

Hvilket kretsløp?

Av Arne Tollan

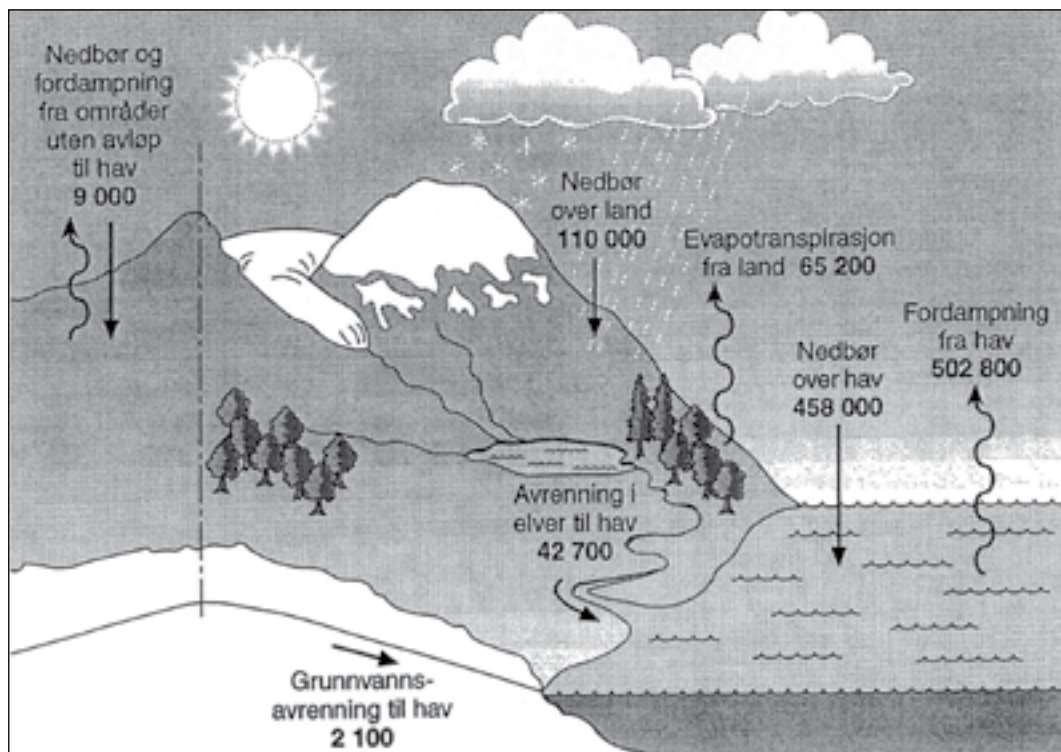
Arne Tollan er cand.real. fra Universitetet i Oslo i 1962. Han står bak vel 100 publikasjoner om hydrologi, vannforvaltning og miljøspørsmål. Han har blant annet vært avdelingsdirektør og senere seniorrådgiver i Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og energidirektorat. Han har også vært involvert i tallrike bistandsoppdrag relatert til vannressurser og vannforvaltning i land i Asia, Afrika og Europa.

Summary

Which cycle? Exact knowledge of the hydrological cycle and water balance is crucial for good water management. Ideally, we need to know the components of the cycle and the amount of water moving from the oceans and land surfaces as

water vapour to the atmosphere, condensing into precipitation, and feeding water courses directly or via soil moisture and ground water.

Such knowledge has evolved gradually over millennia, involving some of humanity's bright



Figur 1. Vannets globale kretsløp, enhet: $\text{km}^3/\text{år}$. $1 \text{ km}^3 = 10^9 \text{ m}^3 = 10^{12}$ liter (Kilde: Tollan, 2002. Data er vesentlig fra Shiklomanov, 1998).

test minds and keenest observers. Probably, the first principally correct understanding of the hydrological cycle stems from the Hindu scriptures of the Upanishads about 3000 years ago. Of particular significance was the progress towards modern scientific hydrology made in Europe some 350 years ago, based on quantitative measurements of the elements of the water cycle.

Innledning

Kanskje virker spørsmålet i tittelen banalt?

I dag er det barneskolelære at vannet på jorda sirkulerer: at nedbør fra skyene treffer bakken, renner av i elvene eller trenger inn i bakken som grunnvann, at vannet fra landjorda renner ut i verdenshavene, og at vannet derfra, og fra jordoverflaten, fordampes og kondenserer til nye skyer, figur. 1.

Vannbalansebegrepet er sentralt i moderne vitenskapelig hydrologi, og knytter seg selvsagt til elementene i kretsløpet. Kunnskap om vannets kretsløp og vannbalanse er nødvendig for all forvaltning av vannressursene. Denne allmenne kunnskapen om kretsløp og balanse var lenge lite kjent og størrelsen av leddene i kretsløpet likeså. Artikkelen forteller fra hvem, når og hvordan vi har fått bedre innsikt.

En oversikt

En generell vannbalanselikning for et nedbørfelt ble først beskrevet av Penck (1898) som

$$R = P - E \pm \Delta G$$

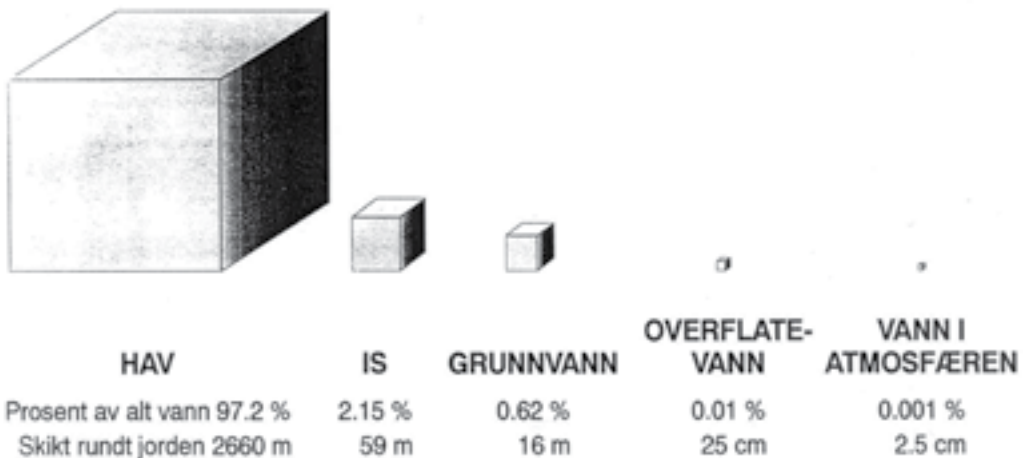
der R er runoff/avrenning, P er precipitation/nedbør, E er evapotranspirasjon og G er ground water/grunnvann.

Verdens totale vannmengde anslås i dag til ca. 1400 millioner km³. Figur 1 viser med tall-estimerer hvilke årlige *flukser* (strømmer) av vann som i gjennomsnitt flyter mellom de viktigste magasinleddene i kretsløpet (hav, atmosfære, jordoverflaten, undergrunnen).

Figur 2 viser globale overslag over vannvolumer i de viktigste magasinleddene, som prosentdel av alt vann på jorda, og som ekvivalent sjikttykkelse dersom vannet var jevnt fordelt over jordoverflaten.

Et viktig begrep når vi snakker om vannbalanse er vannets oppholdstid i de ulike magasinleddene. Oppholdstiden, O, beregnes i prinsipp som $O = V(\text{olum av magasinledd}) / F(\text{lukst ut fra eller inn til magasinleddet})$. Noen estimerer for oppholdstider (Lvovich 1970, Unesco 1971):

Verdens vannforråd



Figur 2. Fordelingen av verdens vannressurser mellom de viktigste magasinleddene (Data vesentlig fra Shiklomanov, 1998).

Hav	>4000 år
Is og snø	10- >1000 år
Grunnvann	dager - >10 000 år
Elvevann	14 dager
Atmosfæren	8-10 dager

Det er naturligvis usikkerhet, til dels stor, ved disse estimatene. Selv vannføringen i verdens vassdrag, ca. 42 700 km³ / år (fig. 1), er usikker, enda vannføring er ganske enkel å måle. Bare 60% av verdens vassdrag måles noenlunde nøyaktig. Et svært usikkert ledd er avrenning av grunnvann direkte til verdenshavene. Når det gjelder evapotranspirasjon (summen av fordampning fra vann og transpirasjon fra planter og dyr) bygger overslagene i svært liten grad på direkte målinger; derimot på meteorologiske beregninger og målinger av strålingsbalansen.

Til sammenlikning med de globale verdiene, er gjennomsnittlig årlig vannbalanse for Norge (1931-1960) anslått til:

P (nedbør)	1415 mm
E (evapotranspirasjon)	235 mm
Q (avrenning)	1180 mm (Tollan, 2002)

Oldtidens oppfatninger

Den første, i hovedsak korrekte, oppfatning av vannets kretsløp stammer fra hinduenes hellige Veda-skrifter. En interessant gruppe blant disse skriftene er de tretten *Upanishadene*, nedskrevet på sanskrit mellom 600 og 900 f.Kr., og i vår sammenheng finnes omtalen av kretsløpet i den såkalte Chandogya-upanishaden, (Upanishads, 2000). Som i vårt hjemlige «Kongespeilet» er det en «far» som svarer på spørsmål fra en «sønn»:

Elvene i øst, min sønn, renner mot øst, som Ganges; elvene i vest renner mot vest, som Indus. De løper fra havet tilbake til havet, dvs. skyene løfter vannet fra havet til himmelen og lar det løpe som regn tilbake til havet.

Det gamle testamente (Forkynneren 1.7, skrevet ca. 250 f.Kr.) har en beskrivelse av vannets kretsløp som likner mye på Upanishadenes, men bare nesten. Forkynneren sier:

Alle elver renner ut i havet, men havet blir ikke fullt. Dit hvor elvene kommer fra, dit vender de tilbake.

Det er verdt å merke seg at den seneste norske Bibel-versjonen (Bibelselskapet, 2011) har en avvikende tekst, som ikke gjengir kretsløpsforståelsen hos Forkynneren. Denne seneste norske bibelversjonen sier:

... dit elvene før har rent, fortsetter de å renne.

Dermed overser denne oversettelsen, feilaktig, det leddet i kretsløpet som bringer vannet fra hav til nytt regn.

Kina

Oldtidens Kina har knapt eksempler på banebrytende hydrologisk innsikt så som Upanishadene. Derimot er det mange eksempler på at tidlige kinesiske tenkere brukte vannet og kretsløpet som filosofiske bilder. Konfutse sa: «*Den kloke finner glede i vannet. Den kloke er i bevegelse*». Og: «*Mesteren sto ved ei elv og sa: Det som farer forbi er slik som denne elva. Den stopper ikke dag eller natt*», (Det norske samlaget, 1988). Konfutse har rimeligvis tenkt på naturens skiftninger eller fortida. Og enkelte vannkilder ble kalt «havets øyne», hvor vannivået varierte med tidevannet.

I samme ånd fulgte kineserne naturens rytme i praktisk vannforvaltning:

La regnvannet strømme om våren og vanne åkrene. Om sommeren (dvs. monsuntiden) skal du bygge dammer og diker for å ta vare på over-skuddsvannet. Vinteren er tid for vedlikehold og innkreving av skatt.

Systematiske nedbørmålinger fant sted i Kina før ca. 200 f.Kr., da regionene ble pålagt å rapportere nedbørverdier til sentralregjeringen som underlag for skattlegging. Tilsvarende nedbørmålinger er kjent fra India allerede ca. 400 f.Kr. (Nace, 1974)

Egypt

Naturlig nok er Egypts historie nært knyttet til Nilen, som årvisst kilde til det fruktbare slammet som sørget for gode avlinger i det nordlige Egypt.

Observasjoner av vannstanden, målt på såkalte nilometre, ga grunnlag for myndighetenes skattlegging, som i Kina. Ikke allmennheten, men bare presteskaper, hadde tilgang til disse avlesningene, og man kan jo mistenke at det ga mulighet for å kreve for høy skatt. For øvrig var den egyptiske Faraos ansett som guddom og styrer over Nilen. Opptegnelser om Nilens flommer ble gjort allerede tidligere enn 3000 f.Kr., men synes ikke å ha gitt grunnlag for teorier om vannets naturlige kretsløp. Tvert imot ble Nilen antatt å komme fra underverdenen, og ble slik en del av gammelegyptisk mytologi, (Caponera, 1992, Dooge, 2004, Tvedt, 2012).

Hellas og Romerriket

De greske filosofene i perioden 800-200 f.Kr. hadde mange interessante meninger om vannets kretsløp, om ikke alltid korrekte, (Nace, 1974). Allerede dikteren *Hesiod* (800 f.Kr., altså samtidig med Upanishadene) hadde betraktninger om fordampning og kondensasjon (i form av en fruktbar tåke over åkrene). Mer kjent er nok oppfatningen hos *Thales* fra Milet (624-584 f.Kr.) at vann er verdens grunnemne, og derfor opphav til all materie. *Thales* mente også at Jorda flyter i vann. Hans elev *Anaximander* (610-545 f.Kr.) mente korrekt nok at regn kan dannes av vandedamp som stiger fra jorden. Den 20 år yngre *Anaximenes*, som også levde i Milet, forsto at kondensasjonen av vanddampen gir regn, hagl eller snø avhengig av temperaturen. Og i samme tradisjon lærte *Anaxagoras* (500-428 f.Kr.) at solvarmen løfter havvannet til skyene, og at vannet i elvene forsynes både fra regnfall og underjordisk grunnvann. Og *Heraklit*, som levde på samme tid, ble kjent for sitt utsagn *panta rhei = alt flyter*, men bidro ikke til dypere hydrologisk innsikt. Grekeren *Philo* (ca. 250 f.Kr.), som levde i Bysants (=Istanbul), er visstnok den første som hevdet at eksperiment og observasjon bør være grunnlaget for en vitenskapelig teori. Men både før og senere var det vanlig å tolke naturfenomener ut fra myter og teologi (Nace, 1974, Tollan, 2004).

Denne greske tradisjonen for å filosofere over naturfenomener, og ofte med konkrete observa-

sjoner, bl.a. av Nilen, som grunnlag, ble videreført i Romerriket, men uten en korrekt forståelse av fordampning og kondensasjon som ledd i kretsløpet. Både de greske filosofene *Platon* og *Aristoteles* og senere romeren *Seneca* mente at grunnvannet ble lagret i store underjordiske grotter, og transportert under trykk i underjordiske rør og kanaler til fjells. Der kunne vannet sprute ut i kilder, i analogi med blodet i kroppens blodårer, når det oppstår sår.

Derimot fortjener *Heron* fra Alexandria å anerkjennes som sannsynligvis den første i verden som beregnet vannføring som produktet av vannhastighet og tverrsnitt i elv/ledning. Etter Romerrikets fall ble denne naturvitenskapelige filosofien basert på erfaringer og observasjoner ikke videreført, men stort sett glemt eller oversett i det neste årtusen, inntil renessansen.

Romerne overtok og aksepterte de greske filosofenes oppfatning, også av vannets kretsløp, selv *Aristoteles'* feilslutninger. Men romerne selv var mest opptatt av hydrologi som grunnlag for praktisk ingeniørarbeid, så som å bygge akvedukter for å lede vann over store avstander, og kloakkering. *Cloaca Maxima* (1.-3. årh f. Kr.) i Roma beundres fortsatt som en teknisk prestasjon.

Middelalderen

Etter Romerrikets fall forfalt også vitenskapelig tenkning i Europa, ofte fortrent av den autoritet som kirken utøvde. Derimot blomstret naturvitenskapene i den arabiske del av verden. En usedvanlig innsiktsfull person i både naturvitenskap og kulturforskning var perseren *al-Biruni*, som levde rundt år 1000 i det som er Afghanistan i dag. Han advarte mot overtro og hekseskuer, og anbefalte i stedet direkte observasjoner av naturen. Foruten store bidrag til matematikk, geodesi, astronomi og medisin, studerte han også en del av vannets kretsløp, nemlig forekomsten av naturlige vannkilder, som *al-Biruni* forklarte med hydrostatikkens lover (Encyclopedia Britannica 1994).

Selv et geni som *Leonardo da Vinci* (1452-1519) mente 500 år senere at kildene som forsynte elvene i fjellet fikk sitt vann direkte fra

havets bunn gjennom underjordiske rør og kanaler. Leonardo sammenliknet, som Aristoteles, denne delen av kretsløpet (feilaktig) med menneskets blodsystem. Leonardo hadde likevel verdifulle tanker om vannet i naturen. Han konstruerte flottører for å måle vannhastighet i elver (han fant at hastigheten vanligvis er større ved overflaten enn ved bunnen), og var den første til å formulere en kontinuitetslov for avrenning: «*en elv fører i alle deler av løpet like store mengder vann i samme tidsrom, uavhengig av bredde, dybde, fall, ujevnheter eller krumning*», (Pfister et al. 2009). Det er likevel en yngre italiener, A. B. Castelli (ca. 1577-1642), også kalt hydraulikkens far, som gjerne får æren for kontinuitetsloven (Caeserlein, s. 55 i Unesco-WMO-IAHS 1974).

Nyere tid

Antikkens og middelalderens oppfatninger om vannets kretsløp ble ikke utfordret før opplysningstidens vitenskapsfolk tok opp også studiet av vann. Blant mange som bidro til økt og eksakt kunnskap om vannet nevnes her franskmennene Pierre Perrault (1608-1680) og Edmé Mariotte (1620-1684) og engelske Edmund Halley (1656-1742).

Perraults bidrag til vitenskapen var boken «*De l'origine des fontaines*», fra 1674, der han som den første forsøker å kvantifisere nedbør og avrenning i en elv, nemlig la Coquille, en 93 km² stor sideelv til Seinen. Til tross for lite nøyaktige målemetoder mente Perrault å kunne konkludere at nedbøren var mer enn tilstrekkelig til å forsyne la Coquille med sin vannføring. Han påviste at mye av nedbøren infiltrerte i bakken, og vedlikeholdt gjennom grunnvannsutstrømming vannføringen i elva i tørre perioder. I denne sammenheng fant han at noe av vannet i bakken drenerte sideveis i den umettede sonen over grunnvannet, hva vi i dag kaller markvann. En imponerende oppdagelse. Året 1674 kan derfor med god grunn sies å markere fødselen for vitenskapelig hydrologi, se litt.referansen Unesco-WMO-IAHS, 1974.

Perraults landsmann Edmé Mariotte var, i motsetning til Perrault, selv vitenskapsmann. Han ønsket å teste Perraults resultater på et

større område, og valgte selve Seinens nedbørfelt ved Paris, 44 320 km², dvs. om lag som Glomma. Hans resultater ble publisert i 1686 («*Traité du mouvement des eaux et d'autres corps fluides*»), og bekreftet at målt nedbør faktisk er nok til å forklare avrenningen i Seinen, samt en differanse nedbør minus avrenning, som er rimelig nær aktuelle beregninger av evapotranspirasjonen i Seinens nedbørfelt. Han var klar over at forskjeller i arealbruk også gir forskjeller i lokal vannbalanse. Mariotte beskrev også korrekt at vandamp kondenserer til små dråper i atmosfæren og at dråpene vokser og faller ved å slå seg sammen til store regndråper. Fremfor alt er det Perraults og Mariottes fortjeneste at kretsløpet nå ble beskrevet kvantitativt. Edmund Halley bidro til denne utviklingen ved å verifisere vannbalansebegrepet for flere og større områder, bl.a. Middelhavet (ca. 1700).

Det kan være interessant å notere at disse pionerene i vannfagene ofte ble mest kjent i andre disipliner: Mariotte er nok mest kjent i fysikken for Boyle-Mariottes lov om forholdet mellom trykk og volum i gasser: $p \cdot V = k$. Og Halley, som også var astronom, fikk sitt navn knyttet til Halleys komet, som besøker Jorden hvert 75. år.

Nevnes bør også kjemikeren Antoine Lavoisier (1743-1794) som ved å brenne hydrogen viste at vann er en kjemisk forbindelse mellom hydrogen og oksygen.

Hvor kommer vannet fra?

Tidlige hypoteser mente at vann dannes kontinuerlig i jordens indre og finner veien til jordoverflaten. Slike forestillinger er nå forlatt, og nyere forskning tyder på at vannet på jorda stammer fra den gass- og støvskyen som ble til vårt solsystem for 4,6 milliarder år siden. Hydrogen, H, og oksygen, O, er henholdsvis det vanligste og tredje vanligste grunnstoffet i universet, så mulighetene er gode for å danne vann, H₂O, når stjerner fødes. Nær sola, der temperaturen er høy, kan H og O og andre lette grunnstoffer «koke vekk», mens vann kan bevares, f.eks. som is, i de fjernere og derfor kaldere delene av solsystemet, på kometer og asteroider. Begge typer legemer er kandidater for å ha brakt vann hit til jorda.

Asteroider, «småplaneter», kalles legemer som finnes i det såkalte asteroidebeltet mellom banene til planetene Mars og Jupiter. De kan komme inn i jordbanen og falle ned på overflaten som meteoritter. Kometene kommer fra de fjerneste delene av solsystemet, utenfor Plutos bane. Disse kometområdene har fått navn som Kuiperbeltet og Oortskyen.

I vurderingen av om asteroider eller kometer er hovedtransportør, er forholdet D/H mellom deuterium (tungt hydrogen) og vanlig hydrogen, viktig. Det viser seg at D/H-forholdet i is fra meteoritter er ganske nær D/H-forholdet i havvann, mens kometer oftest har et betydelig høyere forholdstall. Rådende hypotese er derfor at jordas vann i hovedsak stammer fra asteroidene, som jo dessuten kommer fra områder i solsystemet mye nærmere jorda enn kometene. Men her er visstnok fortsatt plass for alternative hypoteser, (Jewitt and Young, 2015).

Sluttord

Man må imponeres av de mange filosofer og vitenskapsfolk som til ulike tider og i mange land har bidratt til vår dype og kvantitative innsikt i vannets kretsløp og vannbalansebegrepet. De har samtidig vist at det er nødvendig å kombinere iderikdom med nøyaktige observasjoner for å forstå naturen.

Aller mest imponerende er, etter forfatterens mening, den eller de som skrev Upanishadene i Nord-India for 3000 år siden, og som så sammenhengen fra havvann via skydannelse til elvenes avrenning. Veien til vår forståelse av kretsløp og vannbalanse har vært lang, og er vel ennå ikke fullført. Regionale forskjeller og kvantifisering trenger fortsatt pålitelige observasjoner og forskning.

For ytterligere omtale av hydrologiens historie vises til Gottschalk (2000) og de tre Unesco-publikasjonen omtalt i litteraturlisten.

Litteratur

Bibelen, Bibelselskapet (2011), 1508 s

Caponera, D.A. (1992): Principles of water law and administration. A. A. Balkema, 260 s

Det Norske Samlaget (1988): Konfutse: Samtalar. 237 s

Dooge, J.C.I. (2004): Background to modern hydrology. I: The Basis of Civilization – Water Science? IAHS Publ. 286, s. 3-12

Encyclopedia Britannica 15.edition, (1994): Omtale av al-Biruni, i vol. 2, s. 237.

Gottschalk, L. (2000): Hydrologiens historie. UiO Inst. for geofysikk, kompendium, 20 s

Jewitt, D. and E.D.Young (2015): Oceans from the Skies. Scientific American, March 2015, s. 30-37

Lvovich, M.I. (1994): World water balance (General report). Symposium on world water balance, vol. 2. IAHS Publ. 93

Nace, R. (1974): General evolution of the concept of the hydrological cycle. I: Unesco-WMO-IAHS (1974), s. 40-51

Penck, A. (1896): Untersuchungen über Verdunstung und Abfluss von grösseren Landflächen. Geogr. Abh. (Wien) Vol.5 nr.5. Omtalt i Unesco (1971)

Pfister, L., H.G.Savenije and F.Fenicia (2009): Leonardo da Vinci's Water Theory, IAHS spec.publ. 9, 94 s

Schiklomanov, I.A. (1998): World Water Resources. A new appraisal and assessment for the 21st century. Unesco, 37 s

Tollan, A. (2002): Vannressurser. Universitetsforlaget. 227 s

Tollan, A. (2004): Vann-tro. Vann 4-2004, s. 279-288

Tvedt, T. (2012): Nilen – historiens elv. Aschehoug. 458 s

Unesco-WMO-IAHS (1974): Three centuries of scientific hydrology, Unesco, 123 s

Unesco (1971): Scientific framework of world water balance. Techn. papers in hydrology nr. 7, 27 s

Unesco (1991): International symposium to commemorate the 25 years of IHD/IHP. 183 s

Upanishads (2000): Oversatt av F.Max-Müller, revidert av S.Navlakha. Wordsworth Classics of World Literature 244 s