å vurdere og sammenlikne oppgitt usikkerhet i tekniske produktspesifikasjoner fra ulike produsenter. Usikkerhet blir ofte oppgitt i form av relativ usikkerhet på maksimalt måleområde eller 'full scale output', FS/FSO. Disse verdiene kan være misvisende små. Angitt måleusikkerhet på for eksempel 0,25 % FS/FSO høres lite ut for en nivåsensor, men med et måleområde på 0-10 m tilsvarer det en absolutt usikkerhet på 2,5 cm. Slik usikkerhet vil være utilstrekkelig ved vannføringsmåling ved hjelp av for eksempel måleterskel.

Usikkerheten i felt, in situ

I tillegg til sensorusikkerheten, kan man anta at den oppgitte målenøyaktigheten sjelden lar seg oppfylle i praksis. Her er det ingen laboratorieforhold. Ytre påvirkning og forstyrrelser av ymse slag fører til vesentlig høyere usikkerhetsverdier enn det som står oppgitt i tekniske produktdatablad. Eksempler på vanlige påvirkninger er:

- Sensorens posisjon i måleprofilen
- Bølgedannelse på vannoverflaten
- Endringer i strømtversnittarealet på grunn av sedimentering
- Lokale strømningsforstyrrelser på grunn av hydrauliske eller byggetekniske forhold

Tabell 8-1 oppgir forventede usikkerhetsverdier for ulike målemetoder. Legg merke til at tallene er oppgitt med dekningsfaktor = 1. Dersom dekningsfaktor = 2 aksepteres må verdiene multipliseres med 2. Usikkerhetsverdiene bygger på erfaringer og praktisk testing i fagmiljøet. Tallene må ikke betraktes som absolutte, men deres størrelsesorden kan legges til grunn. Det er i det store og hele slik at usikkerheten i

stor grad bestemmes av egenskapene ved målestedet, lokale forhold, utstyrvalg og ikke minst fagkunnskapen til fagpersonene som deltar i arbeidet.

Tabell 8-1 Typisk størrelsesorden for relativ standardusikkerhet, $u^*(x)$. Verdiene er oppgitt i % for sensorer brukt til å måle vannstand og vannføring i ledningsnett. Merk at verdiene er oppgitt med dekningsfaktor $k = 1$. Etter Bertrand-Krajewski et al. (2021), DWA (2011).

Prosent av maksimalt måleområde	6	10	20	25	30	50	75	100
Vannstand								
Ultralydsensor 0-2 m	1,4	0,9	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
Trykksensor 0-2 m	2,4	1,4	0,7	0,6	0,5	0,3	0,2	0,1
Trykksensor 0-6 m	1,9	1,2	0,6	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1
Vannføring								
Venturirenn	4,3	4,0	3,6	3,6	3,5	3,4	3,3	3,3
EMF, fylt strømtverrsnitt	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
EMF, delvis fylt strømtverrsnitt	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0
Rektangulær terskel	2,5	2,0	1,8	1,7	1,7	1,5	1,5	1,3
V-terskel	2,5	2,4	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9
Kombinert måling av vannstand, h og maksimal strømningshastighet, v_{maks}								
Antatt delvis fylt rør DN 600-1400mm og $h \geq 8$ cm med tilnærmet aksialsymmetrisk hastighetsfordeling	6,6	6,6	6,5	6,5	6,5	6,3	6,1	6,5
Kombinert måling av vannstand, h og strømningshastighet, $v(h)$								
Antatt delvis fylt rør DN 600-1400mm og $h \geq 8$ cm med tilnærmet aksialsymmetrisk hastighetsfordeling	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0
Fortynningsmetode, kontinuerlig	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Merk *Uten hensyntagen til usikkerhetskomponenter fra oppmåling og overflatebølger **Usikkerheten øker i øvre del av måleområdet som følge av hydrodynamiske effekter og måleeffekter								

9 Bibliografi

Ahmed, F., Gulliver, J. S. & Nieber, J. L., 2011. *A New Technique to Measure Infiltration rate for Assessing*. [Internett]

Available at: <https://www.landprofile.com/pdf/PAP004847.pdf>

Ahmed, F. et al., 2014. A Modified Philip–Dunne Infiltrometer for Measuring the Field-Saturated Hydraulic Conductivity of Surface Soil. *Vadose Zone Journal*, Oktober.

Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2001. *Messeinrichtungen an Regenüberlaufbecken - Praxisratgeber für Planung, Bau und Betrieb*. München: Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft.

Bertrand-Krajewski, J.-L., Clemens, F. & Lepot, M., 2021. *Metrology in Urban Drainage an Stormwater Management: Plug and Pray*. London: IWA Publishing.

Blomquist, D., Hammarlund, H., Härle, P. & Karlsson, S., 2016. *Rapport Nr 2016-15 Riktlinjer för modellering av spillvattenförande system och dagvattensystem*, s.l.: Svenskt Vatten Utveckling.

CIWEM Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2016. *Rainfall Modelling Guide*, London: CIWEM.

CIWEM Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2017. *Code of Practice for the Hydraulic Modelling of Urban Drainage Systems*, London: CIWEM.

DIN 19559-1, 1983. *Measurement of flow of waste water in open channels and gravity conduits; general information*, s.l.: s.n.

DIN 19682-7, 2015. *Soil quality - Field tests - Part 7: Determination of infiltration rate by double ring infiltrometer*. s.l.:s.n.

DWA, 2011. *Merkblatt DWA-M 181 Messung von Wasserstand und Durchfluss in Entwässerungssystemen*, Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V..

Eijkelkamp, 2018. *Double ring infiltrometer - Operating instructions*, s.l.: s.n.

Einfalt, T., Johann, G. & Pfister, A., 1998. On the spatial validity of heavy point rainfall measurements. *Water Science and Technology*, pp. 21-28.

Fuchs, L., 1987. Hydrologische Leistungsfähigkeit städtischer Kanalnetze. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover*. Bd. 63.

Henrichs, M., 2015. *Einfluss von Unsicherheiten auf die Kalibrierung urban-hydrologischer Modelle*. s.l.:Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften.

Herschey, R. W., 2009. *Streamflow Measurement*. London: CRC Press.

Haas, G., 2005. *Vergleich und Kalibration von unterschiedlichen Durchflussmessmethoden - Diplomoppgave*. Graz: Technischen Universität Graz.

Ing. Strand og Grindahl as, N., 2018. *Miljø blad Nr 55-2018 - Nivåmåling/trykkmåling*. s.l.:Stiftelsen VA/Miljø-blad.

ISO 1438-4, 2017. *Hydrometry — Open channel flow measurement using thin-plate weirs*, s.l.: s.n.

ISO 15769, 2010. *Hydrometry — Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods*. s.l.:s.n.

ISO 20456, 2017. *Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidance for the use of electromagnetic flowmeters for conductive liquids*. s.l.:s.n.

ISO 24578, 2021. *Hydrometry — Acoustic Doppler profiler — Method and application for measurement of flow in open channels from a moving boat*. s.l.:s.n.

ISO 3846, 2008. *Hydrometry — Open channel flow measurement using rectangular broad-crested weirs*. s.l.:s.n.

ISO 4359, 2022. *Flow measurement structures — Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes*. s.l.:s.n.

ISO 4360, 2020. *Hydrometry — Open channel flow measurement using triangular profile weirs*, s.l.: s.n.

ISO 4374, 1990. *Liquid flow measurement in open channels — Round-nose horizontal broad-crested weirs*. s.l.:s.n.

ISO 4377, 2012. *Hydrometric determinations — Flow measurement in open channels using structures — Flat-V weirs*. s.l.:s.n.

ISO 5167-1, 2003. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 1: General principles and requirements*. s.l.:s.n.

ISO 5167-4, 2022. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 4: Venturi tubes*. s.l.:s.n.

ISO 6416, 2017. *Hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic transit time (time of flight) method*. s.l.:s.n.

ISO 748, 2021. *Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels - Velocity area methods using point velocity measurements*. s.l.:s.n.

ISO 9555-1, 1994. *Measurement of liquid flow in open channels — Tracer dilution methods for the measurement of steady flow — Part 1: General*. s.l.:s.n.

ISO 9555-3, 1992. *Measurement of liquid flow in open channels — Tracer dilution methods for the measurement of steady flow — Part 3: Chemical tracers*. s.l.:s.n.

ISO 9555-4, 1992. *Measurement of liquid flow in open channels — Tracer dilution methods for the measurement of steady flow — Part 4: Fluorescent tracers*. s.l.:s.n.

ISO 9826, 1992. *Measurement of liquid flow in open channels — Parshall and SANIIRI flumes*. s.l.:s.n.

ISO/IEC 98-3, 2008. *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. s.l.:s.n.

ISO/TS 24154, 2005. *Hydrometry — Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers*. s.l.:s.n.

Meteorologisk institutt, u.d. *Værstasjoner i norske kommuner- veiledning for kommuner som ønsker å samarbeide med Meteorologisk institutt om datalagring, varsling- og klimaprodukter*. [Internett]

Available at: https://www.met.no/kss/_attachment/download/1fa4c89d-794e-4346-8155-1181687ff0c1:4825af9e0a7094787ce3c219067ebe890d9907f7/vaerstasjoner-i-norske-kommuner2.pdf

[Funnet 01 03 2023].

MFT, Miljø- og Fluidteknikk, 2019. *Miljø blad Nr 126-2019 - Terskelsystemer- Nivåregulering og avlastning av store vannmengder*. s.l.:Stiftelsen VA/Miljø-blad.

Morgenschweis, G., 2018. *Hydrometrie Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen*. Berlin: Springer Vieweg.

Nesting, R. S., 2007. *The Comparison of Infiltration Devices and Modification of the Philip-Dunne Permeameter for the Assessment of Rain Gardens*. Minneapolis: Department of Civil Engineering, University of Minnesota.

Nivus GmbH, 2020. *Installation Instruction - Correlation and Doppler Sensors*. Eppingen: Nivus GmbH.

Norsk Vann, 2008. *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering - Rapport 162*, Hamar: Norsk Vann BA.

Norsk Vann, 2012. *Veiledning for valg av riktige sensorer og måleutstyr i VA-teknikken Rapport 192*, Hamar: Norsk Vann BA.

Norsk Vann, 2012. *Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem - Rapport 193*, Hamar: Norsk Vann BA.

Norsk Vann, 2016. *Dokumentasjon av utslipp fra avløpsnett - Rapport 222*, s.l.: Norsk Vann.

NOU 2015:16, 2015. *Overvann i byer og tettsteder - som problem og ressurs*, Oslo: Klima- og miljødepartementet.

NVE, 1993. *Ferskvannstesaurus*, s.l.: s.n.

NVE, 2022. *NVE rapport 5/2022 - Automatiserte infiltrasjonsmålinger i tettsteder*, Oslo: NVE.

Nærings- og fiskeridepartementet, 2021. *www.regjeringen.no*. [Internett]

Available at: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/veileder-offentlige-anskaffelser/id2581234/sec38>

Paus, K., 2018. Forslag til dimensjonerende verdier for trinn 1 i Norsk Vann sin tre-trinns strategi for håndtering av overvann. *Vann*, 1, pp. 66-77.

- Paus, K., 2022. *B3.6 Måling av mettet hydraulisk konduktivitet*. [Internett]
Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Vc-fYw5jgSE>
- Paus, K., Muthanna, T. & Braskerud, B., 2015. The hydrological performance of bioretention cells in regions with cold climates: Seasonal variation and implications for design. *Hydrology Research*, p. 47. nh2015084. 10.2166/nh.2015.084. .
- Peter, G., 2023. *The discharge and run off calculation of weirs under the consideration of dynamic flows*. [Internett]
Available at: <http://www.gelogmbh.de/downloads/1996artikelengl.pdf>
- Quantum Hydrometrie GmbH, 2011. *Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen*, Berlin: s.n.
- Schmitt, T. et al., 2008. Modellkalibrierung zur Qualitätssicherung von Kanalnetzberechnungen. *KA - Abwasser, Abfall*, 55 (12), pp. 1306-1313.
- Seip, U. B. A., 2022. *Prediksjon av mettet infiltrasjonsrate ved bruk av fjernmåling og nevralt nett - masteroppgave*. Oslo: Universitet i Oslo.
- Solheim, E., 2017. *Infiltrasjon for lokal overvannsd disponering - Vurdering av metoder for å måle infiltrasjon på lokal tomt*. Ås: Institutt for miljøvitenskap, NMBU.
- Solheim, E., French, H. & Braskerud, B., 2017. Måling av infiltrasjon fra overflaten for bruk av åpen LOD i praksis. *Vann*, pp. 279-290.
- Sæterbo, E., Fergus, T. & Hoseth, K. A., 2010. *Vassdragshåndboka - Håndbok i vassdragsteknikk*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- VDI 3786 Blatt 7, 2010. *Environmental meterology - Meteorological measurements - Precipitation*. s.l.:s.n.
- World Meteorological Organization, 1971. *Use of weirs and flumes in stream gauging - Technical Note No. 117*. Geneva: World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization, 2009. *Instruments and observing methods - Report No. 99*, Geneva: World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization, 2018. *Guide to Instruments and Methods of Observation Volume I – Measurement of Meteorological Variables*. Geneva: World Meteorological Organization.
- Ødegard, H. & al., e., 2014. *Vann- og Avløpsteknikk, 2. utgave*, s.l.: Norsk Vann.

Vedlegg

Vedlegg1 Definisjoner

Begrep	Forklaring	Kilde
Avløpsnett	Ledningsnett som håndterer spillvann, overvann og drensvann. Det skilles mellom separatsystem og fellessystem	(Norsk Vann, 2016)
Drensvann	Vann som ledes bort fra grunnen under terrengoverflaten	(NOU 2015:16, 2015)
Fellessystem, fellesavløpssystem	Avløpsledningsnett som transporterer spillvann, drensvann og overvann	(Norsk Vann, 2012)
Fordrøyning	Midlertidig lagring av overvann i magasin e.l. ved stor avrenning. Reduserer avrenningstopp til nedenforliggende ledninger og vassdrag	(Norsk Vann, 2012)
Grunnvann	Med grunnvann forstås vann i den mettede sonen i grunnen	Vrl. § 2
Infiltrasjon	Naturlig eller kunstig anlagt prosess der vann blir tilført grunnvannsmagasinet	(NVE, 1993)
LOH, LOD, LID	Lokal overvannshåndtering, disponering, low impact development. Samlebetegnelse på teknikker som hindrer overvannet i å renne raskt og direkte til avløpsledninger eller vassdrag. Består i å infiltrere, fordrøye eller på annen måte forsinke avrenningen av overvann på annen måte	(Norsk Vann, 2012)
Måleintervall	Tidsintervall mellom to enkelte målinger	(DWA, 2011)
Målekampanje	Tidsbegrenset måleoppgave med et definert mål som forsøkes oppnådd gjennom planlagt og koordinert samarbeid mellom flere aktører	
Målekonsept	Generelt teknisk oppsett for å løse en måleoppgave inkludert drift og dokumentasjon	(DWA, 2011)
Målenett	Flere samtidig drevne måleinstrumenter til et måleprosjekt	(DWA, 2011)

Måleområde	Område hvor en måler gir data innenfor den spesifiserte målenøyaktighet som gjelder for måleren	(etter DIN1319-1)
Måleprogram	Program der kravene til måling er tydelig beskrevet gjennom en detaljert beskrivelse av parametere, sekvens, varighet, metodevalg og rammebetingelser	(DWA, 2011)
Måleprosjekt	Måleprosjekt, dets mål og veiledende prinsipper for et spesifikt brukstilfelle er spesifisert	(DWA, 2011)
Nedbørfelt	Et område som har felles utløpspunkt for sitt avløp	(NVE, 1993)
Oppstuvning	En forhøyning av vannflatens nivå i forhold til det normale ved samme vannføring forårsaket av en hindring eller for lite kapasitet nedstrøms	(Etter NVE)
Overløp	Overløp hindrer overbelastning av nedstrøms ledningsnett og avløpsrenseanlegg under regn og snøsmelting	(Ødegard & al., 2014)
Overvann	Vann som renner av på overflaten som følge av regn og smeltevann	Forslag til ny definisjon i forurl. § 21
Overvannshåndtering	Virkemidler og tiltak for å utnytte overvann som en ressurs, og for å forebygge skade og ulempe som følge av overvann	(NOU 2015:16, 2015)
Overvannsledning	Avløpsledning som fører overvann og drensvann	(Norsk Vann, 2016)
Overvannssystem	Flere overvannsanlegg som virker sammen slik at overvann infiltreres, fordrøyes og avledes på en trygg måte	(NOU 2015:16, 2015)
Overvannstiltak	Etablering av overvannsanlegg, eller andre fysiske tiltak for å forebygge skade som følge av overvann	(NOU 2015:16, 2015)
Pluviograf, nedbørmåler	Instrument som registrerer nedbørsmengden automatisk i et fastsatt tidsintervall	

Pålitelighet	Sannsynligheten for at et målesystem fungerer feilfritt under gitte rammebetingelser i et spesifisert tidsrom	(DWA, 2011)
Regnbed	Regnbed er en beplantet forsenkning som fordrøyer og infiltrerer overvann til grunnen eller overvannsnett	
Spillvann	Avløpsvann fra husholdning, næringsvirksomhet og offentlig virksomhet	(Norsk Vann, 2016)
Spillvannsledning	Avløpsledning som fører spillvann	(Norsk Vann, 2016)
Urbanhydrologi	Læren om hydrologi i urbane og bymessige område	(NVE, 1993)
Vannføring	Vannmengde per tidsenhet, for eksempel liter/sekund.	(Norsk Vann, 2016)
Vannføringsmåler	Måleinstrument for måling av vannføring. Blir også omtalt som mengdemåler eller vannmengdemåler	(Norsk Vann, 2016)
Vassdrag	Som vassdrag regnes alt stillestående eller rennende overflatevann med årssikker vannføring, med tilhørende bunn og bredde inntil høyeste vanlige flomvannstand	Vrl. § 2

Vedlegg 2 Anbudskonkurranse og tildeling

Oppdragsgiver har anledning til å gjennomføre innledende markedsundersøkelser eller å søke råd fra uavhengige eksperter, myndigheter og leverandører. Oppdragsgiver har også anledning til å gjennomføre en begrenset anbudskonkurranse for å prekvalifisere leverandører.

Det forutsettes imidlertid at rådene ikke er konkurransevidende eller fører til brudd på likebehandlingsprinsippet¹⁸. Det er viktig å være oppmerksom på planleggingsprosessen i anbudskonkurransen. Måleoppgaver og krav bør beskrives presist og henvise til målekonseptet. Dette vil hjelpe aktuelle leverandører til å levere realistiske tilbud. Oppdragsgiver bør nøye vurdere hvilke krav som skal og bør stilles til leverandørens kvalifikasjoner.

For ytterligere veiledning om åpne og begrensede anbudsprosesser henviser vi til følgende ressurser på regjeringen.no:

<https://www.regjeringen.no/no/tema/naringsliv/konkurransepolitikk/offentlige-anskaffelser-/andre-kolonne/anskaffelsesprosedyrer-i-del-iii/apen-anbudskonkurranse/id2568581/>

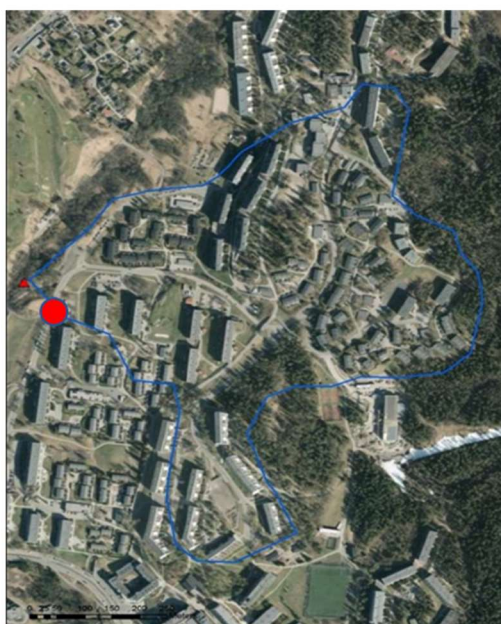
<https://www.regjeringen.no/no/tema/naringsliv/konkurransepolitikk/offentlige-anskaffelser-/andre-kolonne/anskaffelsesprosedyrer-i-del-iii/begrenset-anbudskonkurranse/id2568586/>

¹⁸ (Nærings- og fiskeridepartementet, 2021)

Vedlegg 3 Eksempel på dokumentasjon fra målestedet

Dokumentasjon målested

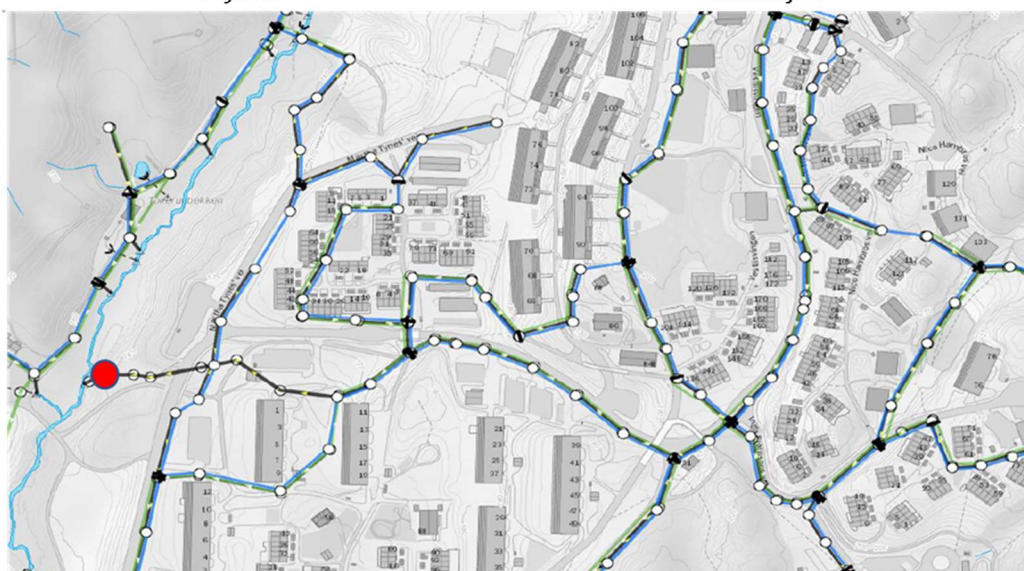
Målested-ID:	6.12.0 – Vestli
Adresse:	Tokeruddalen
Posisjon, Euref89 UTM sone 33:	6654908 N, 272226 Ø
Veibeskrivelse, adkomst:	Plasser bil på parkeringsplassen, ta gangvei ned ved brua
Kontaktperson til ansvarlig eier eller myndighet:	



Flyfoto



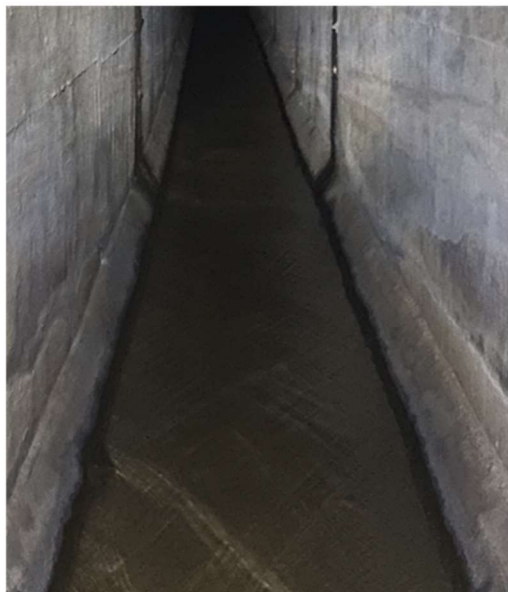
Lokasjon



Oversikt ledningsnett

Måleprofil

Profil:	Rektangulær kanal
Materiale:	Betong
Dimensjon [mm]:	B 1000 / H 1250
Fall [‰]:	4,5
Kort beskrivelse av profilens tilstand:	Støpt rektangulær betongkanal – ru Profilovergang til rørprofil 800 mm
Fremkommelighet:	kum ca. 4,5m dyp. Vanlig kumlokk, øvre del med stige ingen stige i nederste delen



Oppstrøms måleprofil



Nedstrøms måleprofil



Sikt ned i kum

Observasjoner

Dato og tid:	15.04.2022 13:20
Værforhold:	Skyet, 12 grader, lett nedbør
Observert vannstand [m]:	0,05
Observert strømhastighet [m/s]:	Ca. 0,7
Mulige vannstandsmerker:	Ingen
Observert sediment:	Ingen
Sedimenthøyde [m]:	0,0
Strømningstilstand:	☒ Strømmende - ☐ Strykende
Strømningsforhold:	Jevn strømning uten tydelige virvler eller forstyrrelser
Strømningspåvirkninger oppstrøms, nedstrøms, og ved måleprofil	Innledning 15 m oppstrøms. Ingen endring i fall nedstrøms.

HMS

Sikkerhet og adkomst	Målestedet ligger ved siden av veien. Bil kan parkeres ved veikant like ved.
Sikkerhet ved målestedet	• Bruk av tripod og fallsikring obligatorisk • Mobil stige skal brukes • Krav ved arbeid i kum må overholdes
Trafikkrelaterte sikkerhetstiltak «N301 - Arbeide på og ved veg»	☒ Risikovurdering - Håndbok V721 ☐ Arbeidsvarslingsplan Arbeidsstedet skal sikres for fotgjengere



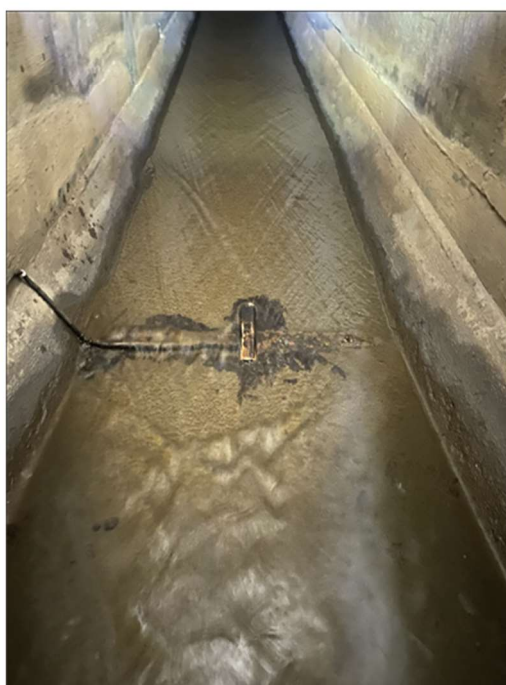
HMS - kum



HMS - trafikk

Installert måleutstyr

Utstyrsenhet	Betegnelse		Serienummer
Logger:	AAA		1234
Sensor 1:	BBB		5678
Sensor 2:	CCC		9876
Montasjemetode, utstyr:	Sensor1: Bunnmontert metallplate festet med plugger ca. 2m oppstrøms i røret		Sensor2: Montert i taket med metallplate festet med plugger ca. 2m oppstrøms i røret
Tilleggsutstyr:	-		-
Registreringsintervall [min]:	Normal 10	Event 1	☒ Eventbasert logging h = 0,07 m
Ansvarlig tekniker:	Knut		Petter
Dato og klokkeslett:	05.05.2022		10:35



Sensor montert på bunnen



Sensor montert i taket

Måleutstyr etter bytte

Byttet utstyr markeres

Utstyrsenhet		
Loggertype:		
Sensor 1:		
Sensor 2:		
Montasjemetode, utstyr:		
Tilleggsutstyr:	-	-
Registreringsintervall [min]:		
Ansvarlig tekniker:		
Dato og klokkeslett:		

fotografisk dokumentasjon

Avinstallasjon

Demontert utstyr registreres

Utstyrsenhet	Betegnelse		Serienummer
Logger:	AAA		1234
Sensor 1:	BBB		5678
Sensor 2:	CCC		9876
Montasjemetode, utstyr:	Sensor1: Bunnmontert metallplate festet med plugger ca. 2 m oppstrøms i røret		Sensor2: Montert i taket med metallplate festet med plugger ca. 2 m oppstrøms i røret
Tilleggsutstyr:	-		-
Registreringsintervall [min]:	Normal 10	Event 1	☒ Eventbasert logging h = 0,07 m
Ansvarlig tekniker:	Heidi		Andre
Dato og klokkeslett:	10.09.2022		13:50

fotografisk dokumentasjon

Vedlegg 4 Eksempel på driftsdokumentasjon

Målested ID / navn		Datafil nedlastet:	☐ ja - ☐ nei
Ansvarlig tekniker:		Parameterfil nedlastet:	☐ ja - ☐ nei
Dato:			
Klokkeslett ved	Ankomst:		
	Avreise:		
Visuelt inntrykk av målested:			
Endringer, kommentarer og avvik - ta bilder:			
Værforhold:		Temperatur:	Regn:
Sjekket systemtid:			
Rettelse:		☐ ja - ☐ nei	
Sommertid:		☐ ja - ☐ nei	
Loggingsintervall [min] (eventbasert?):		Normal:	Event:
Batterispenning [V]:			
Batteri byttet:		☐ ja - ☐ nei	
Tid og måleresultater før rengjøring			
Tid	Vannstand [m]	Hastighet [m/s]	Vannføring [l/s]
Rengjøring			
Behov for rengjøring, type av forurensning		☐ ja - ☐ nei	
Tidspunkt for rengjøring:			
Sedimenthøyde [m]	før rengjøring:		
	etter rengjøring:		
Kontroll og dataverifisering			
Tid og måleresultater etter rengjøring			
Tid:	Vannstand [m]:	Hastighet [m/s]:	Vannføring [l/s]:
Referansemålinger			
Tid:	Vannstand [m]:	Hastighet [m/s]:	Vannføring [l/s]:
Justering			
Behov for justering / parameter		☐ ja - ☐ nei	
Tilpasset parameter 1 – før / etter			
Tilpasset parameter 2 – før / etter			
...			
Måleresultater etter justering			
Tid:	Vannstand [m]:	Hastighet [m/s]:	Vannføring [l/s]:
Referansemålinger etter justering			
Tid:	Vannstand [m]:	Hastighet [m/s]:	Vannføring [l/s]:

Vedlegg 5 Erfaringer fra test av målesystemer

Som del av arbeidet med denne veilederen er det gjort tester av ulike målesystemer i felt og i en egenutviklet testrigg i NVEs kjellerlokale i Oslo.

Noen av målingene ble utført utenfor målesystemenes måleområde. Dette skyldes begrensninger i tilført vannmengde i testriggen (for lav vannstand ved høyt fall). Det uforstyrrede avsnittet oppstrøms sensorene burde også vært lengre i forhold sammenliknet med anbefalingene som er gitt i denne veilederen. Direkte sammenlikning av måleresultatene mellom ulike målesystemer er derfor kun mulig i begrenset omfang. Testene viste seg derimot svært nyttige til å teste grensene for de ulike målesystemene og verifisere mange års erfaring fra feltarbeid med tilsvarende målesystemer.

Målesystemene har ulik funksjonalitet og håndterbarhet ved installasjon i felt. I tillegg merker vi oss at programvaren for parametersetting og betjening av målesystemene er svært ulikt utformet. Dersom systemene betjenes daglig av erfarent driftspersonell trenger ikke dette å bety så mye. I motsatt fall anbefaler vi at en velger målesystemer hvor programvaren er enkel å bruke. Gode måleresultater kan kun forventes dersom brukeren kan håndtere målesystemene. Vi anbefaler å være oppmerksom på følgende ved anskaffelse av måleutstyr:

- bruksområde, hva skal måles, vannmengder, minstevannstand og oppstuvning
- fleksibilitet ved montering av målesystemene
- enkelt vedlikehold
- om programvaren og brukergrensesnittet enkelt å betjene
- mulighet til brukerstøtte ved spørsmål, problemer og funksjonssvikt

Vi anbefaler at driftspersonellet får mulighet til å gjennomføre en grundig test før anskaffelsen finner sted.

Takk

Vi takker følgende samarbeidspartnere i Norge og Tyskland for velvillig bistand og lån av utstyr til arbeidet med denne veilederen:

Målemetode	Kapittel	Modell	Produsent	Leverandør
Cross-correlation-doppler	7.3.5.4	PCM Pro	Nivus GmbH	Rosim AS, Oslo
Radar-doppler	7.3.5.5	nivuflow mobile 550	Nivus GmbH	Nivus GmbH/Rosim AS, Eppingen(D)/Oslo
Radar-doppler	7.3.5.5	Raven Eye	FLOW-TRONIC S.A./N.V.	J.S. Cock AS, Larvik
Continuous-wave-doppler	7.3.5.2	Beluga	FLOW-TRONIC S.A./N.V.	J.S. Cock AS, Larvik
Laser-doppler	7.3.5.6	LaserFlow	Teledyne ISCO	Dipl.ing. Houm AS, Oslo
Pulse-doppler	7.5.3.3	Triton - pulse doppler	ADS LLC	IETG Ltd, Leeds(GB)
Continuous-wave-doppler	7.3.5.2	Triton - continous wave	ADS LLC	IETG Ltd, Leeds(GB)



NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo
Telefon: (+47) 22 95 95 95