OPZOEKINGSCENTRUM VOOR DE WEGENBOUW

Brussel

Werkwijze voor de laboratoriummeting van de doorlatendheidscoëfficiënt van zand bij volledige verzadiging

Meetmethode O.C.W.

MN. 31/68

BRRC-PUB-MN31_68

WERKWIJZE VOOR DE LABORATORIUMMETING VAN DE DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT VAN ZAND BIJ VOLLEDIGE VERZADIGING

Samenstelling van de werkgroep van het O.C.W.

"Aanbeveling inzake het meten van de doorlatendheid van zand"

Voorzitter :	de H.	G. VANDENABEELE	Ere-e.a. Ingenieur van de Provinciale Technische Dienst van Antwerpen
Verslaggever :	de H.	R. VAN GANSE	Diensthoofd bij het O.C.W.
Leden :	de HH.	E. DE BEER	Directeur generaal van het Rijksinstituut voor Grondmechanica en hoogleraar aan de Universiteiten van Gent en Leuven
		A. DOYEN	Hoofdingenieur-directeur van Bruggen en Wegen, afgevaardigde van het Bestuur der Wegen van het Ministerie van Openbare Werken
		A. FAGNOUL	Hoogleraar aan de Universiteit te Luik
		J. NUYENS	Docent aan de Universiteit te Brussel
		J. REICHERT	Hoofd van de Wetenschappelijke Afdeling, Adjunct-directeur aan het O.C.W.
		G. REYNTJENS	Hoogleraar aan de Universiteit te Leuven.

-oOo-

SAMENVATTING

De aanbevolen werkwijze handelt over de laboratoriummetingen van de doorlatendheidscoëfficiënt van zand, dat verzadigd is en waarvoor deze coëfficiënt tussen 0,1 en 0,001 cm/s begrepen is.

De werkwijze wordt voorafgegaan door een beschrijving van de apparaten en hun ijkingen, en van de eisen inzake de eigenschappen van het gebruikte water.

Vooraleer tot de debiet- en gradiëntmetingen overgegaan wordt, wordt de volledige verzadiging van het proefstuk door twee opeenvolgende bewerkingen bekomen :

a) verwijdering van de in het proefstuk bevatte lucht bij middel van het vacuum van een waterstraalluchtpomp ;

b) toelating van ontlucht water langs een toevoer met een hydraulische weerstand (kapillair buisje), die voldoende is om de snelheid van het water zo te beperken dat de afvoering van fijne korrels onmogelijk is.

Vervangt Aanbeveling O.C.W. - A. 21/60.

INLEIDING

Het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw heeft in 1965 een onderzoek gewijd aan een aantal grondmechanische eigenschappen van de Belgische zandsoorten (ref. 1). Hierbij is gebleken, dat de resultaten van de metingen van de doorlatendheidscoëfficiënt van zand, die door de keuringslaboratoria volgens de destijds gangbare werkwijzen werden uitgevoerd, onvoldoend reproduceerbaar waren. Alhoewel deze resultaten steeds tot een referentietemperatuur (10°C) herleid waren, en de doorlatendheid bij een poriënvolume van 0,4 bedoelden weer te geven, waren zij toch zeer disparaat en konden voor éénzelfde zandsoort, naar gelang van het laboratorium dat de meting uitvoerde en de toegepaste werkwijze, tot met een factor 20 uiteenlopen.

Het was dus niet te verwonderen dat er zich talrijke geschillen voordeden wanneer door het Bestuur een minimumwaarde van de doorlatendheidscoëfficiënt als opleveringsvoorwaarde inzake voor draineerlagen van wegen bestemd zand werd voorgeschreven.

Een statistisch onderzoek van enige honderden meetresultaten heeft uitgewezen, dat deze spreiding door verscheidene factoren veroorzaakt werd. Als belangrijkste factor kwam de veranderlijkheid van de verzadigingsgraad van de zandproefstukken, waarvan de doorlatendheid gemeten werd, aan het licht. Verder bleek het referentieporiënvolume 0,4 voor een aantal zandsoorten met ongelijkvormige korrelverdeling belangrijk groter te zijn dan wat met de pakkingsgraad van het behoorlijk verdichte zand overeenstemt, zodat proefstukken met dit referentieporiënvolume gedurende het meten van de doorlatendheidscoëfficiënt konden inklinken, hetgeen de metingen foutief maakte. Tenslotte werd ook nog vastgesteld, dat bepaalde onzuiverheden in het voor de metingen gebruikte water het meetresultaat in een veranderlijke, van de mineralogische samenstelling afhankelijke, mate nadelig kunnen beïnvloeden.

Om aan deze onzekerheid een einde te maken werd door het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (ref. 1) een nieuwe methode voor de laboratoriummeting van de doorlatendheidscoëfficiënt van zand voor draineerlagen van wegen ref. 4) uitgewerkt. Het is welbekend, dat de doorlatendheidscoëfficiënt in situ van een gegeven zandsoort niet constant, doch van verscheidene veranderlijke factoren afhankelijk is, nl. van de temperatuur, de pakkingsdichtheid en de verzadigingsgraad. De laboratoriummeting moet evenwel, wanneer het een keuring in verband met een opleveringsvoorwaarde betreft, reproduceerbare resultaten opleveren; deze meting moet dus onder welbepaalde voorwaarden, die eenvormig door de verschillende laboratoria verwezenlijkt worden, uitgevoerd worden.

De in de vroegere werkwijzen vervatte foutbronnen en spreidingsfactoren moesten dus uitgeschakeld worden. Daarom omvat de nieuwe methode een behandeling, waardoor het zandproefstuk volledig met water verzadigd wordt; het proefstuk wordt ook voldoende verdicht om latere inklinking te vermijden, en de nodige hoedanigheden van het te gebruiken water worden vermeld.

Deze nieuwe werkwijze werd op zandsoorten van verschillende types door de verscheidene Belgische laboratoria proefsgewijze toegepast. Alhoewel het uitvoerend personeel niet vertrouwd was met sommige in de nieuwe werkwijze voorgeschreven bewerkingen, bleken de resultaten op 10% na reproduceerbaar tussen verschillende laboratoria.

Gezien de gunstige afloop van deze proeven werd in 1966 door het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw een werkgroep van specialisten opgericht, om een aan de eisen van de organisatie van de grondmechanische laboratoria beantwoordende beschrijving van de modus operandi van de nieuwe methode in alle bijzonderheden vast te leggen.

Deze werkgroep, waarvan de samenstelling hiervoor vermeld wordt, heeft geconcludeerd dat het wenselijk is, de hierna beschreven modus operandi als aanbeveling van het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw te publiceren.

Deze Aanbeveling A 31/68 vervangt Aanbeveling O. C. W. -A 21/60, welke hiermede komt te vervallen.

INDELING VAN DE AANBEVELING

Deze aanbeveling bestaan uit 4 delen :

Het eerste deel behandelt het doel en de principes van de methode.

Het tweede deel bestaat uit 3 hoofdstukken :

Hoofdstuk I : Beschrijving van de nodige apparatuur (*),
Hoofdstuk II: IJkingen,
Hoofdstuk III: Vereisten inzake de eigenschappen van het gebruikte water.

Het derde deel is de eigenlijke modus operandi.

In het vierde deel, dat de titel "Commentaar" draagt, is een aantal inlichtingen bijeengebracht, dat niet noodzakelijk moet worden gelezen door wie de metingen uitvoert, doch bepaalde voorschriften van de werkwijze rechtvaardigen, en ook voor het interpreteren van de resultaten van nut kunnen zijn.

oOo

(*) De werktekeningen van de aanbevolen apparaten en raadgevingen hieromtrent zijn verkrijgbaar bij het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw.

1. - DOEL VAN DE METHODE

Dit doel is de bepaling, een opleveringsvoorwaarde, van de doorlatendheidscoëfficiënt van voor draineerlagen of draineerinrichtingen bestemde natuur- of brekerzandsoorten, vertegenwoordigd door geroerde monsters en hoofdzakelijk bestaande uit korrels waarvan de diameter tussen 4,76 mm en 0,074 mm ligt.

2. - TOEPASSINGSGEBIED

De beschreven werkwijze en apparatuur zijn geschikt voor het meten van de doorlatendheidscoëfficiënt van zandproefstukken indien deze coëfficiënt bij 10°C tussen 0,001 en 0,1 ligt. De werkwijze kan ook worden toegepast wanneer de doorlatendheidscoëfficiënt tussen 0,0001 en 0,001 of tussen 0,1 en 1 ligt, doch in deze gevallen kunnen de resultaten fouten bevatten die niet tevoren berekenbaar zijn (*).

3. - GRONDSLAGEN VAN DE METHODE

3.1. - ALGEMEEN PRINCIPE.

De doorlatendheidscoëfficiënt voor water van een poreus materiaal (of coëfficiënt van Darcy) wordt bepaald door meting van het debiet van een constante, verticale, opstijgende, laminaire stroming door een volledig verzadigd proefstuk waarvan de afmetingen en het poriënvolume bekend zijn, en gelijktijdige meting van het drukverlies en de temperatuur :

(*) Zie commentaar, a.

$$k\ (\theta°,\ n) = \frac{\dot{v}}{i} \qquad (1)$$

waarin $k\ (\theta,\ n)$ = de doorlatendheidscoëfficiënt bij θ°C voor een poriënvolume n (cm/s);
$\dot{v}$ = de filtersnelheid = het debiet per doorsnede-eenheid (cm/s);
i = het hydraulische verhang van de doorstroming (dimensieloos)

met

$$\dot{v} = \frac{Q}{A} \qquad (2)$$

waarin Q = het debiet dat door het proefstuk heen stroomt (cm^3/s);
A = de doorsnede van het proefstuk (cm^2) normaal op de stroomrichting;

en

$$i = \frac{h}{L} \qquad (3)$$

waarin h = het drukverlies, uitgedrukt in cm waterkolom (cm);
L = de hoogte van het proefstuk in de stroomrichting (cm).

3. 2. - OMREKENING VOOR DE TEMPERATUUR.

Om de op eenzelfde zandsoort (steeds volledig verzadigd) bij verschillende temperaturen en met verschillende poriëngehalten uitgevoerde metingen met elkaar te kunnen vergelijken, wordt een bij θ°C en met een poriëngehalte n gemeten doorlatendheidscoëfficiënt altijd herleid tot de waarde k (10°C, n), die deze coëfficiënt zou hebben bij de temperatuur 10°C en met hetzelfde poriëngehalte (*).

Deze omrekening geschiedt met behulp van de volgende formule :

$$k\ (10°,\ n) = k(\theta,\ n).\frac{\eta_\theta}{\eta_{10}} \qquad (4)$$

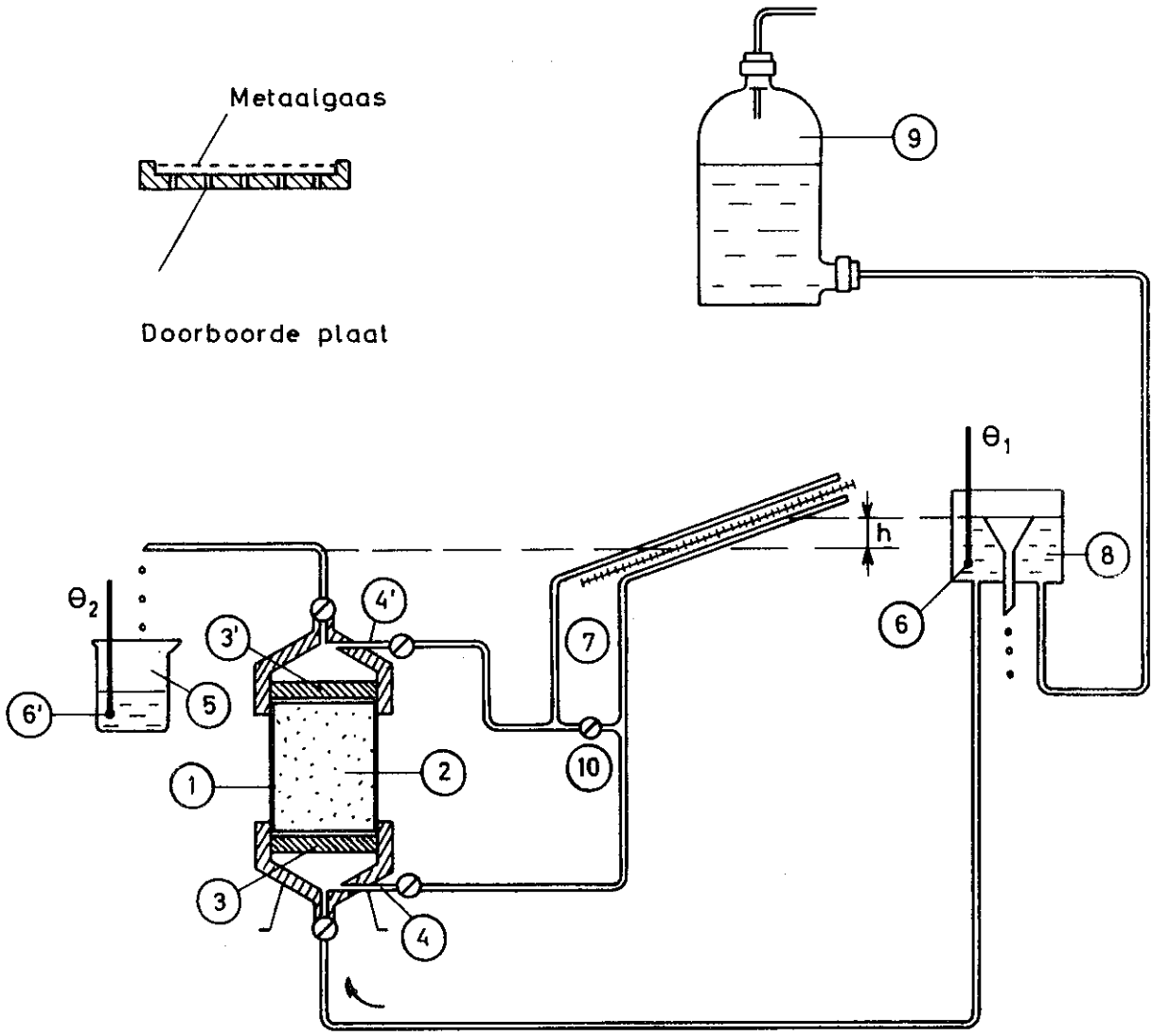
(*) Zie voor eventuele omrekening tot een poriëngehalte Commentaar, b.

waarin $k(\theta, n)$ = de doorlatendheidscoëfficiënt bij θ°C en poriënvolume n,
$k(10°, n)$ = doorlatendheidscoëfficiënt bij 10°C en hetzelfde poriënvolume n,
$\eta\,\theta$ = viscositeit van water bij θ°C (poises)
$\eta\,10$ = viscositeit van water bij 10°C (poises).

Een tabel in Bijlage I geeft de waarden van de verhouding η_θ/η_{10} als functie van de temperatuur θ.

oOo

Bijzonderheden van (3)



PERMEAMETER - OPSTELLING

(1)	Mal	(6) (6')	Thermometers
(2)	Proefstuk	(7)	Piezometer met hellende buizen
(3) (3')	Filterstukken	(8)	Voeding met constant peil
(4) (4')	Drukaftakkingen	(9)	Voorraadfles met ontlucht water
(5)	Afvoer - meetvat	(10)	Drukevenwichtskraantje

Hyd 5.476

FIG. 1

HOOFDSTUK I

APPARATUUR

4. - PERMEAMETER

4. 1. - ALGEMENE BESCHRIJVING

Dit door schema fig. 1 en foto 2 weergegeven apparaat bestaat uit :

- een cilindrische mal die het proefstuk bevat;
- twee doorlatende systemen die tegen onder- en bovenkant van de mal geplaatst worden;
- een onderstuk waarin het onderste doorlatende systeem en de onderkant van de mal passen; hierop is een watertoevoer met kraantje gemonteerd;
- een bovenstuk, dat op de bovenkant van de mal en het bovenste doorlatende systeem past; dit is voorzien van een waterafvoerbuis met kraantje.

Twee aftakkingen voor het meten van de druk, met kraantjes, zijn hetzij in het onder- en het bovenstuk, hetzij in de watertoevoer- en afvoerbuizen aangebracht.

De verschillende onderdelen moeten gemakkelijk ineengebouwd kunnen worden; het geheel moet zo luchtdicht zijn, dat wanneer het apparaat tot een luchtdruk van niet meer dan 20 mm Hg leeggepompt en daarna afgesloten wordt, de luchtdruk met niet meer dan 5 mm Hg per uur toeneemt.

Wanneer de luchtdichtheid wordt verkregen door vervormbare dichtingen, moet de samendrukking van deze laatste zodanig reproduceerbaar zijn, dat het inwendige volume van het ineengebouwde apparaat op $\pm$ 1 cm^3 na constant blijft.

4. 2. - MAL

Dit is een standaard-Proctor-Mal, van ongeveer 4" = 101, 6 mm inwendige diameter en ongeveer 4, 6" = 117 mm hoogte. De werkelijke waarden van de gemiddelde diameter en de gemiddelde hoogte moeten door de in § 14 voorgeschreven ijking worden bepaald.

De toebehoren van de mal zijn (zie foto 3) :

- een bodemplaat,
- een opzetstuk,
- een handstampertje, bestaande uit een metalen schijfje van 3 à 4 cm diameter en ongeveer 0, 5 cm dikte, met steel, om de in de mal gebrachte zandlagen vóór hun verdichting te effenen,
- een stijf metalen afstrijklatje met scherpe kant.

4. 3. BIJ DE PERMEAMETER BEHORENDE DOORLATENDE SYSTEMEN.

Elk van deze twee systemen bestaat uit :

- een schijf van metaalgaas, waarvan de diameter gelijk is aan die van het proefstuk. Er moeten twee stellen van deze schijven, met maasopeningen van 590, 420, 297, 210, 149 en 105 micron, beschikbaar zijn;
- een doorboorde metalen plaat, die het gaas tegen het proefstuk drukt.
  Deze plaat is maximaal 0, 5 cm dik en is voorzien van minstens 200 gaatjes van minstens 0, 2 cm diameter.

5. - VALHAMER VOOR HET VERDICHTEN

De gebruikte valhamer is van het Marshall-type, met een voet van 98, 5 mm diameter, waarop via een aambeeld de stoot van een vallende massa van 4. 536 g wordt overgebracht. De valhoogte, die bij andere proeven 18" = 457 mm bedraagt, wordt hier tot 12" = 305 mm begrensd door middel van een pin, die in een op de juiste hoogte in de leistaaf aangebracht boorgat gestoken wordt.

6. - OPSTELLING VOOR HET VERZADIGEN VAN HET PROEFSTUK

Deze door het schema fig. 4 en de foto fig. 5 weergegeven opstelling bestaat uit :

- een voorraadfles met ontlucht water, minimum inhoud 1 liter, maar bij voorkeur 5 of 10 liter; deze fles is geplaatst op een hoogte van 1 tot 1,5 m boven de onderkant van de permeameter;
- een waterleiding, uitgaande van de onderkant van de voorraadfles, en die aan de onderkant van de permeameter kan worden aangesloten. Deze leiding omvat een capillair gedeelte dat kortgesloten kan worden. Het capillair moet minstens 20 cm lang zijn en zijn inwendige diameter mag niet groter zijn dan 0,060 cm (6/10 mm) (*);
- een luchtleiding, die uitgaat van de bovenkant van de voorraadfles, en met het bovenstuk van de permeameter kan worden verbonden. Deze leiding omvat een vangfles voor het uit de permeameter aan het einde van het verzadigingsproces uitstromende water; op de leiding zijn aangesloten : een manometer, waarop absolute drukken van 10 tot 100 mm Hg op ±1 mm Hg afgelezen kunnen worden, een vacuumleiding, en een inlaat voor de atmosferische druk.

De water- en luchtleidingen moeten, wanneer de hierin heersende druk niet meer dan 20 mm Hg bedraagt, even luchtdicht zijn als de permeameter (Zie § 4.1) (**).

7. - VOEDINGSINRICHTING MET CONSTANT PEIL

Deze in de hoogte verstelbare inrichting wordt gevoed door één of meer voorraadflessen met ontlucht water en kan met het onderstuk van de permeameter worden verbonden. Het water moet beantwoorden aan de voorschriften van §§ 18 en 19.

(*) Zie commentaar, c.
(**) Zie commentaar, d.

8. - PIEZOMETER-INRICHTING

Deze inrichting bestaat uit twee doorschijnende buizen van ongeveer 1 cm diameter en 40 cm lengte; deze zijn evenwijdig, naast een in millimeters verdeelde schaal, zodanig op een plankje bevestigd dat de buizen een hoek α van ongeveer 11°30' met het horizontale vlak vormen (*). Het plankje is voorzien van een schietlood, dat toelaat te controleren of de stand van de inrichting overeenstemt met die bij de in § 17 beschreven ijking.

De bovenste uiteinden van beide buizen staan vrij in verbinding met de buitenlucht; de onderste uiteinden kunnen door middel van slangen op de drukmetingsaftakkingen van de permeameter worden aangesloten. Een verbinding, met kraantje, tussen beide buizen maakt het mogelijk een drukevenwicht in te stellen.

Wanneer aan de twee aftakkingen niet dezelfde waterdruk heerst, zullen de meniscussen in de twee buizen een afstand ℓ afwijken van de stand bij gelijke druk. Het in cm waterkolom uitgedrukte drukverschil is dan $\ell \sin \alpha$. De constante $\sin \alpha$ van het apparaat wordt eens en voor altijd door ijking bepaald (zie § 17).

9. - THERMOMETERS

Twee op $\pm$ 0,1°C afleesbare, geijkte thermometers bevinden zich in de voedingsinrichting met constant niveau en in het vat, waarin het uit de permeameter stromende water wordt opgevangen. Men neemt als temperatuur van de proef het gemiddelde van beide aflezingen.

10. - CHRONOMETER

Afleesbaar op $\pm$ 0,2 s.

(*) Zie commentaar, e.

11. - BALANSEN

Men moet over verschillende balansen beschikken :

a) - draagvermogen 10 kg, gevoeligheid 1g, voor het wegen van de mal en de permeameter;
b) - draagvermogen 2 kg, gevoeligheid 0,05 g, voor het wegen van het uitgestroomde water;
c) - draagvermogen 150 g, gevoeligheid 0,01 g, voor de watergehaltebepalingen.

12. - DROOGSTOOF

Op 110°C voor de bepaling van het watergehalte van het winddroge zand.

13. - KLEIN LABORATORIUMMATERIAAL

- Weegflesjes, met bekende tarra;
- Schepjes en spatels;
- Bekerglazen van 400 en 1000 ml, met bekende tarra;
- Erlenmeyerkolfjes van 25, 100 en 250 ml, met bekende tarra.

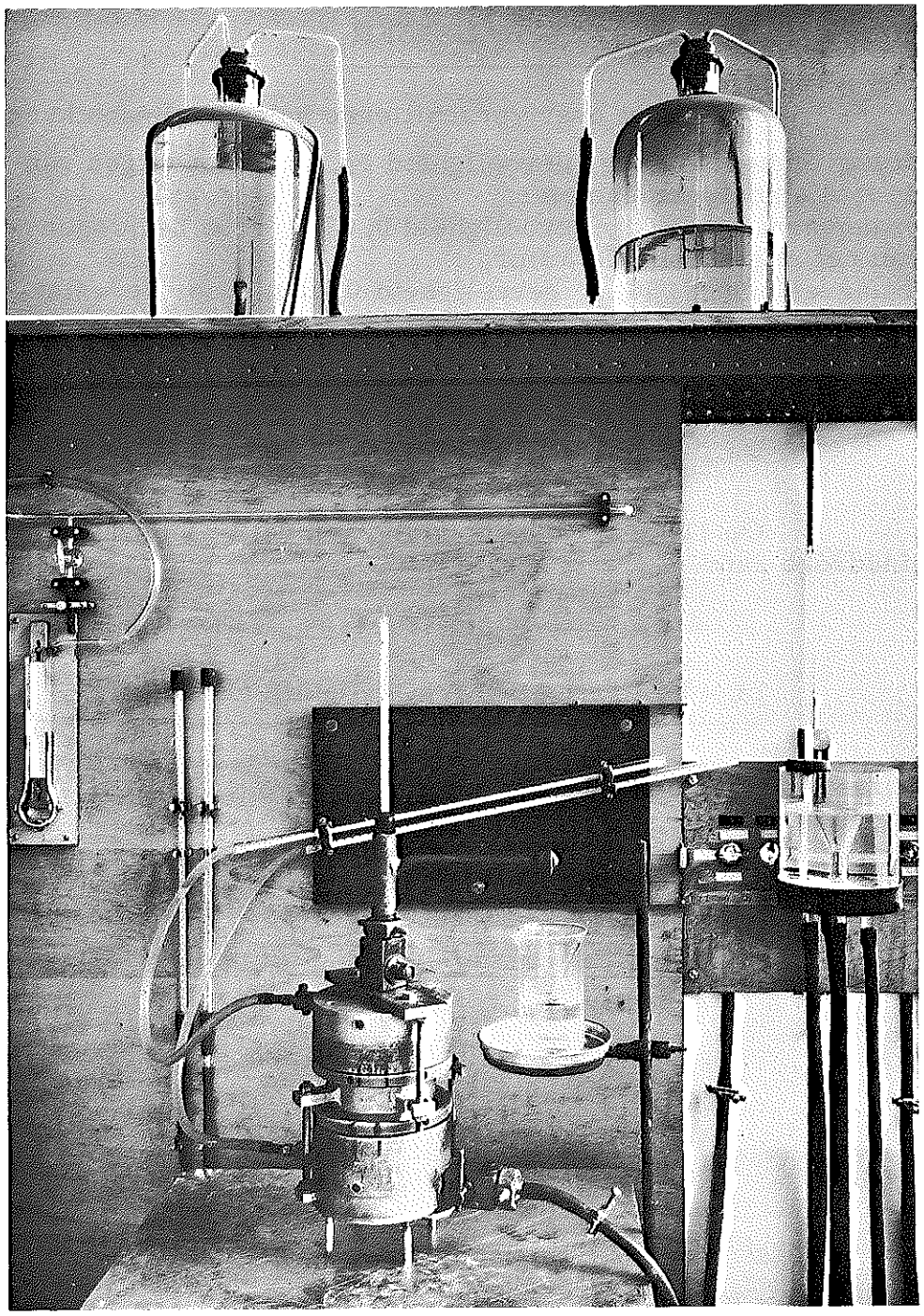


Fig. 2

Opstelling voor het bepalen van de doorlatendheidscoëfficiënt

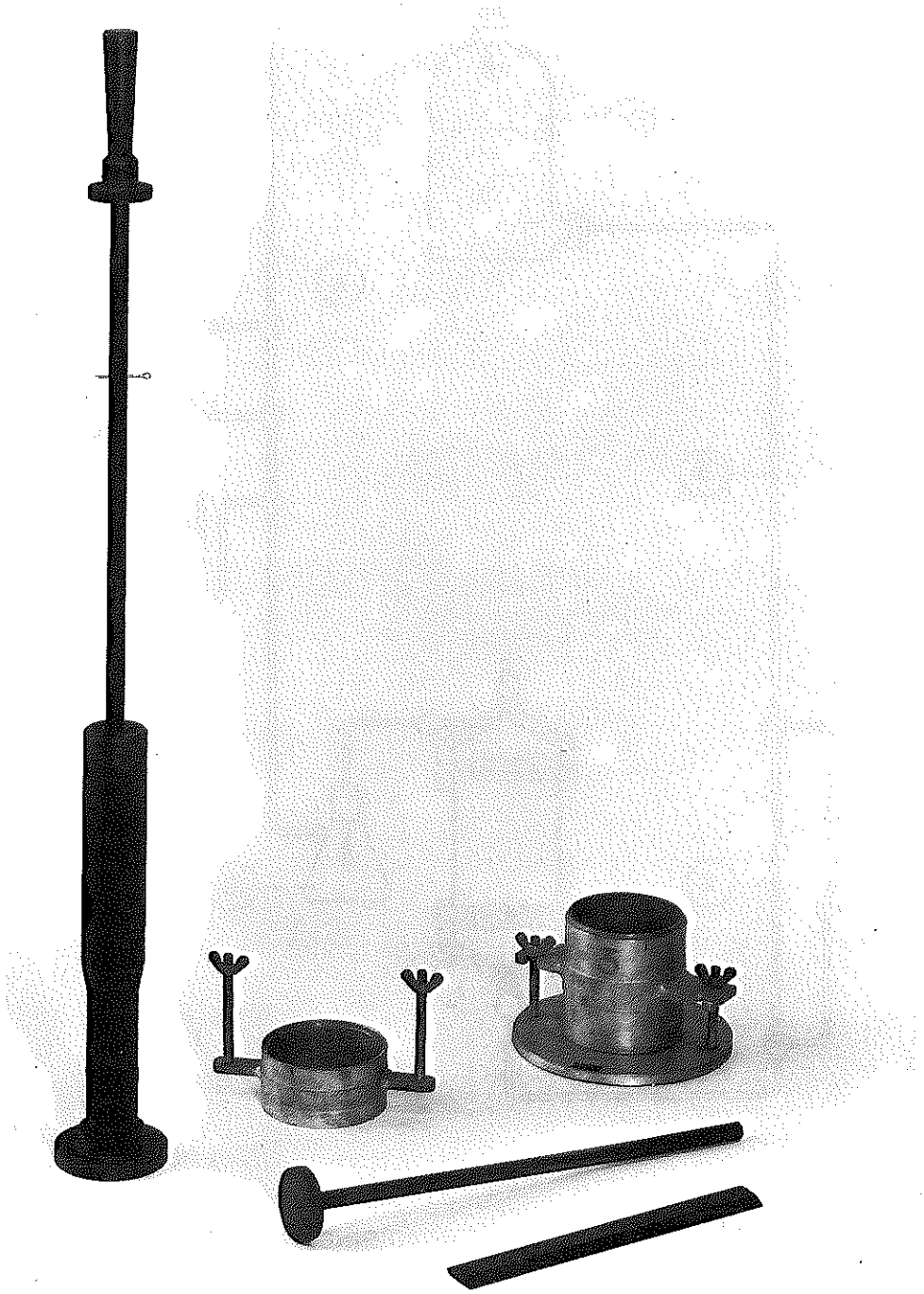
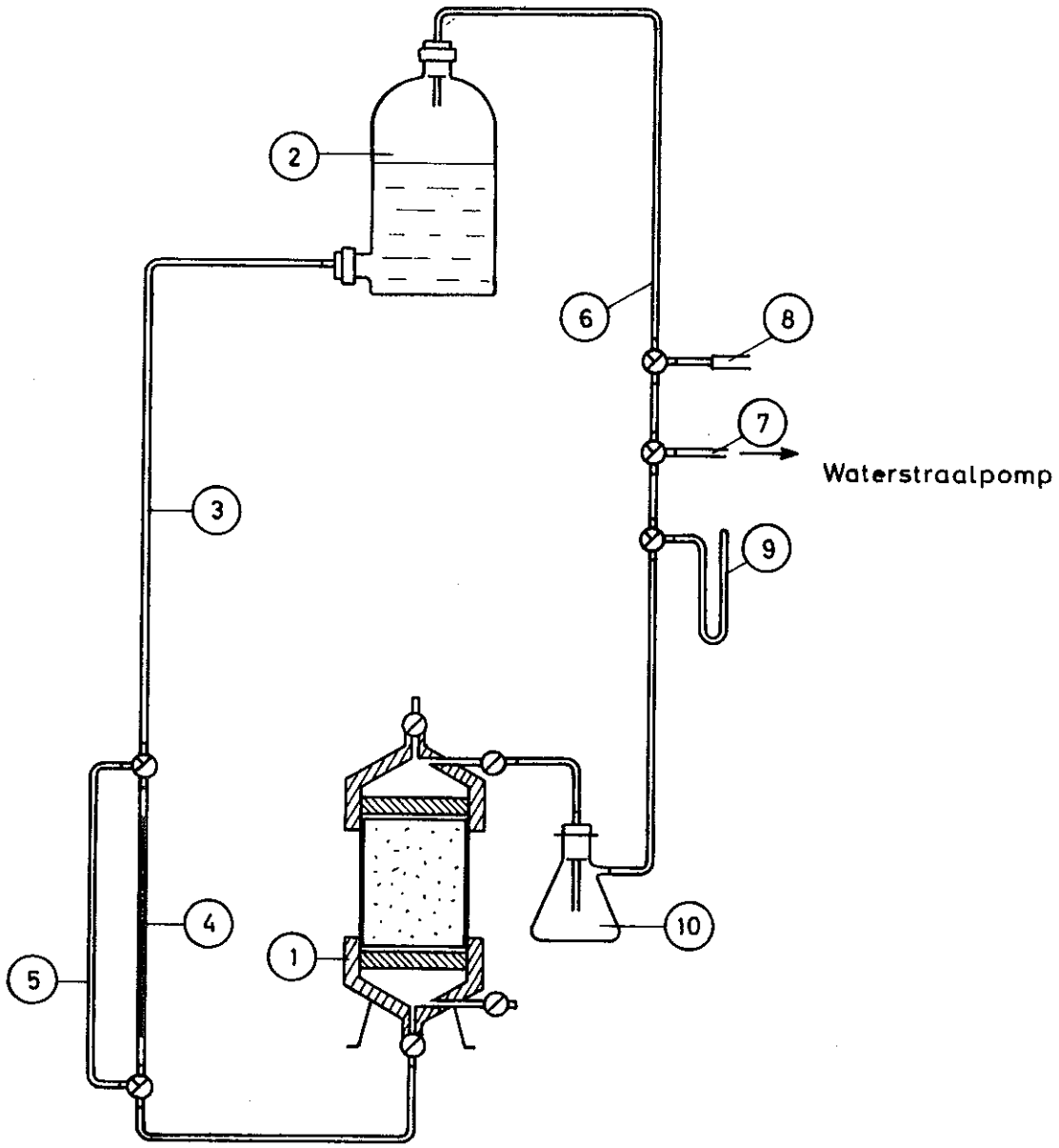


Fig. 3 O.C.W. 46.714

Standaard Proctor-mal met bodemplaat en opzetstuk,
Marshall-valhamer, handstampertje, afstrijklatje



OPSTELLING VOOR DE VERZADIGING VAN HET PROEFSTUK

1. Permeameter
2. Voorraadfles
3. Waterleiding
4. Capillair
5. Kortsluitleiding
6. Luchtleiding
7. Lage druk
8. Atmosferische druk
9. Manometer
10. Watervangvat

Hyd 5.477

FIG. 4

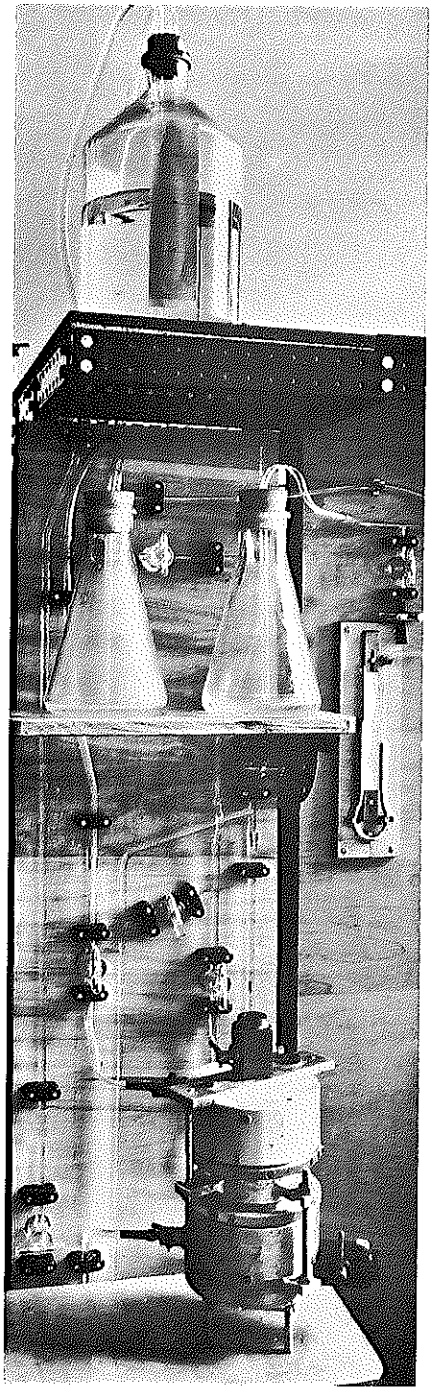


Fig. 5

Opstelling voor het volledig verzadigen van het proefstuk

HOOFDSTUK II

IJKINGEN

14. - AFMETINGEN EN VOLUME VAN DE MAL

Met behulp van een nauwkeurige schuifpasser meet men op 1/20 mm na de hoogte van de mal, zijn bovenste diameter en zijn onderste diameter in 3 diametrale vertikale vlakken die onderling hoeken maken van 60°. Men heeft dus 6 metingen van de hoogte, 3 metingen van de bovenste diameter en 3 metingen van de onderste diameter.

Men berekent de gemiddelde hoogte H (cm) door het rekenkundig gemiddelde te nemen van de 6 metingen.

Men berekent de gemiddelde diameter D (cm) door het rekenkundig gemiddelde te nemen van de 6 metingen.

Men berekent de doorsnede van de mal A met :

$$A = 0,7854\ D^2\ cm^2 \qquad (5)$$

De waarde van A wordt op de naastbijzijnde 0,001 cm^2 afgerond.

Men berekent het volume van de mal V met :

$$V = A.H \qquad cm^3 \qquad (6)$$

De waarde V wordt op de naastbijzijnde 0,1 cm^3 afgerond.

15. - GEWICHT VAN DE COMPLETE, LEDIGE PERMEAMETER P_o

Dit is het gewicht van het ledige apparaat met daarin de doorlatende systemen; daar het gewicht van de metalen zeven van hun fijnheid afhangt, moet deze constante voor elk paar zeven afzonderlijk worden bepaald.

Men dient er zich door herhaalde wegingen van te vergewissen, dat P_o op $\pm$ 1 g nauwkeurig bekend is.

16. - INWENDIG VOLUME VAN DE COMPLETE PERMEAMETER

Dit volume wordt bepaald door weging van het complete apparaat, zonder proefstuk, gevuld met ontlucht water, waarvan de temperatuur bij θ°C op 0,1°C nauwkeurig gemeten wordt. Men vergewist zich van de afwezigheid van luchtbellen door het apparaat enkele minuten te verbinden met het vacuum van een waterstraalpomp, waarna de vulling gecontroleerd en de weging herhaald wordt. Zij P_e het nettogewicht van het water na aftrek van de tarra P_o. Het inwendig volume v wordt gegeven door :

$$v = \frac{P_e}{\gamma_{w\theta}} \qquad (7)$$

waarin $\gamma_{w\theta}$ = het soortelijk gewicht van het water bij θ°C (g/cm^3). (Zie Tabel I).

Het volume v verandert met de fijnheid van de gebruikte zeven. Deze constante moet dus voor elk paar zeven afzonderlijk worden bepaald.

Bij de wegingen moeten de doorlaatopeningen van al de kraantjes van het apparaat steeds vol water zijn.

Wanneer de permeameter vervormbare dichtingen bevat moeten deze altijd even sterk samengedrukt zijn zodat v constant blijft.

De bewerking moet een voldoend aantal malen herhaald worden om er zeker van te zijn, dat v op $\pm$ 1 cm^3 na bekend is.

17. - MEETCONSTANTE VAN DE PIEZOMETER MET HELLENDE BUIZEN

De twee buizen van de piëzometer worden elk met een waterreservoir verbonden.

Het drukevenwichtskraantje wordt geopend : het waterpeil wordt dan in beide buizen gelijk. Men noteert de standen ℓ_{10} en ℓ_{20} van de 2 meniscussen.

Men sluit nu het drukevenwichtskraantje en verlaagt het peil van één der reservoirs met ongeveer 2 cm; men meet dit niveauverschil Δh met de kathetometer op 1/100 mm na. Men noteert de door de overeenstemmende meniscus ingenomen stand ℓ_{11}. De overeenstemmende waarde van de vermenigvuldigingsfactor van de piëzometer is

$$\frac{\ell_{11} - \ell_{10}}{\Delta h} = \frac{1}{\sin \alpha} \qquad (8)$$

waarbij α de helling is van de buis t. o. v. het horizontale vlak.

Men herhaalt de bewerking voor de andere buis en herhaalt ze ook opnieuw vanuit verschillende aanvangspeilen om de gehele lengte van de buizen te bestrijken.

De met (8) berekende waarden van $\frac{1}{\sin \alpha}$ moeten op een relatieve fout van $\pm 0{,}05\%$ na constant zijn.

HOOFDSTUK III

EISEN INZAKE HET GEBRUIKTE WATER

18. - ZUIVERHEID

Men gebruikt gedistilleerd water, of water van overeenstemmende zuiverheid (*).

19. - ONTLUCHTING

Het water moet zodanig ontlucht zijn dat het niet meer dan 1 mg opgeloste zuurstof per liter bevat (**).

De aanbevolen werkwijze voor het bepalen van het gehalte aan opgeloste zuurstof is die van Winkler (Bijlage 3).

oOo

(*) Zie commentaar, f.
(**) Zie commentaar, g.

20. - VOORBEREIDING VAN HET ZAND

Het te onderzoeken zand wordt :

a) - winddroog gemaakt, d.w.z. bij kamertemperatuur, of met lichte verwarming (max. 50°C), gedroogd tot op ± 0,2% na constant gewicht;
b) - homogeen gemaakt door herhaaldelijk zeven of omzetten, waarbij ervoor gezorgd wordt, dat geen stof verloren gaat.

De aldus bereide hoeveelheid zand moet minstens 5 kg per uit te voeren meting bedragen (*).

Vóór de aanvang van een proef controleert men het watergehalte van het winddroge zand op 0,1% nauwkeurig door droging bij 110°C van een hoeveelheid van ca. 20 g.

Verder moeten de volgende getalwaarden betreffende het bestudeerde zand bekend zijn :

- het soortelijk gewicht van de korrels γ_s, op 0,002 g/cm^3 nauwkeurig met de pyknometer bepaald;
- de gemiddelde korreldiameter x_{50} op ± 3%. Deze gemiddelde diameter is gelijk aan de maasopeningen van een denkbeeldige zeef waarop 50% van het zand zou blijven liggen, of nog, gelijk aan de abscis van het snijpunt van de korrelverdelingscurve met horizontale 50%-lijn in een korrelverdelingsdiagram (**).

21. - BEREIDING VAN EEN ZANDPROEFSTUK

In de mal van de permeameter, die op zijn bodemplaat staat en van zijn opzetstuk is voorzien, wordt het winddroge zand in 5 opeenvolgende lagen verdicht. Elke laag wordt eerst met het in § 4 beschreven handstampertje geëffend en krijgt

(*) Zie commentaar, h.
(**) Zie commentaar, i.

dan drie slagen van de in § 5 beschreven valhamer met 30,5 cm valhoogte. Na het verdichten van de vijfde laag wordt het opzetstuk weggenomen en de inhoud van de mal afgevlakt. De mal wordt op ± 0,5 g nauwkeurig gewogen (*).

Men berekent onmiddellijk het drooggewicht van het proefstuk M_d met :

$$M_d = \frac{M_c}{1 + \frac{w_o}{100}} \text{ g} \qquad (9)$$

waarin M_c = het nettogewicht van het proefstuk in g, afgerond op de naaste g;
w_o = het watergehalte van het winddroge zand in %, afgerond op het naaste 0,1%.

De volgens (9) berekende waarde van M_d wordt afgerond op de naaste gram.

Vervolgens berekent men het poriënvolume n van het proefstuk :

$$n = 1 - \frac{M_d}{V.\ \gamma_s} \text{ (dimensieloos, } 0 < n < 1) \qquad (10)$$

waarin V = de inhoud van de mal in cm^3, afgerond op het naaste 0,1 cm^3;
γ_s = het soortelijk gewicht van de korrels, in g/cm^3, afgerond op het naaste 0,001 g/cm^3.

De volgens(10) berekende waarde van n wordt afgerond op het naaste 0,001.

(*) Zie commentaar, j.

22. - KEUZE VAN HET METAALGAAS

Van de in § 6 beschreven schijven metaalgaas kiest men diegene, waarvan de maasopening het dichtst bij de gemiddelde korreldiameter x_{50} van de onderzochte zandsoort ligt.

23. - VERZADIGING VAN HET PROEFSTUK

De mal met daarin het proefstuk, de doorlatende systemen met het volgens § 22 gekozen metaalgaas, het onderstuk en het bovenstuk van de permeameter worden ineengebouwd. Het gesloten apparaat wordt met de lucht- en de waterleiding van de met het capillair uitgeruste verzadigingsinrichting verbonden. Het kraantje, dat verbinding geeft met de luchtleiding, wordt geopend, en de vacuumpomp in werking gesteld. Na enkele minuten moet de op de manometer afgelezen druk tot ongeveer 20 mm Hg zijn gedaald.

Het kraantje van de ontluchte waterleiding wordt dan geopend. Na enige tijd, die afhangt van de doorlatendheid van het proefstuk en van de hydraulische weerstand van het capillair, begint water uit de permeameter in de vangfles te vloeien. Men laat dan zeer langzaam de buitenlucht in de luchtleiding toe. Dadelijk houdt het afvloeien van water uit de permeameter op. Men laat de druk geleidelijk toenemen, zodanig dat hij na 3 minuten het dubbele bedraagt van de oorspronkelijke druk; daarna mag de druk elke minuut verdubbelen, tot de atmosferische druk wordt bereikt. De luchtleiding wordt dan afgesloten en men laat het apparaat verder vollopen tot aan de bovenste opening; men zorgt ervoor dat de doorlaatopeningen van alle kraantjes vol water staan. De permeameter wordt nu gesloten, van alle aansluitingen ontdaan en op $\pm$ 1 g nauwkeurig gewogen : gewicht P_1.
Men meet ook de temperatuur $\theta°$ van het water in de permeameter op $\pm$ 0,5° C.

Men berekent onmiddellijk de verzadigingsgraad S met de volgende formule, waarbij de massa van de lucht en de eventuele verandering van het volume van de permeameter met de temperatuur verwaarloosd worden :

$$S = \frac{1}{n}\left[1 - \frac{v}{V} + \frac{P_1 - P_o - M_d}{V.\ \gamma_w}\right] \text{(dimensieloos)} \quad (11)$$

waarin

P_o = het gewicht van de complete ledige permeameter, in g, op $\pm$ 1 g nauwkeurig;

v = het inwendig volume van de complete, ledige permeameter in cm^3, afgerond op de naaste cm^3;

V = het volume van de mal in cm^3, afgerond op het naaste 0,1 cm^3;

P_1 = het gewicht van de permeameter na verzadiging, in g, op $\pm$ 1 g nauwkeurig;

n = het poriënvolume van het proefstuk, afgerond op het naaste 0,001;

M_d = het drooggewicht van het proefstuk in g, afgerond op de naaste g;

γ_w = het soortelijk gewicht van water bij de temperatuur θ°C, in g/cm^3, afgerond op het naaste 0,0001 g/cm^3.

De volgens (11) berekende waarde van S wordt afgerond op het naaste 0,001.

Wegens de mogelijke ophoping van meet- en weegfouten kan de fout op de berekende waarde van de verzadigingsgraad S $\pm$ 0,03 bereiken.

Bijgevolg bestaat er, wanneer de door middel van (11) berekende waarde van S tussen 0,97 en 1,03 ligt, geen significante afwijking t. o. v. de waarde S = 1 die overeenstemt met volledige verzadiging. Men gaat dan over tot de debietmeting volgens § 24 hierna.

Indien de berekende waarde van S groter is dan 1,03 kan dit stellig onjuiste resultaat alleen het gevolg zijn van minstens één foutieve getalwaarde in de voor de berekening van S gebruikte gegevens. Men moet dan deze fout opsporen en verbeteren alvorens verder te gaan.

Zo ook wanneer de berekende waarde van S kleiner is dan 0,97 zal men eerst eventuele fouten opzoeken in de gegevens van de berekening. Wordt geen fout gevonden, dan verbindt men de permeameter met de opstelling voor de debietmeting en laat

gedurende een uur ontlucht water doorstromen zoals in 6° hierna aangeduid. Het apparaat wordt dan weer van zijn aansluitingen ontdaan en gewogen, en men berekent de nieuwe verzadigingsgraad. Men herhaalt deze bewerking tot twee bepalingen van de verzadigingsgraad met een tussenpoos van 1 uur waarden opleveren tussen 0,97 en 1,03. Zodra dit het geval is gaat men tot de debietmetingen over.

24. - DEBIETMETING

24.1. - INSTELLING

De permeameter met het volledig verzadigde proefstuk wordt verbonden met de voedingsinrichting, waarvan de overlaat oorspronkelijk ter hoogte van de uitstroomopening van de permeameter wordt geplaatst. Men verbindt de drukaftakkingen van de permeameter met de piëzometerbuizen. Men opent de kraantjes.

Men verhoogt nu geleidelijk de overlaat van de voedingsinrichting tot het hoogteverschil tussen beide meniscussen 25 tot 29 mm bereikt. Deze laatste waarde stemt overeen met een hydraulisch verhang van 0,25 (*).

Nu onderbreekt men even de voeding van de permeameter door de toevoerkraan te sluiten, en opent men het drukevenwichtskraantje van de piëzometer. Het waterpeil wordt dan in beide buizen weer even hoog en men noteert de standen ℓ 10 en ℓ 20 van de twee meniscussen, op $\pm$ 0,25 mm nauwkeurig. Het drukevenwichtskraantje wordt dan opnieuw gesloten en de toevoer van de permeameter weer geopend; de piëzometer wordt verder van tijd tot tijd in het oog gehouden.

De afvoer wordt nu ruw geschat door het in één minuut uitgestroomde water op te vangen in een gegradueerd cilindertje. Hierop steunend kiest men dan een getarreerde beker of kolf van passende grootte om de hoeveelheid water op te vangen, die in een tijd tussen 5 en 20 minuten zal afvloeien, zodanig dat deze hoeveelheid minstens 5 gram en hoogstens 1000 gram bedraagt, liefst echter tussen 20 g en 600 g (**).

(*) Zie commentaar, k.
(**) Zie commentaar, l.

Wanneer de aanduidingen van de piëzometer 30 minuten lang niet meer meetbaar veranderd zijn, veronderstelt men dat de doorstroming een constante heeft bereikt. Men gaat dan tot de eigenlijke meting over.

24. 2. - EIGENLIJKE METING

Met een snelle beweging plaatst men de getarreerde fles of beker onder de uitstroomopening van de permeameter, en precies op dit ogenblik stelt men de chronometer in werking.

De door de 2 thermometers aangegeven temperaturen θ_{10} en θ_{20} worden op $\pm$ 0, 1°C nauwkeurig opgetekend. De temperatuur benedenstrooms mag niet lager, en ook niet meer dan 0, 5°C hoger zijn dan de temperatuur bovenstrooms.

Men noteert eveneens de standen ℓ_{11} en ℓ_{21} en de standen van de meniscussen van de piëzometer ℓ_{12} en ℓ_{22}.

Wanneer de voorziene tijd ongeveer verstreken is neemt men snel het vat met het opgevangen water weg, en op hetzelfde ogenblik zet men de chronometer stil : zij T (seconden) de aangegeven tijd.

Men laat de doorstroming van de permeameter onveranderd voortgaan.

Het opgevangen water wordt onmiddellijk gewogen:

- op 0, 005 g nauwkeurig indien het nettogewicht tussen 5 g en 50 g ligt;
- op 0, 05 g nauwkeurig indien het nettogewicht tussen 50 g en 500 g ligt;
- op 0, 5 g nauwkeurig indien het nettogewicht boven 500 g ligt.

24. 3. - BEREKENINGEN.

Onmiddellijk na de weging van het opgevangen water berekent men :

a)- de gemiddelde standen van de meniscussen tijdens de doorstroming, hetzij

$$\frac{\ell_{11} + \ell_{12}}{2} \quad \text{en} \quad \frac{\ell_{21} + \ell_{22}}{2}$$

b)- de gemiddelde piëzometrische afwijking, die de som is van de afwijkingen tussen de gemiddelde standen van de meniscussen tijdens de doorstroming en hun standen bij gelijkheid van druk;

c)- het gemiddelde drukverlies h, dat het produkt is van de gemiddelde piëzometrische afwijking en de constante van de piëzometer;
h wordt opgetekend in cm, waarbij de berekende waarde wordt afgerond op het naaste 0,01 cm;

d)- de gemiddelde temperatuur θ°C, die het rekenkundige gemiddelde is van de 4 aflezingen; men rondt af op het naaste 0,1°C;

e)- het gemeten debiet Q, met :

$$Q = \frac{M}{T.\ \gamma_{w\theta}} \qquad cm^3/s \qquad (12)$$

waarin M = het gewicht van het in de getarreerde fles opgevangen water (g);
T = de gechronometreerde tijd, in s, op ± 0,2 s na;
$\gamma_{w\theta}$ = het soortelijk gewicht van water bij θ°C (g/cm^3), afgerond tot de naaste 0,001 g/cm^3 (zie Tabel Bijlage I).

De berekende waarde van Q wordt op het vierde betekenende cijfer afgerond.

f)- de doorlatendheidscoëfficiënt bij volledige verzadiging k (θ°, n) bij θ°C voor het poriëngehalte n van het proefstuk, met:

$$k\ (\theta°,\ n) = \frac{Q}{h} \cdot \frac{L}{A} \quad cm/s \qquad (13)$$

waarin L = hoogte van het proefstuk (cm), afgerond op het naaste 0,001 cm;
en A = doorsnede van het proefstuk (cm^2), afgerond op het naaste 0,001 cm^2.

De volgens (13) berekende waarde van k (θ°, n) wordt afgerond op het vierde betekenende cijfer.

g)- de doorlatendheidscoëfficiënt bij volledige verzadiging k (10°, n), herleid tot 10°C, voor het poriënvolume n van het proefstuk; deze omrekening geschiedt aldus :

$$k\,(10°,\ n) = k\,(\theta°,\ n).\frac{\eta_\theta}{\eta_{10}} \qquad cm/s \qquad (4)$$

In de tabel van Bijlage II vindt men waarden van de verhouding η_θ / η_{10} als functie van de temperatuur θ.

De berekende waarde van k (10°, n), die het resultaat is van de afzonderlijk beschouwde meting van de doorlatendheidscoëfficiënt, wordt op het derde betekenende cijfer afgerond.

25. - HERHALING VAN DE DEBIETMETINGEN EN VERKRIJGING VAN HET UITEINDELIJK RESULTAAT

De debietmeting en de ermee verbonden berekening van de doorlatendheidscoëfficiënt k (10°, n) worden minstens 3 maal achtereen met tussenpozen van 30 minuten verricht.

Zodra de derde uitslag verkregen is, berekent men het gemiddelde van de 3 verkregen uitslagen en de afwijkingen tussen dit gemiddelde en de 3 afzonderlijke uitslagen.

Indien geen van de 3 afwijkingen groter is dan 6/100 van het gemiddelde, worden de 3 uitslagen als overeenstemmend beschouwd (*) en is de proef beëindigd. Men gaat dan over tot de controlebewerkingen volgens § 26.

Indien daarentegen minstens één van de eerste drie uitslagen meer dan 6% van het gemiddelde afwijkt, wordt de proef voortgezet en verricht men nog 3 debietmetingen, steeds met minstens 30 minuten tussenpoos. Na de zesde meting wordt dan de proef beëindigd en gaat men over tot de controlebewerkingen volgens § 26.

(*) Zie commentaar, m.

26. - CONTROLEBEWERKINGEN

26. 1. - CONTROLE VAN DE VERZADIGINGSGRAAD NA DE METINGEN.

Na afloop van de debietmetingen wordt de permeameter gesloten, van alle aansluitingen ontdaan en gewogen. Men berekent opnieuw de verzadigingsgraad, waarbij het gewicht P_1, in formule 11 (§ 23) door het nieuw gevonden gewicht P_2 vervangen wordt. De aldus gevonden verzadigingsgraad moet tussen 0, 97 en 1, 03 liggen. Indien hij lager is dan 0, 97 wordt de proef als ongeldig beschouwd (*). Ligt hij hoger dan 1, 03 dan dient de fout waaruit dit voortvloeit te worden opgespoord en verholpen.

26. 2. - CONTROLE VAN HET VOLUME VAN HET PROEFSTUK NA DE METINGEN.

Men opent de onderste kraan van de permeameter en men laat een hoeveelheid water uitstromen waarvan het volume gelijk is aan dat van de bovenste kamer van het apparaat. Men neemt het bovenstuk en het bovenste doorlatende systeem weg en bekijkt het bovenvlak van het proefstuk. Men plaatst een afstrijklatje op zijn kant op de bovenrand van de mal. Tussen het latje en het bovenvlak van het proefstuk mag een met een zakking overeenstemmende afstand van hoogstens 1 mm zichtbaar zijn. Is de zakking groter dan 1 mm, dan wordt de proef als ongeldig beschouwd. De proef moet dan opnieuw worden uitgevoerd op een proefstuk met een grotere pakkingsdichtheid (**).

27. - METINGSRAPPORT

Behalve de voor het identificeren van het onderzochte zandmonster nodige gegevens, vermeldt het metingsrapport :

a)- De wijze van verdichting van het proefstuk;
b)- Het poriënvolume, volgens § 21, van het geteste proefstuk;

(*) Zie commentaar, n.
(**) Zie commentaar, j.

c)- De verzadigingsgraad vóór de metingen volgens § 23 en na de metingen volgens § 24. 2;
d)- Het soortelijk gewicht van de korrels γ_s ;
e)- De doorlatendheidscoëfficiënt bij volledige verzadiging voor het onder b) vermelde poriënvolume, na herleiding tot 10°C, namelijk :

- indien geen van de eerste drie uitslagen meer dan 6/100 van hun gemiddelde afwijkt :
  de drie opeenvolgende waarden van k (10°, n) en hun gemiddelde, met 3 betekenende cijfers;
- indien bovenstaande voorwaarde niet vervuld was, en er dus 6 debietmetingen werden verricht :
  de zes opeenvolgende waarden van k (10°, n) en hun gemiddelde, met 3 betekenende cijfers.

oOo

a. - TOEPASSINGSGEBIED EN NAUWKEURIGHEID VAN DE METHODE (§ 2)

Het debiet dat het proefstuk doorstroomt, en waarop de bepaling van de doorlatendheidscoëfficiënt gesteund is, mag een bepaalde grens, die van de onderzochte zandsoort afhankelijk is, niet overschrijden; anders bestaat er gevaar voor evenwichtsverlies van het proefstuk en medevoering van fijne deeltjes. Daarbij moet het lineair laminair karakter van de stroming gehandhaafd blijven. De voorschriften van § 24. 1 inzake het maximum verhang 0, 25 en van § 8 inzake de afmetingen van het capillair beantwoorden aan deze voorwaarden wat de zandsoorten met een doorlatendheidscoëfficiënt tussen 0, 001 en 0, 1 cm/s betreft. Bij toepassing van de vermelde voorschriften op een zandsoort, waarvan de doorlatendheidscoëfficiënt beneden 0, 001 cm/s ligt, is medevoering van fijne deeltjes mogelijk; anderzijds moet, wanneer de doorlatendheidscoëfficiënt groter is dan 10^{-1} cm/s, het verhang lager dan 0, 25 gehouden worden om de lineair laminaire stroming te handhaven, maar dan wordt de meting van het drukverval minder nauwkeurig.

b. - OMREKENING VAN RESULTATEN TOT EEN REFERENTIE-PORIENGEHALTE (§ 3. 2.)

Indien het nodig is, uitslagen van doorlatendheidsmetingen (bij volledige verzadiging en herleid tot 10°C) op proefstukken van éénzelfde zandsoort met verschillend poriënvolume met elkaar te vergelijken, dan kunnen deze resultaten conventioneel herleid worden tot een referentie-poriëngehalte met behulp van de volgende formule, die uit de betrekking van Kozeny (ref. 4) voortvloeit :

$$k\,(10°,\ n_o) = k\,(10°,\ n)\,\left(\frac{n_o}{n}\right)^3 \left(\frac{1-n}{1-n_o}\right)^2 \qquad (14)$$

waarin $k\,(10°,\ n)$ = de doorlatendheidscoëfficiënt bij poriënvolume n $(0 < n < 1)$,

$k\,(10°,\ n_o)$ = de doorlatendheidscoëfficiënt bij het referentie-poriënvolume n_o $(0 < n_o < 1)$.

c. - AFMETINGEN VAN HET CAPILLAIR (§ 6)

Volgens de wet van Poiseuille, is het debiet Q van een L cm lange cilindrische capillair waarvan de straal r cm bedraagt :

$$Q = \frac{\pi r^4 \rho g H}{8 \eta L} \qquad cm^3/s \qquad (15)$$

waarin
- ρ = de soortelijke massa van de vloeistof (gcm^{-3}),
- g = de door de zwaartekracht teweeggebrachte versnelling (981 cm s^{-2}),
- η = de viscositeit van de vloeistof (poise of gcm^{-1} s^{-1}),
- H = het drukverval, in cm vloeistofkolom, tussen de uiteinden van het capillair.

Voor water bij 20°C, met $\rho = 1$ gcm^{-3} en $\eta = 0,01$ poise wordt (15) :

$$Q = 3,85 \times 10^4 \frac{r^4 H}{L} \qquad cm^3/s$$

De hydraulische weerstand van het capillair, d. w. z. de verhouding H/Q, is dus

$$R_c = 2,6 \times 10^{-5} \frac{L}{r^4} \qquad s/cm^2$$

Voor het in § 6 voorgeschreven capillair met L = 20 cm en r = 0,03 cm is dan

$$R_c = 642 \ s/cm^2$$

Voor H = 150 cm is het debiet van dit capillair :

$$Q = \frac{H}{R_c} = \frac{150}{642} = 0,234 \ cm^3/s$$

Bij een poriënvolume van 0,4 is de totale doorsnede van de poriën van het proefstuk ongeveer 80 x 0,4 = 32 cm^2. De gemiddelde stroomsnelheid is dus 0,234 : 32 = 0,0073 cm/s. Met deze snelheid is volgens de wet van Stokes verplaatsing mogelijk van deeltjes, waarvan het soortelijk gewicht 2,65gcm^{-3} bedraagt, indien hun equivalente diameter niet groter is dan 9 micron.

Gedurende de verzadigingsoperatie is de hydraulische weerstand van het proefstuk, die veranderlijk is, bij die van het capillair te voegen, zodat de hierboven berekende maximumwaarden niet worden bereikt.

d. - LUCHTDICHTHEID VAN DE VERZADIGINGSOPSTELLING (§6)

De wanden van sommige kunststof-buizen zijn te doorlatend voor lucht om de gestelde eis te vervullen.

e. - CONSTANTE VAN DE PIEZOMETER MET HELLENDE BUIZEN (§ 8)

De hoek waarvan de sinus 0,20000 bedraagt is 11°32'13". Voor deze hoek is de vermenigvuldigingsfactor van de piëzometer dus precies 5. In werkelijkheid zijn de buizen nooit volmaakt recht en hun wanden nooit volmaakt evenwijdig; daarom is de door § 17 voorgeschreven ijking, door proefondervindelijke bepaling van de apparaatsconstante, noodzakelijk.

f. - ZUIVERHEID VAN HET WATER (§ 18)

Er werd vastgesteld, dat eenwaardige kationen, opgelost kooldioxyde en opgeloste of in suspensie verkerende organische stoffen een peptiserende werking kunnen uitoefenen op de zeer fijne deeltjes van sommige zandsoorten, met als gevolg een inwendige erosie van het proefstuk en een verlaging van de doorlatendheidscoëfficiënt met de tijd.

Water, waarvan de zuiverheid met die van gedistilleerd water overeenstemt, kan bereid worden met behulp van ionenuitwisselaars in het zgn. demineraliseringsproces; de kationen en anionen worden daarbij respectievelijk vervangen door H° en OH' ionen, die zich met elkaar verenigen.

Water kan als bevredigend voor doorlatendheidsmetingen beschouwd worden wanneer zijn analyse geen hogere gehalten aan onzuiverheden dan de hiernavermelde aantoont :

Gehalte aan K°	-ionen:	1 mg/ liter
Gehalte aan Na°	-ionen:	1 mg/ liter
Gehalte aan $Ca^{\circ\circ}$	-ionen:	1 mg/ liter
Gehalte aan $Mg^{\circ\circ}$	-ionen:	1 mg/ liter
Gehalte aan Cl'	-ionen:	1 mg/ liter
Gehalte aan SO_4''	-ionen:	1 mg/ liter
Gehalte aan PO_4'''	-ionen:	1 mg/ liter
Gehalte aan HCO_3'	-ionen:	20 mg/ liter
Gehalte aan organische stoffen (zuurstofverbruik)	:	10 mg/ liter
Gehalte aan detergente stoffen	:	0, 2 mg/liter

g. - ONTLUCHTING VAN HET WATER (§ 19)

Zuurstof is meer oplosbaar in water dan stikstof. Bij 20°C bevat met "lucht" verzadigd water ongeveer 10 mg/liter zuurstof en 15 mg/liter stikstof. De oplosbaarheid van deze gassen vermeerdert naarmate de temperatuur daalt.

De eenvoudigste werkwijze voor het ontluchten van water bestaat erin, het in fijne druppels verdeelde water in een gesloten ruimte, waarin een druk van ongeveer 2 cm kwik heerst (waterstraalpomp) te laten sijpelen, en te recycleren. Het gehalte aan opgeloste zuurstof kan aldus verminderd worden tot ongeveer 0, 2 mg/liter, wat overeenstemt met ongeveer 0, 5 mg opgeloste lucht per liter, hetzij minder dan 0, 5 cm^3 lucht per liter water.

Wanneer ontlucht water in een voorraadfles van een verzadigings- of debietmetingsopstelling sinds enkele tijd niet ververst werd en dus van luchtopname verdacht kan worden, kan men dit water snel opnieuw ontluchten zonder tussenkomst van de ontluchtingskringloop : het is voldoende, het water lichtjes te verwarmen door middel van een elektrisch verwarmend lint dat om de voorraadfles heen gewikkeld wordt, terwijl deze fles verbonden wordt met het vacuum van een waterstraalpomp. Het water begint dan bij lage temperatuur te koken en daardoor wordt de opgeloste lucht afdoende verwijderd.

Het gehalte aan opgeloste lucht kan gemakkelijk gemeten worden door een chemische bepaling van het zuurstofgehalte (methode van Winkler, zie Bijlage III). Men kan gemakkelijk nagaan of een ontoelaatbare hoeveelheid lucht in het water is opgelost, door een fles, die gevuld is met het te testen water, te verbinden met het vacuum van een waterstraalpomp : indien de wand overdekt wordt met luchtbelletjes (die verdwijnen wanneer de atmosferische druk wordt hersteld) is de ontluchting onvoldoend.

h. - VOORBEREIDING VAN HET ZAND (§ 20) HOEVEELHEID

De standaard-Proctormal zal ongeveer 1. 600 g verdicht winddroog zand bevatten. De voorbereide hoeveelheid zand laat dus toe, een nieuw proefstuk te bereiden indien het eerste om een of andere reden onbruikbaar mocht worden.

i. - VOORBEREIDING VAN HET ZAND (§ 20) GEMIDDELDE KORRELDIAMETER.

In vele gevallen zal het laboratorium, dat de doorlatendheidsmeting uitvoert, tevens opdracht gekregen hebben, de korrelverdeling te bepalen. De bepaling van de gemiddelde korreldiameter vraagt dan geen extra werk. In de andere gevallen is het voldoende , het zand met een vergrootglas te bekijken om zonder veel moeite twee opeenvolgende zeven uit de reeks 590, 420, 297, 210, 149 micron zodanig te kiezen, dat minder dan 50% op de eerste zeef blijft en meer dan 50% op de tweede. Een eenvoudige interpolatie tussen de door de twee zevingen opgeleverde cijfers geeft dan de gezochte gemiddelde korreldiameter x_{50}.

j. - VERDICHTING VAN HET ZAND (§ 21 en § 26. 2)

De door § 21 voorgeschreven verdichtingsenergie is kleiner dan die van de verschillende Proctorproeven. De reden hiervoor is, dat een wijziging van de korrelverdeling van het zand door verbrijzeling van broze korrels zoveel mogelijk dient te worden vermeden. Op een groot aantal Belgische zandsoorten van verschillende types is vastgesteld, dat de in § 21 voorgeschreven verdichting proefstukken oplevert met een pakkingsgraad, die voldoende is om zetting gedurende de doorstroming te voorkomen.

Mocht het echter bij een bijzonder zandtype voorkomen, dat bij de in § 26. 2 voorgeschreven controle van het volume na de meting een inklinking wordt waargenomen, dan zou het noodzakelijk zijn, een proefstuk met hogere pakkingsgraad te bereiden door een groter aantal valhamerslagen per laag te geven.

k. - HYDRAULISCH VERHANG (§ 24. 1)

Vermits het proefstuk 117 mm hoog is, stemt met een drukverval van 29 mm waterkolom een verhang van 29 : 117 = 0, 25 overeen. Het is raadzaam, met het grootste toegelaten verhang te werken, want aan de meting van een kleiner drukverval kleeft een grotere relatieve fout.

Zie ook Commentaar a.

l. - DUUR VAN DE DEBIETMETING (§ 24. 1)

De tijdsduur van de meting mag niet te kort zijn, anders wordt de relatieve fout op de gechronometreerde tijd te groot. De meting mag echter ook niet te lang duren, wegens het gevaar van verdamping van een gedeelte van het opgevangen water.

Een zandproefstuk met $k = 10^{-3}$ cm/s zal, onder een verhang van 0, 25, een debiet van $80 \times 10^{-3} \times 0,25 = 0,02$ cm^3/s doorlaten, dus 24 cm^3 in 20 minuten. Voor $k = 10^{-1}$ cm/s wordt het debiet, onder hetzelfde verhang, 2 cm^3/s, dus 600 cm^3 in 5 minuten. Deze hoeveelheden kunnen met voldoende nauwkeurigheid gewogen worden.

m. - OVEREENSTEMMING VAN DE RESULTATEN VAN OPEENVOLGENDE METINGEN (§ 25)

Bij inachtname van de voorschriften van § 24. 2 wordt de relatieve fout op het debiet Q beperkt tot 1%, en die op het drukverval h eveneens tot 1%. Op de factor L/A, die een constante van de gebruikte mal is, kan de relatieve fout, die echter geen spreiding tussen door éénzelfde proefstuk opgeleverde resultaten zal veroorzaken, 1 à 2 tienden van 1% bedragen. Het resultaat k (θ°, n) zou dus op $\pm$ 2% na bij al de opeenvolgende metingen moeten teruggevonden worden, indien de temperatuur constant bleef. Met een onzekerheid van 0, 1° C op de gemiddelde temperatuur stemt een onzekerheid van 0, 3% op de factor η_θ/η_{10} overeen.

De mogelijke relatieve fout op elk tot 10° C herleid resultaat k (10°, n) zou dus niet groter moeten zijn dan $\pm$ 2, 5%, m. a. w. de uit de opeenvolgende debietmetingen berekende waarden van k (10°, n) zouden op 5% na moeten overeenstemmen, voor zover de doorstroming geen wijziging van het proefstuk heeft doen ontstaan.

In werkelijkheid kunnen twee verschijnselen optreden, die de doorlatendheidscoëfficiënt wijzigen :

1°) - de verzadigingsgraad, die gelijk werd gesteld aan 1, vermits de door de formule (11) in 5. 4. berekende waarde slechts met een mogelijke fout van 0, 03 van 1 afweek, kan in werkelijkheid 0, 97 geweest zijn bij de aanvang van de debietmetingen, en kan daarna zijn toegenomen ten gevolge van de gedeeltelijke of volledige oplossing van de in het proefstuk opgesloten lucht in het ontluchte water. De doorlatendheidscoëfficiënt stijgt met ongeveer 4% in relatieve waarde wanneer de verzadigingsgraad met 0, 01 in absolute waarde toeneemt. Een verhoging van k (10°, n) van ongeveer 12% in relatieve waarde kan zich dus voordoen als gevolg van een toename van de verzadigingsgraad;

2°) - de doorlatendheid van het proefstuk kan verminderen ten gevolge van een inwendige erosie van het proefstuk. Hieronder wordt een verplaatsing van de fijnste korrels bedoeld. In natuurlijke toestand zijn deze zeer fijne korrels doorgaans aan het oppervlak van de grotere korrels gehecht, maar door het doorstromen van water kunnen zij loskomen en zich verplaatsen tot

ze worden tegengehouden door een vernauwing van hun weg. Dit veroorzaakt een zekere verstopping van een gedeelte van de kanalen die tussen de zandkorrels bestaan. Dit verschijnsel heeft des te meer kans zich voor te doen naarmate het slibgehalte (fractie van minder dan 20 micron) groter is; doch de mineralogische aard van de zeer fijne korrels speelt hierin ook een rol. Over het algemeen nochtans, is de vermindering van de doorlatendheidscoëfficiënt t. o. v. de eerste meting, die bij sommige zandsoorten kan worden waargenomen, niet groter dan 10%.

n. - VERMINDERING VAN DE VERZADIGINGSGRAAD GEDURENDE DE DEBIETMETINGEN (§ 26. 1)

Wanneer uit de in § 26. 1 voorgeschreven controleweging van de permeameter met zijn inhoud blijkt dat, t. o. v. de vóór de debietmetingen volgens § 23 uitgevoerde weging een gewichtsafname, groter dan de mogelijke weegfouten, is opgetreden, betekent dit dat lucht een bepaald volume in het apparaat is gaan innemen. De oorzaak hiervan kan zijn, ofwel dat lucht ontweken is uit onvoldoend ontlucht water, vooral indien aan de voorschriften van § 24. 2 inzake de bovenstroomse en benedenstroomse watertemperaturen onvoldoende aandacht geschonken werd, ofwel dat de luchtdichtheid van het apparaat te wensen overlaat. Men moet deze oorzaak opsporen en verhelpen vóórdat de metingen worden herhaald of opnieuw begonnen.

oOo

BIJLAGE I

Soortelijk gewicht van water $\gamma_{w\theta}$ (gcm^{-3}) als functie van de temperatuur θ°C
(naar Perry)

θ	$\gamma_{w\theta}$	θ	$\gamma_{w\theta}$	θ	$\gamma_{w\theta}$	θ	$\gamma_{w\theta}$
6.0	0.99997	12.0	0.99952	18.0	0.99862	24.0	0.99733
6.2	96	12.2	50	18.2	59	24.2	28
6.4	95	12.4	48	18.4	55	24.4	23
6.6	95	12.6	45	18.6	51	24.6	18
6.8	94	12.8	43	18.8	47	24.8	13
7.0	0.99993	13.0	0.99940	19.0	0.99843	25.0	0.99707
7.2	92	13.2	38	19.2	39	25.2	02
7.4	91	13.4	35	19.4	35	25.4	0.99697
7.6	90	13.6	33	19.6	31	25.6	92
7.8	89	13.8	30	19.8	27	25.8	87
8.0	0.99988	14.0	0.99927	20.0	0.99823	26.0	0.99681
8.2	86	14.2	24	20.2	19	26.2	76
8.4	85	14.4	21	20.4	15	26.4	71
8.6	84	14.6	19	20.6	11	26.6	65
8.8	82	14.8	16	20.8	06	26.8	60
9.0	0.99981	15.0	0.99913	21.0	0.99802	27.0	0.99654
9.2	79	15.2	10	21.2	0.99798	27.2	49
9.4	78	15.4	07	21.4	93	27.4	43
9.6	76	15.6	03	21.6	89	27.6	38
9.8	75	15.8	00	21.8	84	27.8	32
10.0	0.99973	16.0	0.99897	22.0	0.99780	28.0	0.99626
10.2	71	16.2	94	22.2	75	28.2	21
10.4	69	16.4	90	22.4	71	28.4	15
10.6	67	16.6	87	22.6	66	28.6	09
10.8	65	16.8	84	22.8	61	28.8	03
11.0	0.99963	17.0	0.99880	23.0	0.99757	29.0	0.99597
11.2	61	17.2	77	23.2	52	29.2	91
11.4	59	17.4	73	23.4	47	29.4	86
11.6	57	17.6	70	23.6	42	29.6	80
11.8	55	17.8	66	23.8	37	29.8	74

BIJLAGE II

Viscositeit van water η_θ (centipoise) en verhouding (η_θ/η_{10}) als functie van de temperatuur θ°C (volgens Perry)

θ	η_θ	η_θ/η_{10}	θ	η_θ	η_θ/η_{10}	θ	η_θ	η_θ/η_{10}
6.0	1.473	1.126	14.0	1.171	0.895	22.0	0.958	0.733
6.2	64	1.119	14.2	65	0.891	22.2	53	0.729
6.4	55	1.112	14.4	59	0.886	22.4	49	0.726
6.6	47	1.106	14.6	52	0.881	22.6	45	0.722
6.8	37	1.099	14.8	46	0.877	22.8	40	0.719
7.0	1.428	1.092	15.0	1.140	0.872	23.0	0.936	0.716
7.2	20	1.086	15.2	34	0.867	23.2	31	0.712
7.4	11	1.079	15.4	28	0.863	23.4	27	0.709
7.6	03	1.073	15.6	23	0.858	23.6	23	0.706
7.8	1.394	1.066	15.8	17	0.854	23.8	18	0.702
8.0	1.386	1.060	16.0	1.111	0.850	24.0	0.914	0.699
8.2	78	1.054	16.2	05	0.845	24.2	10	0.696
8.4	70	1.048	16.4	00	0.841	24.4	06	0.693
8.6	62	1.042	16.6	1.094	0.837	24.6	02	0.690
8.8	54	1.035	16.8	88	0.832	24.8	0.898	0.687
9.0	1.346	1.029	17.0	1.083	0.828	25.0	0.894	0.683
9.2	38	1.023	17.2	77	0.824	25.2	90	0.680
9.4	30	1.017	17.4	72	0.820	25.4	86	0.677
9.6	23	1.012	17.6	66	0.816	25.6	82	0.674
9.8	15	1.006	17.8	61	0.812	25.8	78	0.671
10.0	1.307	1.000	18.0	1.056	0.807	26.0	0.874	0.668
10.2	1.300	0.994	18.2	51	0.803	26.2	70	0.665
10.4	1.293	0.989	18.4	45	0.799	26.4	66	0.662
10.6	86	0.983	18.6	40	0.795	26.6	62	0.659
10.8	78	0.978	18.8	35	0.791	26.8	58	0.656
11.0	1.271	0.972	19.0	1.030	0.788	27.0	0.854	0.653
11.2	64	0.967	19.2	25	0.784	27.2	51	0.651
11.4	57	0.961	19.4	20	0.780	27.4	47	0.648
11.6	50	0.956	19.6	15	0.776	27.6	43	0.645
11.8	43	0.951	19.8	10	0.772	27.8	40	0.642
12.0	1.236	0.945	20.0	1.005	0.769	28.0	0.836	0.639
12.2	29	0.940	20.2	1.000	0.764	28.2	32	0.637
12.4	23	0.935	20.4	0.995	0.761	28.4	29	0.634
12.6	16	0.930	20.6	90	0.757	28.6	25	0.631
12.8	09	0.925	20.8	86	0.754	28.8	22	0.628
13.0	1.203	0.920	21.0	0.981	0.750	29.0	0.818	0.626
13.2	1.196	0.914	21.2	76	0.747	29.2	14	0.623
13.4	90	0.910	21.4	72	0.743	29.4	11	0.620
13.6	84	0.905	21.6	67	0.740	29.6	08	0.617
13.8	77	0.900	21.8	62	0.736	29.8	0.804	0.615

BIJLAGE III

METHODE VAN WINKLER VOOR HET BEPALEN VAN DE HOEVEELHEID OPGELOSTE ZUURSTOF IN WATER

REAGENS

1) - Mangaansulfaat of mangaanchloride :

$500 \text{ g } MnSO_4 \cdot H_2O + H_2O \longrightarrow 1000 \text{ ml}$

of $590 \text{ g } MnCl_2 \cdot 4H_2O + H_2O \longrightarrow 1000 \text{ ml}$

2) - KOH + KI : 350 g KOH op te lossen in ongeveer 200 ml H_2O

75 g kaliumjodide (KI) op te lossen in ongeveer 100 ml H_2O

5 g natriumazide op te lossen in ongeveer 100 ml H_2O.

Na afkoeling worden deze oplossingen gemengd en met H_2O tot 500 ml verdund.

Bewaren in een bruine fles en de datum erop schrijven. Deze oplossing blijft hoogstens één maand bruikbaar.

3) - H_2SO_4 : geconcentreerd zwavelzuur, d = 1,84.

4) - Stijfseloplossing 1% : 1 g + kokend water $\longrightarrow$ 100 ml

5) - Natriumthiosulfaat N/40 : 6,2 g $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O + H_2O$

$\longrightarrow$ 1000 ml

of, bij voorkeur, gebruik maken van een getitreerde oplossing.

WERKWIJZE

Een glazen kolf van ongeveer 275 ml met schuin afgeslepen glazen stop, wordt onder water gevuld en gesloten.
Men draagt er zorg voor, dat er geen luchtbellen in de kolf komen.

+ 1 ml mangaansulfaat (1), dat snel onder het wateroppervlak wordt bijgevoegd door middel van een pipet,

+ 2 ml KOH + KI (2), dat snel onder het wateroppervlak wordt bijgevoegd door middel van een andere pipet, de stop terugplaatsen, schudden, dertig seconden wachten, schudden en omkeren, de neerslag laten bezinken,

+ 2 ml H_2SO_4 (3) bijgevoegd op het vloeistofoppervlak, de stop terugplaatsen, schudden tot de neerslag opgelost is,

daarna 100 ml van de inhoud van de kolf afnemen,

+ 1 à 2 ml stijfseloplossing (4) bijgevoegd bij het in de kolf overblijvende volume.

Titreren met $Na_2S_2O_3$ N/40 tot verdwijning van de blauwe kleur.

BEREKENING VAN HET RESULTAAT

$$O_2 \text{ mg/l} = \frac{\text{aantal ml } Na_2S_2O_3 \text{ N/40 x 200}}{\text{aantal ml van het volume van de kolf-103}}$$

Verklaring: 200 = 0,2 x 1000, want 1 ml $Na_2S_2O_3$ N/40 = 0,2 mg O_2

- 103 = - 100 ml uit de kolf genomen - 3 ml van de eerste twee reagentia.

NAUWKEURIGHEID

Het volume van de glazen kolf moet zorgvuldig gemeten worden en definitief op de kolf aangegeven worden.

De nauwkeurigheid bedraagt $\pm$ 0,2 mg O_2 /1 .

oOo

BIBLIOGRAFISCHE VERWIJZINGEN

1 R. van Ganse,

"Inventaris van de in 1965 op de Belgische markt beschikbare natuur- en brekerzandsoorten", Publikatie N. 34/66, Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, 1966.

2 Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw,

"Meting van de doorlatendheidscoëfficiënt van zandsoorten in het laboratorium", Aanbevelingen O. C. W. -A 21/60. De Wegentechniek, V/2, p. 35-46 (1960).

3 Bestuur der Wegen,

Type-bestek nr 108 van 1961
Ministerie van Openbare Werken van België (1961).

4 Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw,

"Handleiding voor de bescherming van wegenwerken tegen de inwerking van het water", Aanbevelingen O. C. W. - A 28/65, Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, 1966.

5 J. Kozeny,

"Ueber die Kapillare Leitung des Wassers im Bodem", Ber. Ak. Wiss. Wien, 136 II a, p. 271 (1927).

Brussel, augustus 1968.

LIJST DER FIGUREN

Nr		blz.
1	Permeameter - Opstelling	9
2	Opstelling voor het bepalen van de doorlatendheidscoëfficiënt	16
3	Standaard Proctor-mal met bodemplaat en opzetstuk, Marshall-valhamer, handstampertje, afstrijklatje	17
4	Opstelling voor de verzadiging van het proefstuk	18
5	Opstelling voor het volledig verzadigen van het proefstuk	19

INHOUD

blz.

INLEIDING I

Indeling van de aanbeveling III

Eerste Deel - TOEPASSINGSGEBIED EN PRINCIPES VAN DE METHODE

1. - DOEL VAN DE METHODE 3

2. - TOEPASSINGSGEBIED 3

3. - GRONDSLAGEN VAN DE METHODE 3

3. 1. Algemeen principe 3
3. 2. Omrekening voor de temperatuur 4

Tweede Deel - APPARATUUR, IJKINGEN, VEREISTE EIGENSCHAPPEN VAN HET WATER

Hoofdstuk I : APPARATUUR 11

4. - PERMEAMETER 11

4. 1. Algemene beschrijving 11
4. 2. Mal 12
4. 3. Bij de permeameter behorende doorlatende systemen 12

5. - VALHAMER VOOR HET VERDICHTEN 12

6. - OPSTELLING VOOR HET VERZADIGEN VAN HET PROEFSTUK 13

7. - VOEDINGSINRICHTING MET CONSTANT PEIL 13

8. - PIEZOMETER -INRICHTING 14

9. - THERMOMETERS 14

blz.

10. - CHRONOMETER 14

11. - BALANSEN 15

12. - DROOGSTOOF 15

13. - KLEIN LABORATORIUMMATERIAAL 15

Hoofdstuk II : IJKINGEN 21

14. - AFMETINGEN EN VOLUME VAN DE MAL 21

15. - GEWICHT VAN DE COMPLETE, LEDIGE PERMEAMETER, P_o 22

16. - INWENDIG VOLUME VAN DE COMPLETE PERMEAMETER 22

17. - MEETCONSTANTE VAN DE PIEZOMETER MET HELLENDE BUIZEN 23

Hoofdstuk III : EISEN INZAKE HET GEBRUIK VAN WATER 25

18. - ZUIVERHEID 25

19. - ONTLUCHTING 25

Derde Deel - WERKWIJZE VOOR DE METING VAN DE DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT BIJ VOLLEDIGE VERZADIGING

20. - VOORBEREIDING VAN HET ZAND 29

21. - BEREIDING VAN EEN ZANDPROEFSTUK 29

22. - KEUZE VAN HET METAALGAAS 31

blz.

23. - VERZADIGING VAN HET PROEFSTUK 31

24. - DEBIETMETING 33

24. 1. Instelling 33
24. 2. Eigenlijke meting 34
24. 3. Berekeningen 34

25. - HERHALING VAN DE DEBIETMETINGEN EN VERKRIJGING VAN HET UITEINDELIJK RESULTAAT 36

26. - CONTROLEBEWERKINGEN 37

26. 1. Controle van de verzadigingsgraad na de metingen 37
26. 2. Controle van het volume van het proefstuk na de metingen 37

27. - METINGSRAPPORT 37

Vierde Deel - COMMENTAAR 39

BIJLAGEN

BIJLAGE I : Soortelijk gewicht van water $\gamma_{w\theta}$ (gcm^{-3}) als functie van de temperatuur θ°C 49

BIJLAGE II : Viscositeit van water η_θ (centipoise) en verhouding (η_θ / η_{10}) als functie van de temperatuur θ°C 51

BIJLAGE III : Methode van Winkler voor het bepalen van de hoeveelheid opgeloste zuurstof in water 53

BIBLIOGRAFISCHE VERWIJZINGEN 55

LIJST DER FIGUREN 57

INHOUD 59