

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING  
WAGENINGEN

*Enige fysische achtergronden bij het gebruik  
van radioactieve stoffen voor het  
bepalen van het vochtgehalte  
in de grond*

P. E. RIJTEMA

RAPPORT 6  
1959

2193231



## INHOUD

	blz.
1. INLEIDING . . . . .	5
2. VOCHTMETING MET BEHULP VAN NEUTRONEN . . . . .	6
a. Verstrooiing van neutronen . . . . .	6
b. De werkzame doorsnede . . . . .	9
c. Diffusie van thermische neutronen . . . . .	10
d. Toepassingsmogelijkheden . . . . .	12
3. VOCHTMETING MET BEHULP VAN GAMMASTRALEN . . . . .	14
a. De absorptiecoëfficiënt . . . . .	15
a.1 <i>Het Compton effect</i> . . . . .	15
a.2 <i>Het fotoelektrisch effect</i> . . . . .	16
a.3 <i>De paarvorming</i> . . . . .	17
b. Toepassingsmogelijkheden . . . . .	19
4. SAMENVATTING EN CONCLUSIES . . . . .	21
5. LITERATUUR . . . . .	22
SUMMARY . . . . .	23



## 1. INLEIDING

Er zijn een groot aantal methoden bekend voor het bepalen van het vochtgehalte in de grond. Geen van deze methoden geeft geheel bevredigende resultaten. Bij de bepaling van het vochtgehalte door het drogen van monsters in een droogstoof kunnen veranderingen in vochtgehalte gedurende het groeiseizoen niet op dezelfde plaats worden gevolgd. Bij de indirecte methodes zijn calibraties vereist. Gedurende het groeiseizoen kunnen veranderingen van structuur, temperatuur en zoutconcentratie in de grond afwijkingen veroorzaken van de calibratiecurven.

Bij metingen met behulp van radioactieve stoffen treden bovengenoemde moeilijkheden niet op. Deze methode van vochtbepaling berust op het meten van de intensiteit van de door een radioactieve bron uitgezonden straling, nadat deze een ongestoord grondpakket is gepasseerd. De praktische toepassingsmogelijkheden beperken zich tothet gebruik van neutronen en gammastralen, aangezien alfa- en beta-stralen een te klein doordringend vermogen hebben.

Bij metingen van het vochtgehalte met behulp van neutronen worden snelle neutronen (met een grote kinetische energie) door een radioactieve bron uitgezonden. Door botsingen met de bodembestanddelen neemt de kinetische energie af. Na een groot aantal botsingen is de energie zo laag geworden, dat de neutronen zich nog alleen door diffusie verplaatsen. De meting van de intensiteit van de verstróóide neutronen geschiedt met behulp van instrumenten, die alleen op langzame neutronen (met een lage energie) reageren.

Bij metingen met behulp van gammastralen neemt de intensiteit van de straling af door absorptie inde grond. De intensiteit van de straling na het passeren van het grondpakket wordt gemeten met een apparatuurwaarin de straling wordt geabsorbeerd.

Hieronder worden de processen die bij beide methoden een rol spelen en de toepassingsmogelijkheden behandeld.

## 2. VOCHTMETING MET BEHULP VAN NEUTRONEN

Als atoomkernen niet met neutronen, maar met positief geladen deeltjes worden beschoten, treedt er een drempelwaarde op voor de kinetische energie van het deeltje, waar beneden geen reactie met de kern plaatsvindt. Dit wordt veroorzaakt door de afstotende kracht ten gevolge van de positieve ladingen van de atoomkern en het deeltje. Het deeltje kan niet tot de kern doordringen, tenzij het voldoende snelheid heeft. Neutronen zijn ongeladen deeltjes, waarvan de massa vrijwel gelijk is aan de massa van de waterstofkern. Bij beschieting van atoomkernen met neutronen kunnen laatstgenoemden door hun elektrische neutraliteit, ongeacht hun kinetische energie, doordringen tot de kern van het atoom. Het effect van neutronen, die in een bepaalde stof doordringen moet dan ook worden beschreven door de eventuele reacties met de kern. Bij de reacties tussen neutronen en atoomkernen spelen twee processen een rol.

In het absorptieproces vormt het neutron met de getroffen kern (Z.A.) een samengestelde kern (Z.A. + 1), die op één of andere manier weer uit elkaar valt onder uitzending van gammastraling of geladen deeltjes (Z = kernlading, A = kernmassagetal).

Bij de verstrooiing van neutronen wordt de kinetische energie van het neutron tussen de kern en het neutron verdeeld volgens de wet van behoud van energie.

Bij de metingen van het vochtgehalte wordt alleen gebruik gemaakt van de verstrooiing van neutronen, waarbij de snelle neutronen, die door de bron worden uitgezonden, door energieverlies overgaan in langzame neutronen.

De waarschijnlijkheid, waarmede een bepaalde reactie met de kern optreedt, is een functie van de neutronenenergie en de opbouw van de atoomkernen, die in het materiaal aanwezig zijn. De sterke afhankelijkheid van de energie bij deze reacties heeft geleid tot de termen: snelle ( $E > 0.01 \text{ mev}$ )<sup>1</sup>, langzame ( $E < 0.01 \text{ mev}$ ) en thermische neutronen ( $E \approx 0.02 \text{ ev}$ ).

### a. Verstrooiing van neutronen

Gaan we er in onze beschouwing van uit, dat de verstrooiing zowel isotroop (in alle richtingen even waarschijnlijk) als elastisch is, dan gebeurt dit op dezelfde manier als bij

<sup>1</sup>) Een ev (elektronvolt) is de kinetische energie, die een elektron opneemt, wanneer het door een elektrisch veld van 1 volt wordt versneld.  $1 \text{ mev} = 10^6 \text{ ev} = 1.6020 \times 10^6 \text{ erg}$ .  $1 \text{ kev} = 10^3 \text{ ev}$ .

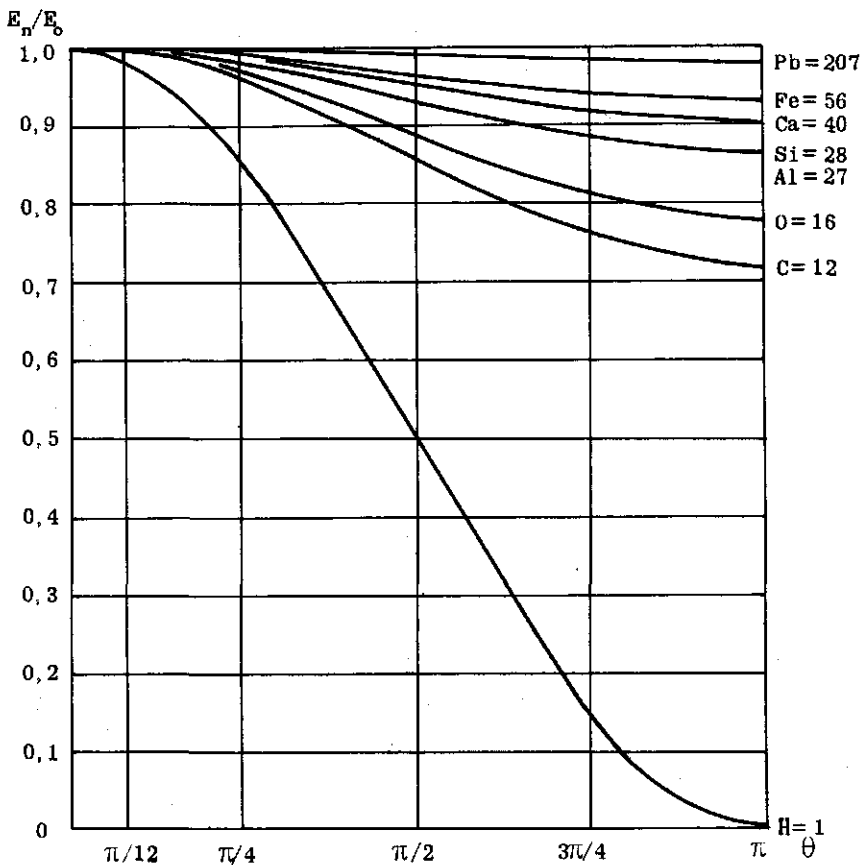


Fig.1 Verband tussende verhouding  $E_n/E_0$  van neutronen en de verstrooiingshoek  $\theta$  bij botsing met diverse atoomkernen.

Fig.1 Relation between the ratio  $E_n/E_0$  of neutrons and the scattering-angle  $\theta$  after collision with various atom-nuclei.

botsingen van ideale gasmoleculen. De kern blijft onveranderd en er gaat geen energie verloren door straling. Volgens SIRI (1949) bedraagt de kinetische energie, die aan de kern wordt overgedragen:

$$E_A = \frac{4 m A \sin^2 \frac{\theta}{2}}{(m + A)^2} E_0 = \alpha E_0 \quad (1.1)$$

Hierin is:  $m$  = massa van het neutron

$A$  = kernmassa

$E_0$  = beginenergie van het neutron in mev

$\theta$  = verstrooiingshoek van het neutron uit zijn beginrichting ten opzichte van het centrum van de kernmassa

Hieruit volgt, dat na de botsing het neutron nog een kinetische energie heeft, die gelijk is aan:

$$E_n = (1 - \alpha) E_0 \quad (1.2)$$

In figuur 1 is de verhouding  $\frac{E_n}{E_0}$  weergegevend door verschillende verstrooiingsrichtingen en atoomkernen. De grootste energieoverdracht van het neutron aan de kern heeft plaats als de verstrooiingshoek  $\theta = \pi$ . Bij de zware kernen verandert het neutron wel van richting, maar het draagt betrekkelijk weinig energie over aan de kern. Bij het waterstofatoom, waar de kernmassa ongeveer gelijk is aan de massa van het neutron, wordt de meeste energie overgedragen. Bij een verstrooiingshoek  $\theta = \pi$  wordt bij een centrale botsing vrijwel alle energie van het neutron aan de waterstofkern overgedragen.

Over het algemeen zal het snelle neutron veel botsingen moeten maken, voordat de snelheid is teruggebracht tot lage snelheden. De gemiddelde verhouding tussen de energie ( $E_n$ ) van het neutron na een botsing ten opzichte van de oorspronkelijke energie ( $E_0$ ) in alle verstrooiingsrichtingen is een constante waarvan de grootte afhangt van de massa van de verstrooiende kern (SIRI, 1949). Dit kan als volgt worden weergegeven:

$$E_n = E_0 e^{-\xi} \quad (1.3)$$

Hierin is:

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1} \quad (1.4)$$



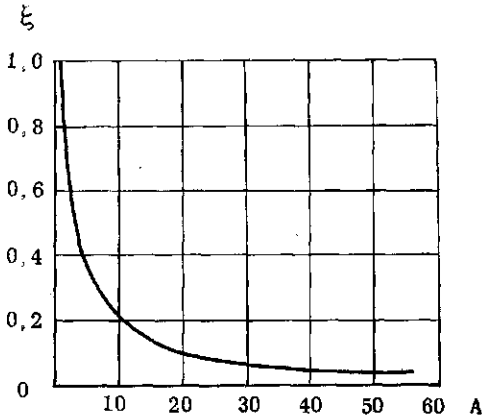


Fig.2 Verband tussen de exponent  $\xi$  en de atoommassa A.

Fig.2 Relation between the exponent  $\xi$  and the atomic-mass A.

In figuur 2 is het verband weergegeven tussen  $\xi$  ende kernmassa A. Uit deze figuur blijkt, dat de waarde van  $\xi$  bij het toenemen van de kernmassa zeer snel daalt tot lage waarden.

Uit (1.3) volgt dat na N botsingende energie van het neutron is gedaald tot een waarde:

$$E_n = E_0 e^{-N\xi} \quad (1.5)$$

Bij botsingen met waterstofkernen is  $\xi = 1$ . Voor koolstof ( $A=12$ ) is  $\xi = 0.16$ . Dit betekent voor een neutron met een kinetische energie  $E_0$ , dat het aantal botsingen met koolstofatomen ruim zesmaal het aantal botsingen met waterstofatomen is om hetzelfde energieverlies te krijgen. Bij zwaardere atoomkernen is het vereiste aantal botsingen nog groter. Hieruit blijkt dat bij waterstof de grootste energie-overdracht plaatsvindt.

#### b. De werkzame doorsnede

Behalve de energie-overdracht tussen een neutron en een atoomkern bij een botsing, is ook de waarschijnlijkheid dat een botsing optreedt van groot belang. Deze waarschijnlijkheid is afhankelijk van de werkzame doorsnede. De grootte van deze werkzame doorsnede is afhankelijk van de energie van het neutron en de aard van de kern.

In tabel 1 zijn de werkzame doorsneden gegeven voor de meest voorkomende elementen in de grond (GARDNER en KIRKHAM, 1952).

Volgens SIRI (1949) is de werkzame doorsnede voor waterstof in het energiegebied van 1 eV tot 10 keV praktisch constant. De waarde in dit gebied is ongeveer  $21 \cdot 10^{-24}$  cm<sup>2</sup>.

TABEL 1

 $\sigma_S$  in  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>

Element	Snelle neutronen 2.5 mev	Thermische neutronen 1/40 ev
H	2.55	47.5
C	1.6	4.6
O	1.5	4.2
Al	2.5	1.6
Si	3.2	2.5
Ca	4.9	1.5
Fe	13.0	3.0

$\sigma_S$  is de werkzame doorsnede voor verstrooiing.

Uit deze gegevens blijkt, dat de waarschijnlijkheid van het optreden van botsingen voor een belangrijk energiegebied het grootst is voor waterstof, omdat de werkzame doorsnede van dit element veel groter is dan van andere elementen.

### c. Diffusie van thermische neutronen

Na een aantal botsingen is de energie van de neutronen zo ver afgenomen, dat het transport van neutronen alleen plaats heeft door middel van diffusie. Dit kan als volgt worden weergegeven. Stel dat  $\rho$  (r) de dichtheid is van de thermische neutronen per volume element op een afstand r van een bron van snelle neutronen. De gemiddelde levensduur van een neutron is T. De dichtheidsverandering van thermische neutronen per volumeelement met de tijd kan nu worden weergegeven door de volgende vergelijking:

$$\frac{\xi \rho}{\xi t} = D \frac{\xi^2 \rho}{\xi r^2} - \frac{\rho}{T} + Q \quad (1.6)$$

Hierin is:

$\frac{\xi \rho}{\xi t}$  = de dichtheidsverandering in thermische neutronen in het volumeelement met de tijd

$D \frac{\xi^2 \rho}{\xi r^2}$  = de dichtheidstoename van thermische neutronen in het volumeelement door diffusie

Q = dichtheidstoename van thermische neutronen door vertraging van snelle neutronen

$-\frac{\rho}{T}$  = dichtheidsafname van thermische neutronen door absorptie

Aangezien de evenwichtstoestand zeer snel wordt bereikt, mag  $\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx 0$  worden gesteld. Vergelijking (1.6) kan dan als volgt worden geschreven:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial r^2} - \frac{\rho}{DT} = -\frac{Q}{D} \quad (1.7)$$

Voor de oplossing van vergelijking (1.7) kan  $Q$  worden berekend door middel van de zogenaamde "ouderdomstheorie". OREAR e. a. (1949) geven voor de berekening van  $Q$  de vergelijking:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial r^2} = \frac{\partial Q}{\partial \tau} \quad (1.8)$$

In vergelijking (1.8) is  $\tau$  de "ouderdom" van het neutron ( $\sqrt{\tau}$  heeft de dimensie van lengte). OREAR e.a.(1949) en HOLMES (1956) geven oplossingen van vergelijking (1.7) voor een puntbron in een medium met oneindige uitgestrektheid.

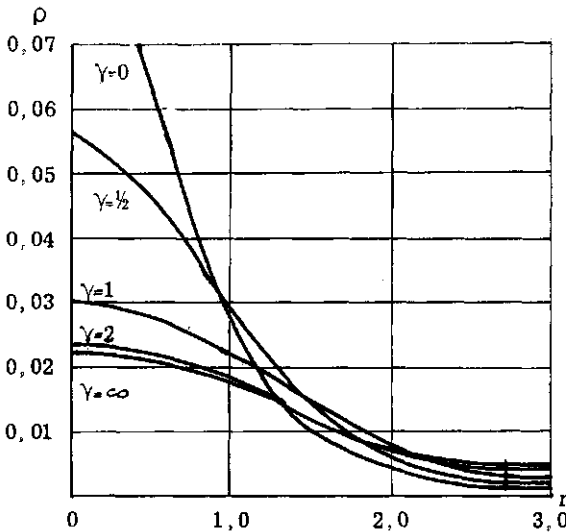


Fig.3 Verband tussen de dichtheid  $\rho$  van thermische neutronen en de afstand  $r$  van de bron bij verschillende waarden van  $\gamma$ , volgens Gardner en Kirkham (1952).  $\rho$  en  $r$  in relatieve eenheden.

Fig.3 Relation between the density  $\rho$  of thermal neutrons and the distance  $r$  from the source for several values of  $\gamma$ , after Gardner and Kirkham (1952).  $\rho$  and  $r$  in relative units.

In figuur 3 (GARDNER en KIRKHAM, 1952) is het verband weergegeven tussen  $\rho$  en  $r$  in relatieve eenheden voor verschillende waarden van de verhouding  $\frac{\sqrt{\tau}}{\sqrt{DT}} = \gamma$ .

De waarde van de coefficient  $\gamma$  is een maat voor de energie-afname van de neutronen. Uit deze figuur blijkt dat voor  $\gamma = 0$  de dichtheid van langzame neutronen het grootst is vlak bij de bron. Voor waarden van  $\gamma > 1$  is de dichtheid van langzame

neutronen vlak bij de bron veel kleiner. De afname in dichtheid van langzame neutronen bij toenemende afstand van de bron is dan echter geringer. Op enige afstand vande bron is de neutronendichtheid vrijwel onafhankelijk van de waarde van  $\gamma$ .

#### d. Toepassingsmogelijkheden

In het voorgaande is aangetoond, dat de energie-overdracht bij een botsing tussen een neutron en een waterstofatoom zeer groot is in vergelijking met botsingen van neutronen met andere in de grond voorkomende atoomkernen. Verder is gebleken, dat de waarschijnlijkheid van het optreden van botsingen het grootst is voor waterstofatomen. Dit heeft tot gevolg, dat de waarde van  $\gamma$  voor waterstof zeer klein is in vergelijking met de  $\gamma$ -waarden voor andere elementen. Wordt de intensiteit van de langzame neutronen zo dicht mogelijk bij de bron gemeten, dan is deze intensiteit in hoofdzaak een functie van de aanwezige waterstofatomen. Om deze reden wordt de neutronenbron direkt onder de meetapparatuur geplaatst.

HOLMES (1956) geeft een methode om theoretisch het verband te berekenen tussen de intensiteit van de langzame neutronen en het vochtgehalte van de grond. Hij gaat er van uit dat water de enige component in de grond is, die de vertragung, diffusie en absorptie van neutronen beheerst. Tussen berekende en experimenteel gevonden waarden kunnen echter afwijkingen optreden van 10% (HOLMES en TURNER, 1958). Voor praktisch gebruik is het daarom gewenst dat experimenteel calibratiecurven worden gemaakt. Volgens GARDNER en KIRKHAM (1952), VAN BAVEL e. a. (1954), HOLMES (1956), STOLZY en CAHOON (1956) geven alle minerale grondendezelfde calibratiecurven voor het verband tussen vochtgehalte en intensiteit van langzame neutronen. MORTIER en DE BOODT (1956) geven echter verschillende calibratiecurven voor leem en klei.

Aangezien waterstofde belangrijkste rol speelt bij de vertragung van neutronen zullen andere verbindingen met waterstof, dan water, van belang zijn voor eventuele verschuivingen in de calibratiecurven. Ten behoeve van de calibratie wordt het vochtgehalte van de grond door droging bij 105° C bepaald. In de eerste plaats zal het vochtgehalte van de grond bepaald door drogen bij 105° C niet al het water in de grond weergeven, omdat kleimineralen een hoeveelheid kristalwater bevatten. De aard van de chemische binding van het waterstofatoom heeft wel invloed. Een waterstofatoom gebonden aan de -OH groep van een kleimineraal reageert anders op

thermische neutronen dan waterstof gebonden in water. De grootte van het effect is echter onbekend.

Ook zijn waterstofatomen aanwezig in het organische materiaal van de grond. GARDNER en KIRKHAM (1952) berekenen in humus een waterstofgehalte van ongeveer 5 gewichtsprocenten. In water is het waterstofgehalte ongeveer 11 gewichtsprocenten. In gronden met een hoog gehalte aan organische stof heeft de aanwezigheid van deze aan organische stof gebonden waterstof een grote invloed op de calibratiecurve.

Deze methode van vochtbepaling berust verder op de diffusie van thermische neutronen in een medium van oneindige uitgestrektheid. Om de invloed van randeffecten te vermijden zal het volume van de grond, dat bij de meting is betrokken, zo groot moeten zijn, dat het als een medium van oneindige uitgestrektheid mag worden beschouwd. In figuur 4 is het ver-

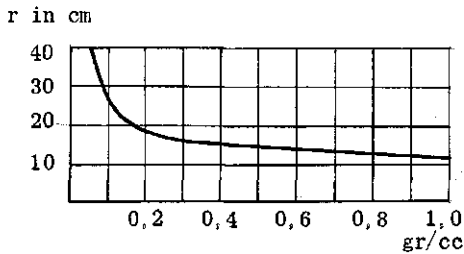


Fig. 4 Het verband tussen de straal  $r$  van het bemonsterde volume en het vochtgehalte, volgens Holmes en Turner (1958).

*Fig. 4 The relation between the radius  $r$  of the sampled volume and the moisture content, after Holmes and Turner (1958).*

band tussen de straal van het volume en het vochtgehalte weergegeven, zoals dit door HOLMES en TURNER (1958) is bepaald. In de grond varieert de straal van dit volume van ongeveer 15 cm in verzadigde grond tot ongeveer 30 cm in droge grond. Dit betekent, dat in de laag van 15 tot 30 cm onder het oppervlak geen vochtgehalte-metingen mogelijk zullen zijn met behulp van neutronenstraling, tenzij speciale voorzieningen worden getroffen. Het bepalen van het vochtgehalte in betrekkelijk dunne lagen (5 à 10 cm) is ook niet mogelijk, tenzij de verandering in vochtgehalte regelmatig verloopt over het profiel, omdat dan het gemiddelde vochtgehalte in de hele laag overeenkomt met het vochtgehalte halverwege de laag. Deze methode is over het algemeen dus alleen bruikbaar als men een vrij globale informatie wil hebben over het vochtgehalte in het profiel.

### 3. VOCHTMETING MET BEHULP VAN GAMMASTRALEN

Gammastralen bestaan uit elektromagnetische golven. Evenals voor de lichtintensiteit kan de intensiteitsafname van de gammastralen bij het passeren van een absorberend medium worden weergegeven door de wet van Lambert: de intensiteitsvermindering ( $-dI$ ), die de straling bij het passeren van een dunne laag ( $dx$ ) ondergaat is evenredig met de intensiteit van de invallende straling. In formule geeft dit:

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \quad (2.1)$$

Integratie van de differentiaalvergelijking geeft:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.2)$$

Hierin is  $I_0$  de intensiteit van de bron.

De absorptiecoëfficiënt  $\mu$  is een functie van de golflengte van de straling en de aard van de absorberende stof. Het produkt  $\mu x$  is dimensieloos, zodat de dimensies van  $\mu$  afhangen van de dimensies van  $x$ . In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de gebruikte dimensies en notaties.

TABEL 2

Dimensies $x$	Dimensies $\mu$	Notaties
cm	$\text{cm}^{-1}$	$\mu$
$\text{g}/\text{cm}^2$	$\text{cm}^2/\text{gr}$	$\mu/\rho$
atomen/ $\text{cm}^2$	$\text{cm}^2/\text{atoom}$	$\mu_a$
elektronen/ $\text{cm}^2$	$\text{cm}^2/\text{elektron}$	$\mu_e$

Het verband tussen de verschillende absorptiecoëfficiënten kan als volgt worden weergegeven:

$$\mu = \rho(\mu/\rho) = \rho \left(\frac{N}{A}\right) \mu_a = \rho \left(\frac{N}{A}\right) Z \mu_e \quad (2.3)$$

Hierin is:  $Z$  = atoomnummer  
 $A$  = atoomgewicht  
 $N$  = getal van Avogadro  
 $\rho$  = dichtheid van de stof in  $\text{gr}/\text{cm}^3$

### a. De absorptiecoëfficiënt

In het energiegebied van 0,1 tot 6 mev komen drie verschillende typen van absorptie voor: het Comptoneffect, het fotoelektrisch effect en de paarvorming. De drie absorptieprocessen treden onafhankelijk van elkaar op, zodat de totale absorptiecoëfficiënt gelijk is aan de som van de absorptiecoëfficiënten van de afzonderlijke effecten.

Er geldt dus:

$$dI \text{ (Compton)} = -\sigma I \, dx$$

$$dI \text{ (fotoelektrisch)} = -\tau I \, dx$$

$$dI \text{ (paarvorming)} = -\kappa I \, dx$$

Hieruit volgt dat:  $\mu = \sigma + \tau + \kappa$

#### a.1 Het Compton effect

Het Compton effect berust op de verstrooiing van gammastralen door vrije elektronen. Hierbij gaat een deel van de stralingsenergie over op het elektron, terwijl de straling wordt afgebogen en zich met een grotere golflengte voortplant. Na een aantal botsingen is de stralingsenergie echter zover afgenomen, dat deze volledig door een elektron kan worden geabsorbeerd. In principe is het Compton effect dus geen absorptieproces maar een verstrooiing van de straling bij de botsing met een vrij elektron. De elektronen in het atoom zijn echter aan verscheidene krachten onderworpen. Bij elementen met een laag atoomnummer is de bindingsenergie van de elektronen zo klein, vergeleken met de energie van de gammastraling, dat zij als vrije elektronen mogen worden beschouwd. KLEIN en NISHINA (DAVISSON en EVANS, 1952) hebben met behulp van de quantummechanica een formule ontwikkeld om de absorptiecoëfficiënt  $\sigma_e$  te berekenen. In figuur 5 is het verband weergegeven tussen de Compton absorptiecoëfficiënt  $\sigma_e$  en de stralingsenergie in mev berekend uit gegevens van DAVISSON en EVANS (1952).

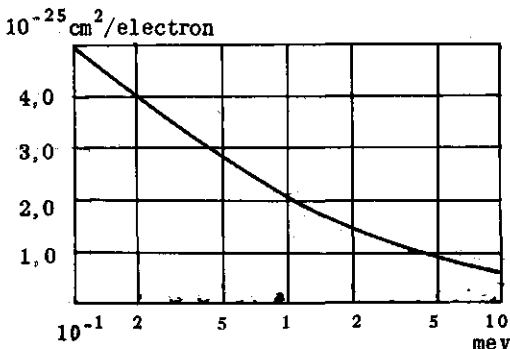


Fig. 5 Het verband tussen de Compton absorptiecoëfficiënt  $\sigma_e$  en de energie van  $\gamma$  stralen in mev, berekend uit gegevens van Davisson en Evans (1952).

Fig. 5 The relation between the Compton absorption coefficient  $\sigma_e$  and the energy of  $\gamma$  rays in mev, calculated from data of Davisson and Evans (1952).

## a.2 Het fotoelektrisch effect

Bij lage stralingsenergie is dit het belangrijkste absorptieproces. Wanneer een foton in aanraking komt met een atoom bestaat er de mogelijkheid dat alle energie wordt overgedragen op een elektron. Dit elektron wordt daardoor uit het atoom weggeschoten of het komt in een niet bezette positie van een andere baan. Een deel van de stralingsenergie wordt gebruikt om het elektron uit zijn binding in het atoom los te maken, terwijl de rest als kinetische energie aan het elektron wordt overgedragen.

De grootte van de absorptiecoëfficiënt is afhankelijk van de elektronenbezetting in de verschillende schillen. De absorptiecoëfficiënt is daardoor behalve van de stralingsenergie ook afhankelijk van het atoomnummer. Volgens DAVISSON en EVANS (1952) heeft ongeveer vier vijfde van de fotoelektrische absorptie plaats door de elektronen van de K-schil in het voor gammastralen van belang zijnde energiegebied.

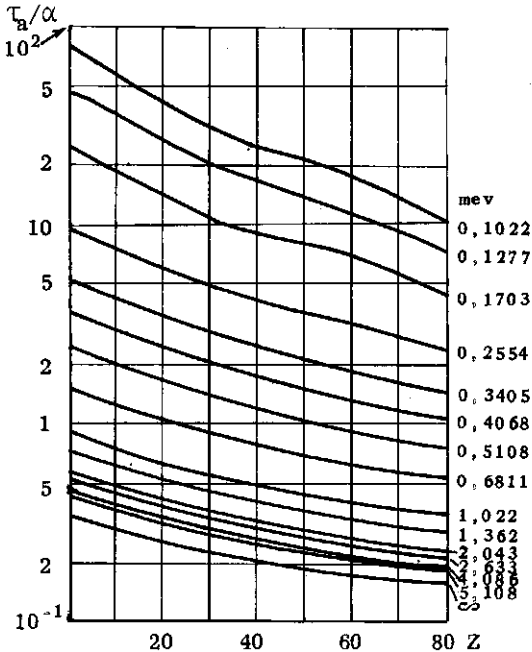


Fig. 6 Het verband tussen  $\tau_a/\alpha$  en het atoomnummer  $Z$  bij verschillende stralingsenergie, volgens Davisson en Evans (1952).

Fig. 6 The relation between  $\tau_a/\alpha$  and the atomic number  $Z$  for several values of radiation energy, after Davisson and Evans (1952).

In figuur 6 is het verband weergegeven tussen het atoomnummer  $Z$  en  $\tau_a/\alpha$  voor een aantal stralingsenergieën, volgens gegevens van DAVISSON en EVANS (1952). De factor  $\alpha$  is gelijk aan  $Z^2 \frac{mc^2}{h\nu}$ . Hierin is  $mc^2$  gelijk aan 0.51084 mev en  $h\nu$  is de stralingsenergie in mev.



### a.3 De paarvorming

Bij kortgolvlige gammastralen (met een zeer hoge energie) wordt de absorptie in een medium niet alleen veroorzaakt door de elektronen maar ook door de atoomkernen. Bij de paarvorming gaat alle energie van het foton over in een vrij elektron en een positron. De kinetische energie van beide deeltjes is gelijk aan de stralingsenergie, verminderd met de massa-energie van de gevormde deeltjes. Deze vorm van absorptie treedt alleen op als de stralingsenergie gelijk of groter is dan de massa-energie van het positron-elektron paar. Deze massa-energie is gelijk aan 1,02 mev. De absorptiecoëfficiënt neemt boven 1,02 mev langzaam toe tot ongeveer 4 mev en wordt daarna bijna evenredig met  $\ln E$ . Bovendien neemt de absorptiecoëfficiënt voor paarvorming vrijwel evenredig toe met de toename van het atoomnummer.

HEITLER en SAUTER (1933) geven als benaderingsformule:

$$\kappa_e = \left(\frac{e^2}{m_0 c^2}\right)^2 \frac{Z}{137} \left(\frac{28}{9} \ln \frac{2h\nu}{2^{1/3} \cdot 27} - \frac{2}{27}\right) \quad (2.4)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} e &= \text{lading elektron in e. s. e.} \\ m_0 c^2 &= 0.51084 \text{ mev} \\ Z &= \text{atoomnummer} \\ h\nu &= \text{stralingsenergie} \end{aligned}$$

DAVISSON en EVANS (1952) berekenden met de formule van HEITLER en SAUTER de absorptiecoëfficiënten voor paarproductie. In het energiegebied van 1.02 mev tot 3 mev waren de berekende waarden de helft van de experimenteel bepaalde waarden van JAEGER en HULME (1936). De toegepaste benadering van HEITLER en SAUTER geldt voor dit gebied niet, omdat de interactie tussen elektron en kern niet mag worden verwaarloosd. Bij een stralingsenergie boven 4 mev is de fout echter gering. Aangezien in het betrokken energiegebied de absorptiecoëfficiënt voor paarvorming voor de meeste bodemelementen belangrijk kleiner is dan die voor het Compton effect, heeft de genoemde fout weinig invloed op de totale absorptiecoëfficiënt.

Met behulp van de figuren 5 en 6 en vergelijking (2.4) zijn voor de elementen, die het meest in de grond voorkomen, de massa absorptiecoëfficiënten ( $\mu/\rho$ ) berekend. In de figuren 7 tot 10 is voor enkele elementen het verband weergegeven tussen de absorptiecoëfficiënten ende stralingsenergie. Uit de figuren blijkt, dat in het energiegebied van 0.4 tot 2 mev

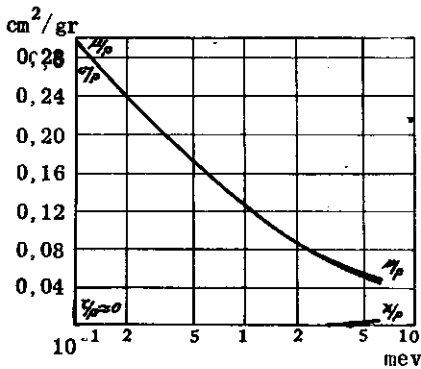


Fig.7 Het verband tussen de massa-absorptiecoëfficiënten en de stralingsenergie voor waterstof.

Fig.7 The relation between the mass-absorption coefficients and the radiation energy for hydrogen.

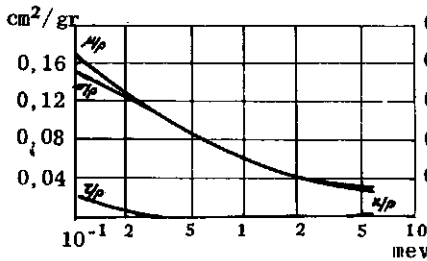


Fig.9 Het verband tussen de massa-absorptiecoëfficiënten en de stralingsenergie voor silicium.

Fig.9 The relation between the mass-absorption coefficients and the radiation energy for silicon.

Fig.8 The relation between the mass-absorption coefficients and the radiation energy for oxygen.

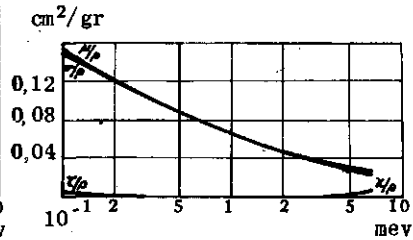


Fig.8 Het verband tussen de massa-absorptiecoëfficiënten en de stralingsenergie voor zuurstof.

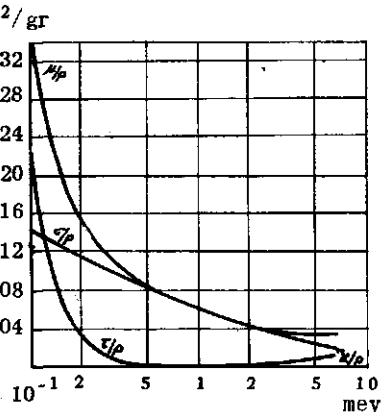


Fig.10 Het verband tussen de massa-absorptiecoëfficiënten en de stralingsenergie voor ijzer.

Fig.10 The relation between the mass-absorption coefficients and the radiation energy for iron.

de totale massa absorptiecoëfficiënt alleen wordt bepaald door het Compton effect. De Compton absorptiecoëfficiënt is voor de elementen met atoomnummer 2 tot 30 dezelfde, omdat de verhouding  $Z/A$  voor deze elementen constant is, namelijk  $1/2$ . Voor de zwaardere elementen wordt deze verhouding steeds kleiner. Voor waterstof daarentegen is de  $Z/A$ -verhouding gelijk aan 1. De absorptiecoëfficiënt voor waterstof is in het energiegebied van 0.4 tot 2 mev dan ook tweemaal zo groot als de absorptiecoëfficiënt van andere elementen. In sommige moleculaire verbindingen heeft waterstof echter zo goed als geen afwijkende invloed. In deze moleculaire verbindingen wordt het elektron van het waterstofatoom opgenomen in de schil van het bindende atoom. In deze moleculen, zoals bijvoorbeeld water, blijft de  $Z/A$ -verhouding ongeveer  $1/2$ .

Voor anorganische grond kan als grove benadering de volgende samenstelling per 100 atomen worden gegeven: 65%  $O_2$ ; 20% Si; 8% Al en 7% andere elementen. Elementen met een atoomnummer hoger dan 30 hebben dus weinig invloed. De totale massa-absorptiecoëfficiënten van grond en water zijn in het energiegebied van 0.4 tot 2 mev praktisch aan elkaar gelijk. Ook in gronden met een zeer groot gehalte aan organisch stof moet theoretisch dezelfde totale massa-absorptiecoëfficiënt worden gevonden.

#### **b. Toepassingsmogelijkheden**

Aangezien de totale massa-absorptiecoëfficiënt voor alle bodembestanddelen bij een bepaalde stralingsenergie gelijk is, worden veranderingen in de absorptiecoëfficiënt veroorzaakt door wijzigingen in de dichtheid van het absorberend medium. Bij intensiteitsmetingen op een gegeven afstand van de bron moet er volgens vergelijking (2.2) een lineair verband bestaan tussen  $\ln I$  en de dichtheid van het medium. Bij de calibratie wordt echter geen lineair verband gevonden tussen de beide factoren, maar een enigszins gebogen curve (VOMOCIL, 1954). Vergelijking (2.2) is alleen geldig voor de primaire monochromatische straling van de bron. Verstrooiing door het Compton effect en secundaire straling veroorzaken een afwijking van het lineaire verband, omdat de telapparatuur in het algemeen niet selectief werkt. VAN BAVEL e.a. (1957) zijn er in geslaagd om de primaire straling selectief te meten en vinden dan inderdaad een lineair verband. De dichtheid van het absorberend medium geeft bij deze metingen het nat-volumegegewicht van de grond. Om absolute vochtgehalten van de grond te berekenen moet het droog-volumegegewicht van de grond bekend zijn. Gaat men er vanuit dat het droog-volumegegewicht van de grond gedurende een langere periode

constant blijft, dan geven met gammastralen gevonden wijzigingen in de dichtheid directe verandering in vochtgehalte aan. Het meten van de dichtheid is in betrekkelijk dunne lagen mogelijk. Bij metingen met niet selectief werkende ontvangers neemt de laagdikte, die bij de meting is betrokken, toe door de verstrooide straling tengevolge van het Compton effect bij toenemende afstand tussen bron en ontvanger. Indien het mogelijk is om met een selectief op de primaire straling werkende ontvanger te meten, dan heeft de verstrooide straling geen invloed meer. De laagdikte wordt dan alleen nog bepaald door de vertikale afmetingen van bron en ontvanger. VOMOCIL (1955) werkte met een Geiger-Müllerteller met een verticale afmeting van 5 cm. Hij vond hiermede alleen in de laag van 0 - 5 cm onder het oppervlak afwijkende waarden bij zijn metingen. De laagdikte kan door het gebruik van telapparatuur met geringere afmetingen, zoals scintillatietellers, worden verkleind.

## 4. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Bij de behandeling van de voorkomende processen bij de vochtgehaltemetingen met behulp van neutronen is gebleken, dat waterstofkernen een zeer specifiek effect geven in vergelijking met de andere elementen in de grond. Als de neutronenbron en de teller zeer dicht bij elkaar worden geplaatst, is de intensiteit van de langzame neutronen in hoofdzaak een functie van de waterstofatomen.

Het is mogelijk om theoretisch het verband te berekenen tussen de neutronendichtheid en het vochtgehalte. Het voorkomen van andere verbindingen met waterstof maakt het noodzakelijk, dat voor iedere grond experimenteel calibratiecurven worden gemaakt.

Het bemonsterde volume heeft grote afmetingen, die groter worden naarmate het vochtgehalte van de grond lager is. Er zijn speciale voorzieningen nodig om het vochtgehalte van de bovenste 15 tot 30 cm van de grond te meten. Het nauwkeurig bepalen van het vochtgehalte in lagen van 5 tot 10 cm dikte is niet mogelijk.

Bij vochtgehalte-metingen met behulp van gammastralen heeft het in verbindingen voorkomende waterstof geen specifieke werking. In het energiegebied van 0.4 tot 2 mev wordt de absorptiecoëfficiënt alleen beheerst door het Compton effect. In dit energiegebied is de massa-absorptiecoëfficiënt voor alle elementen met atoomnummer 2 tot 30 gelijk. De massa-absorptiecoëfficiënt is daarom een directe maat voor het nat-volumegewicht. Veranderingen in de waarde van de absorptiecoëfficiënt geven direct een maat voor de verandering in vochtgehalte als het droog-volumegewicht van de grond gedurende een zekere periode constant blijft.

Als geen gebruik wordt gemaakt van een selectief werkende ontvanger is het maken van een calibratiecurve noodzakelijk.

Het meten van het vochtgehalte in de grond is voor lagen met een dikte vanaf ongeveer 5 cm mogelijk. Als selectief werkende ontvangers kunnen worden toegepast, wordt de laagdikte alleen bepaald door de verticale afmetingen van bron en ontvanger.

Bij een verdere technische ontwikkeling van de apparatuur zal vooral de vochtbepaling met behulp van gammastralen zeer goede toepassingsmogelijkheden kunnen geven.

## L I T E R A T U U R

- BAVEL, C. H. M. VAN, E. E. HOOD en N. UNDERWOOD. 1954. Trans. Am. Geoph. Union 35: 595.
- BAVEL, C. H. M. VAN, N. UNDERWOOD en S. R. RAGAR. 1957. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21: 588.
- DAVISSON, C. M. en R. D. EVANS. 1952. Rev. of Modern Physics 24: 79.
- GARDNER, W. en D. KIRKHAM. 1952. Soil Sci. 73: 391.
- HEITLER, W. en F. SAUTER. 1933. Nature 132: 892.
- HOLMES, J. W. 1956. Austr. J. Appl. Sci. 7: 45.
- HOLMES, J. W. en K. G. TURNER. 1958. J. Agr. Eng. Res. 3: 199.
- JAEGER, J. C. en H. R. HULME. 1936. Proc. Roy. Soc. London 153a: 443.
- MORTIER, P. en M. DE BOODT. 1956. Neth. J. Agr. Sci. 4: 111.
- OREAR, J., A. H. ROSENFELD en R. A. SCHLUTER. 1949. Nuclear Physics. Univ. Chicago Press.
- STOLZY, L. H. en G. A. CAHOON. 1957. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21: 571.
- SIRI, W. E. 1949. Isotopic Tracers and Nuclear Radiations. McGraw Hill Book Comp., New York.
- VOMOCIL, J. A. 1954. Agr. Eng. 35: 651.
- VOMOCIL, J. A. 1955. Proc. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy 12: 223.

# SOME PHYSICAL ASPECTS OF THE USE OF RADIOACTIVE MATERIALS IN THE MEASUREMENT OF SOIL MOISTURE

P. E. RIJTEMA

## SUMMARY

Discussion of the physical processes governing the measurement of soil moisture by means of neutron scattering makes it clear that hydrogen gives a specific effect in contrast with the other elements present in the soil. The measured density of scattered thermal neutrons is mainly a function of the hydrogen atoms if source and counter are placed close together.

It is possible to calculate on a theoretical basis the relation between density of scattered thermal neutrons and soil moisture content.

Other chemical combinations of hydrogen, besides water, make it necessary to use calibration curves for each soil separately.

The volume of the sample must have large dimensions, varying with the soil moisture content. Special provisions are necessary to measure the moisture content in the top layer (15 to 30 cm) of the soil. It is not possible to measure the moisture content with great accuracy in thin layers of 5 to 10 cm.

There are also possibilities in using gamma rays for the measurement of the moisture content. The absorption of gamma rays in the energy range from 0.4 to 2 mev is governed by the Compton effect.

The mass-absorption coefficient of elements with an atomic number between 2 and 30 is the same, when using the same radiation energy. Changes in the value of the mass-absorption coefficient give a direct measure of the changes in the moisture content when the dry-bulk density of the soil remains constant during a longer period.

The counters do not measure selectively primary radiation, secondary radiation is also registered, so calibration curves for measured radiation and density are necessary.

The measurement of changes in moisture content in thin layers (5 to 10 cm) is possible.

Further technical development of the apparatuses, to be used for the measurement of the moisture content with gamma rays, will give this method good possibilities for application.

