

# Tritiumindholdet i grundvandet og dets betydning ved geohydrologiske undersøgelser

af

LARS JØRGEN ANDERSEN

## Abstract

After a short reference to the use of tritium as a ground water tracer, the methods for estimating ground water parameters have been mentioned. The result of 5 tritium analysis of ground water from different aquifers at Langstrup, Northeast Sealand are referred and discussed. Finally a tritium profile from an unconfined aquifer at Hjordkær, South Jutland has been discussed and correlated to precipitation, evapotranspiration and aquifer conditions.

## Indledning

Anvendelsen af radioaktive isotoper som tracere ved grundvandsundersøgelser har i de senere år fået en betydelig udbredelse, og sådanne undersøgelsesmetoder vil uden tvivl blive endnu mere almindelige efterhånden som isotoptekniken udvikles.

## Fordele og ulemper ved tritium-tracing

Tritium er en radioaktiv isotop af brint med atomvægten 3. Den er den eneste radioaktive isotop af brint, der forekommer i naturen. Dens halveringstid er 12.262 år. Tritium kan dannes på flere måder: 1) ved cosmisk stråling i atmosfæren, 2) ved brintbombsprængninger og 3) i atomreaktorer, hvor tritium kan fremstilles syntetisk.

Tritiumholdigt vand har vist sig at være en næsten ideel tracer i vand, idet dets kemiske egenskaber er meget nær ved at være identiske med normalt vands. Den ret lange halveringstid og stor målefølsomhed ved bestemmelsen af tritium gør tritium velegnet som grundvandstracer, idet selv små aktiviteter vil kunne spores over lange afstande og i lange tidsrum.

Ved de analysemetoder, der benyttes ved bestemmelse af tritium, er man i

stand til at bestemme så små tritiumkoncentrationer som 1 tritiumatom i  $10^{18}$  brintatomer. Denne koncentration betegnes som 1 T.U. (Tritium Unit).

En anden stor fordel ved at benytte tritium ved tracerundersøgelser i grundvand er, at disse kan gennemføres uden udgift til tracer, idet tritium tilføres med nedbøren, hidrørende fra de i 1954–1962 foretagne bombeforsøg. Det bør endvidere nævnes, at den radioaktive stråling, der finder sted ved de forhåndenværende aktiviteter i nedbøren, er så svag, at der ikke i sundhedsmæssig henseende er nogen fare forbundet med tracerforsøg af denne art.

Ulempen ved tritium er imidlertid, at analysemetoderne forudsætter et meget kompliceret måleapparat, og ved måling af små koncentrationer er selve analyseprocessen meget langvarig. Derfor bliver analyseringen meget kostbar, og tritiumbestemmelserne kan kun foretages i laboratoriet, hvorfor alle bestemmelser forudsætter prøveudtagninger. På nuværende tidspunkt findes der ingen tritiumlaboratorier i Danmark, de nærmeste findes i Stockholm, Wien og Heidelberg. Isotopcentralen i København er imidlertid i gang med at udvikle en analysemetode for tritium, der er meget hurtig og derfor billig. Dens følsomhed kendes ikke sikkert endnu, men den påregnes at kunne måle aktiviteter ned til 30–50 T.U.

### Tritiumkoncentrationen i nedbør før og nu

Den naturlige tritiumkoncentration i nedbøren før 1954 opgives til  $6 \pm 2$  T.U. for Nordamerika (CRAIG og LAL, 1961). Direkte målinger før de første brintbombeeksplosioner foreligger kun i ringe udstrækning. Ved tritiumbestemmelser på vine af forskellige årgange har man fået overensstemmelse med denne værdi (KAUFMANN og LIBBY, 1954). Målinger af tritiumindholdet i nedbør fra Europa foreligger først fra august 1954, hvor der i nedbør fra Oslo er målt 16.6 T.U. og fra Flensborg 15.8 T.U. (GILETTI, BAZAN og KULP, 1958, p. 809).

Tritiumindholdet i nedbøren steg i 1954 på kort tid meget kraftigt. I New York således fra 8 T.U. til 400 T.U. Regelmæssige målinger foreligger fra enkelte skandinaviske stationer først fra marts 1958, bl. a. Huddinge ved Stockholm (ÖSTLUND og LUNDGREN, 1963). Et skandinavisk stationsnet for måling af nedbørens tritium indhold etableredes fra efteråret 1961 ved Internationella Meteorologiska Institutet i Stockholm. På baggrund af bl. a. dette tritiumnet har det vist sig, at tritiumkoncentrationen i nedbøren stiger mod øst (ODÉN, 1964), således at tritiumindholdet i nedbøren over Danmark kan beregnes til ca. 80% af tritiumindholdet i nedbør ved Huddinge (Stockholm). Dette forhold skyldes formentlig kontinentaleffekten med større reevapotranspiration og dermed større tritiumindhold i fugtighed over land end over hav (ERIKSSON, 1965) og (LIBBY, 1963). De forskellige brintbombeforsøg i 1953, 1958 samt 1961–62 har, som det fremgår af kurven over tritiumkoncentrationen ved Huddinge på fig. 3, medført en række maksimer i nedbørens tritiumindhold i denne periode. På grund af fordampningsforholdene er der stort set tale om sommermaksimer og vinterminimer i nedbørens tritiumkoncentration. I 1963 nås de største tritiumkoncentrationer i nedbøren, nemlig ca. 4300 T.U. Der synes at være en forsinkelse på ca. 1 år fra en given bombesprængning til det deraf følgende tritiummaksimum i nedbøren på vore breddegrader.

### Kriterier for benyttelsen af tritium som tracer

Med en målefølsomhed på omkring 1 T. U. og en målenøjagtighed på ca.  $\pm 4\%$  (ÖSTLUND, BROWN og BAINBRIDGE, 1963) ved tritiumbestemmelser på grundvand, og under forudsætning af, at før-bombeniveauet for tritium i nedbørsvand lå på  $6 \pm 2$  T. U., kan man opstille følgende kriterier for tracerforsøg med det i naturen forekommende tritium (jvf. VON BUTTLAR og WENDT, 1958, og VON BUTTLAR, 1959).

1. Grundvand med et ikke måleligt indhold af tritium må være gammelt, d.v.s. over 25-30 år, og det kan ikke være opblandet med nedbørsvand efter 1954 i nævneværdig mængde.
2. Grundvand, der befandt sig under jordoverfladen før 1954, og som ikke siden er opblandet med senere infiltrationsvand, kan dateres inden for de rammer, som halveringstiden for tritium og målenøjagtigheden tillader det.
3. Grundvand med et stort indhold af tritium i forhold til det naturlige tritiumniveau må være ungt, d.v.s., det må hidrøre fra nedbør yngre end 1954 eller være opblandet med ungt overfladevand.

### Anvendelsesområder for tritium

Af det foregående vil det fremgå, at det under visse omstændigheder er muligt at benytte det naturlige tritiumindhold til datering af grundvand efter de almindelige principer for radioaktiv nedbrydning.

I andre tilfælde vil det kun være muligt at bestemme en minimal eller en maksimal alder på grundvandet.

I tilfælde, hvor der haves detaljerede, systematiske oplysninger om tritiumindholdet i grundvandet som funktion af tiden, vil der være mulighed for at identificere en top på grundvandets tritiumkurve med en given top på nedbørens tritiumkurve, hvorved den nøjagtige alder på grundvandet kan bestemmes.

I et artesisk grundvandsreservoir, der har sit infiltrationsområde beliggende i nogen afstand, vil det ved bestemmelse af tritiumindholdet som funktion af tiden i to borer beliggende på en linie parallel med grundvandsstrømmen være muligt at bestemme grundvandets strømhastighed. Dette kan ske ved at finde tiden mellem tidspunkterne for passagen af et og samme tritiummaksimum i de to borer og dividere denne op i afstanden mellem borerne. Her må dog korrigeres for en eventuel dispersion af traceren i grundvandet.

Ved systematisk indsamling af vandprøver, såvel af nedbør, grundvand som overfladevand i et givet grundvandsopland og påfølgende bestemmelse af tritiumindholdet i disse, vil der kunne opstilles en tritiumbalance for den hydrologiske cyklus inden for dette opland, hvorved en række oplysninger om grundvandsreservoirrets størrelse og grundvandets opholdstid kan beregnes.

Eriksson har i afhandlinger fra 1958 og 1961 fremsat og diskuteret en teori for benyttelse af atmosfærisk tritium ved sådanne reservoirundersøgelser inden for et vandløbs- eller grundvandsopland, og i en afhandling fra 1963 (ERIKSSON, 1963) demonstreret teorien og beregningsmetoden på Brown's data fra Ottawa (BROWN, 1961). Eriksson antager imidlertid, at den dybere del af grundvandet muligvis er vanskelig at karakterisere ved hjælp af denne metode, især hvis vandmængden i overfladen er stor.

Det må derfor anses for vigtigt, at der skaffes oplysninger om tritiumkoncentrationen i vertikal retning ned gennem et grundvandsreservoir for derved at undersøge, i hvilken grad grundvandets opholdstid er forskellig i forskellig dybde af grundvandsreservoiret.

Måling af tritiumkoncentrationen som funktion af dybden i zonen over grundvandet vil give oplysninger om porevandets nedsivningstid og -hastighed. Dette kan imidlertid kun ske ved bestemmelse af tritiumindholdet på porevandet i jordprøver. Den vertikale dispersion vil imidlertid være en faktor, der vil kunne vanskeliggøre dateringen af porevandet, hvorimod den molekulære diffusion formentlig spiller en langt mindre rolle.

En eventuel forskel i tritiumkoncentrationen mellem et grundvandsreservoir og et overfladevandsreservoir eller et vandløb, vil kunne udnyttes til bestemmelsen af grundvandsafstrømningens andel i vandløbets totalvandføring. Under de samme forudsætninger vil det også være muligt gennem tritiumanalyser at konstatere, om et vandløb modtager eller afgiver vand til grundvandet; et forhold, der ud fra et sundhedsmæssigt synspunkt ofte er af stor interesse.

Det skal anføres, at det almindeligvis ikke vil være muligt at opnå entydige resultater ud fra éngangsanalyser af tritiumindholdet i et eller flere reservoirer. Hertil kræves en serie vandprøver udtaget med regelmæssige intervaller. Ud fra sådanne data vil der kunne foretages matematiske beregninger af visse grundvandsparametre.

Størrelsen af intervallet mellem prøveudtagningerne afhænger af de faktorer, man ønsker at måle, samt af størrelsen og hyppigheden i tritiumaktivitetens variation i det pågældende medium.

Nedbør bør almindeligvis udtages i intervaller på 1 uge, 2 uger eller samleprøver over 1 måned. Prøver af overfladevand bør udtages 1-2 gange hver måned, og grundvand 1 gang om måneden. En analysering af alle prøver er dog næppe nødvendig. For visse grundvandsundersøgelers vedkommende vil analysering af 1 vandprøve om året være tilstrækkelig. Hvis opholdstiden i et grundvandsreservoir f. eks. er 50 år, vil det være fuldt tilstrækkeligt at bestemme denne med en nøjagtighed på  $\pm 1$  år. Under målinger i reservoirer med kort omløbstid vil hyppige prøvetagninger være nødvendige, men her vil tritium antagelig være en mindre velegnet tracer.

I Israel har man en løbende indsamling af grundvandsprøver fra ca. 80 borer. Prøverne indsamles 1 gang om året. Nedbør fra få nedbørsstationer indsamles 1 gang ugentlig.

I Sverige har man et tritiumprogram for Kristianstadsslätten. Her udtages grundvandsprøver med 1 måneds mellemrum fra en halv snes borer.

I Danmark har Odense Vandforsyning de sidste par år foretaget månedlig indsamling af grundvand fra ca. 10 borer, foruden overfladevand og nedbørsvand. Analyseresultater herfra foreligger endnu ikke.

Det er meget vigtigt, at opmagasinerede vandprøver opbevares på aldeles vandtætte og vanddamp-tætte beholdere, især for grundvandsprøvernes vedkommende. En nok så ringe forurening fra den relativ store tritiumkoncentration i luftfugtigheden uden for flaskerne vil ændre deres dateringsværdi væsentligt. Glasflasker med tætsluttende prop bør foretrækkes. Visse polyethylenflasker tillader en ikke ringe udveksling af vanddampe. Vandprøvernes størrelse er almindeligvis 1 liter. Skal der samtidig være mulighed for at udføre en kemisk analyse, må 4-liter prøver anbefales.

### Tritiumbestemmelser af grundvand fra Langstrup-området

I forbindelse med grundvandsundersøgelser i Alnarpdalen i Skåne, som KAJ NILSSON, Sveriges Geologiska Undersökning, foretager, blev forfatteren anmodet om at være behjælpelig med udtagelsen af grundvandsprøver fra Alnarpdalens fortsættelse på den danske side af Øresund med henblik på bestemmelse af tritiumindholdet. Boringer i området vest for Langstrup Mose blev benyttet til dette formål, se fig. 1.

De geologiske og hydrologiske forhold i Alnarpdalen ved Langstrup er tidligere behandlet af THEODOR SORGENFREI (1945) og P. KIELER JENSEN (1964). Alnarpdalen fremtræder som en bred dal i prækvartæret med retning SØ-NV. Dens nordlige begrænsning er beliggende få km sydvest for Helsingør og dens sydlige begrænsning går fra Nivå over Langstrup til sydspidsen af Esrom sø. Den sydlige forkastning gennem Langstrup Mose, hvor Gentofte kommune har et stort antal vandindvindingsboringer, er meget nøje kortlagt. Kalkoverfladen nord for forkastningen er beliggende omkring kote -60 til -65 m, mens den syd eller sydvest for forkastningen ligger omkring kote -35 til -40 m. De kvartære lag over kalken udgøres af moræneler vekslende med smeltevands-sedimenter.

Kalkens grundvandspejl er artesisk og oprindelig beliggende indtil flere m over terræn. De vandførende sand- og gruslag i kvartæret danner grundvandsreservoirer, der kan være helt eller delvis adskilte fra kalkens grundvand. I det omfang, der er hydraulisk forbindelse, vil den oprindelige grundvandsbevægelse i selve Langstrup Mose-området gå fra kalken opad i sand- og gruslagene, idet grundvandspotentialer har vist sig at være stigende med dybden. Infiltrationsområdet for kalkens grundvand må derfor antages at være beliggende i nogen afstand uden for Langstrup Mose.

Der blev udtaget 5 prøver af grundvand, 2 fra boringer i kalken, på hver sin side af forkastningen, og 3 prøver fra kvartære vandførende lag, 1 fra en mellemdyb boring og 2 fra brønde til ringe dybde. Beliggenheden af disse er vist på fig. 1.

Analyseringen af disse prøver blev udført af Laboratoriet for Radioaktiv Datering via Sveriges Geologiska Undersökning, Stockholm.

I tabel I er vist dybderne for de vandførende intervaller, og arten af den vandførende bjergart. Endvidere er vandrejsningen i boringerne eller brøndene angivet i forhold til terræn, og endelig tritiumkoncentrationen i de udtagne vandprøver.

Tabel I. Tritiumindholdet i boringer og brønde i Langstrup-området med angivelse af dybde for det vandførende lag, samt vandrejsning.

D.G.U ark. nr.	Dybde og art af vandførende lag	Vandrejsning i for- hold til terræn	Tritiumkon- centration
187.79	74 -77,5 m boring, kalk	5 m over terræn	< 1 T. U.
187.137	27 -32 m boring, sand	9 m under terræn	7,0 ± 1 T. U.
Toftegaard	0 - 9,5 m brønd, sand	6,5 m under terræn	80,6 ± 6 T. U.
187.99	42,5-48 m boring, kalk	6,1 m over terræn	< 1 T. U.
Ch. Pedersen	0 - 6,5 m brønd ?		
	6,5- 9,0 m boring, sand	5,6 m under terræn	50,1 ± 4 T. U.

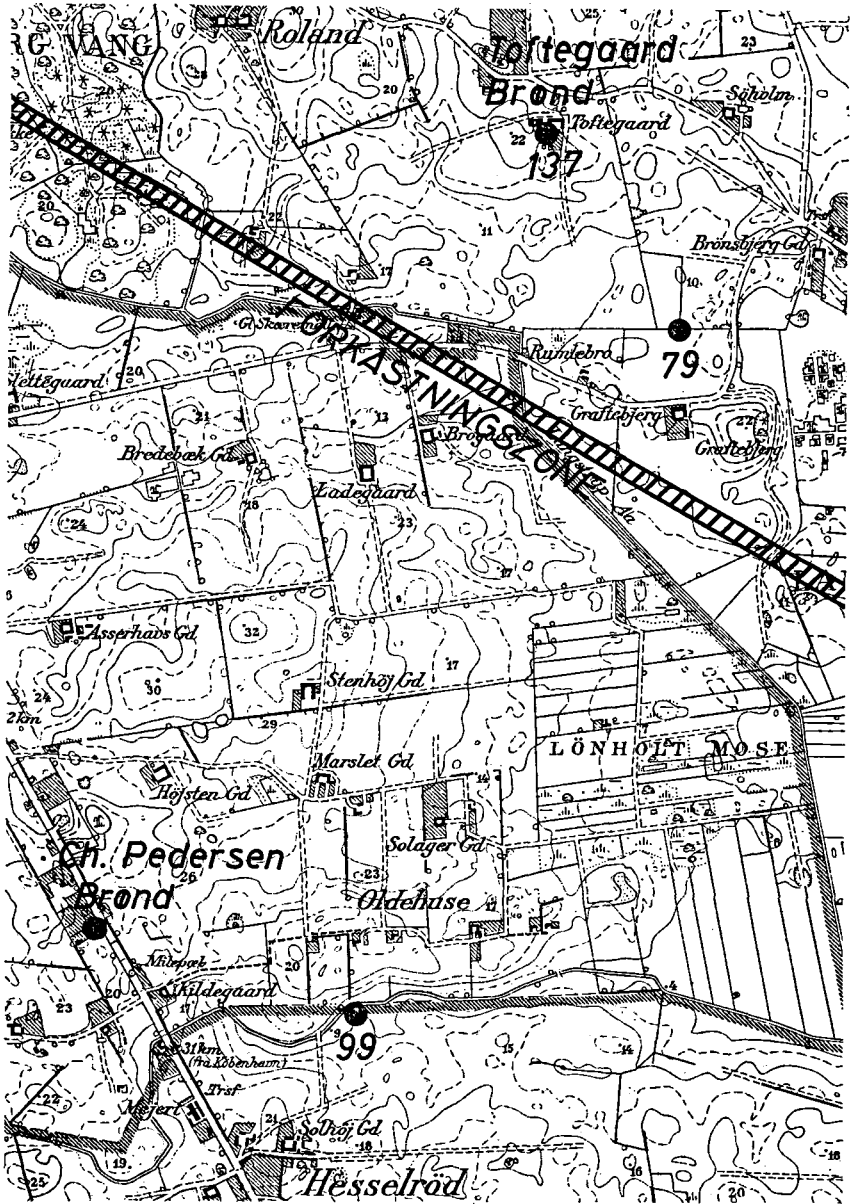


Fig. 1. Kort over brønde og borer i området vest for Langstrup Mose, hvorfra der foreligger tritiumanalyse af grundvandet. Numrene angiver borerens løbe nr. på atlasblad i 187 i D.G.U.' borearkiv. Kortudsnit af målebordsblad M2729 i 1:20000, reproduceret med tilladelse af Geodætisk Institut.

Af analyseresultaterne fremgår det, at tritiumindholdet i grundvandet fra kalken er mindre end 1 T.U. i begge kalkboringer.

Laboratoriet oplyser, at aktiviteten i prøven fra boring 187.99 i virkeligheden ikke var målelig, idet den var mindre end det vand, der anvendes som referencenulvand fra en dybdeboring ved Ljunghusen i Skåne, mens laboratorieresultatet af prøven fra boring 187.79 var  $0,81 \pm 0,15$  T.U.

Man skal antagelig ikke lægge for stor vægt på forskellen i de to prøver, men det bør dog nævnes, at den væsentlige del af vandindvindingen i området sker nord for forkastningen, hvorfra prøve 187.79 er taget.

De få konklusioner, der kan drages på grundlag af disse måleresultater, må være følgende:

1. Grundvandet fra de to kalkboringer er ret gammelt, d.v.s. ældre end 25 år, idet et tritiumindhold på  $6 \pm 2$  T.U., hvilket som nævnt ovenfor må antages at være tritiumkoncentrationen før bombeforsøgene, vil kræve et tidsrum på 25–35 år, før det ved radioaktiv halvering er nået ned under aktiviteten 1 T.U.
2. Grundvandet fra boring 187.137 på  $7,0 \pm 1$  T.U. må indeholde nedbør yngre end 1954, idet tritiumindholdet i nedbør fra før 1954 som følge af radioaktiv halvering vil være mindre end 4 T.U.
3. Grundvandet fra de to brønde med henholdsvis 50,1 og 80,6 T.U. må være yngre end nedbør fra 1954.

### Tritiumindholdet i grundvand fra Hjordkær

I forbindelse med de ovenfor nævnte undersøgelser fik forfatteren lejlighed til at få yderligere 5 grundvandsprøver analyseret for tritium.

Med så få prøver vil det være vanskeligt at få oplysninger om grundvandsforholdene i et større område, hvorfor forfatteren valgte at undersøge grundvandets tritiumkoncentration som funktion af dybden i et grundvandsreservoir med frit vandspejl i ringe dybde under terræn.

En boring, som udførtes for Hjordkær vandværk, ca. 7 km sydvest for Aabenraa, blev benyttet til dette formål.

Boringens beliggenhed (D.G.U. ark. nr. 160.493) er vist på kortet fig. 2. Boringen er beliggende i den østlige del af Tinglev hedeslette, tæt vest for hovedopholdslinien. På grundlag af de oplysninger, der findes i D.G.U.'s borearkiv om boringer i dette område, er hedesletteaflejringerne mægtighed større end 25 m, idet flere boringer til denne dybde ikke er nået gennem hedesletten. På kortet er indtegnet niveaukurver over grundvandspejlet, grundvandskellet, (punkteret kurve), samt det topografiske vandskel, (prikket kurve). Grundvandskellet, som er en del af hovedvandskellet gennem Jylland, ligger her, som på det meste af den øvrige strækning fra grænsen til Hagebro ved Karup å, vest for det topografiske vandskel.

Den hydrauliske gradient er ca. 2‰ vest for grundvandskellet og ca. det dobbelte øst for dette. På kortet er endvidere angivet dybden til grundvandspejlet (øverste tal) og grundvandspejlets kote (nederste tal).

Det fremgår heraf, at dybden til grundvandet i nærheden af grundvandskellet ligger omkring 10 m aftagende mod sydvest til ca. 2 m og stigende mod syd og øst til omkring 30 m.





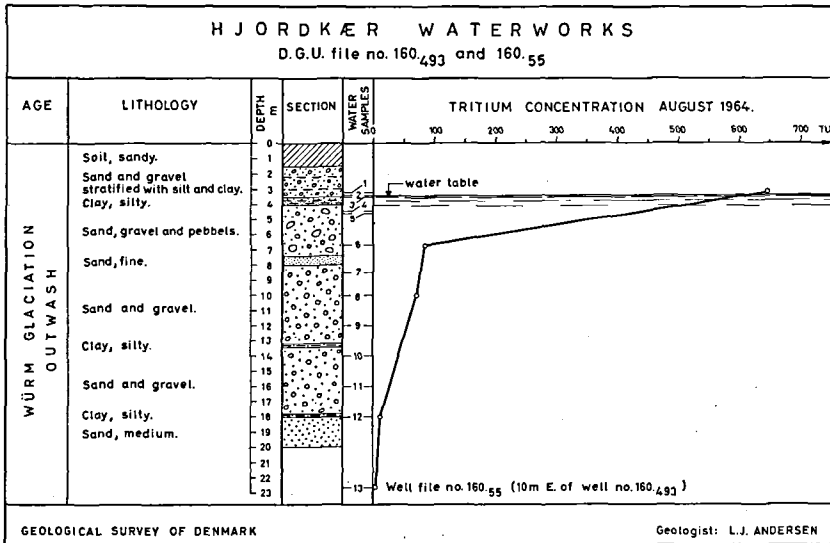


Fig. 3. Boreprofil af boring D.G.U. ark. nr. 160.493, Hjordkær vandværk, visende de gennemborede jordlag, numre og dybde for de udtagne vandprøver samt en kurve over tritiumkoncentrationen på basis af de analyserede prøver.

Den gennemborede lagserie består, som det fremgår af boreprofilet fig. 3, i overvejende grad af sand, grus og sten, med underordnede, finsandede lerlag. Grundvandspejlet ved boringen ligger 3,4 m under terræn.

Boringen blev udført i august 1964 af brøndborer Schmidt, Christiansfeld. Borediameteren var 12", og boringen udførtes som tørboring uden tilsætning af vand under borearbejdet. Der blev udtaget prøve af det siltrige ler over grundvandet med henblik på senere inddampning af porevandet i dette. Under grundvandspejlet blev der udtaget vandprøver, efter at der fra boringen var fjernet en vandmængde svarende til borehullets volumen under grundvandspejlet. Der blev udtaget ialt 12 vandprøver fra denne boring, pr. nr. 1-12, hvis beliggenhed er vist på fig. 3. Prøve nr. 13 blev udtaget i en nærliggende indvindingsboring med filter fra ca. 20-25 m.

Kun 5 af de udtagne prøver er analyseret for tritium. Analyseresultaterne fremgår af tabel II.

Tabel II. Tritiumindholdet i grundvand fra boringer ved Hjordkær vandværk, udtaget i august 1964 og analyseret i marts-april 1965.

D.G.U. ark. nr.	Prøve nr.	Dybde m under terræn	T.U.
160.493	1	3,2	647 ± 35
	6	6,7	85 ± 6
	8	10,0	70,6 ± 5
	12	18,0	13,7 ± 2
160.55	13	20-25	4,81 ± 1

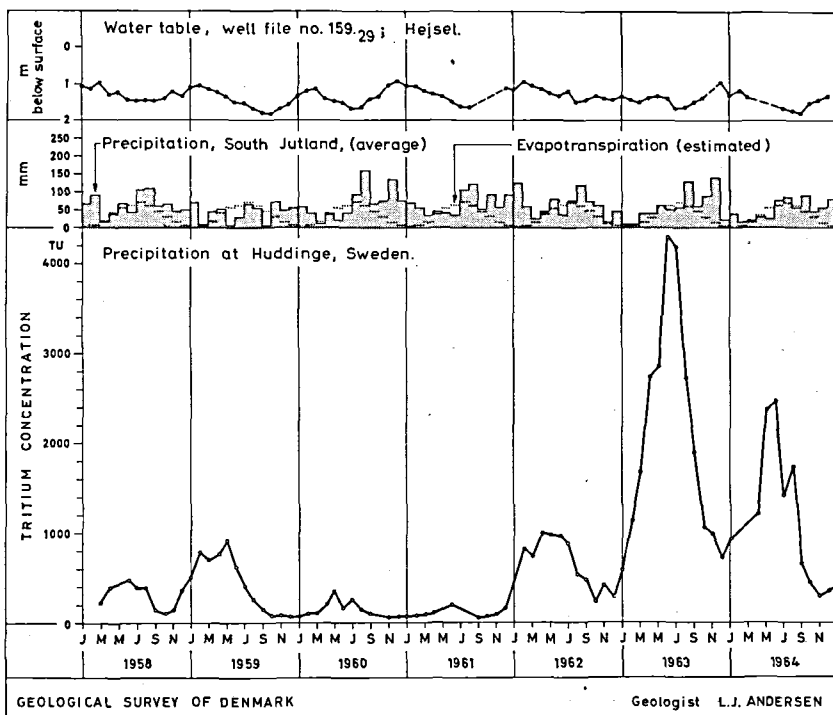


Fig. 4. Grafisk fremstilling af månedsværdier af nedbørens tritiumkoncentration ved Huddinge (Stockholm), gennemsnitlig nedbør for Sønderjylland, skønnet evapotranspiration samt grundvandspejlets fluktuationer i boring D.G.U. ark. nr. 159.29, Hejsel for perioden 1958–1964.

For ud fra disse tritiumaktiviteter at kunne bedømme nedsivningens størrelse og grundvandets omtrentlige alder er det nødvendigt at kende nedbørmængden og tritiumkoncentrationen i denne.

På fig. 4 er vist en grafisk fremstilling af tritiumkoncentrationen ved Huddinge (Stockholm) i perioden 1958–1964, idet måling af tritiumindholdet i nedbør ved danske stationer kun foreligger i kortere perioder. Som ovenfor nævnt må aktiviteten i nedbøren i Danmark antages at være ca. 20% lavere end ved Huddinge, mens fluktuationerne iøvrigt må antages at være de samme de to steder.

Nedbøren er angivet som histogrammer over månedlige gennemsnit af alle sønderjyske nedbørsstationer efter Meteorologisk Instituts månedstillæg for ugeberetning om nedbør. I histogrammerne er indtegnet en punkteret linie, der angiver den skønnede evapotranspiration i de enkelte måneder (Aslyng 1961).

Denne er beregnet ud fra sjællandske forhold, hvorfor den muligvis er lidt for høj for sønderjyske forhold.

Den øverste kurve på fig. 4 viser grundvandspejlets fluktuationer i en boring ved Hejsel nogle km længere mod vest. Det fremgår af vandstandskurven, at

Tabel III. Nedsivningsperioder, beregnet nedsivning og tritiumkoncentration samt skønnet nedsivningsdybde ved Hjordkær i perioden 1958-1964.

Nedsivningsperioder	Nedbør minus evapotranspiration (N - E)		Skønnet nedsivningsdybde
	m	T.U.	
August 1963-maj 1964	0,332	1200	0 -3,3 m under terræn
Juli 1962-maj 1963	0,188	360	3,3-3,9 m under terræn
Juli 1961-maj 1962	0,479	210	3,9-5,6 m under terræn
Juli 1960-april 1961	0,474	55	5,6-7,2 m under terræn
Oktober 1959-februar 1960	0,160	45	7,2-7,7 m under terræn
Juli 1958-april 1959	0,194	160	7,7-8,4 m under terræn

grundvandspejlet er stigende i perioder, hvor nedbøren er større end evapotranspirationen. Vandstands-faldet ophører praktisk taget i samme måned, som nedbøren overstiger evapotranspirationen. Det vil sige, at der må antages at ske nedsivning til grundvandet i perioder, hvor nedbøren er større end evapotranspirationen.

I tabel III er angivet længden af de enkelte nedsivningsperioder i tidsrummet 1958-1964, differencen mellem nedbør og evapotranspirationen (N - E), samt den gennemsnitlige tritiumaktivitet i denne.

Nedsivningsperioderne er bestemt ved de måneder, i hvilke nedbøren er større end evapotranspirationen. Ved beregningen af tritiumaktiviteten er benyttet nedbørsaktiviteten ved Huddinge (Stockholm) med en reduktion på 20% (ODÉN, 1964). I de perioder, hvor  $E > N$ , er nedbørsunderskuddet subtraheret fra den foregående nedsivningsperiodes (N - E), og tritiumkoncentrationen er reduceret med en størrelse svarende til den i denne periode sidst faldne nedbør. Tritiumværdierne er derefter korrigeret for den radioaktive nedbrydning indtil analysetidspunktet.

De beregnede tritiumaktiviteter skulle således vise tritiumindholdet ned til den dybde, hvortil nedsivningen i perioden 1958-1964 er nået, hvis der ses bort fra dispersion og absorption af traceren. For at kunne sammenligne de beregnede værdier med de fundne værdier i tabel II er det nødvendigt tillige at finde den vertikale udbredelse af den enkelte nedsivningsperiodes nedsivning. Dette kan kun ske meget groft på det forhåndenværende materiale, idet markkapaciteten over grundvandspejlet og porevolumen under grundvandspejlet ikke er målt, ligesom den molekylære diffusion og dispersionen i vertikal retning ikke kendes. Ud fra et skøn over porevolumen og markkapacitet vil man dog være i stand til at få et indtryk af disse forhold.

Ved at anslå markkapaciteten i jordlagene over grundvandspejlet til 10% og porevolumen under grundvandspejlet til 30% kan værdien af N - E i de enkelte nedsivningsperioder omregnes fra m vandsøjle til m jordsøjle, hvorved fås den maksimale nedsivningsdybde, hvis det antages, at nedsivningsvandet under nedsivning fortrænger det i jorden værende porevand fuldstændigt.

Resultatet af en sådan beregning på jordlagene ved Hjordkær er anført i tabel III.

En sammenligning af de fundne og de beregnede tritiumkoncentrationer kan kun foretages for dybderne 3,2 m og 6,7 m.

Tritiumindholdet ned til 3,3 m's dybde er beregnet til en gennemsnitsværdi af 1200 T.U., og i 3,2 m's dybde er fundet en aktivitet på  $647 \pm 35$  T.U. I 6,7 m's dybde er der fundet  $85 \pm 6$  T.U., mens gennemsnitskoncentrationen i laget 5,6–7,2 m er beregnet til ca. 55 T.U.

Det fremgår heraf, at der til trods for absolutte afvigelser imellem de målte og de beregnede tritiumkoncentrationer i grundvandet dog er en relativ overensstemmelse mellem dem. Det er indlysende, at fuld overensstemmelse ikke kan forventes, da de beregnede værdier er baseret på en lang række skønnede faktorer som nedsivningens størrelse, porevolumen, markkapacitet samt manglende oplysninger om dispersion og diffusion, ligesom afvigelser fra det antagne vil indtræffe, hvis der finder en horisontal grundvandsbevægelse sted, hvilket er sandsynligt, bl. a. som følge af den nærliggende indvindingsboring.

De konklusioner, der kan drages på de foreliggende undersøgelser, er derfor behæftet med en betydelig usikkerhed, men den generelle fortolkning må være følgende:

1. Grundvandet i pr. nr. 13 fra 20–25 m under terræn har et tritiumindhold på  $4,81 \pm 1$  T.U., og da grundvand fra nedbør før 1954 på grund af den radioaktive halvering maksimalt skulle kunne have en aktivitet på 4 T.U., må det hidrøre fra nedbør fra ca. 1954 eller være en blanding af ældre og yngre grundvand, men i så fald må tilskuddet af yngre grundvand anses for at være ringe.
2. Grundvandet ned til en dybde af 18 m under terræn har et tritiumindhold, der er større end nedbørens tritiumindhold før 1954, hvorfor grundvandet til denne dybde må være opblandet med eller helt udgøres af nedbør, der er yngre end 1954.
3. Grundvandet i prøverne fra 10 m's dybde og opefter må hidrøre fra nedbør yngre end 1954. Prøverne fra 10 m og 6,7 m's dybde må skønnes at stamme fra nedbørens før 1961–1962, hvor tritiumkoncentrationen steg væsentligt, mens porevandet fra 3,2 m's dybde formentlig er nedbør fra 1963.

Sammenfattende synes undersøgelsen at vise, at grundvandet ned til dybder på 20–25 m i et grundvandsreservoir med frit grundvandspejl uden dækkende lerlag og under betingelser med mulighed for stor nedsivning har en tydelig tritiumgradient i nedadgående retning, betinget af nedbørens tritiumkoncentration, hvorfor den er et udtryk for grundvandets forskellige alder. En homogen opblanding af grundvandet har ikke fundet sted.

For at få et sikrere kendskab til grundvandets aldersmæssige lagdeling vil det imidlertid være nødvendigt at undersøge tritiumkoncentrationen i et grundvandsreservoir, hvorfra der ikke sker oppumpning og med en større analyse-tæthed end ved nærværende undersøgelser.

Der er næppe tvivl om, at det ved hjælp af det i naturen forekommende tritium er muligt også i en årrække fremover at få værdifulde oplysninger om en lang række geohydrologiske forhold.

## LITTERATUR

- ASLYNG, H. C., 1961: Forelæsninger over klima, jord og vandbalance i jordbruget. Kulturteknik I. København.
- BAINBRIDGE, A. E., 1963: Tritium in the North Pacific surface water. *J. Geophys. Res.*, 68, pp. 3785-3789.
- BEGEMANN, F., og LIBBY, W. F., 1957: Continental water balance, ground water inventory and storage times, surface ocean mixing rates and worldwide water circulation patterns from cosmic ray and bomb tritium. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 12, pp. 277-296.
- BOLIN, B., 1959: On the use of tritium as a tracer for water in nature. *Proc. 2nd. UN Int. Conf. PUAE 20*, 158.
- BROTZEN, F., 1964: Tritium och grundvattenundersökningar vid S.G.U., Grundförbättring, 1964: 2.
- BROWN, R. M., 1961: Hydrology of tritium in the Ottawa Valley. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 21, pp. 199-216.
- CRAIG, H., og LAL, D., 1961: The production rate of natural tritium. *Tellus*, XIII, pp. 85-105.
- DANSGAARD, W., 1961: The isotopic composition of natural waters. *Medd. om Grønland*, bd. 165, nr. 2.
- ERIKSSON, E., 1958: The possible use of tritium for estimating ground-water storage, *Tellus X*, pp. 472-478.
- 1961: Natural reservoirs and their characteristics. *Geofisica Internacional 1* (2), pp. 27-43.
- 1963: Atmospheric tritium as a tool for study of certain hydrologic aspects of river basins. *Tellus XV*, pp. 303-308.
- 1965: An account of the major pulses of tritium and their effects in the atmosphere. *Tellus XVII*, pp. 118-130.
- ERIKSSON, E., og ODÉN, S., 1963: Tritium in precipitation in relation to meteorological data. *Annual Progress Rept. Contr. AT (30-1)-2458, Annex for USAEC*, pp. 1-11.
- GILETTI, B. J., BAZAN, F., og KULP, J. L., 1959: The Geochemistry of Tritium. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 39, pp. 807-818.
- HALEVY, E., NIR, A., HARPAZ, Y. og MANDEL, S., 1958: Use of radioisotopes in studies of ground-water flow, I. Laboratory and field experiments on the suitability of various tracers. *Proc. 2nd. UN Int. Conf. PUAE 20*, 158.
- HALEVY, E. og NIR, A., 1962: The determination of aquifer parameters with the aid of radioactive tracers. *Journ. Geophys. Res.* 67, pp. 2403-2409.
- HEEMSTRA, R. J., WATKINS, J. W. og ARMSTRONG, F. E., 1961: Laboratory evaluations of nine water tracers. *Nucleonics 19*: 1, pp. 92-96.
- IAEA, Vienna, 1962, 1963: *Tritium Lists*, 1, 2 (1962) and 3 (1963).
- JENSEN, P. KIELER, 1964: Determination of Yeld. *International Water Supply Association, Sixth Congress, Stockholm*, vol. 1, pp. H3-H26.
- KAUFMAN, S. og LIBBY, W. F., 1954: The Natural Distribution of Tritium. *PHYSICAL REVIEW*. Vol. 93, no. 6. pp. 1337-1344.
- KAUFMAN, W. J. og ORLOB, G. T., 1956: Measuring ground water movement with radioactive and chemical tracers. *J. Amer. Water Works Assoc.*, 48, 559.
- KNUTSSON, G. og LJUNGGREN, K., 1959: Studies of ground-water flow using radioactive isotopes. *Geologiska Föreningens Förhandlingar 81*, 405.
- KNUTSSON, G. og LJUNGGREN, K., 1959: Äldre och nyare metoder för undersökning av grundvattenströmning. *Grundförbättring 12*, 211.
- KNUTSSON, G., LJUNGGREN, K. og FORSBERG, H. G., 1963: Field and laboratory tests of chromium-51-EDTA and tritium water as a double tracer for ground-water flow. *Radioisotopes in hydrology, IAEA, Vienna*, 347.
- LIBBY, W. F., 1959: Radioactive fallout particularly from the Russian October series. *Proc. of the Nat. Ac. of Sciences*, 45, pp. 959-976.
- 1963: Moratorium tritium geophysics. *J. of Geophys. Res.*, 68, pp. 4485-4499.
- MOSER, H., NEUMAIER, F. og RAUERT, W., 1957: Die Anwendung radioaktiver Isotopen in der Hydrologie II. *Atomkernenergie 6*, 225.

- ODÉN, S., 1964: C-14 och tritium isotopernas förekomst över Skandinavien under senare år med tillämpning inom marklära och hydrologi. Grundförbättring 1964: 2, pp. 122-142.
- ODÉN, S., og ERIKSSON, E., 1963: Results from a tritium network over Scandinavia MS. Report to U.S. Atomic Energy Commission.
- SORGENFRI, TH., 1945: Træk af Alnarp Dalens geologiske Opbygning. Medd. fra Dansk Geol. Forening, bd. 10 hft. 5, pp. 617-630.
- VON BUTTLAR, H., 1959: Ground-Water Studies in New Mexico Using Tritium as a Tracer, II. Jour. Geophys. Res., 64, 1031-1038.
- VON BUTTLAR, H., og WENDT, I., 1958: Ground-Water Studies in New Mexico Using Tritium as a Tracer. Trans. Amer. Geophys. Union, 39, pp. 660-668.
- ÖSTLUND, G., og LUNDGREN, L. B., 1963: Stockholm natural tritium measurements. I. Tellus XVI (1964), 1, pp. 118-130.
- ÖSTLUND, G., BROWN, R. M., og BAINBRIDGE, A. E., 1963: Standardization of natural tritium measurements. Tellus XVI (1964), 1, pp. 131-134.
- ZIMMERMANN, U., MÜNNICH, K. O., ROETHER, W., KREUTZ, W., SCHUBACH, K., og SIEGEL, O., 1965: Downward Movement of Soil Moisture Traced by Means of Hydrogen Isotopes. Evaluation of Evapotranspiration. Paper presented at the International C-14 and H-3 Dating Conference, Pullman, Wash., June 7-11, 1965.