

Hydrologi

Om vandets kredsløb, jordbund, vandforbrug
og vand som ressource

Indholdsfortegnelse:

Vand som ressource.....	2
Vandets kredsløb.....	3
Vandbalancen	3
Fordampning	4
Nettonedbør og fugtighedsindeks	4
Afstrømning	5
Overfladisk afstrømning - A_o	5
Jordbunden og den underjordiske afstrømning - A_u	5
Grundvandet	6
Danmarks vandforbrug og bæredygtighed.....	7
Det globale vandforbrug	8

Vand som ressource

Vandet (H₂O) er den vigtigste af alle naturressourcer vi har, idet vandet er forudsætningen for livet på jorden og indgår i alle levende væsner, mennesker, dyr og planter. Vores krop består af 2/3 vand, hvoraf ca. 60 % er indeholdt i kroppens celler.

Det først liv på jorden er formentlig opstået i havet for mere end 3 mia. år siden og har herfra bredt sig til landjorden for ca. 500 mio. år siden. Havene er fortsat hjemsted for et rigt plante- og dyreliv, som i lighed med enorme mineralrigdomme, udgør en endnu kun ringe udnyttet ressource for mennesket.

Af jordens samlede overfalde er over 70 % dækket af oceanernes *saltvand*, mens *ferskvand*, som er livsnødvendigt for mennesker, dyr og planter, kun udgør ca. 2,5 % af de samlede mængder af vand. Heraf er langt størstedelen (ca. 75 %) bundet i iskapperne på polerne og Grønland, i gletsjere og permafrost, og kun en forsvindende lille del er tilgængeligt for planter, dyr og mennesker via floder, søer og i jordvandet og grundvandet.

Vandet har gennem millioner af år formet vores *landskab* gennem forvitring af klipper og bjerge, transport og aflejring af sedimenter (nedbrudte bjergarter) og dermed omformet jordoverfladen. Det danske landskab er formet af vand og is under den sidste istid. Når vandet via floder og åer strømmer tilbage til havet, medfører det salte og mineraler fra de nedbrudte og opløste bjergarter.

Vandet er en endelig og ikke-fornybar ressource. Mængden af vand på jorden er mere eller mindre konstant, og udgør i alt ca. 1.3 mia. km³. Se tabel 1. Det vand vi har i dag, har været her siden jordens dannelse for mere end 4 mia. år siden. Men gennem vores brug af vandet, medvirker vi til forurening af vandet og ødelægger således en uerstattelig og livsvigtig ressource.

I takt med at verdensbefolkning er vokset – fra 3 mia. i 1960 til 8 mia. i 2022 – er [forbruget af ferskvand](#) til landbrugsproduktion, industri og husholdninger steget fra 1.75 billioner m³ til knap 4 billioner m³ årligt ¹. Vandmangel er blevet et stadig mere alvorligt problem i mange dele af verden, i takt med at forbruget af vand er tørre end den naturlige gendannelse af ferskvandsressourcerne. Vandmangel er ofte den vigtigste begrænsende faktor i forhold til fødevareproduktionen, og dermed årsag til fejlslagen høst, fødevaremangel og decideret hungersnød.

¹ En billion = en million millioner. Bemærk at på amerikansk kaldes en billion for en trillion.

Langt størstedelen (ca. 80 %) af det samlede vandforbrug i verden består af *overfladevand* fra søer, vandløb og floder. Da floder og søer samtidigt fungerer som kloaker for forurenede spillevand fra husholdninger og industri er overfladevandet ofte stærkt forurenede. Af samme grund anslås det at næsten én milliard mennesker endnu ikke har adgang til rent drikkevand. Dette udgør i sig selv en alvorlig sundhedsrisiko for befolkningen. *Grundvandet*, som er danskernes vigtigste kilde til rent drikkevand, omfatter kun 0,5 % af jordens samlede vandressourcer.

Mange steder i verden har man anlagt store dæmninger for at opdæmme vandet i floderne. Dette tjener dels til at opsamle vand til brug i landbrug, industri og husholdninger, og dels til at producere elektricitet i vandturbiner. Da floderne almindeligvis strømmer gennem flere lande inden de udløber i havet, har kontrollen med floderne og deres vandføring givet anledning til internationale konflikter, over retten til udnyttelse af ferskvandet i floderne.

Tabel 1: Atmosfæren og jordens anslåede vandmængder. Kilde: Finn Hansen m.fl. 'Vandets veje', s. 9

	Vandindhold 1000 km ³	% af total
Vand i alt fordelt på:	1.384.000	100,00
Verdenshavene:	1.350.400	97,6
Landområder:	33.900	2,5
floder	1,7	-
søer	230	0,017
jordvand	150	0,01
biologisk bundet vand		
grundvand	7.000	0,5
iskapper og gletschere	26.000	1,92
Atmosfæren	13	0,0001
Vand i kredsløb:		
Fordampning:	516	0,036
fra havet	445	0,032
fra land	71	0,005
Nedbør:	516	0,036
over havet	412	0,029
over land	104	0,007
Afstrømning:	33,5	0,002
floder	29,5	-
smeltevand	2,5	-
Grundvands- afstrømning	1,5	-

I det følgende skal du lære at kunne beskrive og forklare vandets kredsløb.

Vandets kredsløb

Jordens samlede vandressourcer indgår de i et evigt kredsløb mellem havet, luften og landjorden – se figur 1. Havde der ikke været et sådant kredsløb ville jordens ferskvand for længst være opbrugt. Det er vandets kredsløb som sikrer, at vi får omdannet oceanernes saltvand til det ferskvand, som er livsnødvendigt for mennesker, dyr og planter.

Vandets kredsløb drives af energi fra solen og af tyngdekraften. Igenennem kredsløbet skifter vandet mellem sine *tre tilstandsformer*: flydende (L), luftformigt (G) og fast (S). At vandet skifter tilstandsform, skyldes ændring i temperaturen.

Når temperaturen stiger, vil vandet fordampe og ændre tilstandsform fra flydende til luftformig, ligesom is vil smelte og blive til flydende vand. Omvendt så vil en nedkøling af vandet også ændre vandets tilstandsform. Når vanddamp afkøles, vil vanddampen fortættes (kondensere) og blive til regndråber. Hvis vandets afkøles yderligere til under frysepunktet, vil det antage en fast form som iskrystaller eller is.

Der er stor forskel på hvor længe en vanddråbe eller et vandmolekyle opholder sig i de enkelte led i kredsløbet. I oceanerne kan et vandmolekyle opholde sig i millioner af år før det når op i overfladen og herfra fordamper. Det frosne vand i iskapperne kan opholde sig her i hundrede tusinder af år før det smelter og kommer tilbage i kredsløbet. I grundvandet kan vandet opholde sig mellem 10 og 1000 år, afhængig af grundvandsdybden og vores oppumpning af grundvandet. Den korteste opholdstid har vandet i luften (vanddampen), som hurtig afkøles og omdannes til dråber og nedbør i form af regn, sne, hagl eller rim og dug.

Kredsløbet starter over havet hvor vandet fordamper og bliver til vanddamp (gas). Vanddampen vil fortættes (kondensere) over havet og en stor del heraf falder herefter som nedbør over havet. Det har vi ingen glæde af. Men heldigvis vil vindene føre en del af vanddampen ind over kontinenterne hvor det falder som nedbør. Herfra får vi de ferskvandsressourcer som er afgørende for livet på landjorden.

Vandbalancen

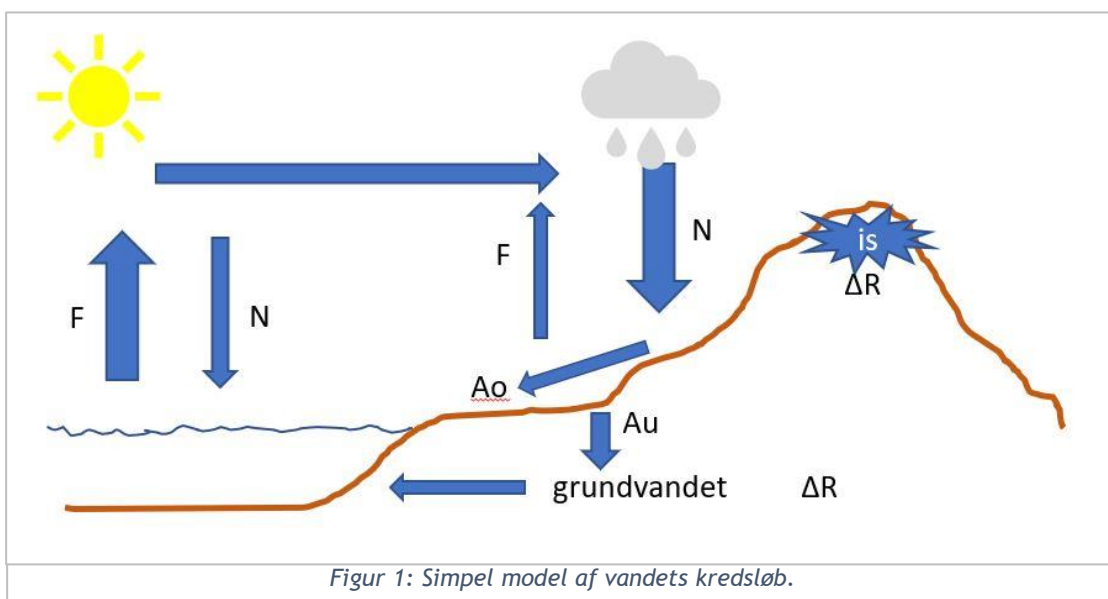
For landområderne kan man opstille den såkaldte vandbalanceligning:

$$N = F + Au + Ao + \Delta R$$

N = Nedbøren
F = Fordampning
Au = Underjordisk afstrømning
Ao = Overfladisk afstrømning
ΔR = Ændringer i opmagasineret vand over og under jorden (f.eks. grundvand, ismasser, søer)

Vandbalanceligningens enkelte elementer kan genfindes i figur 1.

I det følgende skal vi kort beskrive de enkelte led i ligningen, og hvad der betinger størrelsen af disse. Nedbøren (N) gennemgås dog først når vi læser klimatologi. Så her gennemgås altså den højre side af ligningen.



Fordampning

For at nedbør overhovedet kan finde sted skal luften tilføres vanddamp. Dette sker ved fordampning fra have, søer og landjorden. Fordampningens størrelse vil være afhængig af følgende forhold:

- temperaturen
- hvor meget vand der findes på overfladen.
- vindhastigheden
- lufttrykket.

Den maksimale fordampning fås ved høje temperaturer, en vandmættet overflade, høj vindhastighed og lavt lufttryk. Den samlede fordampning kaldes også for evatranspiration, idet fordampningen fra planterne betegnes transpiration og fordampning fra jord- og vandoverfladen kaldes evaporation. I det følgende vil vi dog udelukkende tale om den samlede fordampning (F).

Fordampningens størrelse kan udtrykkes på to måder, nemlig som den:

- Den potentielle fordampning (F.pot), dvs. hvor meget vand (gr./m²) der ved den pågældende temperatur maksimalt kunne fordampe, hvis overfladen var dækket af vand.
- Den aktuelle fordampning (F.akt), fortæller hvor meget vand der rent faktisk fordamper fra det pågældende område.

Den aktuelle fordampning kan selvfølgelig højst være lige så stor som den F.pot. - f.eks. over havområder, mens den oftest vil være betydelig mindre end den potentielle fordampning over landområderne pga. vandmangel. Det vil i særlig grad gøre sig gældende i ørkenområder. Den aktuelle fordampning kan i en kortere periode godt være større end nedbøren - dette betyder blot at der tæres på jordens fugtighed, som derfor udtørres. Den aktuelle fordampning øges med plantevæksten - dels fordi planternes rødder kan trække vand ud af jorden og dels fordi den samlede overflade, hvorfra fordampningen kan forgå f.eks. i en skov, vil være større end den jordoverflade som skoven dækker.

Ved fordampning såvel fra havet, jordoverfladen og planternes blade frigives der varme til luften. På samme måde som når vi sveder - så afgiver vores krop varme til omgivelserne.

Nettonedbør og fugtighedsindeks

En simpel måde at beregne om et givent område har nedbørsoverskud eller nedbørsunderskud er ved hjælp af et fugtighedsindeks. Men hvad forstår man egentlig med nedbørsoverskud og -underskud?

Hvis du nu ser på vandbalanceligningens enkelte elementer: $N = F + A_o + A_u$ (vi undlader her R), hvad er det så for en del, som mennesker, dyr og planter har glæde af? Ja det er selvfølgelig den del af nedbøren som *ikke* er fordampet, men som bliver til afstrømning ($A_o + A_u$) til søer, vandløb og jorden. Dette kaldes for **nettonedbøren**, og kan altså beregnes som nedbøren (N) minus fordampning (F) målt i mm.

En anden måde at beregne om et område har nedbørs-overskud eller -underskud er med et såkaldt **fugtighedsindeks**, som beregnes som:

$$\frac{\text{nedbør (mm)}}{\text{potentiell fordampning (mm)}}$$

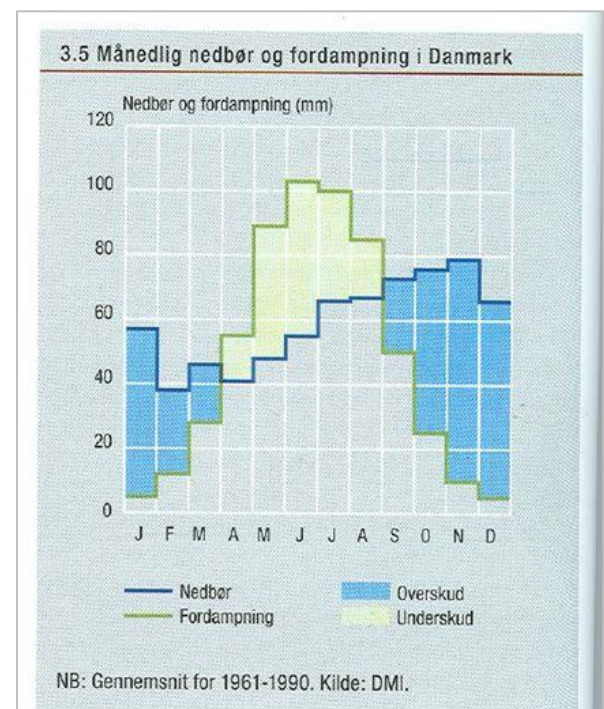
Er fugtighedsindekset > 1.0 = nedbørsoverskud

Er fugtighedsindekset < 1.0 = nedbørsunderskud

For Danmark kan man beregne det årlige gennemsnitlige fugtighedsindekset således:

$$\frac{\text{Nedbør}}{\text{Potentiell fordampning}} = \frac{650 \text{ mm}}{550 \text{ mm}} = 1.18$$

Da indekset er over 1.0 er der nedbørsoverskud. Men som det fremgår af figur 2, dækker det over store forskelle i årets måneder. Vi har kun nedbørsoverskud i efterår og vintermånederne og nedbørsunderskud i perioden april til og med august.



Figur 2: Vandbalancen for Danmark.
Kilde: Alverdens geografi, s.?

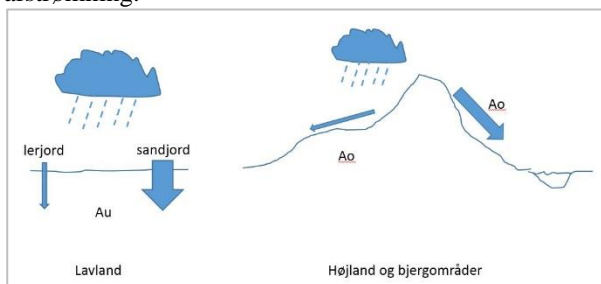
Afstrømning

Afstrømningen ($A_o + A_u$) handler altså om nettonedbøren, dvs. den nedbør der er tilbage efter at noget af nedbøren er fordampet. Den del af nedbøren som ikke fordampes, vil enten blive til overfladisk afstrømning (**Ao**) eller underjordisk afstrømning (**Au**). De to former for afstrømning skal beskrives mere indgående i det følgende.

Overfladisk afstrømning - **Ao**

Størstedelen af nedbøren føres tilbage til havet som overfladisk afstrømning via bække, åer og floder og i byområder via kloakledningerne. Afstrømningens størrelse i et givent område vil - udover nedbørmængden - være afhængigt af terrænet, beplantningen og jordbunden.

Jo mere terrænet hælder – som f.eks. på bakker og bjergskråninger - jo større vil den overfladiske afstrømning være. Afstrømningens opland afgrænses af det såkaldte vandskel, som følger de højeste beliggende punkter i terrænet. Det afstrømmende vand medfører opløste salte og mineraler som til sidst ender i havet. Er området tæt beplantet - f.eks. med skov - vil strømningshastigheden nedsættes og træroddeerne mv. vil opsuge en betydelig del af den overfladiske afstrømning.



Figur 3 Simple illustration af afstrømningsforhold

Den omfattende skovrydning i specielt de nedbørsrige tropiske områder, har således medført en betydelig jorderosion, hvor den overfladiske afstrømning fører overflade jorden ud i floderne. Herved berøves jorden sine næringsstoffer, og frodige skovområder omdannes til gølle ufrugtbare områder. Et eksempel herpå er de omfattende skovrydninger på Himalayas sydvendte skrånninger, som har medført en betydelig jorderosion, med det resultat at jorden havner i Ganges floden og her medvirker til voldsomme oversvømmelser i floddeltaet i Bangladesh.

Udover at borttransportere frugtbar overfladejord, fungerer floderne mange steder som kloakfløb for byernes og industriens spildevand, med efterfølgende forurening af havmiljøet. Den overfladiske afstrømning via floder, anvendes mange steder til energifremstilling i vandkraftværker og kunstvanding af landbrugsjorden.

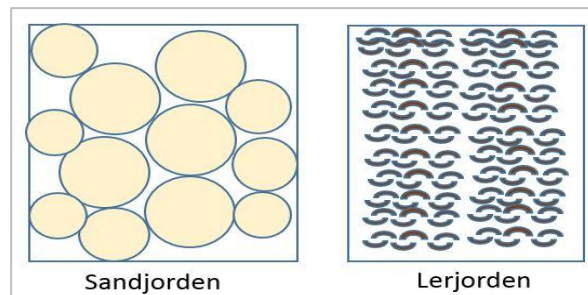
Som det ses i tabel 1, udgør afstrømning til floder (A_o) så langt den største del af den samlede afstrømning på globalt plan. Og i langt de fleste lande udgør overfladeafstrømningen befolkningens vigtigste eller eneste kilde til drikkevand og brugsvand. Af samme grund har spørgsmålet om kontrol over flodernes udspring, mange steder i verdens været kilde til konflikter mellem de lande som floderne gennemstrømmer. Det gælder f.eks. floderne Eufrat og Tigris floderne som udspringer i det østlige Tyrkiet og herfra strømmer videre gennem Syrien og Irak. For hvem tilhører vandet i floderne?

Jordbunden og den underjordiske afstrømning - **Au**

Den del af nedbøren som ikke fordampes eller løber bort som overfladisk afstrømning, siver ned gennem jorden til grundvandet. Den underjordiske afstrømning vil selvfølgelig være større end den overfladiske afstrømning i et fladt terræn.

Afstrømningen til jorden (A_u) vil dernæst være afhængig af jordbundstypen. For Danmarks vedkommende kan vi noget forenklet skelne mellem lerjorde og sandede jorde. De sandede jorde finder vi især i det sydlige, vestlige og nordlige Jylland. Sandet er her blevet aflejret under den sidste istid. Lerjorde finder vi derfor primært i det østlige Jylland og på øerne.

Det er vigtigt at du forstår forskellen på sand- og lerjorden. De to jordbundstyper er illustreret i figur 4



Figur 4 Simple model af sandjord og lerjord

Der er umiddelbart to iøjnefaldende forskelle på de to jordbundstyper. Det handler om *partikelstørrelsen* og antal og størrelsen af *hulrummene* mellem jordpartiklerne.

Jordpartiklerne i sandjorden er store og derfor bliver antallet af hulrum relativt få men til gengæld store. De få men store hulrum betyder at vandet løber hurtigt igennem sandjorden. Man siger at sandjorden har en høj **permeabilitet** (vand gennemtrængelighed).

Omvendt består lerjorden af mange meget små partikler og derfor er der langt flere, men også meget meget

mindre hulrum i lerjorden, end i sandjorden. Faktisk betyder dette, at **porøsitet** (% hulrum af jordmassens samlede volumen) er større i lerjord end i sandjord. Dette betyder at vandet kun løber ganske langsomt igennem lerjorden. Dette skyldes også en elektrisk spænding mellem vandmolekylerne og ler partiklerne, som gør, at vandet så at sige klæber til ler partiklerne.

Lerjorden har således en mindre permeabilitet end sandjorden. Til gengæld har lerjorden en større **markkapacitet**, dvs. jordens evne til at indeholde vand. Det sidste er jo nok så vigtigt for plantevæksten. Derfor er lerjorden mere frugtbar end sandjorden. Jordvandet i lerjorden fungerer også som et 'opløsningsmiddel' for mineraler og næringsstoffer som er vigtige for plantevæksten.

Denne større underjordiske afstrømning (permeabilitet) på sandjordene er imidlertid et problem af to grunde. For det første vil den hurtige nedsivning af vandet, betyde at der ikke sker en naturlig kemisk rensning af vandet under nedsivningen. For det andet vil det nedsivende vand medføre en udvaskning af jordens naturlige næringsstoffer, men også af et eventuelt overskud af gødning eller sprøjtemidler fra landbrugsarealer.

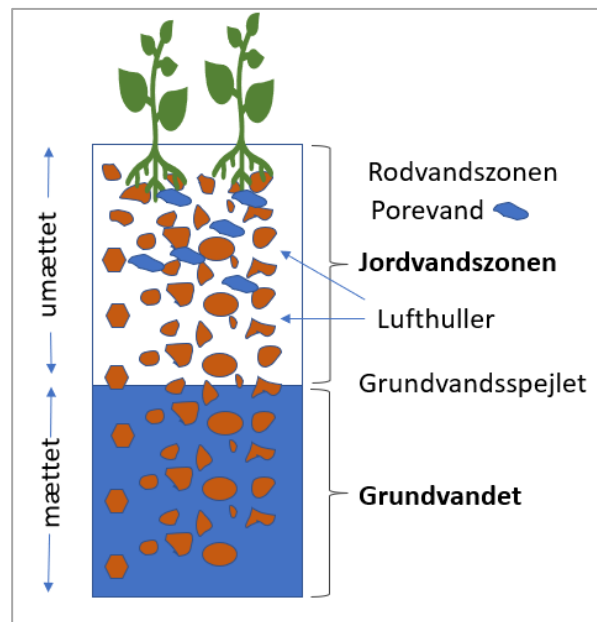
I Danmark har denne problemstilling velkendt fra de senere års beretninger om iltsvind og fiskedød i fjordene, samt forurenede drikkevandsboringer. Det er især på de sandede jorde i det vest-, sønder- og Nordjylland at den underjordiske afstrømning er særlig høj. Det viser sig både i forurening af grundvandet, men også i et lavere høstudbytte da jordens næringsstoffer udvaskes meget hurtigt. Problemet forstærkes her af, at Vestjylland modtager op til 8-900 mm nedbør årligt mod kun 5-600 mm i det østlige Danmark.

	Nedbør (N) mm	Aktuel fordampning (F) mm	Afstrømning (Ao + Au) mm
Jylland	700	360	340
Fyn	600	380	220
Sjælland	570	400	170

Tabel 2: Omtrentlige værdier for vandbalancen i Danmark (kilde: Clevin og Vangdrup 1982, s. 149)

Grundvandet

Grundvandet defineres som det niveau i jorden hvor alle jordens hulrum er mættet med vand – se figur 5. Over grundvandet finder vi jordvandszonen. Her vil nogle af jordens hulrum være vandfyldte og resten af jordvandszonens porer er luftfyldte. Overgangen mellem jordvandszonen og grundvandet kaldes grundvandsspejlet. Fra grundvandet vil vandet langsomt sive mod vandløb og floderne og i kystnære områder mod havet.



Figur 5: Simpel model af vandet i jorden

I Danmark er drikkevandsforsyningen udelukkende baseret på oppumpning af grundvand, og har mange steder ført til en sænkning af grundvandsspejlet. På Østsjælland med mere end 10 meter i det 20. århundrede.



Figur 6: Nedbørsfordeling i Danmark (1960-91) fra 900 mm i sydvestlige jylland til 550 mm på Sjælland

Danmarks vandforbrug og bæredygtighed

Det gennemsnitlige vandforbrug pr dansker er på ca. 103 l i døgnet (2018). Det svarer til ca. 38.000 liter vand årligt eller 38 m³. Men tilbage i 1980'erne var vandforbruget langt højere. Her brugte danskerne i gennemsnit godt 63 m³. Det samlede vandforbrug er dog ca. dobbelt så stort når man medregner vandforbrug i landbrug, industri og servicevirksomheder.

Når det alligevel er lykket danskerne at reducere vandforbruget siden 1980'erne skyldes det ikke mindst en større offentlig bevidsthed om beskyttelse af vores grundvandsressourcer. Dels i forhold til forureningen heraf men også at sikre at forbruget ikke overgår gendannelsen af grundvandet. Nok så vigtig er det også at man fra 1990'erne indførte en forbrugsafgift på drikkevandet. Afgiften er i dag ca. 7 øre pr liter vand.

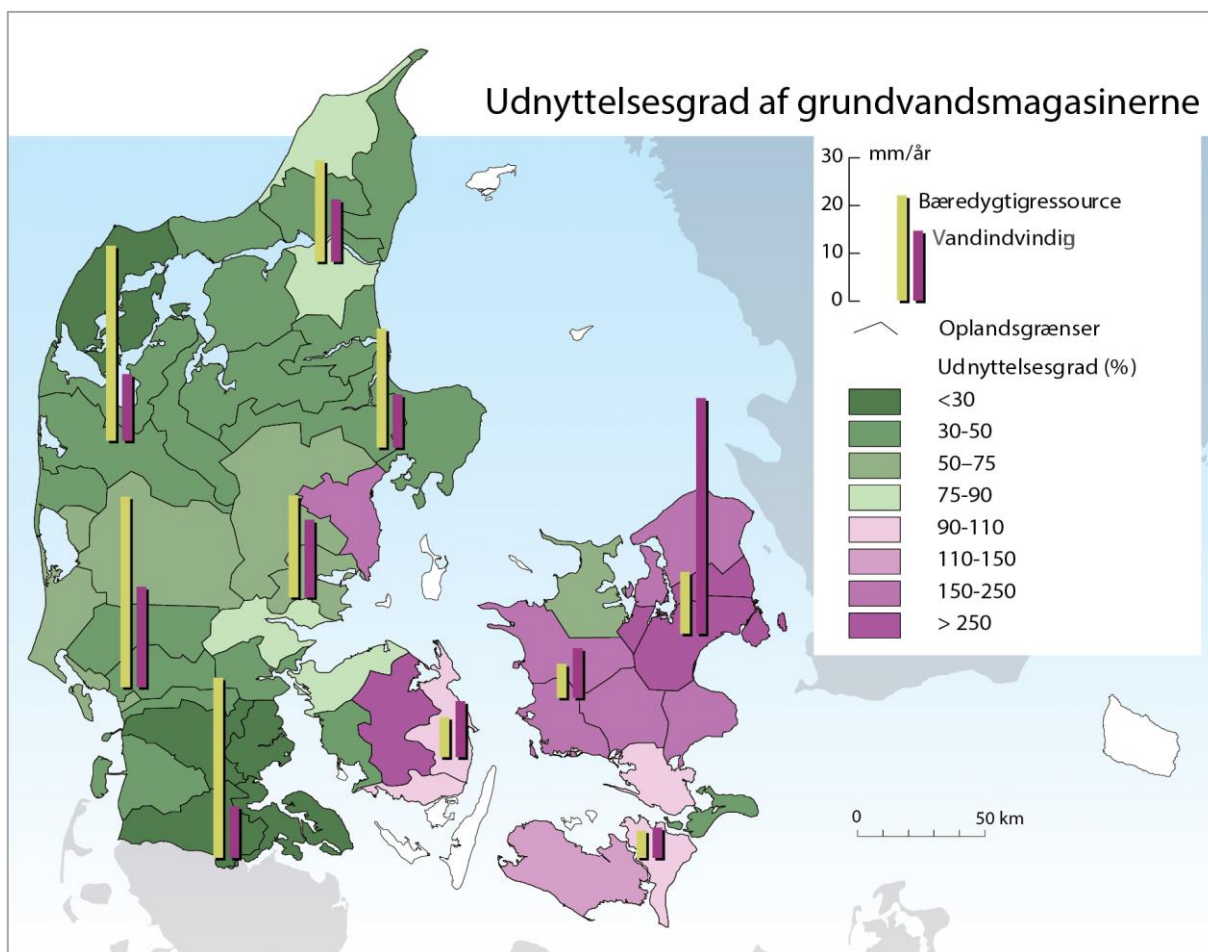
Figur 7 viser vores forbrug (vandindvinding) af vand og størrelsen af de bæredygtige vandressourcer.

Begrebet *bæredygtighed* betyder, at det forbrug vi har i dag, f.eks. af grundvand, ikke må forringe fremtidige generationers adgang til rent drikkevand. Vi må altså ikke bruge mere end det der hvert år bliver gendannet via nedbør og afstrømning.

Figur 7 viser at grundvandsressourcerne er langt større i Jylland end i det øvrige Danmark. Det skyldes to ting: Dels får Jylland mere nedbør og dels har vi her de sandede jorde, hvor den underjordiske afstrømning er større end på de lerede jorde i det østlige Danmark.

Når vandforbruget (indvindingen) er meget større i Københavnsområdet end i resten af landet, skyldes det at ca. 1/3 del af halvdelen af befolkningen bor i dette område, og derfor vil forbruget være større.

Fladesignaturen (farverne) viser i hvilken grad vandforbruget er bæredygtigt eller ej. Når tallet her er over 100% betyder det at man bruger mere vand, end man burde af hensyn til fremtidige generationers adgang til grundvand.

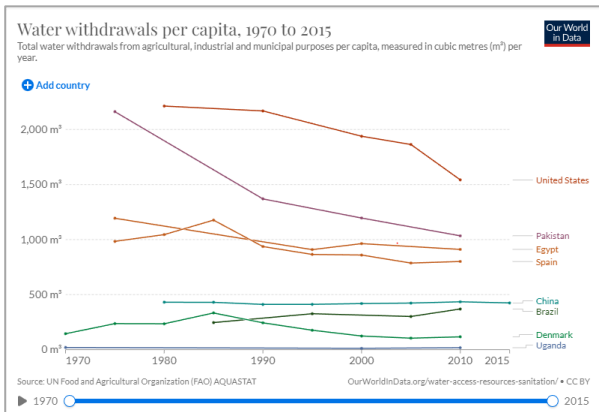


Figur 7: Udnyttelsesgrad af grundvandsmagasiner.

Kort fra GEUS - her fra <https://arwos.dk/akademiet/s%C3%A5dan-faar-vi-vand-op-af-jorden>

Det globale vandforbrug

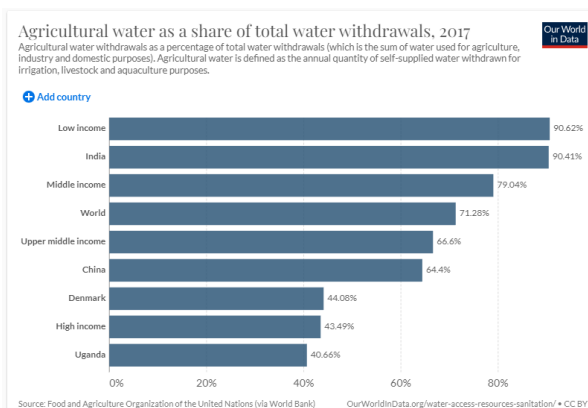
Som tidligere nævnt er det globale vandforbrug steget i takt med befolkningstilvæksten siden 1950'erne. Der er dog meget store forskelle på vandforbruget i de enkelte lande, som vist i figur 8.



Figur 8: Vandforbrug pr indb. i m³ i udvalgte lande 1970-2015. Kilde: [Our World in Data](#)

De store forskelle i vandforbruget kan skyldes flere forhold. Dels adgang til vandressourcerne i form af pumpestationer og rørledninger ud til husholdningerne, virksomheder m.v. Dels hvorvidt vandet er gratis eller som i Danmark belagt med forbrugsafgifter. Hertil kommer vandspild f.eks. fra lækager i rørledninger, men også i det almindelige forbrug af vand (lange brusebade, karbade) f.eks. fra opvaske- og vaskemaskiner som har et højt vandforbrug.

En meget stor del af verdens samlede vandforbrug anvendes i landbruget som vist i figur 9. Men også her er der store forskelle. Mens de fattigste lande (*Low Income*) bruger over 90% af det samlede vandforbrug i landbruget, så er det kun ca. 43 % i verdens rigeste lande (*High Income*)



Figur 9 Landbrugets vandforbrug i % af det samlede vandforbrug i 2017. Kilde: [Our World in Data](#)

I takt med befolkningstilvæksten og det stigende forbrug af grundvand til husholdninger, industri og landbrug, falder grundvandsspejlet, og man skal bore stadig dybere for at få fat på grundvandet. Mange områder i verden trues i dag af udtømmning af grundvandsreserverne. Dette er specielt et problem i de tæt befolkede og nedbørsfattige områder i Nordafrika og Mellemøsten, men også i store dele af Asien, som vist i tabel 3. I følge Verdensbanken har mellem 50-66 % af landbefolkningen i verdens fattige lande, som ikke har adgang til rent drikkevand. Det er særligt et problem i Mellemøsten og Nordafrika.

Man kan tale om decideret vandmangel når den underjordiske afstrømning (Au) er mindre end 1000 m³ / indb. / årligt. For Danmark er tallet 2400 m³, for Libyen 160 m³ og Egypten 30 m³.

Country	Per capita renewable resources m ³ per person per year * 2015
Northern Africa	256.00 m ³
South Asia	1,131.00 m ³
Middle East	1,444.00 m ³
East Asia	2,115.00 m ³
Central Asia	2,420.00 m ³
Asia	2,697.00 m ³
Africa	3,319.00 m ³
Sub-Saharan Africa	3,879.00 m ³
Western & Central Europe	4,006.00 m ³
World	5,829.00 m ³
Central America and Caribbean	8,397.00 m ³
Europe	8,895.00 m ³
North America	12,537.00 m ³
Americas	19,725.00 m ³
Eastern Europe	21,383.00 m ³
Oceania	29,225.00 m ³
South America	30,428.00 m ³

Tabel 3: Fornybare vandressourcer i m³ pr år, i forskellige regioner. Kilde: [Our World in Data](#)

-- SLUT --

I det næste undervisningsforløb om **klimatologi**, skal du blandt andet lære at forstå hvordan **nedbør** dannes og ikke mindst hvorfor nedbøren er meget forskellig rundt om i verden.

Teksten her samt figurer og noter til hydrologi kan ses på

<http://www.geografi-noter.dk>

Læs mere om vand på:
<https://vandetsvej.dk>

https://www.danva.dk/media/5002/2018_vand-i-tal.pdf

https://issuu.com/geoviden/docs/gv2019_02_grundvand