



Er hydrologi vitenskap?

Stein Beldring

115

SÆRTRYKK 2001

Er hydrologi vitenskap?

Av Stein Beldring,
Hydrologisk avdeling, NVE

I de senere år har det funnet sted en debatt innenfor hydrologiske miljøer om hvorvidt løsning av praktiske problemer overskygger og holder tilbake utviklingen av hydrologi som vitenskap. Opp gjennom historien, og spesielt i det 20. århundre, har de praktiske anvendelsene gått foran og lagt premissene for forskningen som drives.

Hydrologi defineres som «det geofysiske fag som behandler vannet på jorden, dets forekomst, sirkulasjon og fordeling, dets kjemiske og fysiske egenskaper og dets reaksjon med omgivelsene, inkludert relasjonen til levende organismer» (Maidment, 1992). Denne definisjonen, som blant annet benyttes av FN-organisasjonene World Meteorological Organization og UNESCO, er svært vid og omfatter vann både på landjorden, i havet og i atmosfæren. Vanligvis benyttes hydrologi bare om studiet av vann på jordens landområder, med en klar avgrensning mot oseanografi (vann i havet) og en noe mindre klar avgrensning mot meteorologi. Johanson (1983) har følgende tillegg til definisjonen over: «hydrologi er den vitenskap som behandler prosesser som styrer tapping og fornyelse av vannressursene på jordens landområder, og som behandler de forskjellige faser i det hydrologiske kretsløp». De geofysiske fagene inkludert hydrologi er karakterisert ved at de beskriver fysiske og kje-

miske prosesser som finner sted i jordens atmosfære (luft), hydrosfære (vann), kryosfære (snø og is), litosfære (jordskorpe) og biosfære (levende organismer). Hydrologi er et empirisk fag som baserer seg på eksperimenter og innsamling av data om de prosessene som er gjenstand for studiene.

I de senere år har det funnet sted en debatt innenfor hydrologiske miljøer om hvorvidt løsning av praktiske problemer overskygger og holder tilbake utviklingen av hydrologi som vitenskap. Opp gjennom historien, og spesielt i det 20. århundre, har de praktiske anvendelsene gått foran og lagt premissene for forskningen som drives. Teknologiske fag, dominert av sivilingeniører og agronomer har æren for at befolkning, industri og jordbruk i de moderne urbane samfunn nyter godt av en høy standard på vannforsyning, energiproduksjon og reduksjon av skadevirkninger. Denne fokuseringen på praktiske anvendelser har imidlertid ført til at vitenskapelig hydrologi ikke har hatt samme fremgang

som andre geovitenskapelige fag som meteorologi, oseanografi og geologi (Eagleson, 1991). Følgende utsagn illustrerer dette:

- I hydrologisk forskning legges vekten mer på verktøyene enn prinsippene. Man søker å løse de samme problem i dag som for 40 år siden (Nash, 1988).
- Hydrologene er mer opptatt av å reproducere observerte fenomen enn å beskrive de prosessene som finner sted (Gottschalk, 1990).
- Tre fjerdedeler av alt arbeid med etiketten hydrologi er forsøk på å løse hydrologirelaterte teknologiske problemer i fravær av hydrologisk kunnskap (Klimes, 1988).

Vitenskapen har som sitt mål å produsere viten eller erkjennelse om det som utgjør dens gjenstandsområde. F.eks. beskjeftiger fysikken seg med den livløse del av naturen, mens biologien dreier seg om den levende del av naturen. Prosessen som leder fram til vitenskapelige resultater er komplisert og består av mange forskjellige elementer som vekselvirker og preger både arbeidsformen og den erkjennelsen som produseres. Det er først og fremst den vitenskapelige metode og begrunnelsene som gis for teoriene som skiller vitenskap fra annen virksomhet. Observasjoner, eksperimenter og formulering av hypoteser med det formål å forstå naturen er viktige elementer i naturvitenskapelig virksomhet, systematisering av teorier og hypoteser er et annet.

I hvilken grad hydrologisk forskning inneholder disse elementene og i hvilken grad hypoteser og teorier er gjenstand for kritisk vurdering vil bli belyst. For naturvitenskapene er det et problem at det er vanskelig å verifisere generelle hypoteser om virkeligheten basert på endelig empirisk evidens; man er i stedet henvist til å vurdere hypoteser og teorier i henhold til andre kriterier. De tradisjonene som finnes for begrunnelse av hydrologisk forsknings resultater, sammenliknes med slike kriterier.

Dette essayet tar for seg de dominerende trekk ved faget hydrologi slik det utøves i dag. Har samfunnets behov ført til at hydrologi er et teknologisk fag hvis viktigste formål er å finne verktøy som kan løse sosialt relevante problemer eller er hydrologi en vitenskapelig aktivitet hvis mål er å forstå og beskrive prosesser som finner sted i naturen? En konsekvens av de praktiske metoders dominans er at utvikling av matematiske modeller som kan reproducere og prognosere naturlige prosesser er en viktig aktivitet i hydrologisk forskning. Dette er verktøy som er svært effektive når man skal treffe beslutninger om forvaltning og bruk av vannressurser, men de baseres ofte på forenklede beskrivelser av de hydrologiske prosessenes grunnleggende fysiske egenskaper. Hvilken betydning dette har for den vitenskapelige virksomheten i hydrologi vil bli belyst.

Hydrologiens historie

Det er åpenbart at menneskene lærte

seg å utnytte og kontrollere vann i vassdrag og sjøer lenge før tanken på hydrologi som vitenskapsgren oppsto. Gamle irrigasjonssystemer i Mesopotamia, Egypt og Kina viser at folk langt tilbake i oldtiden utnyttet vannet ved hjelp av teknologiske metoder. Opp gjennom historien har utforskning av naturen foregått parallelt med løsning av praktiske problemer i forbindelse med vannforsyning, bygging av kanaler, reduksjon av flomskader, bygging av demninger osv. I det 20. århundre har behovet for utnyttelse og kontroll av jordens vannressurser ført til at praktiske anvendelser har ledet utviklingen av hydrologien (Gottschalk m.fl., 1995). Fra Kina fortelles det om observasjoner av nedbør fra år 1200 f. Kr., fra India fra år 400 f. Kr. og fra Persia kjenner man en bok fra slutten av det 10. århundre e. Kr. som beskriver det hydrologiske kretsløp som en kontinuerlig prosess hvor fordampning av vann inngår. Utviklingen i Asia påvirket imidlertid ikke forholdene i den vestlige verden i nevneverdig grad før renessansen på 1500-tallet (Otnæs og Ræstad, 1978).

Grunnlaget for fysikken ble lagt i antikken ved studiet av naturmiljøet som omga menneskene (Peixoto og Oort, 1992). Grekerne forsøkte å forklare vannets kretsløp bl.a. ved teorier for kildenes, dvs. elvenes opprinnelse. Aristoteles mente f.eks. at kildevannet oppsto i store underjordiske grotter, der jordelementets kulde forvandlet det varme og fuktige luftelementet til det kalde og fuktige vannelementet. I Bibe-

len omtales vann i ulike forbindelser, f.eks. finner man i Predikerens bok fra det 3. århundre f. Kr.: «Alle bekker løper ut i havet, men havet blir ikke fullt; til det sted som bekkene kommer fra, dit går de tilbake igjen». Den rådende oppfatning fram til 1600-tallet var at vannet strømmet fra havet til kildene i underjordiske kanaler. Den nå allment aksepterte oppfatningen at vannet i elvene stammer fra nedbør som infiltrerer i bakken var også en av teoriene som ble behandlet i skriftene om kildenes opprinnelse. Den ble imidlertid sett på som urimelig siden mange kilder gir vann i perioder hvor det overhodet ikke regner (Gottschalk m.fl., 1995).

Autoritetstroen var stor hos naturforskere i perioden fram til 1500-tallet. Opplysninger fra Bibelen og klassiske forfattere ble akseptert uten kritikk. I det 16. og 17. århundre fikk man en vitenskapelig vekkelse i Europa som førte til at man begynte å lage instrumenter, utføre eksperimenter og gjøre beregninger med det formål å forstå naturen i stedet for blindt å akseptere den klassiske kunnskapsarven (Wormnæs, 1993). Den viten om omverdenen som naturvitenskapen produserer i dag, er preget av den mekanistiske fysikken som ble utviklet i det 17. og 18. århundre i opposisjon til den aristoteliske autoritetstroen (Kragh og Pedersen, 1991).

I 1674 utkom boken «De l'origine des fontaines» av franskmannen Pierre Perrault. Han utførte vannbalansebe-

regninger for et avløpsfelt i øvre del av Seinen og konstaterte at nedbøren var tilstrekkelig til å dekke avløpet i vassdraget. Hans landsmann Edmé Mariotte publiserte i 1686 resultater av tilsvarende beregninger for Seinen avløpsfelt ved Paris. Engelskmannen Edmond Halley, mest kjent for Halleys komet, utførte og publiserte resultater fra fordamningsstudier i perioden 1687-1715. Disse arbeidene er starten på den vitenskapelige hydrologien. I Norden utføres meteorologiske observasjoner av bl.a. Tycho Brahe på øya Ven i Øresund og Anders Celcius i Uppsala. De første norske nedbørmålingene ble utført av Fr. Chr. Holberg Arentz i Bergen fra 1765. Hydrologiske observasjoner i Norden er mer sporadiske, den første vannføringsmålingen utføres i Göta elv ved utløpet av Vänern i 1718 av Emanuel Swedenborg. Den første realistiske vannbalanseberegningen for Vänern ble publisert av Birger Vassén i 1758 (Gottschalk, 1992).

Virksomheten i det 19. århundre domineres av eksperimentelt arbeid. Problemer i forbindelse med vannforsyning og utnyttelse av vannets energi fører til arbeider av bl.a. Venturi, Bernoulli og Chezy som er grunnlaget for hydrauliske beregninger. Etter som samfunnets kompleksitet øker overtar offentlige etater ansvaret for forvaltning av vannressursene i de fleste vestlige land. Disse institusjonene er først og fremst opptatt av å utnytte og kontrollere vannet og styrer dermed hydrologisk forskning mot å løse aktuelle

problem (Otnæs og Ræstad, 1978). I denne perioden legges grunnlaget for den oppfatningen at avløpsfeltet er et passivt element i klimasystemet, uten evne til å påvirke atmosfæriske prosesser. Den internasjonale utviklingen av hydrologi fra begynnelsen av det 20. århundre preges av at spesielle studieområder og metoder tiltrekker seg oppmerksomhet og aktivitet. Den perioden vi er inne i nå er karakterisert ved bruk av matematiske modeller og datamaskiner (Kundzewicz m.fl., 1987).

Fremdeles dominerer den teknologisk orienterte hydrologien, men hydrologi har også fått en formell status som vitenskap gjennom opprettelse av nasjonale og internasjonale vitenskapelige organisasjoner (Eagleson, 1992). Den vitenskapelige hydrologien har til dels vært drevet av internasjonale program, et av de første var Den internasjonale hydrologiske dekadé i perioden 1965 - 1974 i regi av UNESCO. I Norden førte dette til opprettelse av forskningsområder med intense måleprogrammer. En fortsettelse fulgte med Det internasjonale hydrologiske program fra 1975 (Gottschalk m.fl., 1995).

Hydrologi i et

vitenskapsfilosofisk perspektiv

Naturvitenskapens anvendelse er først og fremst gjennom teknologien. Teknologi er systematisk anvendelse av vitenskap eller annen organisert viten på praktiske områder. Det teknologiske produkt kan være av både materiell og ikke-materiell karakter, f.eks. er meto-



der som benyttes til å produsere teknologiske objekter eller som er grunnlag for beslutninger om handlinger også teknologiske produkter. Teknologisk forskning er en systematisk aktivitet med metoder som ikke skiller seg vesentlig fra vitenskap. Det er heller ikke et skarpt skille mellom gjenstandsområdene for vitenskapelig og teknologisk forskning: I begge aktiviteter studeres både naturen slik den eksisterer og ikke-naturlige gjenstander. Dessuten er den naturen som vitenskapen studerer ofte påvirket av den teknologiske utviklingen. Det er formålet med forskningen som er avgjørende for distinksjonen mellom vitenskap og teknologi: teknologien er rettet mot muligheten for å manipulere med og kontrollere naturlige og kunstige objekter. En forskningsaktivitet er ikke av teknologisk art når den er rettet mot forståelse av naturen som den er under alle omstendigheter, dvs. uten mulighet for manipulasjon og kontroll. Dessuten er ideen om generalitet slik den viser seg i vitenskapens søking etter universelle lover fremmed for teknologien. En teknologisk suksess måles ikke først og fremst ved dens bidrag til erkjennelse, men ved effektiviteten av de løsninger den har på sosialt relevante problemer. Likevel kan vitenskap være et utgangspunkt for teknologiske innovasjoner. I denne forstand løper vitenskap og teknologi sammen; begge kan gi resultater som kan benyttes for å løse praktiske problemer.

Tilgjengelighet på vann og en viss

mulighet til å kontrollere vannressursene har vært en forutsetning for sivilisasjoner til alle tider. Etter som de menneskelige samfunnene har vokst i størrelse og blitt mer kompliserte har problemene i forbindelse med forvaltning av vannressursene blitt stadig større. De moderne urbane samfunns behov for å løse problem i forbindelse med vannforsyning, kraftproduksjon og skadevirkninger pga. tørke og flommer har gitt opphav til en hydrologisk forskningskultur som er dominert av utøvere fra praktisk orienterte disipliner, og som er mer opptatt av å løse aktuelle problemer enn å bidra til utvikling av kunnskap om de basale hydrologiske prosessene. Samfunnets krav til løsninger på hydrologirelaterte problemer er med på å diktere hvilken retning hydrologisk forskning skal ta og hvilken form undervisning i hydrologi ved universiteter og høyskoler skal ha. (Eagleson, 1991).

En konsekvens av dette behovet for å løse praktiske problemer er at utviklingen i hydrologi domineres av en økende bruk av modeller med det formål å reprodusere og prognosere hydrologiske fenomener. En hydrologisk modell har som regel form av datamaskinkode basert på algoritmer for å løse matematiske likninger. Datamaskinenes evne til å lagre store datamengder og utføre omfattende beregninger har gitt hydrologene effektive verktøy, men har også ført til at diskusjonene i faget ofte dreier seg om forbedring av modeller basert på eksiste-

rende teorier i stedet for at oppmerksomheten rettes mot ny kunnskap om hydrologiske prosesser (Gottschalk, 1990). Dette illustreres ved det store antall modeller som er i bruk i forhold til de basale hydrologiske teoriene bak disse modellene. I de fleste naturvitenskaper finnes det grunnleggende modeller som gir den mest eksakte representasjonen av prosessene som studeres med det nåværende kunnskapsnivå. Selv om denne type modeller finnes i hydrologi, er det et stort antall modeller som kun har som formål å representere inngangs- og utgangsdatta i systemene som studeres. Disse modellene baserer seg bare i begrenset grad på grunnleggende fysiske prinsipper og innsikt i systemenes struktur (Kundzewicz m.fl., 1987). Som eksempel kan nevnes modeller som beregner et avløpsfelts respons på nedbør ved hjelp av en serie lineære magasiner. De kan gi en god representasjon av observert avløp, men de er ikke basert på grunnleggende fysiske prinsipper om bevaring av masse og energi og de bidrar ikke til ny kunnskap om de prosessene som finner sted i virkeligheten (Gottschalk, 1990).

Det er først og fremst tre grunner til at forenklete beskrivelser av grunnleggende prosesser benyttes i mange hydrologiske modeller; (1) man har begrenset kunnskap om de hydrologiske prosessene i den skalaen som det aktuelle problem foreligger i, (2) det er kostbart og tidkrevende å samle inn data med den oppløsningen som er nød-

vendig for å gi en detaljert beskrivelse av de basale fysiske prosessene og (3) en detaljert, fysisk realistisk beskrivelse stiller store krav til datamaskiners lagringskapasitet og regnekraft.

Et annet problem med den overdrevne fokuseringen på bruk av modeller er at man parametriserer prosessene man studerer i en skala som er egnet til det aktuelle formålet. Dermed er man også forhindret fra å overføre sine resultater til en annen skala i rom og tid. Dette er spesielt viktig fordi vår evne til å løse miljøproblemer i regional og global skala er avhengig av en forståelse av det globale systemet som utgjøres av atmosfæren, hydrosfæren, kryosfæren, litosfæren og biosfæren. Hydrologi har sin plass som et av fagene som studerer dette systemet.

Til tross for at bruk av modeller i hydrologi først og fremst fyller et praktisk behov kan de også benyttes for vitenskapelige formål, men noen forutsetninger må oppfylles:

- Hvis formålet er å forstå naturen benyttes modellen som et mønster for å analysere en prosess, og dens bidrag til økt kunnskap avhenger av om den gir en eksakt representasjon av virkeligheten.
- En modell vil alltid innebære en forenkling, det er ikke mulig å representere naturlige prosesser eksakt. Fra det praktiske problems synspunkt vil dette som regel ha den fordel at modellen i alminnelighet har visse ordensskapende og systematiserende funk-

sjoner som gjør det enklere å reprodusere systemets virkemåte. Fra et vitenskapelig synspunkt kan dette være en fordel, men hvis graden av forenkling er for stor vil beskrivelsen av systemet være ufullstendig.

- Vitenskapelige teorier bør være mest mulig generelle, slike krav kan i alminnelighet ikke stilles til modeller (Gottschalk, 1990).

Forsøkene på å systematisere faget hydrologi tar ofte utgangspunkt i metoder, siden det umiddelbart kan lede fram til praktiske resultater. Siden mange av disse metodene ikke har sine røtter i hydrologien og ofte er vilkårlig valgt bidrar ikke resultatet til å forstå hydrologiske fenomen. En bedre vitenskapelig klassifisering oppnås ved å ta utgangspunkt i objektet for studiene, dets skala og karakteristika. I f.eks. meteorologi og oseanografi er inndelingen av fenomener i mikro-, meso- og makroskala et grunnlag for den vitenskapelige virksomheten. I hydrologi mangler denne muligheten for å ekstrapolere resultat fra et sted til et annet fordi karakteriseringen av landskapet er ufullstendig (Gottschalk, 1990). Kunnskapen om de fundamentale fysiske prosessene er begrenset til mikroskala, men dette har ikke hindret hydrologer fra å benytte teorier utviklet for en liten skala for å løse problemer i stor skala. Man kan imidlertid ikke anta at observasjoner av fysiske størrelser kan overføres mellom forskjellige skalaer uten å bruke metoder for aggregering og disaggregering som er basert på kunnskap

om de fysiske prosessenes variasjon i rom og tid. De teknologiske metodene som ble utviklet for å løse problem i avløpsfelt med romlig skala inntil noen tusen kvadratkilometer forutsatte at disse var isolerte elementer uten evne til å vekselvirke med hverandre eller med atmosfæren. I dag vet vi at det hydrologiske kretsløpet er en del av et komplisert samspill mellom atmosfære, hav, snø og is, landoverflate og vegetasjon. Likevel er mye av den hydrologiske forskningen basert på en oppfatning om at avløpsfeltene er isolerte elementer som er passive mottagere av påvirkning fra atmosfæren (Eagleson, 1991).

Observasjoner, eksperimenter og formulering av hypoteser med det formål å utvikle teorier for naturlige prosesser er viktige elementer i vitenskapelig virksomhet. Imidlertid er en av de alvorligste hindringene for fremskritt i den vitenskapelige hydrologien mangel på data som er nødvendig for å utvikle og verifisere teorier (Gottschalk og Askew, 1987). Dette må ikke forstås som om hydrologiske data er en mangelfull, det foregår omfattende innsamling av data i regi av institusjoner som driver operativ hydrologi, men de dataene som er nødvendige for å bringe fagets teorier fremover blir ikke samlet inn i tilstrekkelig grad. Datainnsamling betraktes ofte som en rutinemessig og tidkrevende aktivitet, og det har etter hvert oppstått et skille mellom de som arbeider med utvikling av teorier og de som driver eksperimentelt arbeid og

datainnsamling (Eagleson, 1991). Det er imidlertid avgjørende for en empirisk vitenskap at dens teorier baseres på eksperimentelle data. Som eksempel kan nevnes et fundamentalt problem i hydrologi; å beskrive vannpartiklenes vei gjennom jord og fjell fra de faller som nedbør til de renner ut i en elv. Selv om de fysiske lovene som styrer bevegelse av vann i løsmasser og fjellsprekker i prinsippet er kjent, betyr det på ingen måte at de naturlige fenomenene er godt beskrevet. Dette skyldes både ufullstendige observasjons- og analysebteknikker og manglende teoretisk forståelse av prosessene (Gottschalk, 1990).

Når en hypotese som forklarer empiriske data er formulert, må man forsøke å begrunne den. Innenfor formelle vitenskaper som matematikk kan deduktive slutninger hvor konklusjonene med logisk nødvendighet følger av premissene benyttes ved vurdering av hypoteser. For empiriske vitenskaper vil det imidlertid ikke være mulig å oppnå resultater som gjelder med logisk nødvendighet. Observasjonene er beheftet med usikkerhet og konklusjonene som trekkes gjelder bare med en viss sannsynlighet. Hypoteser innenfor de empiriske vitenskaper vil som regel forbli tvilsomme ved at det ikke er mulig å stille opp påstander som kan testes, hverken ved å hevde hypotesen eller dens motsetning. Et alternativ til deduksjon er induksjon, hvilket innebærer at generelle hypoteser og teorier aksepteres som gyldige på

grunnlag av endelig empirisk evidens. Dette er ikke en logisk holdbar begrunnelse for en hypotese fordi det alltid vil kunne dukke opp et eksempel som motbeviser utsagnet, men det er likevel en vanlig metode i empiriske vitenskaper. Det har vært gjort forsøk på å utvikle en induktiv logikk med veldefinerte slutningsregler på linje med den deduktive logikk. Forskjellen består i at de induktive slutningsreglene bare bekrefter konklusjonene til en viss grad (Kragh og Pedersen, 1991).

Siden det i alminnelighet ikke er mulig å bevise generelle teorier innenfor faget hydrologi på grunnlag av endelig mange empiriske utsagn, er man i stedet henvist til å formulere hypoteser som forsøkes falsifisert. Hvis falsifiseringen ikke lykkes, aksepteres hypotesene inntil videre og inngår i den generelle teorien. Dette står i motsetning til prinsippet om verifisering hvor man antar at et eksperiment faktisk kan bekrefte en hypotese. Karl Popper har formulert et demarkasjons-kriterium mellom vitenskap og ikke-vitenskap basert på dette prinsippet: en vitenskapelig teori må inneholde muligheten for tilbakevisning; det må være mulig å utlede konsekvenser av teorien som det i prinsippet er mulig å falsifisere. Testing av teorier må foregå ved systematiske forsøk på gjendrivelse. Veksten av den vitenskapelige erkjennelsen skjer således på en rasjonell måte ved at dristige teorier formuleres og deretter utsettes for så omfattende kritikk som mulig. I hydrologisk litteratur derimot,

finner man ofte argumenter som støtter prinsippet om verifisering. Dette skyldes at diskusjonene i faget sentrerer om modeller som skal reprodusere observerte fenomen i stedet for en bedre forståelse av basale prosesser (Gottschalk, 1990). Men det faktum at en modell kan reprodusere et datasett er ikke et bevis for at hypotesen som er grunnlaget for modellen er korrekt.

Et annet og mer radikalt syn på den vitenskapelige virksomheten er Thomas Kuhns teori om paradigmer, normalvitenskap og vitenskapelige revolusjoner (Kragh og Pedersen, 1991). Paradigmet er en grunnleggende teori som styrer den vitenskapelige virksomheten mot et mål; å bekrefte paradigmet sine teorier. Den vitenskap som bedrives kalles normalvitenskap og er karakterisert ved mangel på kritiske holdninger til paradigmet sine teorier. Paradigmet sine teorier kan imidlertid komme i krise hvis et tilstrekkelig antall forskere vender seg mot en ny teori. Dette er en revolusjonær fase som vil munne ut i et nytt paradigme. Ifølge Kuhn er dette en irrasjonell prosess som utløses av psykologiske og sosiale faktorer. Imre Lakatos har formulert et syn på vitenskapens utvikling som er en blanding av Poppers og Kuhns ideer (Kragh og Pedersen, 1991). Et sentralt punkt hos Lakatos er at det ikke er enkeltteorier som vurderes rasjonelt, men hele systemer av teorier og metoder. I motsetning til Kuhns paradigmatheori mener Lakatos at overgangen mellom konkurrerende teoretiske systemer skjer som en

kontinuerlig og rasjonell prosess. Enkeltstående eksperimenter er imidlertid ikke tilstrekkelig til å falsifisere en eksisterende teori, men disse eksperimentene kan med tiden inngå i en ny teori som erstatter den gamle. I den grad en teori falsifiseres skjer det først etter at en bedre, alternativ teori er tilgjengelig. Et eksempel på et paradigmeskifte i hydrologi er forståelsen av vannets bevegelse gjennom landskapet. Den amerikanske hydrologen Robert E. Horton (Horton, 1933) formulerte en teori som sa at den andelen av nedbøren som ikke trenger ned i bakken raskt vil strømme på landoverflaten fram til nærmeste bekk eller elv. Denne andelen øker med nedbørens intensitet og varighet. Hortons teori viste seg å passe utmerket sammen med en meget effektiv modell (Sherman, 1932) for beregning av vannføring i et vassdrag, og ble således nærmest enerådende i en periode på ca. 30 år. Detaljerte studier i mange deler av verden fra 1960-årene og fram til i dag har vist at denne nedbør-avløps-prosessen er langt mer nyansert enn beskrevet i Hortons teori; i mange områder vil så å si all nedbør trenge ned i bakken og renne mot nærmeste vassdrag som grunnvann (Bonell, 1993).

Naturvitenskapenes gjenstandsområde sies ofte å være den objektive virkelighet som eksisterer uavhengig av om den erkjennes av mennesker eller ikke. Det faktum at naturen viser permanente trekk selv om de subjektive omstendigheter varierer rettferdiggjør



antagelsen om denne type objektivitet. Naturen vil imidlertid alltid opptre i en subjektiv forkledning avhengig av omstendighetene ved en observasjon. Den metodologiske objektivitet handler om hvordan man finner fram til de objektive trekk ved naturfenomenene. Dette kan oppnås ved intermetodisk og intersubjektiv kontroll. Intermetodisk kontroll krever at man studerer et fenomen fra så mange forskjellig perspektiver som mulig, intersubjektiv kontroll innebærer at et resultat alltid skal kunne reproduseres av andre forskere (Kragh og Pedersen, 1991). I geofysiske fag er det ikke alltid mulig å etterkomme krav til reproduserbarhet og variasjon i eksperimentene; det gis bare en mulighet for å utføre et eksperiment under et sett med betingelser. Naturen er ikke et laboratorium hvor det er mulig å ha full kontroll over alle faktorer som påvirker de prosessene som studeres eller hvilke tilstander disse prosessene befinner seg i. Dette gjør det vanskelig å imøtekomme kravet om intermetodisk og intersubjektiv kontroll i vitenskapelig hydrologi, man er ikke en gang garantert at systemene som studeres er i en slik tilstand at de eksperimentelle dataene kan brukes for å støtte en hypotese. Problemet med manglende objektivitet er spesielt stort når man studerer fenomener som har funnet sted langt tilbake i tid, f.eks. innenfor paleohydrologi eller paleoklimatologi. Dette problemet forsøkes løst ved at man i forklaringen av slike individuelle hendelser i alminnelighet baserer seg på generelle og

testbare lovmessigheter (Kragh og Pedersen, 1991).

Det herskende syn i naturvitenskap i dag er at naturen må forstås som et stort mekanisk system som kun er underlagt fysikkens lover. Vitenskapen har som sitt mål å produsere viten eller erkjennelse om denne objektivt eksisterende virkelighet. Tradisjonen i moderne naturvitenskap basert på denne mekanistiske oppfatningen tilsier at en dypere erkjennelse av naturen oppnås ved å studere egenskaper av universell karakter fremfor individuelle fenomener. De individuelle objekter studeres kun for å få empirisk viten om de generelle objekter (Kragh og Pedersen, 1991). Den hydrologiske forskningen som er orientert mot en forståelse av fenomener som finner sted i naturen har konsentrert seg om å beskrive isolerte prosesser i liten skala. Det man mangler er en forståelse av hvordan fenomenene endrer karakter når de betraktes i en annen skala og hvordan de vekselvirker med hverandre. For å forstå disse mekanismene må man finne en basis for vitenskapelig hydrologi som er basert på fysiske betraktninger og som ser på hydrologiske prosesser som en del av en helhet (Klemes, 1986). De store atmosfære-landoverflate-eksperimentene med skala 10^4 km^2 som har vært utført i forskjellige klimasoner over hele jorden siden slutten av 1980-årene (f.eks. Halldin m.fl., 1999) kan bidra til en slik utvikling. Her studeres atmosfæriske, hydrologiske og biologiske prosesser som deltar i utveksling av

vann, karbondioksid og energi mellom atmosfæren og landoverflaten med det formål å oppnå kunnskap om hvordan disse prosessene vekselvirker og hva som karakteriserer deres romlige variasjon.

En mulig utvikling i fremtiden

Hydrologi har ikke store konsekvenser for vår erkjennelse av virkeligheten. De geofysiske fagene opererer innenfor termodynamikk, og klassisk mekanikk og beskrivelsen av fagene og verktøyene som benyttes betraktes som kjent. Selv om studiet av det fysiske naturmiljøet var vesentlig for virkelighetsoppfatningen i antikken, har de geofysiske fagene hatt liten betydning for den vitenskapelige erkjennelsen i moderne tid. Geofysikk kan lett betraktes som et antikvert fagområde hvor problemene har funnet sin endelige løsning (Peixoto og Oort, 1992). Innenfor naturvitenskapen er det fag som fysikk, astrofysikk og biologi som har vært opphav til store endringer i vår oppfatning av virkeligheten i nyere tid. Hvis man betrakter den vitenskapelige erkjennelsen som et resultat av en vekselvirkning mellom naturen og forskeren, er det imidlertid ingen grunn til å tro at veksten i den vitenskapelige erkjennelsen vil ha en slutt (Kragh og Pedersen, 1991). Ny teknologi kan gi nye muligheter for å utføre eksperimenter og analysere data; et eksempel er bruk av satellitter, fjernanalyse og geografiske informasjonssystemer for å analysere geofysiske problemstillinger hvor man

betrakter prosesser med romlig karakter (Eagleson, 1991).

Hydrologiske prosesser er en del av et større dynamisk økologisk system med mer komplekse strukturer enn det som reflekteres i nåværende teorier (Gottschalk, 1990). Med dette utgangspunktet finnes flere utfordrende problemer som gir mulighet for en ny utvikling i hydrologi, det gjelder spesielt problemer med så stor skala at landjorden med vegetasjon og atmosfæren må betraktes som et integrert system. Eksempler er problemer i forbindelse med klimaendringer, avskoging, irrigasjon og drenering i stor skala og påvirkning fra sur nedbør. Vår evne til å løse miljøproblemer i regional og global skala er avhengig av en forståelse av det globale systemet som utgjøres av atmosfæren, hydrosfæren, kryosfæren, litosfæren og biosfæren. Hydrologi har sin plass som et av fagene som studerer dette systemet (Bras og Eagleson, 1987). Utvikling av hydrologi må i så fall gå i retning av å studere fysiske, kjemiske og biologiske prosesser på landjorda som påvirker den hydrologiske syklus og å beskrive den globale vannbalansens karakteristika i rom og tid (Eagleson, 1991).

Konklusjon

Det er først og fremst formålet med forskningen som er avgjørende for forholdet mellom vitenskap og teknologi. Hydrologen H.L. Penman formulerte det slik: «Forskjellen mellom vitenskap og teknologi er at spørsmålene som stil-

les er henholdsvis hvorfor og hvordan» (Nash, 1988). Teknologien søker å utvikle metoder for å kontrollere og manipulere med naturlige og kunstige objekter; hvorvidt disse metodene er basert på en korrekt beskrivelse av virkeligheten er irrelevant. Naturvitenskapen på sin side, søker å oppnå erkjennelse og kunnskap om det som utgjør dens gjenstandsområde i form av universelle naturlover. På grunn av samfunnets krav om løsning av problemer i forbindelse med bruk og forvaltning av vannressursene har den hydrologiske forskningskulturen vært preget av teknologisk aktivitet. Et viktig produkt i den teknologiske hydrologien er modeller som kan reprodusere naturlige prosesser fordi mange praktiske resultat kan oppnås med disse verktøyene. Det er lett å bli imponert av magien i matematiske modeller som kan simulere virkelige hydrologiske systemers oppførsel, men dette betyr ikke at modellene gir en korrekt beskrivelse av de grunnleggende hydrologiske fenomenene (Gottschalk, 1990).

De basale relasjonene i hydrologi hører til fysikken. Imidlertid mangler en konstituering av gjenstandsområdet for hydrologisk forskning som er basert på grunnleggende fysiske prinsipper og en oppfatning av hydrologiske prosesser som en del av et større dynamisk system bestående av atmosfære, hav, snø og is, landoverflate og vegetasjon. I stedet har store deler av den hydrologiske forskningen lagt vekt på metoder som er basert på forenklinger og kvasi-

fysiske beskrivelser av de hydrologiske prosessenes karakter. Eksperimenter med det formål å forstå og oppnå ny kunnskap om naturen er også for en stor del manglende. Grunnlaget for å formulere hypoteser om hydrologiske prosesser er dermed ikke til stede, og dette hindrer veksten i vitenskapelig erkjennelse.

Siden en teknologisk suksess måles ved effektiviteten av dens evne til å løse gitte problemer har det ingen hensikt å vurdere dens underliggende antagelser etter de kriterier som benyttes ved vurdering av vitenskapelige teorier. Falsifikasjon er ikke et kriterium som kan benyttes ved forkastelse av en teknologisk metode. Den teknologiske hydrologien er karakterisert ved dette; hypoteser utsettes ikke for forsøk på gjendrivelse, i stedet betraktes metodenes evne til å reprodusere observerte fenomen som en verifikasjon av at de underliggende antagelsene er korrekte.

Objektivitet er et krav som ofte reises i forbindelse med vitenskapelig arbeid. Det kan innebære krav til verdifrihet, sannhet, upartiskhet, allsidighet eller ideologifrihet, men også krav til den vitenskapelige metoden i form av intermetodisk og intersubjektiv kontroll. I geofysiske fag hvor naturen dikterer tilstanden til systemene som studeres er det vanskelig å imøtekomme kravet om metodisk objektivitet. Et annet og mer generelt problem i vitenskap er at objektiviteten neppe gjelder for den enkelte forsker som er påvirket av tradisjoner, verdier og ideologier

som styrer hans arbeid. Likevel kan en vitenskapelige disiplin som helhet være objektiv fordi det foregår en vekselvirkning mellom de enkelte forskere i form av samarbeid og gjensidig kritikk (Kragh og Pedersen, 1991).

Virksomheten i hydrologi kan deles i to: En teknologisk orientert og en vitenskapelig orientert del. Den teknologisk orienterte hydrologien er dominerende i dag, men det finnes også en hydrologi basert på vitenskapelige prinsipper, den strever imidlertid med å finne sitt fundament. En mulighet for en ny utvikling ligger i å betrakte hydrologiske prosesser i sammenheng med og som en del av det kompliserte globale systemet som består av atmosfære, snø og is, hav og land hvor også biologiske prosesser har betydning. En slik utvikling er nødvendig for å løse de stadig mer påtrengende miljøproblemene i global skala. Dette krever imidlertid at man fokuserer på en vitenskapelig basert hydrologi, hvor målet er å oppnå størst mulig innsikt i de fundamentale mekanismene i naturen.

Uansett hvilken retning hydrologi utvikler seg i er det sannsynlig at man vil benytte modeller som et hjelpemiddel til å studere systemene. Gottschalk (1990) sier at det er nødvendig å rette oppmerksomheten mot teoriene bak

modellene og at modellene må klassifiseres med hensyn til deres evne til å reprodusere og forklare hydrologiske fenomener. Dette vil gjøre det enklere å avgjøre hvilke konklusjoner som kan trekkes på grunnlag av modellenes resultater og hvor generelle disse resultatene er, med andre ord i hvilken grad modellene bidrar til vitenskapelig erkjennelse.

Utviklingen av et fagområde vil dels påvirkes av eksterne faktorer av teknologisk, sosial og politisk art, dels av interne faktorer ved at forskersamfunnet med sine publikasjons- og utdannelsessystemer sørger for å overføre holdninger og sensurere påstander (Kragh og Pedersen, 1991). Forventede miljøproblemer og klimaendringer vil forhåpentligvis føre til at den hydrologiske forskningen styres i en ny retning ved at samfunnet forlanger en forståelse av forholdene som ligger bak disse problemene og en mulighet for å redusere eventuelle skadelige effekter. Dette krever at forskersamfunnet og utdannelsessystemet bryter med den teknologisk orienterte tenkegangen og retter oppmerksomheten mot de fysiske mekanismene som finner sted i virkeligheten.

Litteratur

- Bonell, M. (1993) Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests, *Journal of Hydrology*, vol. 150, s. 217-275.
- Bras, R. og Eagleson, P.S. (1987) *Hydrology, the forgotten earth science*, *Eos*, vol. 68 (16), s. 227.
- Eagleson, P.S. (red.) (1991) *Opportuni-*

- ties in the hydrologic sciences, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C.*
- Eagleson, P.S. (1992) Global change, a catalyst for the development of hydrologic science, i: O'Kane, J.P. (red.): *Advances in theoretical hydrology*, Elsevier, Amsterdam, s. 219-236.
- Gottschalk, L. (1990) How can we use hydrological models? i: Haldorsen, S. (red.): *Hydrogeological properties of Nordic tills, Nordic Hydrological Programme, NHP Report no. 25*, s. 211-230.
- Gottschalk, L. (1992) Quantitative hydrology in Scandinavia in the 18th century, i: O'Kane, J.P. (red.): *Advances in theoretical hydrology*, Elsevier, Amsterdam, s. 177-189.
- Gottschalk, L. og Askew, A. (1987) Hydrology and data acquisition, i: Kundzewics, Z.W., Gottschalk, L. og Webb, B. (red.): *Hydrology 2000*, IAHS Publication no. 171, s. 79-90.
- Gottschalk, L., Killingtveit, Å. og Sæltun, N.R. (1995) *Kompendium i hydrologi*, Institutt for geofysikk, Universitetet i Oslo.
- Halldin, S., Gryning, S.E., Gottschalk, L., Jochum, A., Lundin, L.C. og Van de Griend, A.A. (1999) Energy, water and carbon exchange in a boreal forest landscape – *NOPEX experiences, Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 98-99, s. 5-29.
- Horton, R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrological cycle, *Transactions American Geophysical Union*, vol. 14, s. 446-460.
- Johansson, I. (1983) *Nordic Glossary of Hydrology*, Almquist & Wiksell International, Stockholm.
- Klemes, V. (1986) Dilettantism in hydrology: transition or destiny?, *Water Resources Research*, vol. 22 (9), s. 177S-188S.
- Klemes, V. (1988) A hydrological perspective, *Journal of Hydrology*, vol. 100, s. 3-28.
- Kragh, H. og Pedersen, S.A. (1991) *Naturvidenskabens teori*, 2. utgave, Nyt Nordisk Forlag, København.
- Kundzewics, Z.W., Afouda, A. og Szolgay, J. (1987) Mathematical modelling, i: Kundzewics, Z.W., Gottschalk, L. og Webb, B. (red.): *Hydrology 2000*, IAHS Publication no. 171, s. 71-78.
- Maidment, D.R. (red.) (1992) *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Nash, J.E. (1988) Foreword, *Journal of Hydrology*, vol. 100, s. v-viii.
- Otnæs, J. og Ræstad, E. (1978) *Hydrologi i praksis*, 2. utgave, Ingeniørforlaget, Oslo.
- Peixoto, J.P. og Oort, A.H. (1992) *Physics of climate*, American Institute of Physics, New York.
- Sherman, L.K. (1932) Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method, *Engineering News Record*, vol. 108, s. 501-505.
- Wormnæs, O. (1993) *Vitenskapsfilosofi*, 2. utgave, Gyldendal, Oslo.

Utgitt i NVEs Meddelelse/Særtrykk-serie de siste 10 år (fullstendig liste finnes på www.nve.no)

- Nr 77. G. Rosquist and G. Østrem: The sensitivity of a small icecap to climatic fluctuations. (5 s.) 1991.
- « 78. H. Hisdal and O.E. Tveito: Generation of runoff series at ungauged locations using empirical orthogonal functions in combination with kriging (15 s.) 1993
- « 79. Ole Fredrik Bergersen, Morten Thoresen, Ragnhild Hougsnæs. Evidence for a Newly Discovered Weichselian Interstadial in Gudbrandsdalen, Central South Norway (3 s.) 1993.
- « 80. Tron Laumann and Bjørn Wold: Reactions of a calving glacier to large changes in water level. (5 s.) 1993.
- « 81. Hege Hisdal and Ole Einar Tveito: Extension of runoff series using empirical orthogonal functions. (16 s.) 1993.
- « 82. Gunnar Østrem and Nils Haakensen: Glaciers of Norway. (53 s.) 1993.
- « 83. M. Kennett, T. Laumann and C. Lund: Helicopter-borne radio-echo sounding of Svartisen, Norway. (4 s.) 1993.
- « 84. Tron Laumann and Niels Reeh: Sensitivity to climate change of the mass balance of glaciers in southern Norway.(10 s.) 1994« 85.Arve M. Tvede: Discharge, water temperature and glaciers in the Aurland river basin. (6 s.) 1995.
- « 86. Ø. Aars og G. Østrem: Tiden går - vannet rår, 1895 - 1995. Hydrologisk avdeling i 100 år. (s.) 1995.
- « 87. J. Bogen: Monitoring grain size of suspended sediments in rivers. (8 s.) 1995.
- « 88. J. Bogen, B. Bølviken og R. T. Ottesen: Environmental studies in Western Europe using overbank sediment. (9 s.)1995.
- « 89. J. Bogen, H. Berg og F. Sandersen: The contribution of gully erosion to the sediment budget of the River Leira. (9 s.) 1995.
- « 90. J. Bogen: Sediment Transport and Deposition in Mountain Rivers. (15 s.) 1995.
- « 91. Tomas Johannesson, Oddur Sigurdsson, Tron Laumann and Michael Kennett: Degree-day glacier mass-balance modelling with applications to glaciers in Iceland, Norway and Greenland. (14 s.) 1995.
- « 92. Lars Egil Haugen, Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Østen A. Tilrem og Jon Karlstad: Nasjonalt markvann. Jord som vannlager. Observasjoner fra markvannsstasjonen Ås/NLH 1996. (5 s.)
- « 93. Peter Jansson, Jack Kohler og Veijo A. Pohjola: Characteristics of basal ice at Engabreen, northern Norway. (8 s.) 1996.
- « 94. M. Kennett, C. Rolstad, H. Elvehøy, E. Ruud: Calculation of drainage divides beneath the Svartisen ice-cap using GIS hydrolic tools. (6 s.) 1997.
- « 95. Torstein Herfjord, Astrid Voksø og Geir Taugbøl: 72 dybdekart over innsjøer i Trøndelag og Nord-Norge (170 s.)1997.
- « 96. Stefan Winkler, Nils Haakensen, Atle Nesje, Noralf Rye: Glaziale Dynamik in Westnorwegen - Ablauf und Ursachen des aktuellen Gletschervorstoßes am Jostedalsbreen. (21 s.) 1997.
- « 97. Bjarne Kjøllmoen and Gunnar Østrem: Storsteinsfjellbreen: Variations in mass balance from the 1960s to the 1990s.(6 s.) 1997.
- « 98. Arve M. Tvede, Tron Laumann: Glacial variations on a meso-scale: Examples from glaciers in the Aurland Mountains, southern Norway. (5 s.) 1998.

- « 99. Michael Kennett, Tron Laumann, Bjarne Kjøllmoen: Predicted response of the calving glacier Svartisheibreen, Norway, and outbursts from it, to future changes in climate and lake level. (5 s.) 1998.
- « 100. Michael Kennett, Trond Eiken: Airborne measurement of glacier surface elevation by scanning laser altimeter. (4 s.) 1998.
- « 101. Jack Kohler, John Moore, Mike Kennett, Rune Engeset, Hallgeir Elvehøy: Using groundpenetrating radar to image previous years' summer surfaces for mass-balance measurements. (6 s.) 1998.
- « 102. Ole Schjødt-Osmo & Rune Engeset: Remote sensing and snow monitoring: Application to flood forecasting. (5 s.) 2000
- « 103. Rune V. Engeset & Dan Johan Weydahl: Analysis of Glaciers and Geomorphology in Svalbard Using Multitemporal ERS-1 SAR Images. (9 s.) 2000
- « 104. Liss M. Andreassen: Comparing traditional mass balance measurements with long-term volume change extracted from topographical maps: A case study of Storbreen Glacier in Jotunheimen, Norway, for the period 1940-1997. (10 s.) 2000
- « 105. Gunnar Østrem & Nils Haakensen: Map comparison of traditional mass-balance measurements: Which method is better? (9 s.) 2000
- « 106. R.V. Engeset & R.S. Ødegård: Comparison of annual changes in winter ERS-1 SAR images and glacier mass balance of Slakbreen, Svalbard. (13 s.) 2000
- « 107 Kelly, R.E.J., Engeset, R., Kennett, M., Barrett, E.C., & Theakstone, W., 1997 Characteristic snow and ice properties of a Norwegian ice cap determined from complex ERS SAR. (6 s.) 2000
- " 108 Rune Verpe Engeset, Hallgeir Elvehøy, Liss Marie Andreassen, Nils Haakensen, Bjarne Kjøllmoen, Lars Andreas Roald, Erik Roland: Modelling of historic variations and future scenarios of the mass balance of Svartisen ice cap, northern Norway (7 s.) 2001
- " 109 R.V.Engeset, H.K.Sorteberg & H.C.Udnæs: Snow pillows: Use and verification Reprint from Proceedings of the fourth international conference on snow engineering Trondheim/Norway 19-21 June 2000. Snow engineering recent Advances and Developments (7 s.) 2001
- " 110 Stein Beldring, Lars Gottschalk, Allan Rodhe, Lena M. Tallaksen: Kinematic wave approximations to hillslope hydrological processes in tills (19 s.)
- " 111 Stein Beldring, Lars Gottschalk, Allan Rodhe, Lena M. Tallaksen: Distribution of soil moisture and groundwater levels at patch and catchment scales (20 s.)
- " 112 Stein Beldring, Lars Gottschalk: An Indirect Method for Determination of the Parameters of Flood Plain Aquifers (14 s.)
- " 113 H. Hisdal, K. Stahl, L.M. Tallaksen, S. Demuth: Estimating the mean areal snow water equivalent by integration in time and space Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? Reprint from International Journal of Climatology, 21, 317-333, 2001
- " 114 Thomas Skaugen Estimating the mean areal snow water equivalent by integration in time and space Reprint from: Hydrological Processes 13, 2051-2066, 1999, 2001
- " 115 Stein Beldring: Er hydrologi vitenskap?, 2001 (15 s.)



185

185

185

185