

ONDERZOEK NAAR DEN WEERSTAND
VAN BITUMEN-MINERAALAGGREGAAT
MENGSELS TEGEN PLASTISCHE
DEFORMATIE

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN
DOCTOR IN DE TECHNISCHE WETENSCHAP
AAN DE TECHNISCHE HOOGESCHOOL TE
DELFT, OP GEZAG VAN DEN RECTOR MAG-
NIFICUS DR. H. B. DORGEL, HOOGLEERAAR
IN DE AFDEELING DER ALGEMEENE WETEN-
SCHAPPEN, VOOR EEN COMMISSIE UIT DEN
SENAAT TE VERDEDIGEN OP VRIJDAG
3 JULI 1942, DES NAMIDDAGS TE 4.— UUR

DOOR

LAMBERT WILLEM NIJBOER

CIVIEL-INGENIEUR

GEBOREN TE EDAM



AMSTERDAM

N.V. NOORD-HOLLANDSCHE UITGEVERS MAATSCHAPPIJ

1942

1012.211

Dit proefschrift is goedgekeurd door den Promotor Prof. Dr. C. Zwikker

Aan mijn Moeder
Aan mijn Vrouw

Aan de N.V. Bataafsche Petroleum Maatschappij betuig ik mijn groote erkentelijkheid voor de mij geboden gelegenheid de in haren dienst verzamelde gegevens in dit proefschrift te verwerken.

Tevens spreek ik mijn grooten dank uit voor de vele waardevolle raadgevingen, welke ik bij mijn werk van collega's en medewerkers, waarbij ik in het bijzonder wil noemen de Heeren Dr. Ir. J. PH. PFEIFFER, Dr. R. N. J. SAAL, M. C. SIEGMANN, J. P. P. KLOPPERS en F. DIJKSTRA, mocht ontvangen.

INHOUDSOPGAVE.

	Pag.
HOOFDSTUK I. Inleiding; doel dezer studie	1
§ 1. Algemeene beschouwingen omtrent het ontwerpen van een constructie	1
§ 2. Bijzondere omstandigheden bij het ontwerpen van een wegdekconstructie in het algemeen	3
§ 3. Beschrijving van bitumineuze wegdekmaterialen	5
§ 4. Eigenschappen van bitumineuze wegdekmaterialen	7
§ 5. Bijzondere omstandigheden bij het ontwerpen van een bitumineuze wegdekconstructie	9
§ 6. Eischen aan het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van bitumineuze wegdekmaterialen te stellen	11
HOOFDSTUK II. Overzicht der bekende onderzoekingsmethoden naar de mechanische eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaatmengsels	14
§ 1. Doel van het materiaalonderzoek	14
§ 2. Literatuuronderzoek van LONSDALE	15
§ 3. Indeeling der onderzoekingsmethoden volgens LONSDALE	17
§ 4. Drukvastheidsbepalingen	18
§ 5. Drukproeven met zijdelingschen steun	19
§ 6. Trekproeven	20
§ 7. Afschuifproeven	21
§ 8. Buigproeven	22
§ 9. Indrukkingsproeven	23
§ 10. Uitpersingsproeven	25
§ 11. Imitatie verkeersproeven	26
§ 12. Proeven ter bepaling van de elastische eigenschappen van het materiaal	27
§ 13. Schokproeven	28
§ 14. Beschouwing der verkregen resultaten	29
HOOFDSTUK III. Beschouwingen over het systeem bitumen-mineraalaggregaat. Grondidee der celproeven	30
§ 1. Bitumen-mineraalaggregaat-mengsels als systeem, dat uit drie fasen bestaat	30
§ 2. Bitumen-mineraalaggregaat-mengsels als een homogeen isotroop materiaal beschouwd	30

	Pag.
§ 3. Breukhypothesen van vaste stoffen	31
§ 4. Deformatie van vloeibare stoffen	33
§ 5. Deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels	34
§ 6. Grondidee der celproeven	35
HOOFDSTUK IV. Theorie der celproeven. Uitwerken van de proefresultaten volgens MOHR	37
§ 1. Hypothesen der theorie	37
§ 2. Spanningen en deformatie bij de celproef	38
§ 3. Theorie over den weerstand tegen plastische deformatie van droog mineraalaggregaat	42
§ 4. Theorie over den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels	43
§ 5. Uitwerken der resultaten van de proef volgens MOHR	48
HOOFDSTUK V. Beschrijving der apparatuur. Meetmethode. Bereiding der proefstukken	52
§ 1. Beschrijving der celapparaten	52
§ 2. Beschrijving van de 30-tons pers	55
§ 3. Beschrijving van de 2.5-tons pers	57
§ 4. Installatie voor temperatuurregeling	58
§ 5. Persvormen	59
§ 6. Meetmethode	59
§ 7. Bereiding der mengsels	62
§ 8. Comprimeering der proeflichamen	62
§ 9. Terugwinning van het bindmiddel	70
HOOFDSTUK VI. Proefondervindelijk onderzoek naar de geldigheid der theorie. Bespreking van eenige fysische verschijnselen, die zich bij de plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels voordoen.	71
§ 1. Inleiding	71
§ 2. Homogeniteit en isotropie	72
§ 3. Invloed van de waarde der normaalspanning op den wrijvingscoëfficiënt	72
§ 4. Invloed van de deformatiesnelheid op de waarde van den wrijvingscoëfficiënt	76
§ 5. Invloed der deformatiesnelheid op de waarde der differentieele viscositeit	78
§ 6. Vergelijking der waarde van den initiaalweerstand bij den grensspanningstoestand en de door extrapolatie in het schijnbare initiaalweerstand-snelheids-diagram verkregen waarde	79

§ 7.	Reproduceerbaarheid der proeven; invloed van de afmetingen der proeflichamen; nauwkeurigheid der beproevingsresultaten	80
§ 8.	Invloed van het bitumengehalte op de resultaten der proeven	81
§ 9.	Dilatatie	86
§ 10.	Bespreking van eenige physische verschijnselen, welke bij de plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaatmengsels optreden	90
§ 11.	Critische vergelijking der in Hoofdstuk IV, § 4 sub α , resp. sub β afgeleide formules	95

HOOFDSTUK VII. Invloed van eenige eigenschappen van het bitumen op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels 100

§ 1.	Inleiding	100
§ 2.	Keuze der proefmaterialen; proefomstandigheden. Resultaten	102
§ 3.	Rangschikking van de resultaten der proeven naar de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur	105
§ 4.	Rangschikking der proefresultaten naar de temperatuur	110
§ 5.	Initiaalverstarringstemperatuur	114
§ 6.	Viskeuze verstarringstemperatuur	115
§ 7.	Temperatuurindex van de viscositeit der massa	117
§ 8.	Vergelijking van de eigenschappen van mengsels, waarin Venezolaansche resp. Mexicaansche bitumina zijn verwerkt	118
§ 9.	Beschouwingen omtrent de functie van het bitumen in bitumen-mineraalaggregaat-mengsels	122

HOOFDSTUK VIII. Invloed van de vulstof op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels 128

§ 1.	Inleiding	128
§ 2.	Werkhypothese	131
§ 3.	Invloed van de holle ruimte op den weerstand tegen plastische deformatie	132
§ 4.	Invloed van de verhouding vulstof-bitumen op den weerstand tegen plastische deformatie	138
§ 5.	Invloed van de fijnheid van de vulstof op den weerstand tegen plastische deformatie	148
§ 6.	Analytische behandeling van het verband tusschen de verschillende grootheden	157
§ 7.	Invloed van het chemisch-physisch karakter van de vulstof op den weerstand tegen plastische deformatie	158

	Pag.
HOOFDSTUK IX. Invloed van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels	165
§ 1. Inleiding	165
§ 2. Theoretische beschouwingen	167
A. Invloed van de korrelgrootte	167
B. Invloed van de hoeveelheid grof aggregaat	172
C. Invloed van de granulatie van het grove aggregaat	174
§ 3. Onderzoek naar den invloed van de afmetingen van grof aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels, waarin grof aggregaat van een enkele korrelgrootte is verwerkt	175
§ 4. Onderzoek naar den invloed van de concentratie van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels, waarin grof aggregaat van een enkele korrelgrootte is verwerkt	183
§ 5. Invloed van de granulometrische samenstelling van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie	193
HOOFDSTUK X. Conus en stempelproeven	198
§ 1. Inleiding	198
§ 2. Theoretische beschouwingen	198
§ 3. Proefondervindelijk onderzoek naar de juistheid der theorie bij den evenwichtstoestand	204
§ 4. Proefondervindelijk onderzoek naar de juistheid der theorie bij beweging	206
HOOFDSTUK XI. Toepassingen	213
§ 1. Inleiding	213
§ 2. Gevaar van beschadiging van een wegdek tengevolge van door een wiel uitgeoefende horizontale krachten	213
§ 3. Draagvermogen van een wegdek	214
§ 4. Toepassing bij het onderzoek van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels	218
HOOFDSTUK XII. Conclusies	220
LITERATUURLIJST	227

HOOFDSTUK I.

Inleiding; Doel dezer studie.

§ 1. *Algemeene beschouwingen omtrent het ontwerpen van een constructie.*

Voor de bepaling van de afmetingen van een constructie is het noodzakelijk over een drietal groepen van gegevens te beschikken.

Ten eerste zal de vorm der constructie, in verband met het doel, waarvoor zij wordt ontworpen, in groote lijnen vastgelegd moeten zijn. Ten tweede dient bekend te zijn, op welke wijze en met welke intensiteit de lasten op de constructie inwerken en ten slotte moet men in staat zijn om de uitwerking dezer lasten op de constructie na te gaan.

Met behulp van de leer der Toegepaste Mechanica is het in het algemeen mogelijk de spanningen, die in verschillende punten der constructie optreden, te berekenen.

Indien de constructie statisch bepaald is, kan men de spanning in elk deel der constructie uit de grootte en plaats der lasten zonder meer afleiden met behulp van de evenwichtsleer (47) *).

Is uit het onderzoek der betreffende bouwstof bekend, welke spanning het materiaal kan opnemen zonder te breken (m.a.w. is de sterkte van het materiaal bekend), dan kan men nagaan of de berekende spanningen voldoende laag zijn om breuk der constructie uit te sluiten.

Daar men evenwel nooit in staat zal zijn alle factoren, die de grootte der optredende spanningen beïnvloeden, met volkomen zekerheid te berekenen, is men verplicht de toelaatbare (berekende) spanning lager te stellen dan de breukspanning van het materiaal. Bij de bepaling der toelaatbare spanning wordt als regel de breukspanning door een bepaalden factor (den zgn. veiligheidscoëfficiënt) gedeeld. De grootte van dezen veiligheidscoëfficiënt wordt voor elk materiaal en voor elke constructie anders gekozen.

*) De nummers verwijzen naar de literatuurlijst.

Zoo zal de waarde van den veiligheidscoëfficiënt worden beïnvloed door het al dan niet in rekening brengen van dynamische krachten (den zgn. stootcoëfficiënt), van slingerkrachten, van windkrachten, van spanningen ten gevolge van temperatuursinvloeden, enz., en tevens afhankelijk zijn van de nauwkeurigheid, waarmede de eigenschappen van het materiaal zijn bepaald. Ook dient rekening te worden gehouden met de mogelijkheid, dat de eigenschappen van het materiaal in het bouwwerk af kunnen wijken van die van speciaal vervaardigde proeflichamen.

Voor de berekening van dergelijke statisch bepaalde constructies kan vaak met een berekening der sterkte van de constructie worden volstaan, zoodat de kennis van de breukspanning van het materiaal voldoende is, om een oordeel over de geschiktheid der ontworpen constructie te vormen.

Indien men daarnaast eischen meent te moeten stellen aan de deformatie, welke de constructie onder de belasting zal vertoonen, dan wordt naast de kennis der sterkte tevens een zekere kennis omtrent de deformatie van het materiaal bij de optredende spanningen vereischt. Voor het verkrijgen van deze kennis kan men bij het onderzoek naar de eigenschappen der bouwmaterialen niet meer volstaan met een eenvoudige bepaling der sterkte, doch men dient dit onderzoek uit te breiden met bepalingen, waaruit het verband tusschen spanning en deformatie blijkt.

Voor de berekening van statisch onbepaalde constructies, bij welke de spanning in de verschillende deelen mede van de vervorming der constructie afhankelijk is, dient men steeds te beschikken over de kennis der deformatie van het materiaal als functie van de spanning.

Vergelijking der berekende spanningen en deformaties met de werkelijk optredende waarden dezer grootheden in uitgevoerde constructies, vormt een waardevolle contrôle op de juistheid der veronderstellingen, die aan de berekening ten grondslag liggen, doch zal alleen toegepast worden bij die constructies, waarbij de uitgave der met deze contrôle gemoede kosten verantwoord mag worden geacht. Deze contrôle blijft dientengevolge veelal beperkt tot grootere bouwwerken of werken van afwijkende constructie. De resultaten van dergelijke onderzoekingen dienen mede als grondslag voor de bepaling van den veiligheidscoëfficiënt.

§ 2. *Bijzondere omstandigheden bij het ontwerpen van wegdekconstructies in het algemeen.*

De wegdekconstructie dient de krachten, welke het verkeer er op uitoefent, op te nemen en op dusdanige wijze naar den ondergrond over te brengen, dat noch de constructie zelve, noch de ondergrond op den duur wordt beschadigd. Het wordt steeds als een gunstige omstandigheid beschouwd indien het wegdek waterdicht is, zoodat geen water van de oppervlakte in den grondslag kan dringen, waardoor deze zou kunnen verweken.

De door het verkeer op het wegdek uitgeoefende krachten kunnen zoowel een verticaal als een horizontaal gericht component bevatten. Naast de verticale kracht, die door den last wordt uitgeoefend, kunnen ook horizontaal gerichte krachten optreden, zooals de rollende wrijving der voertuigen, de drijfkraft bij mechanische vervoermiddelen en de remkrachten, welke laatsten waarschijnlijk de grootste waarde zullen kunnen bereiken.

Volgens metingen aan geblokkeerde wielen kan de wrijvingscoëfficiënt tusschen wielband en wegdek tot ca. 0.7 bedragen (80). Deze metingen werden verricht met luchtbanden, zoodat genoemd cijfer wel de grootste waarde van den wrijvingscoëfficiënt zal aangeven.

De druk, welken een luchtband op het wegdek uitoefent (de banddruk), zal van de grootte-orde van den luchtdruk in den band (de zgn. bandspanning) zijn.

BRADBURY (5) bespreekt verschillende omstandigheden, welke er toe kunnen leiden, dat de spanning, welke een stilstaand wiel op het wegdek uitoefent, grooter zal zijn dan de bandspanning, doch de afwijkingen blijven volgens hem beperkt tot ca. 25 %. Hij geeft als hoogste bandspanning 90 lbs/sq. inch = ca. 6.5 kg/cm² aan.

Anderzijds geven onderzoekingen van het Engelsche ROAD RESEARCH LABORATORY TE HARMONDSWORTH (74) aan, dat de werkelijke druk bij een normaal belaste luchtband ca. 50 %, bij een overbelaste band zelfs ca. 100 % hooger kan zijn dan de bandspanning.

Daar volgens deze publicatie bij een rollend wiel met een verdubbeling van den wiellast gerekend moet worden (stootcoëfficiënt = 2), moet men aannemen, dat de banddruk van een

stilstaand wiel 50 % meer kan bedragen dan de bandspanning, waarbij de wiellast dezelfde waarde behoudt, terwijl bij een voortbewegend wiel de banddruk tot het dubbele van de bandspanning kan oplopen bij een wiellast, welke het dubbele van den statischen last bedraagt.

Voor massieve rubberbanden worden hogere drukken aangegeven. Zoo berekent HAWTHORN (34) een gemiddelden banddruk van ca. 9 kg/cm², hetgeen bij een parabolische spanningsverdeling tot een hoogsten druk van ca. 13.5 kg/cm² leidt. Daar voor een dergelijk relatief stijven band de stootcoëfficiënt zeker meer dan 2 zal bedragen, dient men voor een rollend wiel zeker met drukken tot ca. 35 kg/cm² rekening te houden.

Omtrent met ijzer beslagen wielen zijn geen exacte gegevens bekend. De ervaring leert, dat men, niettegenstaande de lichte lasten, welke op met ijzer beslagen wielen worden getransporteerd, de grootte der optredende drukken niet mag onderschatten. Benaderende berekeningen geven aan, dat deze druk onder de ongunstigste omstandigheden op bitumineuze wegdekken maximaal ca. 40 kg/cm² zal bedragen.

Op grond van deze gegevens lijkt het wenschelijk bij het ontwerpen van een wegconstructie in het ongunstigste geval rekening te houden met verticale spanningen van ca. 15 kg/cm² bij een stilstaanden last, terwijl bij een bewegenden last de spanning tot ca. 35 kg/cm² kan oplopen.

Daarbij dient men voor de grootte van den statischen wiellast volgens TUTTLE (91) met 4 ton per wiel (of dubbel wielstel) rekening te houden, terwijl de dynamische last het dubbele kan bedragen.

De horizontale spanningen zullen waarschijnlijk het grootst zijn bij rubberbanden, zoodat deze schuifspanningen 25 kg/cm² niet te boven zullen gaan. Zij zullen alleen optreden bij een bewegenden last.

De wegconstructie vormt een op den bodem gelegde plaat, welke over een gedeelte van haar oppervlak belast is.

WESTERGAARDT-KELLEY (41) en HAPPÉ (33) hebben methoden ontwikkeld met behulp waarvan de spanningen in deze statisch

onbepaalde constructie berekend kunnen worden. Beide methoden vatten de constructie op als een elastische plaat, welke gelijkmatig door een elastische onderlaag wordt gedragen. De methode WESTERGAARDT-KELLEY is uitgewerkt voor wegebouwmaterialen, welke een groote stijfheid bezitten, terwijl de methode HAPPÉ bij uitstek geschikt is voor gemakkelijk te vervormen materialen.

Beide methoden worden toegepast ter bepaling van de afmetingen, welke aan de constructie dienen te worden gegeven om de belasting door het verkeer op den ondergrond over te kunnen brengen. Daarnaast dient tevens onderzocht te worden of het wegdek materiaal in staat is aan de onder den last in het aangrijpingsvlak der kracht optredende druk- en schuifspanningen weerstand te bieden. Men dient daarbij te overwegen, dat de schuifspanningen alleen optreden bij bewegenden wiellast, terwijl de verticale drukspanningen zoowel bij bewegende als bij stilstaande lasten aanwezig zijn.

Bovendien moet men voor vele constructies nog rekening houden met spanningen, welke optreden ten gevolge van verschillen in temperatuur, van krimp, enz. Bij cementbeton vormen de temperatuur- resp. krimpspanningen een belangrijk deel van de totaal optredende spanning in de constructie.

Ten gevolge van het feit, dat wegconstructies statisch onbepaald zijn, dient men bij het ontwerpen der constructie zoowel de sterkte van het materiaal als het verband tusschen spanning en deformatie te kennen.

Bij het onderzoek naar de eigenschappen van wegebouwmaterialen moet hiermede rekening worden gehouden.

§ 3. *Beschrijving van bitumineuze wegdekmaterialen.*

Bitumineuze wegdekken worden samengesteld uit mineraalaggregaat en uit bitumen, welke laatste als bindmiddel fungeert.

Het aggregaat bevat als regel fracties van verschillende grootte, welke met verschillende benamingen worden aangeduid. Zoo onderscheidt men: slag, gruis en meel.

Onder slag verstaat men volgens de KEURINGSVOORSCHRIFTEN

VOOR BITUMINEUZE BOUWSTOFFEN (42) ¹⁾ gebroken of natuurlijk aggregaat, waarvan de deeltjesgrootte meer dan 2.4 mm bedraagt. Slag kan worden onderverdeeld in grof en fijn slag. Als grens kan een deeltjesgrootte van 12 mm worden aangehouden. Bij de samenstelling van bitumineuze mengsels wordt de onderverdeling vaak nog verder doorgevoerd, waarbij volgens STELLWAAG (84) de volgende fracties worden onderscheiden: 3—6 mm, 6—8 mm, 8—12 mm, 12—18 mm, 18—25 mm en 25—30 mm.

Het gruis omvat natuurlijk of gebroken aggregaat, dat kleiner is dan 2.4 mm. Het kan worden onderverdeeld in grof en fijn gruis. Als grens dezer verdeling wordt vaak 0.2 mm aangehouden.

Onder vulstof verstaat men gemalen natuurlijk of kunstmatig aggregaat, dat voor minstens 70 gew. % uit deeltjes kleiner dan 75μ (micron = $\frac{1}{1000}$ mm) bestaat.

Onder grind, resp. zand verstaat men natuurlijk steenmateriaal, dat in hoofdzaak uit slag, resp. gruis bestaat.

Onder asphaltbitumen verstaat men volgens de K.V.B.B. een natuurlijk of in de natuur voorkomend bitumen, of bitumen, bereid uit natuurlijke koolwaterstoffen, door destillatie, oxydatie of kraken; vast of dikvloeibaar met een laag gehalte aan vluchtige producten, met karakteristieke eigenschappen als bindmiddel en praktisch geheel oplosbaar in zwavelkoolstof.

Onder teer verstaat men een bitumeneus product, door destructieve destillatie verkregen uit organisch materiaal, rijk aan koolstof. De bij den wegebouw gebruikte teerproducten ondergaan vóór de verwerking nog bepaalde behandelingen, waardoor zij voor de beoogde toepassing beter geschikt worden gemaakt.

Mengsels van asphaltbitumen en mineraal aggregaat worden asphalt genoemd.

Men onderscheidt verder verschillende benamingen als gietasphalt, asphaltbeton (resp. teerbeton), asphaltmortel (resp. teer-

¹⁾ Volgens de Keuringsvoorschriften voor Bitumineuze Bouwstoffen 1940 (N 1013) verstaat men onder
slag: fractie van steenmateriaal door zeef N 480—d—64 en op zeef 480—d—2.4;
gruis: fractie door zeef N 480—d—2.4 en op zeef N 480—d—0.075;
meel: fractie door zeef N 480—d—0.075.

mortel), asphaltsteenslag (resp. teersteenslag), asphaltmacadam (resp. teermacadam). Deze benamingen hebben voor gietasphalt betrekking op de wijze van verwerken (uitgieten en vervolgens uitstrijken), terwijl de andere benamingen een aanduiding geven voor de samenstelling van het mengsel. Zoo geven de aanduidingen „asphalt-“ resp. „teer-“ aan, welk bindmiddel werd gebruikt.

Beton is een innig mengsel van steenslag, steengruis, en eventueel vulstof, met de aangeduide bitumineuze stof gemengd.

Mortel is een innig mengsel van steengruis, al dan niet met vulstof, met de aangeduide bitumineuze stof gemengd.

Steenslag is een met de aangegeven bitumineuze stof verkit steenslag.

Macadam bestaat uit steenslag, ingegoten met de aangegeven bitumineuze stof.

Een beschrijving van verschillende toepassingen dezer mengsels is in de literatuur (64, 56) te vinden en zal hier achterwege blijven.

§ 4. *Eigenschappen van bitumineuze wegdekmaterialen.*

Uit het voorgaande blijkt, dat bitumineuze wegenbouwmengsels steeds zijn samengesteld uit een tweetal componenten, nl.:

1. mineraalaggregaat en
2. een bitumineus bindmiddel.

Men kan dus verwachten, dat de eigenschappen van de mengsels eenerzijds afhankelijk zullen zijn van de eigenschappen van het aggregaat, anderzijds door het bindmiddel beïnvloed worden.

De eerste component, het mineraalaggregaat, is een korrelvormige, vaste stof, waarvan de bestanddeelen in het mengsel door den tweeden component, het bindmiddel, omhuld zijn. Dit bindmiddel, om het even of dit uit asphaltbitumen of uit teer bestaat, is een vloeibare stof, welke een hooge, eventueel zeer hooge viscositeit bezit.

Bij het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van een dergelijk systeem: korrelvormig aggregaat—vloeistof, kan men gebruik maken van de ervaring, welke bij de bestudeering van analoge systemen is opgedaan.

In dit verband verdient het systeem bodemmateriaal—water bijzondere aandacht, daar gedurende de laatste decennia uitge-

breide onderzoekingen, welke belangrijke resultaten hebben opgeleverd, aan dit systeem zijn uitgevoerd.

Na het verschijnen van het bekende boek „Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage” van K. TERZAGHI (89), is een school van onderzoekers gevormd, welke in verschillende landen de algemeene en meer specifieke problemen op dit gebied heeft bestudeerd en daarbij resultaten heeft bereikt, welke de Grondmechanica — onder welken naam men veelal de verschillende vraagstukken, welke op de mechanische eigenschappen van den bodem betrekking hebben, samenvat — tot een hoogen trap van ontwikkeling heeft gebracht.

Nederlandsche onderzoekingen op dit gebied zijn gepubliceerd door A. S. KEVERLING BUISMAN (43, 44, 45) en anderen. Vooral de onderzoekingen van KEVERLING BUISMAN zijn hier van belang, daar hij verschillende onderzoekingsmethoden ontwikkelde, welke bij het in dit proefschrift behandelde onderzoek — zij het in gewijzigden vorm — worden toegepast.

In de Grondmechanica wordt, evenals bij het onderzoek van andere materialen, zowel de sterkte van het materiaal bepaald, als de deformatie, welke het materiaal bij verschillende spanningen vertoont, nagegaan. Sterktebepalingen worden daarbij op dusdanige wijze uitgevoerd, dat uit de proefresultaten door eenvoudige berekening de weerstand van het materiaal tegen afschuiving afgeleid kan worden.

Uit de resultaten van onderzoekingen aan dit materiaal volgt, dat de schuifweerstand van het materiaal afhankelijk is van de normaalspanning op het vlak, waarin afschuiving optreedt, en lineair met deze spanning toeneemt. De schuifweerstand van het materiaal blijkt dus van den spanningstoestand afhankelijk te zijn. Sommige bodemmaterialen, en wel voornamelijk de kleihoudende, blijken ook bij afwezigheid van een normaalspanning op het afschuifvlak in staat te zijn een schuifweerstand te ontwikkelen.

Bestudeering van de mechanische eigenschappen van verschillende bitumina heeft geleid tot het inzicht, dat bitumina, zooals die in den wegenbouw worden toegepast, zeer viskeuze vloeistoffen zijn. De weerstand tegen vloeï is uit den aard der zaak van de vloeï-snelheid afhankelijk. De publicatie van SAAL en KOENS (81) geeft een duidelijk beeld van de vloeï-eigenschappen van verschillende

asphaltbitumina, terwijl de publicatie van BROOME en THOMAS (8) de vloeieigenschappen van eenige teeren beschrijft.

Uitgaande van de reeds vermelde grondgedachte, dat de eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels een afspiegeling zijn van de eigenschappen van het aggregaat en van het bindmiddel, kan men verwachten, dat de schuifweerstand van een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel ontleed kan worden in een wrijvingsweerstand, welke mede van de normaalspanning in het materiaal afhankelijk is, een viskeuze weerstand (37, 21), welke mede van de deformatiesnelheid afhankelijk is en met toenemende deformatiesnelheid grooter wordt, en een beginweerstand, welke door deze beide factoren (spanningstoestand en deformatiesnelheid) niet wordt beïnvloed.

Uit het voorgaande volgt, dat een onderzoek naar de sterkte van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels alleen met succes uitgevoerd kan worden, indien een zoodanige onderzoekingsmethode wordt gekozen, dat zoowel de spanningstoestand als de deformatiesnelheid in elk punt van het proefmateriaal bekend zijn.

Bij bestudeering van het verband tusschen spanning en deformatie van het materiaal, dienen dezelfde eischen aan de proefuitvoering te worden gesteld.

Daar de vloeistofcomponent van het stelsel in hooge mate gevoelig is voor verschillen in temperatuur, dient bij het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels met een zekere „temperatuurgevoeligheid” rekening te worden gehouden. Het is dus noodzakelijk de onderzoekingen uit te voeren bij de temperatuur, bij welke het materiaal in de praktijk dienst doet. Voor West-Europa dient men blijkens de literatuur (14) hiervoor een temperatuurinterval van $+50^{\circ}\text{C}$ tot -20°C aan te houden.

§ 5. *Bijzondere omstandigheden bij het ontwerpen van een bitumineuze wegconstructie.*

Bij het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels dient bijzondere aandacht te worden besteed aan de grootte der spanningen, aan welke het materiaal weerstand moet bieden, en aan de deformatiesnelheden, waaraan het wordt onderworpen.

Een analyse dezer omstandigheden is ten deele zeer moeilijk en nog niet ten volle bekend, doch het is mogelijk voor sommige deelen van dit probleem onder gebruikmaking van de gegevens van § 2 van dit hoofdstuk benaderend na te gaan, onder welke omstandigheden het materiaal belast wordt.

1. Bij stilstaanden last wordt het materiaal in het contactvlak band-wegdek belast, waarbij het in verticale richting wordt samengedrukt. De locale deformatie, die daarbij optreedt, zal in het gebied der elastische vervormingen liggen, indien de spanning in elk vlak van het materiaal beneden de zwichtspanning (11) blijft. Wordt de zwichtspanning overschreden, dan zal het materiaal gaan vloeien. De snelheid waarmede dit geschiedt, kan op de volgende wijze worden afgeleid:

Stel een wegdek, dat 5 cm dik is, en na 30 minuten belasting een indrukking van 1 mm vertoont, zooals men vaak aan wegdekken kan constateeren, en welke deformatie naar het schijnt practisch geen bezwaar oplevert.

De vervormingssnelheid van het materiaal in verticale richting bedraagt dus 1 mm over 5 cm hoogte in 30 min. of 10^{-5} sec⁻¹ indien de deformatie in elk punt van het materiaal met dezelfde snelheid plaats vindt.

Wil men den weerstand van het materiaal onderzoeken onder omstandigheden, welke op die der praktijk gelijken, dan dient dus de deformatie van het materiaal te geschieden met een snelheid van ca 10^{-5} sec⁻¹. De verticale spanning, die daarbij op het materiaal wordt uitgeoefend, bedraagt tot 15 kg/cm². Het is dus van belang den weerstand tegen plastische deformatie van het materiaal onder deze omstandigheden te bestudeeren.

De grootere spanningen (tot ca. 40 kg/cm²) welke bij rollend verkeer optreden, duren slechts korten tijd, zoodat grootere deformatiesnelheden toelaatbaar zijn. Uit het materiaalonderzoek zal moeten blijken, of bij deze grootere spanningen de deformatiesnelheid buitensporig hooge waarden kan verkrijgen, hetgeen a priori niet waarschijnlijk lijkt.

2. De horizontale schuifspanningen, welke het rollende verkeer op het wegoppervlak kunnen uitoefenen en welke tot ca. 25 kg/cm² kunnen bedragen, treden alleen op bij bewegenden last, en houden dus slechts een korten tijdsduur aan. Een eenigszins nauwkeurige

berekening der daarbij toelaatbare deformatiesnelheid is niet bekend.

3. Bij het overbrengen van de verkeersbelasting op den ondergrond fungeert de wegconstructie als een op buiging belaste plaat. Hierbij zullen in de plaat spanningen optreden, welke waarden van de omstandigheden afhankelijk zijn. Deze spanningen zullen deformaties ten gevolge hebben, welke met een zekere deformatiesnelheid tot stand komen. Het is te verwachten, dat de deformatiesnelheid grooter zal zijn, naarmate de snelheid, waarmede de last wordt aangebracht, grooter is. Deze laatste zal toenemen met toenemende snelheid van het verkeer, zoodat de deformatiesnelheid, naar verwacht mag worden, met toenemende verkeerssnelheid grooter zal worden. De waarde, welke de deformatiesnelheid daarbij bereikt, en de grootte der optredende spanningen, is niet bekend.

Het lijkt evenwel mogelijk aan de hand van metingen van de vervorming van wegdekken onder dynamische belasting, zooals o.a. door RAMSPECK (72) zijn uitgevoerd, den vorm van het wegdek op elk oogenblik te bepalen, en uit deze bepalingen zoowel de deformatie van het materiaal als de deformatiesnelheid te berekenen.

Ook zonder dat exacte gegevens voorhanden zijn moet op grond van aan uitgevoerde constructies waargenomen verschijnselen worden aangenomen, dat de buigspanningen bij snelle deformaties, welke een elastisch karakter hebben, een even groot gevaar voor de duurzaamheid der constructie zullen vormen als de directe door het wiel uitgeoefende drukspanning.

Een bespreking van de spanningen, welke tengevolge van temperatuurswisselingen in het materiaal kunnen optreden, meenen wij in deze studie achterwege te moeten laten.

§ 6. *Eischen aan het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van bitumineuze wegdekmaterialen te stellen.*

De studie, die in dit proefschrift is neergelegd, beoogt het ontwikkelen van onderzoeksmethoden, waarvan de resultaten met behulp van fysisch verantwoorde berekeningswijzen gebruikt kunnen worden om tot een rationeele constructie van bitumineuze wegdekken te komen. In een later hoofdstuk van dit proefschrift

zal blijken, dat de hier ontwikkelde onderzoekingsmethode ons in staat stelt, om den weerstand van het materiaal tegen plaatselijke deformatie onder den last te beoordeelen en om ons inzicht in den opbouw van het materiaal te verdiepen. Zij is evenwel niet geschikt om die eigenschappen van het materiaal vast te leggen, welke voor de waardeering van de geschiktheid der constructie om als buigende plaat de lasten op den ondergrond over te brengen benodigd zijn, of om het gevaar van beschadiging der constructie tengevolge van verschillen in temperatuur te beoordeelen.

Het is duidelijk, dat bij het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels, de keuze der proefomstandigheden, wil het onderzoek de gegevens opleveren, welke voor het ontwerpen der constructie onontbeerlijk zijn, met bijzonderen zorg dient te geschieden.

Daarbij geldt ook hier de algemeene regel, dat het noodzakelijk is deze proefomstandigheden zoo eenvoudig mogelijk te houden, daar slechts dan de fundamentele eigenschappen van het materiaal bepaald en in getalwaarden uitgedrukt kunnen worden.

Men dient bij de keuze der proefomstandigheden tevens rekening te houden met de omstandigheden der praktijk, in het bijzonder met de optredende spanningen en deformatiesnelheden.

Wij beperken ons thans reeds tot de langzame verticale deformaties bij normale spanningen tot ca. 15 kg/cm², welke bij locale deformatie onder den last zullen optreden.

Bij dit deformatietype zal het aandeel van den wrijvingsweerstand in den totalen weerstand tegen deformatie van het materiaal aanzienlijk kunnen zijn, zoodat voor het onderzoek naar den weerstand tegen plaatselijke deformatie aan de volgende criteria dient te worden voldaan.

1. De spanning moet in elk punt van het proeflichaam hetzelfde zijn en uit de uitwendige spanningen berekend kunnen worden.
2. De deformatiesnelheid in elk punt van het proeflichaam dient bekend te zijn en overal dezelfde waarde te bezitten.
3. Bij het bepalen van de sterkte van het materiaal is het gewenscht de proefomstandigheden zoo te kiezen, dat hetzij de spanning, hetzij de deformatiesnelheid bij de meting constant en bekend is; zoo mogelijk dienen de omstandigheden zoo gekozen te

worden, dat elastische en plastische verschijnselen gescheiden bepaald kunnen worden.

4. Deze omstandigheden dienen bij deze bepalingen verder zoo te worden gekozen, dat door variatie van de omstandigheden het aandeel, dat elk der in § 4 genoemde componenten op de sterkte van het materiaal heeft, kwantitatief kan worden bepaald.

Het is daarom wenschelijk de proef zoodanig uit te voeren, dat de invloed van den viskeuzen weerstand bij gelijkblijvenden wrijvingsweerstand kan worden bepaald en omgekeerd bij gelijkblijvenden viskeuzen weerstand de invloed van den wrijvingsweerstand kan worden nagegaan.

5. De deformatiesnelheid dient van de grootte-orde 10^{-5} sec^{-1} te zijn, de verticale hoofdspanning dient daarbij ca. 15 kg/cm^2 te bedragen.

Dit onderzoek zal beperkt blijven tot de sterkte van het materiaal, daar uit waarnemingen aan bestaande constructies is gebleken, dat de elastische deformaties onder deze omstandigheden geen schade aan de constructie veroorzaken.

Volledigheidshalve zij eraan herinnerd, dat voor de bestudeering van de werking der constructie als buigende plaat niet kan worden volstaan met de bepaling van de sterkte van het materiaal, doch tevens het verband tusschen spanning en deformatie onder verschillende omstandigheden dient te worden bepaald.

In het volgende hoofdstuk zal worden nagegaan in hoeverre de uit de literatuur bekende onderzoekingsmethoden aan de gestelde criteria voldoen.

HOOFDSTUK II.

Overzicht der bekende onderzoekingsmethoden naar de mechanische eigenschappen van bitumen-mineraal-agregaat-mengsels.

§ 1. *Doel van het materiaalonderzoek.*

Het onderzoek van materialen wordt met verschillende doeleinden ondernomen. Men kan een materiaal onderzoeken:

1. ter herkenning van het materiaal;
2. ter contrôle van de bereiding van het materiaal;
3. ter bepaling van die eigenschappen van het materiaal, welke voor de toepassing er van beslissend zijn.

De onder 1. vermelde onderzoekingen zullen veelal een betrekkelijk eenvoudig karakter hebben en volgens gestandaardiseerde methoden worden uitgevoerd, om na te gaan of het materiaal aan bepaalde, voor de levering gestelde voorwaarden voldoet. Bij materialen, welke uit verschillende componenten worden samengesteld, hebben deze onderzoekingen veelal betrekking op de componenten, zooals de keuringsvoorwaarden voor bitumen en voor agregaat, of die voor cement en voor toeslagmaterialen voor cementbeton.

De onder 2. genoemde onderzoekingen hebben betrekking op het materiaal, zooals dit in de constructie aanwezig is. Als voorbeelden kunnen dienen: het onderzoek van vloeijzer, waartoe proefstaven uit het reeds gewalste profiel worden gesneden, het onderzoek naar de drukvastheid van cementbeton, en ook de onderzoekingen, verricht aan uit bitumineuze wegdekken gesneden tegels. Soms wordt bij deze onderzoekingen het materiaal weer in zijn componenten ontleed om de samenstelling van het mengsel te controleeren en worden de eigenschappen dier componenten bepaald, zooals dit het geval is bij bitumineuze mengsels, waarbij de verharding van het bitumen bij de bereiding van het mengsel wordt nagegaan.

De onder 3. vermelde onderzoekingen, welke ongetwijfeld voor de ontwikkeling der techniek de meest belangrijke zijn, hebben tot

doel het verzamelen van die gegevens, welke voor het ontwerpen van een constructie onontbeerlijk zijn. De ontwikkeling der berekeningsmethoden dient daarbij hand in hand te gaan met het onderzoek der materialen. Tevens zal het tot de taak van den onderzoeker behooren om na te gaan op welke wijze en in welke mate (dus kwalitatief en kwantitatief) de samenstellende deelen van het materiaal de eigenschappen van het geheel beïnvloeden.

Bij het in hoofdstuk I gestelde doel dezer studie komen hier alleen de onder 3. vallende onderzoeken voor een nadere bespreking in aanmerking.

§ 2. *Literatuuronderzoek van LONSDALE.*

Een overzicht over de literatuur, welke op het gebied van het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van bitumineuze wegdekmaterialen bestaat, werd in 1939 gepubliceerd door T. LONSDALE (51) welke een literatuurlijst van 137 nummers vermeldt.

LONSDALE omschrijft het doel, dat bij het uitvoeren der mechanische proeven beoogd wordt, als volgt:

"The objects of mechanical tests are:
to assign an order of merit to various road materials, and
to assist in the establishment of principles of design of road mixtures."

en vervolgt:

"Few mechanical tests make any attempt to simulate the complex mechanical conditions imposed by traffic on a road surface, most tests consisting in the application of some kind of stress to a test piece of the road material, and the measurement of the resulting deformation."

In een voorwoord bij dit rapport merkt R. E. STRADLING op, dat "those (tests) which have been used do not give a value for the material which can be regarded as a definite physical constant".

Terwijl praktijkproeven ook na het bepalen van „definite physical constants" niet gemist kunnen worden, zullen bij het ontbreken van dergelijke gegevens deze praktijkproeven het eenige middel vormen, om de resultaten van het laboratoriumonderzoek voor de praktijk waarde te verleen. Het is dan ook volkomen terecht, dat LONSDALE vervolgt met:

"It is thus necessary to obtain some correlation between the results of mechanical tests on the materials and their road behaviour. This is done:

- a. by making the tests on materials taken from good and bad roads,
- b. by laying experimental roads, testing the road materials in the Laboratory, and then observing the behaviour of the roads during their life, or
- c. by laying the materials under test on special tracks, and subjecting them to intensive artificial traffic, that is, employing road testing machines, and testing the material in the Laboratory."

Terwijl het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van bouwmaterialen, zooals in § 1 van dit hoofdstuk onder 3. vermeld, in zijn meest ontwikkelden vorm beoogt het verkrijgen van die kennis, welke noodig is om op rationeele wijze de samenstelling van het constructiemateriaal en de afmetingen der constructie te kunnen bepalen, blijkt dit oogmerk bij het onderzoek van bitumineuze wegebouwmaterialen met behulp van de bekende onderzoekingsmethoden niet verwezenlijkt te zijn. Ook de onder c. genoemde methode, welke zeer kostbaar is, stelt ons niet in staat het gedrag van het materiaal in den weg te voorspellen, daar de omstandigheden bij de proef sterk afwijken van die in de praktijk.

Indien hierin geen verbetering kan worden gebracht, zal de waarde van het mechanisch onderzoek van bitumineuze wegebouwmaterialen zeer beperkt blijven, daar de resultaten van het onderzoek pas beoordeeld kunnen worden, nadat de constructie is uitgevoerd, ja veelal eerst, nadat zij eenige jaren heeft dienst gedaan. Daarbij zullen de resultaten van het onderzoek altijd eerst een zekeren tijd na het verrichten van het onderzoek kwantitatief beoordeeld kunnen worden, hetgeen met zich brengt, dat het uitspreken van een verwachting omtrent het toekomstige gedrag eener constructie ten eenenmale onmogelijk is. Dit maakt de waarde van het onderzoek voor het ontwerpen van nieuwe constructies denkbeeldig.

Het is daarom van belang na te gaan, welke de oorzaken zijn, dat de bekende onderzoekingsmethoden niet tot een gunstiger re-

sultaat hebben geleid. Daarbij zullen eenige na het verschijnen van het rapport van LONSDALE gepubliceerde onderzoekingsmethoden tevens worden besproken.

§ 3. *Indeeling der onderzoekingsmethoden volgens LONSDALE.*

Bij de bespreking der bekende proefmethoden zal in groote lijnen de indeeling, welke LONSDALE van de verschillende proefmethoden maakte, gevolgd worden. Hij onderscheidt:

- I. Proeven, betrekking hebbende op plastische eigenschappen van het materiaal.
 - a. Drukproeven op cylinders of kubussen.
 - b. Trekproeven.
 - c. Uitpersingsproeven waarbij het materiaal door een opening of openingen van een vasten vorm wordt geperst.
 - d. Afschuifproeven.
 - e. Metingen van de doorbuigselheid van balken.
 - f. Indrukkingsproeven.
 - g. Metingen van energie absorptie.
- II. Proeven, betrekking hebbende op elastische eigenschappen van het materiaal.
 - a. Schokproeven, welke breuk- of vermoeidheidsverschijnselen veroorzaken.
 - b. Meting van YOUNG's modulus en stijfheidsmodulus.

Deze indeeling is in zekere mate willekeurig, daar met behulp van de onder I. genoemde onderzoekingsmethoden, indien slechts de proef op een daartoe geschikte wijze wordt uitgevoerd, tevens de eigenschappen van het materiaal beneden de zwichtspanning — dus elastische eigenschappen van het materiaal — kunnen worden bepaald.

Bij de bespreking der proeven zal daarom worden nagegaan in hoeverre zij geschikt zijn om de sterkte van het materiaal te bepalen, en in hoeverre zij benut kunnen worden om het verband tusschen spanning en deformatie na te gaan.

De onderzoekingsmethoden zullen daarbij getoetst worden aan de in Hoofdstuk I § 6 opgestelde criteria. Daarbij dient in het oog te worden gehouden, dat volgens de analyse der materiaaleigen-

schappen, welke in Hoofdstuk I § 4 werd gegeven, deze eigenschappen door 3 grootheden worden omschreven. In verband hiermede wordt een eenigszins afwijkende indeeling der proeven gevolgd.

§ 4. *Drukvastheidsbepalingen.*

Drukvastheidsbepalingen worden als regel op zoodanige wijze uitgevoerd, dat alleen de hoogste druk, waaraan het materiaal weerstand kan bieden, wordt bepaald. De uitvoering der proef wordt veelal zoo gekozen, dat òf de snelheid, waarmede het proeflichaam wordt vervormd, òf de toeneming der belasting constant wordt gehouden.

De eerste methode wordt o.a. in de DUITSCHE NORMALISEERINGSVOORSCHRIFTEN (15) uitdrukkelijk vereischt, hoewel merkwaardigerwijze geen voorschrift gegeven wordt voor de waarde der toe te passen deformatiesnelheid.

Ook BATSON (3) en VOKAC (91) volgen deze methode, evenals NEUMANN (61). WILSON (97) past een regelmatig toenemende belasting toe.

Wanneer volstaan wordt met de bepaling der drukvastheid, levert de proef slechts een enkel gegeven.

Wel is het mogelijk door varieeren der deformatiesnelheid, zooals door NEUMANN en door VOKAC is toegepast, een indruk te krijgen van den invloed der deformatiesnelheid op de waarde der drukvastheid, doch uit de in Hoofdstuk I § 4 gegeven analyse volgt, dat op deze wijze geen bepaling van de waarde van viskeuze, resp. wrijvingsweerstand mogelijk is.

Ook de door NEUMANN (62) voorgestelde bepaling der „Dauerfestigkeit“ geeft hier geen oplossing.

Drukvastheidsbepalingen worden uitgevoerd op proeflichamen van kubischen of cilindrischen vorm. Kubussen worden voorgeschreven in de D.I.N. 1996 (7.07 cm ribbe = 50 cm² doorsnede) en worden ook gebruikt door NEUMANN (10 cm ribbe = 100 cm² doorsnede); laatstgenoemde ging later (1939) over tot het gebruik van cilindrische proeflichamen.

Cylindrische proeflichamen werden o.m. door BATSON, VOKAC en WILSON gebruikt.

Terwijl bij kubische proeflichamen de verhouding tusschen

hoogte-afmeting en dwarsafmeting ($H/D = 1$) bedraagt, welke verhouding door BATSON, WILSON en NEUMANN ook voor cilindrische proeflichamen wordt aanbevolen, meent VOKAC, dat een verhouding $H/D = 0.75$ toelaatbaar is. PFEIFFER (66) wijst er evenwel op, dat voor asphaltemortel-mengsels deze waarde minstens 2 moet bedragen. Hij toont aan, dat de wrijving, welke tusschen proeflichaam en pers tot ontwikkeling komt, het proefresultaat beïnvloedt, indien aan deze voorwaarde niet wordt voldaan, en meent o.i. terecht, dat het opheffen der wrijving door tusschengelegde rubberplaatjes een bron van onzekerheid insluit.

Wordt de drukvastheidsbepaling op geschikte wijze uitgevoerd ($H/D = 2\frac{1}{2}$, constante deformatiesnelheid), dan wordt aan de criteria 1, 2, 3 en 6 van Hoofdstuk I sub 6, voldaan, doch niet aan criterium 4, zoodat slechts een gebrekkig inzicht verkregen kan worden in den weerstand, welken het materiaal tegen locale deformatie kan ontwikkelen.

Slechts indien men er in slaagt met behulp van andere onderzoekingsmethoden de ontbrekende gegevens te bepalen, zal ten volle profijt van de resultaten dezer onderzoekingsmethoden getrokken kunnen worden.

Voorloopig is de bepaling der drukvastheid voor ons doel minder geschikt.

§ 5. *Drukproeven met zijdelingschen steundruk.*

Door enkele onderzoekers zijn proeven uitgevoerd, waarbij het materiaal onder druk vervormd en gelijktijdig zijdelings gesteund werd. De oudste onderzoekingen zijn vermeld door HVEEM (84), die het materiaal met een snelheid van 1.25 mm per minuut vervormt tot een verticale spanning van ca. 30 kg/cm² is bereikt en den ontwikkelden steundruk afleest. Bij de door hem gevolgde wijze van beproeving wordt zijdelingsche deformatie van het proeflichaam vermeden. Hij voert zijn proeven uit op cylinders van ca. 10 cm diameter en ca. 6 cm hoogte bij + 60° C, de hoogste in Californië in het wegdek voorkomende temperatuur.

De invloed van variaties in de deformatiesnelheid op den zijdelingschen druk werd door HVEEM niet nagegaan. Wel voerde hij proeven uit bij verschillende verticale spanningen, doch een split-

sing van den totalen weerstand van het materiaal in de in Hoofdstuk I vermelde deelen wordt door hem niet gegeven.

Hij beperkte zich tot het correleeren van den zijdelingschen druk bij ca. 30 kg/cm² verticalen druk met de resultaten, welke met verschillende mengsels in de praktijk werden bereikt.

De vorm der proefstukken doet vermoeden, dat de door HVEEM verkregen resultaten door de lage H/D-verhouding worden beïnvloed. De wijze van proefneming brengt mede, dat elastische- en vloeiverschijnselen niet van elkaar gescheiden kunnen worden.

Worden de bovengenoemde bezwaren ondervangen, dan beschikt men over een onderzoekingsmethode, welke aan de gestelde eischen voldoet.

Door PFEIFFER (66) wordt vermeld, op welke wijze de aan den stabilometer van HVEEM klevende bezwaren kunnen worden ondervangen. Met de door hem beschreven apparatuur, welke onafhankelijk van die van HVEEM ontwikkeld werd, zijn door mij proeven uitgevoerd, welke in dit proefschrift uitvoerig worden behandeld.

Tenslotte dient nog te worden vermeld, dat ook NEUMANN (62) soortgelijke proeven heeft uitgevoerd, doch hij geeft noch details over de uitvoering, noch resultaten.

§ 6. *Trekproeven.*

Trekvastheidsbepalingen geven evenals drukvastheidsbepalingen slechts een enkel gegeven omtrent de sterkte-eigenschappen van het materiaal. Door variatie in de deformatiesnelheid kan weer een zeker inzicht verkregen worden in den invloed van de deformatiesnelheid op de waarde van den viskeuzen schuifweerstand, doch daar in het lichaam geen drukspanningen optreden, is het niet mogelijk de waarde van den wrijvingsweerstand te bepalen, zoodat de proef een beperkte waarde heeft voor de vermeerdering van onze kennis omtrent de eigenschappen van het materiaal onder verschillende omstandigheden.

Door verschillende onderzoekers, nl. WILSON (97), ADAM en MURDOCH (2), BATSON (3) en NELLENSTEYN en LOMAN (58) worden voor trekproeven 8-vormige proefstukken gebruikt van ongeveer denzelfden vorm, doch veelal met grootere afmetingen dan voor cementonderzoek gebruikelijk is.

Daar het spanningsverloop in een dergelijk proeflichaam zeer gecompliceerd en niet volledig bekend is, zijn dergelijke proeven voor ons doel ongeschikt.

In Duitschland wordt algemeen de door BIERHALTER (6) voorgestelde vorm van proefstukken toegepast. Deze bezitten tusschen twee wigvormig verbreedde koppen, welke in stalen klauwen passen, een rechthoekige prismatische schacht. De deformatie van een deel dezer schacht wordt gemeten en de totale deformatie bij breuk bepaald.

Terwijl BIERHALTER zijn proeven bij één enkele deformatiesnelheid uitvoert, wordt door PFEIFFER (66) de deformatiesnelheid gevarieerd en de invloed der deformatiesnelheid nagegaan.

LEE en MARKWICK (50) daarentegen, die rechte prismatische staven met behulp van een plakmiddel aan stalen klemmen verbinden, passen een constante belasting toe en meten de deformatie.

Tenslotte dient nog de door STANTON en HVEEM (85) ontwikkelde „Cohesiometer” genoemd te worden, waarin het materiaal tusschen platen wordt geklemd, en deze platen om een scharnier, dat in het vlak van een der platen gelegen is, worden gedraaid, waardoor in het materiaal trekspanningen optreden, welke toenemen met den verticalen afstand tot het scharnier.

Samenvattend kan worden vastgesteld, dat van de verschillende onderzoekingsmethoden, waarbij het materiaal op trek wordt belast, alleen de door PFEIFFER aangegeven methode aan de criteria 1, 2, 3 en 6 van Hoofdstuk I § 6 voldoet. Daarbij zal er zorg voor moeten worden gedragen, dat de krachtlijnen nauwkeurig met de materiaalas samenvallen. Treden afwijkingen op, dan zullen de werkelijke spanningen grooter zijn dan de berekende, gemiddelde trekspanning, zoodat groote zorg bij de uitvoering der proef geboden is.

Ook wanneer de uitvoering der proef op zoodanige wijze wordt gewijzigd, dat aan deze bezwaren wordt tegemoet gekomen, zullen de daarmee verkregen gegevens voor het doel van deze studie onvolledig zijn.

§ 7. *Afschuifproeven.*

Verschillende onderzoekers voerden proeven uit, waarbij het materiaal langs een bepaald vlak werd afgeschoven.

Zoo onderzocht SKIDMORE (83) den schuifweerstand van cilindervormige proeflichamen, welke in een vlak loodrecht op de cylinderas werden afgeschoven, terwijl een soortgelijke proef door BOGAERS (4) wordt beschreven.

LEE en MARKWICK (50) schuiven een prismavormig lichaam tusschen ijzeren platen volgens evenwijdige vlakken af.

Al deze onderzoekers brachten geen drukspanning loodrecht op het afschuifvlak aan, en bepaalden of alleen den grootsten weerstand van het materiaal, of het verloop der deformatie onder constante belasting.

Door STOKES en ZAPATA (86) werd een afschuifproef ontworpen, waarbij het materiaal loodrecht op het schuifvlak op druk kan worden belast, doch de snelheid, waarmede de deelen van het materiaal aan weerszijden van het afschuifvlak ten opzichte van elkaar werden bewogen, werd niet gevarieerd, zoodat wel een indruk verkregen werd van de grootte van den wrijvingsweerstand, doch een verdere analyse der proefresultaten achterwege moest blijven. Er dient overigens op gewezen te worden, dat de vloeï in het proeflichaam bij deze proeven zoo gecompliceerd verloopt, dat een analyse er van onmogelijk moet worden geacht.

De hier besproken onderzoeksmethoden voldoen geen van alle aan de in Hoofdstuk I § 6 gestelde criteria, zoodat zij voor ons doel niet geschikt zijn.

§ 8. *Buigproeven.*

Zooals in Hoofdstuk I § 2 werd opgemerkt, vormt een wegdeconstructie een over het geheele oppervlak opgelegde plaat, welke op buiging wordt belast. Begrijpelijkerwijs hebben dan ook verschillende onderzoekers proeven uitgevoerd, waarbij bitumineuze wegdekmenzels op buiging werden belast. Volledigheidshalve worden deze proeven hier eveneens besproken. Zij werden uitgevoerd aan prismatische staven, welke op twee steunpunten werden opgelegd en in het midden werden belast.

Sommige onderzoekers, als LEE en MARKWICK (50), RASHIG en DOYLE (75) (welke de proefbalk aan het eene uiteinde inklemden en het andere einde belastten), brengen een constante belasting aan en bepalen de deformatie, terwijl anderen de balk een gedwon-

gen deformatie (met een bepaalde snelheid) opleggen en den druk welke hierbij ontwikkeld wordt, bepalen.

Het meest bekend zijn de onderzoeken van RADER (70), die bij zeer lage temperatuur ($-70^{\circ}\text{F} = -56^{\circ}\text{C}$) balkjes van $5 \times 3.75 \times 20$ cm met een snelheid van 0.125 cm per minuut in het midden over 15 cm overspanning doorboog en uit de resultaten der proef de breukvastheid en den elasticiteitsmodulus van het materiaal berekende op de gebruikelijke wijze (Hooke, $E_{\text{trek}} = E_{\text{druk}}$, vlakke doorsneden blijven vlak).

In hoeverre een dergelijke berekening bij de uiterst lage temperatuur, waarbij RADER werkte, toelaatbaar is, kan niet worden uitgemaakt, doch LEE en MARKWICK vermelden, dat bij $+25^{\circ}\text{C}$ de neutrale lijn van een op buiging belast langzaam deformeerd balkje niet in het midden van het materiaal gelegen is, doch dicht bij den bovenrand van het materiaal, zoodat onder die omstandigheden de door RADER gegeven analyse zeker niet juist is.

Deze overwegingen maken de waarde van het werk van RADER en van de andere onderzoekers, die buigproeven uitvoerden voor het door ons vastgestelde doel, hoogst problematisch. Gaat men na, in hoeverre bij deze onderzoekingsmethoden aan de in Hoofdstuk I § 6 gestelde criteria wordt voldaan, dan valt onmiddellijk op, dat de deformatiesnelheid niet in elk punt van het proeflichaam bekend is, terwijl een splitsing van den weerstand van het materiaal in zijn 3 componenten onmogelijk is, zoodat deze methode niet tot het door ons gestelde doel kan leiden.

§ 9. *Indrukkingsproeven* (indentation tests).

Indien het wegdek over een gedeelte van zijn oppervlak wordt belast, zullen bij te hooge belasting plaatselijke deformaties optreden. Verschillende onderzoekers hebben getracht het gevaar van plaatselijke deformatie van bepaalde mengsels door middel van proeven te bepalen, om op deze wijze tot een uitspraak te kunnen komen omtrent de geschiktheid van de onderzochte mengsels om aan een bepaalde belasting weerstand te kunnen bieden.

Daar een dergelijke proef in principe de belasting van het materiaal in de practijk nabootst, dienen de proefomstandigheden zoodanig te worden gekozen, dat inderdaad bij de proef een zoo ge-

trouw mogelijke nabootsing van de omstandigheden, waaronder het materiaal in de praktijk wordt belast, wordt verkregen.

Daar het gevaar van plaatselijke vervorming het grootst is bij de hoogst optredende temperatuur, dienen dergelijke proeven bij deze temperatuur (voor West-Europa $+50^{\circ}\text{C}$) te geschieden, terwijl de belasting, welke daarbij moet worden aangebracht, volgens Hoofdstuk I § 2 10 à 15 kg/cm^2 zal moeten bedragen, indien de belasting gedurende een eenigszins langere periode zal worden gehandhaafd. Voor kortdurende belastingen moet met ca. 35 kg/cm^2 druk worden gerekend.

Dit soort proeven zal niet kunnen voldoen aan de in Hoofdstuk I § 6 gestelde criteria, in het bijzonder niet aan punt 4, terwijl bovendien alleen bij een toestand van evenwicht de spanningverdeling in het materiaal voldoende bekend is, daar in dit geval de door PRANDTL (69) gegeven oplossing van dit probleem geldigheid bezit. De invloed van de deformatiesnelheid op den weerstand wordt door hem niet behandeld. Bovendien is het niet mogelijk op deze wijze het verband tusschen spanning en deformatie bij verschillende deformatiesnelheden eenvoudig te bepalen.

Uit de literatuur zijn de volgende onderzoekingsmethoden bekend :

De Duitse normen DIN 1996, (15) schrijven een door HERRMANN ontwikkelde proefmethode voor, waarbij een kubusvormig proefblok (ribbe = 7.07 cm) door een vlakken stempel van 1 cm^2 doorsnede met 52.5 kg wordt belast bij $+22^{\circ}\text{C}$.

De inzakking na 5 uur mag een zekere grenswaarde niet overschrijden.

Door DRESCHLER (16) en door EWERS (21) is later voorgesteld het materiaal zijdelings in te klemmen, waardoor een betere imitatie van hetgeen op den weg geschiedt, wordt verkregen.

NEUMANN (63) stelde voor de proef bij $+50^{\circ}\text{C}$ uit te voeren, hetgeen geen ingang heeft gevonden.

WILSON (97) voerde soortgelijke proeven uit op gietasphalt, waarbij hij een spanning van 100 kg/cm^2 op het materiaal uitvoerde en de indringing na 1 minuut bij $+25^{\circ}\text{C}$ bepaalde.

Terwijl bovengenoemde onderzoekers hun proeven bij een constante belasting uitvoeren, werd door anderen de belasting met een bepaalde waarde per tijdseenheid opgevoerd.

Zoo verhoogt TAYLOR (88) de belasting op een vlakken stempel van 2" diameter met 500 lbs/min, terwijl VOKAC (93) de belasting op een oppervlakte van 1" diameter met 5 lbs/sq.inch per 5 minuten opvoert tot de indringing snel gaat toenemen.

Door MARTIN (54) werden onderzoeken uitgevoerd, waarbij zoowel een vlakke stempel als lichamen van anderen vorm (kogel, kegel) in de bitumineuze massa werden gedrukt met een bepaalde snelheid, welke evenwel zeer hoog werd gekozen (8 mm/min.). De door hem bepaalde weerstand bedraagt veelal meerdere honderden kg/cm², zoodat deze proeven zoowel wat deformatiesnelheid als wat spanning betreft, zijn geschied onder omstandigheden, welke sterk afwijken van die der practijk. De resultaten dezer onderzoeken dienen dan ook met de noodige voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd.

Andere onderzoekers gebruikten eveneens een indruklichaam van anderen vorm dan de vlakke stempel.

Zoo voerden BROOME en THOMAS (9) proeven uit met een stempel, welke een wielsector (2" breed) nabootste, en met 400 lbs gedurende 6 h bij verschillende temperaturen (tot + 45° C toe) werd belast. Zij maten de indringing in het wegdek materiaal. Ook het ROAD RESEARCH LABORATORY TE HARMONDSWORTH (75) gebruikte een dergelijke apparatuur.

Weer andere onderzoekers bestudeerden eveneens de mate, waarin een kogel in de bitumineuze massa wordt gedrukt, hetzij onder constante belasting (13), hetzij onder schokbelasting (46).

Na hetgeen in den aanhef van deze § gezegd is, is het duidelijk, dat de hier besproken beproevingsmethoden voor ons doel ongeschikt zijn.

In een later hoofdstuk van dit proefschrift zullen beproevingsmethoden worden besproken, welke met de hier vermelde onderzoekingsmethoden nauw verwant zijn, en welke beter aan de gestelde eischen voldoen.

§ 10. *Uitpersingsproeven* (extrusion tests).

Men heeft getracht de sterkte van bitumineuze wegdekcomposities te bepalen door na te gaan, welke kracht noodig is om het materiaal door een opening te laten vloeien.

Het meest bekend is de „HUBBARD-FIELD STABILITY-TEST" (39), waarbij een cilindrisch proeflichaam door een ring, welke iets kleiner in diameter is dan het proeflichaam, wordt geperst. Voor asphaltmortel- resp. asphaltbetonmengsels werden later proeflichamen van verschillende diameter gebruikt. De proeven worden uitgevoerd bij een bepaalde deformatiesnelheid (1 mm/sec.) bij $+60^{\circ}$ C. De hoogste kracht, welke op het materiaal wordt uitgeoefend, wordt afgelezen. Deze wordt de „stability value" genoemd.

Om reproduceerbare resultaten te verkrijgen, is het noodig geweest de vervaardiging der proeflichamen nauwkeurig te normaliseeren.

EMMONS en ANDERTON (18) gebruikten een proef, waarbij het materiaal met een bepaalde snelheid uit een drietal openingen (een aan den bodem en twee aan de zijde) van een stalen vorm wordt geperst en bepaalden den grootsten daarbij optredenden weerstand, alsmede de toeneming van den weerstand met de deformatie.

Bij beide beproevingsmethoden is het vrijwel ondoenlijk de spanning en de deformatiesnelheid in elk punt van het materiaal te bepalen, zoodat aan de in Hoofdstuk I § 6 gestelde criteria niet wordt voldaan, en zij voor het gestelde doel ongeschikt zijn.

§ 11. *Imitatie verkeersproeven.*

Door vele onderzoekers zijn proeven uitgevoerd, waarbij getracht werd de inwerking van het verkeer op den weg na te bootsen.

De omstandigheden bij dergelijke proeven zullen als regel sterk afwijken van die op den weg, zoodat de proef een sterk arbitrair karakter heeft, en wel geschikt is om verschillen tusschen diverse mengsels tot uiting te brengen, doch ons niet in staat kan stellen om fundamenteele eigenschappen van het materiaal kwantitatief vast te leggen.

Naarmate de omstandigheden gedurende de proef beter die op den weg benaderen, zullen de resultaten grootere waarde bezitten.

Proeven op proefwegen zijn o.m. uitgevoerd door het U.S. BUREAU OF PUBLIC ROADS (19) en in Duitschland (14).

Op iets kleinere schaal, doch nog altijd met een verkeer, overeenkomstig dat op den weg, werden in HARMONDSWORTH (Engeland) proeven uitgevoerd met een zgn. „model road" (76). Hierbij werd

een 12-tons zware wagen over een cirkelvormige baan van 33 meter diameter gevoerd, met snelheden tot ca. 70 km/h.

Het aantal onderzoeken, waarbij het wegverkeer op kleinere schaal wordt nagebootst, is vrij groot. Het meest bekend zijn de onderzoeken van KRIEGE en GILBERT (49), CARPENTER (12), het ROAD RESEARCH LABORATORY TE HARMONDSWORTH (76), GRAF (29), SCHENCK (82) en GOLDBECK (27), welke allen rubber banden (pneumatisch of massief) gebruikten. Bij al deze proeven wordt de vormverandering van het wegdekoppervlak als norm voor de kwaliteit van het materiaal beschouwd.

TARWATER (87) gebruikt stalen walsen, en bepaalt de horizontale vervorming van het materiaal, terwijl EWERS en SCHIEL (22) de spoorvorming, door een pneumatischen wielband veroorzaakt, bepalen en deze als maat voor de stabiliteit van het wegdek beschouwen.

Deze onderzoekers gebruiken een rechte proefbaan, die onder het belaste wiel heen en weer wordt bewogen, terwijl de andere onderzoekers, met uitzondering van TARWATER, cirkelvormige proefbanen gebruiken.

Zooals reeds vermeld, zijn deze onderzoekingsmethoden voor ons doel ongeschikt.

§ 12. *Proeven ter bepaling van de elastische eigenschappen van het materiaal.*

Na hetgeen in Hoofdstuk II bij de beschrijving der bekende beproevingsmethoden werd opgemerkt, is het duidelijk, dat druk- resp. trekproeven voor dit doel in aanmerking komen. Deze dienen daarbij zoo te worden uitgevoerd, dat het verband tusschen spanning en deformatie bij verschillende deformatiesnelheden wordt bepaald.

VOKAC (92) voerde dergelijke proeven uit. De vorm zijner proeflichamen heeft, zooals reeds vermeld, ongetwijfeld de door hem verkregen resultaten beïnvloed.

Verder zijn nog proeven bekend van het Engelsche ROAD RESEARCH LABORATORY (76), dat met behulp van de resultaten van trillingsproeven den elasticiteitsmodulus van het materiaal berekende.

Door ditzelfde laboratorium (77) werden ook nog soortgelijke

proeven uitgevoerd, waarbij het materiaal op torsie werd belast.

Als bezwaar tegen deze proeven geldt, dat de frequentie der trillingen (ca. 1000 Hertz) veel hoger is dan die in het wegdek, waarvoor MEISTER (55) een frequentie van ca. 15 Hertz bepaalde, zoodat de deformatiesnelheden waarschijnlijk veel grooter zijn dan die van het wegdek in de praktijk.

RADER (70), die buigproeven bij zeer lage temperatuur heeft uitgevoerd, berekende uit zijn proefresultaten eveneens den elasticiteitsmodulus van het materiaal. Bezwaren tegen zijn analyse zijn reeds in § 8 vermeld. De door hem op p. 565 gegeven figuur 4 duidt er trouwens op, dat bij meer normale temperatuur dan de gekozen werktemperatuur van -70° F, de aangegeven analyse niet juist is, daar dan geen evenredigheid van spanning en deformatie wordt gevonden.

§ 13. *Schokproeven.*

Verschillende onderzoekers hebben nagegaan hoe bitumen-mineeraal-mengsels zich bij schokbelasting gedragen. Bij deze proeven werd veelal onderzocht van welke hoogte vallend een bepaald gewicht het materiaal ernstig beschadigde (zie o.a. RADER (71) en TAYLOR (89)). Door VOKAC (94) werd bepaald hoeveel malen men een gewicht van een bepaalde hoogte moet laten vallen om beschadigingen te verkrijgen. Al deze onderzoekers belasten het materiaal op druk.

Volgens KLAPPER (46) worden in het Italiaansche Wegenbouw Laboratorium schokproeven uitgevoerd, waarbij het materiaal op buiging wordt belast.

Door VOKAC zijn verschillende betrekkingen afgeleid tusschen de valhoogte van den door hem gebruikten hamer (2 kg), den weerstand van het materiaal en het aantal malen, dat hij den hamer moest laten vallen om breuk te verkrijgen en hij berekent daaruit de energie, noodig om met een enkelen slag breuk te veroorzaken. Met behulp van deze berekeningen is het wel mogelijk de eigenschappen van verschillende materialen onderling te vergelijken, doch voor constructiedoeleinden zijn deze gegevens evenmin als die van de andere onderzoekers geschikt.

Aan de in Hoofdstuk I § 6 gestelde criteria voldoen zij uit den aard der zaak (deformatiesnelheid!) geen van alle.

§ 14. *Beschouwing der verkregen resultaten.*

Bij de bespreking der verschillende bekende onderzoekingsmethoden is gebleken, dat bij geen dezer methoden de drie fundamenteele grootheden, welke tezamen den weerstand van een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel tegen plastische deformatie beheerschen, van elkaar gescheiden en kwantitatief bepaald kunnen worden. Variatie in de waarden van een der grootheden aangebracht, b.v. door variatie van de deformatiesnelheid, beïnvloedt op een dusdanige wijze het aandeel, dat een der andere deelen in den totalen weerstand heeft, dat een splitsing van den totalen weerstand in de drie fundamenteele grootheden onmogelijk wordt.

Om deze redenen was het voor ons doel noodzakelijk een nieuwe onderzoekingsmethode ter bepaling van den weerstand tegen plastische deformatie van het materiaal te ontwikkelen. Deze methode wordt in de volgende hoofdstukken uitvoerig besproken en aan de hand van proefresultaten toegelicht.

De oudere onderzoekingsmethoden blijven evenwel geschikt om de eigenschappen van verschillende mengsels te vergelijken, b.v. ter contrôle van de bereiding en van de verwerking van het materiaal of ter vergelijking van de eigenschappen van een nieuw te bouwen wegdek met die van een wegdek, dat onder gelijke omstandigheden als waaronder de nieuwe weg komt te verkeerren, op tevredenstellende wijze reeds langeren tijd dienst heeft gedaan.

HOOFDSTUK III.

Beschouwingen over het systeem bitumen-mineraalaggregaat. Grondidee der celproeven.

§ 1. *Bitumen-mineraalaggregaat-mengsels als systeem dat uit drie fasen bestaat.*

In Hoofdstuk I § 3 en 4 werd in groote trekken aangegeven, uit welke bestanddeelen bitumen-mineraalaggregaat-mengsels zijn samengesteld, en welke eigenschappen, naar verwacht mag worden, een dergelijk mengsel zal bezitten.

Het is evenwel gewenscht thans er op te wijzen, dat in een gecompriëerd bitumen-mineraalaggregaat-mengsel nog holten aanwezig zijn (veelal eenige volume %) welke met gas (vnl. lucht) zijn gevuld.

Een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel vormt dus in feite een systeem dat uit drie fasen bestaat. In dit systeem zal bij benadering 77 vol. % ingenomen worden door de aggregaatphase, 20 vol. % door de vloeistofphase, terwijl de gasphase ca. 3 vol. % zal innemen. Bovengenoemde getallen geven een globaal beeld van de verdeling van het materiaal over de verschillende fasen.

Beschouwt men de bijdrage, welke elk dezer fasen aan den weerstand van het mengsel tegen deformatie kan leveren, dan is het zonder meer duidelijk, dat dit aandeel voor de gasphase practisch nihil moet zijn. Het zou evenwel onjuist zijn te concludeeren, dat de gasphase voor het gedrag van het materiaal van geen belang is.

In Hoofdstuk VI § 8 zal aan de hand van resultaten van proeven worden aangetoond, dat de gasphase voor vele soorten constructies een integreerend deel van het materiaal uitmaakt, daar bij het ontbreken van deze phase, resp. indien deze phase een te gering deel van het geheel uitmaakt, de weerstand van het materiaal in sterke mate gereduceerd wordt.

§ 2. *Bitumen-mineraalaggregaat-mengsel als een homogeen isotroop materiaal beschouwd.*

Wanneer men de mechanische eigenschappen van bitumen-

mineraalaggregaat-mengsels wil uitdrukken in fundamenteele fysische grootheden, is het noodig bij theoretische beschouwingen het materiaal als homogeen isotroop te beschouwen. In werkelijkheid wordt elke doorsnede van het materiaal gedeeltelijk door de aggregaatphase, gedeeltelijk door de vloeistofphase en gedeeltelijk door de gasphase ingenomen. Indien men evenwel de spanning in het materiaal over een zoo groot oppervlak bepaalt, dat de gemiddelde waarde van de spanning niet door de inhomogeniteit van het materiaal wordt beïnvloed, en met behulp van de gevonden waarden der spanning de eigenschappen van het materiaal in de fundamenteele fysische grootheden uitdrukt, dan is het toelaatbaar het materiaal als een homogeen materiaal op te vatten (zie ook (11) § 1).

Bij de uitvoering der onderzoekingen dient evenwel zorg te worden gedragen, dat de in werkelijkheid heerschende inhomogeniteit van het materiaal de resultaten der proef niet beïnvloedt. Dit kan geschieden door de afmetingen van het te onderzoeken proeflichaam voldoende groot te kiezen ten opzichte van de afmetingen der grootste aggregaatdeelen.

De resultaten der onderzoekingen zullen voor de practische toepassingen alleen kunnen worden overgenomen voor die constructies, waarin aan dezelfde voorwaarden wordt voldaan.

Bij het onderzoek dient verder te worden nagegaan, of het materiaal tengevolge van de deformatie, welke het ondergaat, zijn isotropie verliest en of dit bij het bepalen der fysische grootheden tot uitdrukking dient te worden gebracht.

Tenslotte dient nog te worden nagegaan, of het materiaal bij vloeï een constant volume behoudt, dan wel een volume-verandering ondergaat. Zoo mogelijk dient de invloed van een eventueele volume-verandering op de waarden der bepaalde grootheden te worden nagegaan.

§ 3. *Breukhypothesen van vaste stoffen.*

Door verschillende onderzoekers zijn hypothesen opgesteld met het doel de omstandigheden, waaronder een vaste stof breukverschijnselen vertoont, te omschrijven. Het is evenwel juister deze breukhypothesen op te vatten als hypothesen, welke de omstandig-

heden vastleggen, waarbij het materiaal plastische deformatie begint te vertoonen.

Deze hypothesen kunnen in een drietal groepen worden verdeeld en wel:

1. Hypothesen, welke een spanningsvoorwaarde omschrijven.
2. Hypothesen, welke een deformatievoorwaarde inhouden.
3. Hypothesen, welke een arbeidsvoorwaarde vastleggen.

ad 1. Spanningshypothesen.

LAMÉ-RANKINE (48, pag. 341) veronderstellen, dat plastische deformaties zullen optreden, wanneer de grootste spanning (trek of druk) een zekere grenswaarde overschrijdt.

COULOMB-GUEST (48, pag. 340) nemen aan, dat de grenstoestand afhankelijk is van de waarde van de grootste optredende schuifspanning.

MOHR (48, pag. 341) neemt aan, dat de schuifspanning in geen enkel vlak een waarde mag overschrijden, welke een functie is van de op dit vlak gerichte normaalspanning.

DUGUET (48, pag. 342) stelt deze functie voor als een eenvoudige evenredigheid (een soort wrijvingscoëfficiënt).

BECKER neemt aan, dat de waarde der hoofdspinning na aftrek van een deel, dat bepaald wordt door de andere hoofdspinningen en den zijdelingschen contractiecoëfficiënt van POISSON een bepaalde waarde niet mag overschrijden, terwijl het verschil tusschen grootste en kleinste hoofdspinning tevens aan een bepaalde grens gebonden is.

BRIGDMANN (7) geeft aan dat onder bepaalde omstandigheden de grootste afwijking van de hydrostatische spanning in het materiaal maatgevend is.

ad 2. Deformatiehypothesen.

PONCELET (48, pag. 339) geeft aan, dat de grootste specifieke rek (resp. verkorting) beslissend is voor den grenstoestand. De hypothese van BECKER komt neer op een combinatie van de hypothesen van COULOMB en van PONCELET.

Volgens BRIGDMANN (7) kan ook de grootste relatieve verlenging, gerekend vanaf den toestand van alzijdige gelijkmatige samendrukking, den breuk bepalen.

ad 3. Arbeidshypothesen.

De hypothese van MAXWELL, veelal genoemd naar HUBER-MISES-HENKY (32), geeft aan, dat de vormveranderingsarbeid beslissend is voor den grenstoestand.

SCHLEICHER (32, noot 3 op pag. 463) neemt verder nog aan, dat de waarde van den vormveranderingsarbeid afhankelijk is van de gemiddelde hoofdspanning.

Beide hypothesen stellen voorop, dat de deformatiewet van HOOKE op het materiaal toepasselijk is.

De deformatie van het materiaal zal, indien de grensspannings-toestand niet wordt overschreden, volkomen elastisch zijn. Bij overschrijding der grensspanning zal de terugveering onvolledig zijn.

Voor beide gevallen kan de terugveering momentaan of vertraagd verlopen.

De drempelwaarde der schuifspanning bij overschrijding waarvan de deformatie onvolkomen elastisch wordt, duidt men aan met den naam zwicht(schuif)spanning, of ook wel elasticiteits- of vloeigrens.

Bij overschrijding der zwichtspanning vloeit het materiaal plastisch. Men spreekt dan van plastische deformaties.

Verschillende gevallen, die zich bij plastisch deformeeren kunnen voordoen zijn beschreven door BURGERS, SAAL en BIEZENO (11), wier nomenclatuur hier gevolgd wordt.

§ 4. *Deformatie van vloeibare stoffen.*

Materialen, welke reeds bij de kleinste schuifspanning een blijvende deformatie vertoonen, noemt men vloeibare stoffen. De verschillende gevallen, die zich bij het deformeeren van vloeibare stoffen kunnen voordoen, worden door BURGERS, SAAL en BIEZENO (11) beschreven. Men verstaat onder een echte vloeistof een vloeibare stof, welke onder een willekeurig groote schuifspanning vloeit met een deformatiesnelheid, welke een constante waarde bereikt. Is de verhouding tusschen schuifspanning (τ) en vloeisnelheid (D) een constante, dan spreekt men van een „Newtonsche” vloeistof. Is deze verhouding, de viscositeitscoëfficiënt, of ook kortweg de viscositeit genaamd, van de waarde van de spanning

of van de vloeisnelheid afhankelijk, dan spreekt men van een „niet-NEWTONSche” vloeistof. Ook gebruikt men wel de termen „lineair viskeuze” resp. „niet-lineair viskeuze” vloeistof.

Men spreekt verder van „differentieele viscositeit” om de helling der kromme in het τ -D diagram aan te geven.

Voor plastische materialen kan deze laatste term tevens worden gebruikt, om het verloop van het vloeiproces bij plastische deformatie aan te geven.

§ 5. *Deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.*

In Hoofdstuk I § 4 werd op grond van uit andere onderzoekingen bekende eigenschappen van de samenstellende deelen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels een verwachting uitgesproken over de mechanische eigenschappen van dit materiaal.

Het is duidelijk dat de omschrijving van den grensspannings-toestand van dit materiaal dient aan te sluiten bij de hypothesen van MOHR of bij die van DUGUET. Bij deze omschrijving wordt in het bijzonder met de eigenschappen van de aggregaatphase rekening gehouden.

Het onderzoek naar de eigenschappen van een dergelijk materiaal stelt evenwel bepaalde voorwaarden aan de uitvoering van de proef, daar de plasticiteitsvoorwaarde een functie van den spanningstoestand inhoudt, zoodat de experimenteele bepaling der zwichtspanning bij verschillende spanningstoestanden dient te geschieden.

Bij een één-dimensionalen spanningstoestand is dit niet mogelijk, zoodat het voor de bepaling der plasticiteitsgrens noodzakelijk is het materiaal bij den twee- of eventueel drie-dimensionalen spanningstoestand te onderzoeken. Het onderzoek bij twee-dimensionalen spanningstoestand of bij drie-dimensionalen spanningstoestand met twee gelijke hoofdspansingen verdient wegens de grootere eenvoudigheid de voorkeur.

Bij het onderzoek van materialen wordt bij de bepaling der sterkte echter steeds deze grenstoestand overschreden, zoodat plastische deformaties zullen optreden.

Bevat het te onderzoeken materiaal een vloeistofphase, zooals hier het geval is, dan kan men verwachten, dat het materiaal bij

overschrijding van den grenstoestand een van de deformatiesnelheid afhankelijkten weerstand tegen deformatie zal bezitten, welke door een differentieele viscositeit kan worden uitgedrukt.

Op grond van deze analyse is het te verwachten, dat een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel bij deformatie zich zal gedragen als een plastisch deformeerbare stof, waarvan de deformaties bij overschrijding der zwichtspanning plastisch-viskeus zullen verlopen. De snelheidsafhankelijkheid van den weerstand tegen deformatie zal in een differentieele viscositeit kunnen worden uitgedrukt. De waarde der zwichtspanning zal door den spannings-toestand van het materiaal worden beïnvloed.

Bij de uitvoering van het onderzoek van dit materiaal dient er tevens rekening mede te worden gehouden, dat tengevolge van de aanwezigheid der vloeistofphase de elastische deformaties met vertragingverschijnselen gepaard kunnen gaan. Het is daarom wenschelijk om het materiaal gedurende een zekeren tijd, vóórdát de eigenlijke meting wordt uitgevoerd, te onderwerpen aan spanningen, welke de spanningen, die gedurende de meting op het materiaal inwerken, zooveel mogelijk in intensiteit nabij komen.

§ 6. *Grondidee der celproeven.*

Bij het zoeken naar een beproevingsmethode, welke aan de verschillende hierboven ontwikkelde desiderata voldoet, bleek in Hoofdstuk II reeds, dat de gebruikelijke wijzen, waarop vaste stoffen worden onderzocht, voor het gestelde doel ongeschikt zijn.

Daarom werd nagegaan op welke wijze het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van materialen, welke volgens eenzelfde systeem als bitumen-mineraalaggregaat-mengsels zijn opgebouwd, wordt uitgevoerd. Bijzondere aandacht werd gewijd aan het systeem bodemmateriaal-water-lucht (of waterdamp), dat een volkomen analoog systeem vormt, waaraan in de laatste decennia veel aandacht is besteed.

Bij de bestudeering van de in de grondmechanica gebruikelijke onderzoekingsmethoden bleek, dat de door Prof. A. S. KEVERLING BUISMAN te Delft (lit. 43 en 45) ontwikkelde celproef, welke blijkens een recente publicatie (36) de algemeene aandacht trekt, bij uitstek voor ons doel geschikt te maken is.

Bij deze proef, zooals zij in de grondmechanica wordt toegepast,

wordt het inwendige evenwicht van een cylinder van het materiaal bepaald onder invloed van een verticalen belastingdruk en een voor het evenwicht benoodigden horizontalen steundruk, welke laatste door middel van een vloeistof op het materiaal wordt uitgeoefend.

Verandering in de waarde der verticale belasting heeft een verandering in de waarde van den voor evenwicht benoodigden steundruk ten gevolge.

De op deze wijze in het materiaal opgewekte spanningstoestand is drie-dimensionaal, doch bezit twee gelijke hoofdspansingen en voldoet dus aan een der eischen, waaraan bij ons onderzoek moet worden voldaan. Bovendien is de spanningstoestand in elk punt van het materiaal hetzelfde, hetgeen de analyse der resultaten ten zeerste vergemakkelijkt.

Het is verder mogelijk de belasting geruimen tijd op het materiaal te laten inwerken, vóórdát de eigenlijke meting wordt uitgevoerd, zoodat de invloed van vertragingverschijnselen bij het deformeeren van het materiaal uitgeschakeld kan worden.

De proef wordt door ons in ietwat gewijzigden vorm uitgevoerd, waarbij zorg is gedragen, dat het materiaal met een bepaalde, willekeurig te stellen snelheid wordt gedeformeerd.

Daar de spanningstoestand in elk punt van het materiaal hetzelfde is, moet men aannemen, dat de deformatiesnelheid ook overal hetzelfde is.

Dit geldt uit den aard der zaak alleen, indien het materiaal homogeen is, hetgeen hooge eischen aan de bereiding van het proefmateriaal stelt.

Een gedetailleerde beschrijving van de uitvoering der proef en van de bereiding der proefcylinders wordt in Hoofdstuk V gegeven.

HOOFDSTUK IV.

Theorie der celproeven. Uitwerken van de proefresultaten volgens MOHR.

§ 1. *Hypothesen der theorie.*

In het volgende zal een theorie ontwikkeld worden, die de verschijnselen, welke gedurende het deformeeren van bitumen-mineraal-aggregaat-mengsels bij de celproef optreden, omschrijft.

De ontwikkeling dezer theorie is evenwel alleen mogelijk, indien de eigenschappen van het materiaal met eenige veronderstellingen, welke hieronder worden besproken, in overeenstemming zijn.

Verondersteld wordt, dat het materiaal voldoet aan een plasticiteitsvoorwaarde, welke een combinatie van de hypothesen van DUGUET en MOHR vormt.

Er wordt namelijk aangenomen, dat de zwichtpanning in het materiaal overschreden wordt, indien de schuifspanning een waarde verkrijgt, welke samengesteld is uit een beginweerstand, (de initiaalweerstand genaamd, τ_e) en een deel, dat met de normaalspanning op het schuifvlak evenredig is ($f \times \sigma$). De coëfficiënt f kan als een wrijvingscoëfficiënt worden opgevat. Deze evenredigheid wordt om redenen, die later zullen blijken, bij voorkeur geschreven als $f = tg \varphi_e$, waarin φ_e de hoek van inwendige wrijving wordt genoemd.

Er wordt aangenomen, dat bij plastische deformatie van het materiaal de beginweerstand ten volle tot ontwikkeling is gekomen en bij de verdere deformatie eenzelfde waarde behoudt, terwijl ook de waarde van den hoek van inwendige wrijving in het gebied der plastische deformaties constant wordt aangenomen. Verder wordt verondersteld, dat het materiaal homogeen en isotroop is, en bij deformatie geen wijziging van het volume plaats vindt, terwijl de plastische deformatie een constante waarde der differentieele viscositeit vertoont.

§ 2. *Spanningen en deformaties bij de celproef.*

a. *Spanningen.*

In een materiaal in evenwichtstoestand kan de spanning in een willekeurig vlak berekend worden uit de waarden der hoofdspansingen. Voor het drie-dimensionale spanningsgeval met twee onderling gelijke hoofdspansingen gaan de daarvoor ontwikkelde formules over in

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (2)$$

Hierin stelt σ_1 de verticale, grootste hoofdspanning voor en σ_3 de beide kleinste, onderling gelijke horizontale hoofdspansingen, terwijl α den hoek van het vlak met den horizon aangeeft (zie ook lit. 48, p. 203, waaruit deze formules kunnen worden afgeleid).

Ook kan men de spanning $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ splitsen in een hydrostatische spanning

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

en een deviatorisch spanningsysteem

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}, \sigma_3 - \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}, \sigma_3 - \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

of

$$\frac{2(\sigma_1 - \sigma_3)}{3}, -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3}, -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3}.$$

Ten gevolge van de hydrostatische spanning zal het materiaal een volumeverandering, welke met in alle richtingen gelijke specifieke lengteveranderingen gepaard gaat, ondergaan, terwijl het deviatorische spanningsysteem afschuivingen ten gevolge heeft. Dit behoeft niet met volumeveranderingen gepaard te gaan.

Een zelfde beschouwing kan men ook ontwikkelen, indien men niet van de hoofdspansingen σ_1 en $\sigma_2 = \sigma_3$, doch van de spanningen σ_{α} en τ_{α} in een vlak α uitgaat.

Deze vergelijkingen bezitten ook geldigheid, indien het materiaal in beweging is, doch de massacrachten zoo klein zijn, dat zij verwaarloosd kunnen worden. Zij kunnen dus ook worden toegepast, indien het materiaal met eenparige snelheid afschuift, en indien bij meer gecompliceerde deformatieverschijnselen de rotatie van elk willekeurig elementair lichaam met zeer geringe snelheid geschiedt; in het algemeen wanneer men de kinetische effecten kan verwaarloosen.

De grootste schuifspanning blijkt op te treden in vlakken, die een hoek van 45° met de hoofdassen maken.

β. Afschuiving.

Bij deformatie met twee onderling gelijke hoofdspansingen zullen in een homogeen isotroop materiaal de deformaties in de richting van deze onderling gelijke hoofdspansingen ook onderling gelijk zijn. Indien volumeveranderingen kunnen worden verwaarloosd, zal de relatieve samendrukking in deze richtingen $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ met de samendrukking in de derde richting samenhangen volgens:

$$(1 - \varepsilon_1) (1 - \varepsilon_2) (1 - \varepsilon_3) = 1 \quad \dots \quad (3)$$

zoodat bij ε_1 klein geldt:

$$\varepsilon_3 = -\frac{1}{2} \varepsilon_1. \quad \dots \quad (4)$$

Beschouwen wij thans voor een drie-dimensionale deformatie, waarbij $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$, een vlak AB onder een hoek α met de horizontaal (fig. 1 pag. 40). De punten van het vlak veranderen door een vervorming $+\varepsilon_1$, in verticale richting van plaats.

Door deze vervorming verplaatst het punt A zich naar A' en B naar B' . De verplaatsing van A bedraagt $dl = \varepsilon_1 l$; die van B $\frac{1}{2} \frac{dl}{\text{tg} \alpha}$. De hoek, die het vlak $A'B'$ met de horizontaal maakt, is daardoor geworden

$$\text{tg}(\alpha + d\alpha) = \frac{l - dl}{\frac{l}{\text{tg} \alpha} + \frac{1}{2} \frac{dl}{\text{tg} \alpha}} = \text{tg} \alpha \left(1 - \frac{3 dl}{2 l} \right) \quad \dots \quad (5)$$

zoodat volgens:

$$\frac{\operatorname{tg}(a + da) - \operatorname{tga}}{da} = \frac{d \operatorname{tga}}{da} = \frac{1}{\cos^2 a}$$

geldt:

$$\left. \begin{aligned} a\alpha &= \cos^2 a \, d \operatorname{tga} = -\cos^2 \operatorname{tga} \cdot \frac{3 \, dl}{2 \, l} = \\ &= -\frac{3 \, dl}{2 \, l} \sin a \cos a = -\frac{3 \, dl}{4 \, l} \sin 2a \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

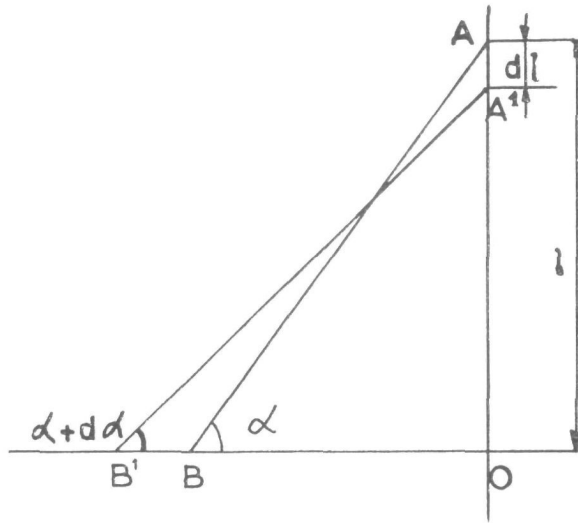


Fig. 1.

Beschouwen wij thans een vlak $a + 90^\circ$. Dit ondergaat een draaiing

$$da = -\frac{3 \, dl}{4 \, l} \sin(2a + 180) = +\frac{3 \, dl}{4 \, l} \sin 2a.$$

De hoekverandering, dus de afschuiving, tusschen twee loodrecht op elkaar staande vlakken a en $a + 90^\circ$ bedraagt dientengevolge

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{3 \, dl}{2 \, l} \sin 2a \text{ of, indien } \varepsilon_1 = \frac{dl}{l} \\ \gamma_\alpha &= \frac{3}{2} \varepsilon_1 \sin 2a \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

Uit formule (7) volgt, dat de grootste afschuiving plaats vindt in vlakken, die een hoek van 45° met de hoofdspanningsassen maken.

γ . *Afschuifsnelheid.*

Daar de afschuifsnelheid de eerste afgeleide naar den tijd van de deformatie is, vindt men voor de hoekverandering per tijdseenheid:

$$D_\alpha = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_1}{dt} \sin 2\alpha \dots \dots \dots (8)$$

δ . *Samenvatting.*

Het blijkt, dat zoowel de schuifspanning, de afschuiving als de afschuifsnelheid in de vlakken onder 45° maximaal is.

De formules kunnen op eenvoudige wijze als volgt geschreven worden:

$$\tau_{45} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \tau_\alpha = \tau_{45} \sin 2\alpha \dots (9)$$

$$\gamma_{45} = \frac{3}{2} \frac{dl}{l} = \frac{3}{2} \varepsilon_1 \quad \gamma_\alpha = \gamma_{45} \sin 2\alpha \dots (10)$$

$$D_{45} = \frac{d\gamma_{45}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_1}{dt} \quad D_\alpha = D_{45} \sin 2\alpha \dots (11)$$

Uit deze formules, waarvan de afleiding op zuiver geometrische argumenten is gebaseerd, blijkt, dat de afhankelijkheid der waarden van schuifspanning, afschuiving en afschuifsnelheid in vlak α_0 van die in het vlak onder 45° hetzelfde is voor alle materialen.

Dit resultaat is onafhankelijk van de eigenschappen van het materiaal, waaruit het beschouwde lichaam is opgebouwd, mits dit homogeen en isotroop is, en bij deformatie geen volumeverandering ondergaat.

Uit deze beschouwingen volgt, dat, indien de spanningsverdeling in elk punt van het proeflichaam dezelfde is, de deformatiesnelheidsverdeling in elk punt er van dezelfde zal zijn voor een homogeen isotroop materiaal.

De deformaties zullen steeds op eenzelfde wijze verlopen, onafhankelijk van de verdere eigenschappen van het materiaal.

§ 3. *Theorie over den weerstand tegen plastische deformatie van droog mineraalaggregaat.*

Uitgaande van een constanten wrijvingscoëfficiënt (f) en een constante waarde van den initiaalweerstand τ_e kan berekend worden, bij welke combinatie van hoofdspanningen in het materiaal glijding zal optreden.

Hiervoor is noodig, dat in een enkel vlak

$$\tau_\alpha = \tau_e + f\sigma_\alpha, \quad (12)$$

terwijl voor andere vlakken $\tau_\alpha - \tau_e - f\sigma_\alpha < 0$ kan zijn.

In het „schuifvlak” α_0 is deze functie, welke wordt uitgedrukt door:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha_0 - \tau_e - f \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha_0 \right) = 0. \quad (13)$$

maximaal, zoodat door differentieëren volgt:

$$2 \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha_0 + 2f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha_0 = 0. \quad . . . (14)$$

Uit (14) volgt, dat

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -\frac{1}{f} (15)$$

Het schuifvlak ligt dus niet bij 45° , maar bij een hoek $\alpha_0 = 45 + \frac{\varphi_e}{2}$ ($f = \operatorname{tg} \varphi_e$), en zijn ligging wordt niet beïnvloed door de waarde van den initiaalweerstand τ_e .

Dit „schuifvlak” zal bij schuiving van grondmassa's, welke soms meer het karakter van een breuk draagt, inderdaad physische beteekenis hebben, doch bij plastische deformatie zal in dit vlak niet de grootste afschuiving kunnen optreden, daar volgens formule (7) deze in het 45° vlak optreedt.

Voor ons onderzoek dient men dit „schuifvlak” dan ook op te vatten als een hulpgrootheid, welke ons bij het ontwikkelen van beschouwingen omtrent de wijze, waarop de verschillende samen-

stellende deelen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels den weerstand tegen plastische deformatie van het materiaal beïnvloeden, goede diensten bewijst, doch geen reële physische beteekenis bezit.

§ 4. *Theorie over den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.*

Ook hier wordt een constante waarde van den wrijvingscoëfficiënt (f) vooropgesteld, alsmede een constante initiaalweerstand τ_e . Daarnaast wordt verondersteld, dat na overschrijding van den grensspanningstoestand het materiaal een constante waarde der differentieele viscositeit bezit, waardoor een schuifspanning (door ons de viskeuze schuifspanning $\tau_{visk.}$ genaamd) aanwezig moet zijn, of in formule gebracht:

$$\tau_{visk.} = K \eta D. \quad (16)$$

Hier stelt η de viscositeit der vloeistofphase voor, terwijl K een coëfficiënt is, welke den invloed van de samenstelling van het aggregaat op de waarde van den viskeuzen weerstand aangeeft.

De term $K \eta$ stelt de vloeieigenschappen van het materiaal, zooals zij in de differentieele viscositeit van het materiaal tot uiting komen, voor en wordt door ons de viscositeit der massa (η_m) genoemd.

a. Er wordt verondersteld, dat de normaalspanning geheel van korrel op korrel wordt overgebracht, terwijl deze korrelspanning niet door de viskeuze vloeistofspanning wordt beïnvloed.

In het schuifvlak moet de schuifspanning nu gelijk zijn aan de som van initiaalweerstand, wrijvingsweerstand en viskeuzen weerstand, of

$$\tau_{\alpha_0} = \tau_e + f \sigma_{\alpha_0} + K \eta D_{\alpha_0}. \quad (17)$$

waaruit volgt:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha_0 - \tau_e - f \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha_0 \right) - K \eta D_{\alpha_0} = 0 \quad (18)$$

Verder is

$$D_{\alpha_0} = D_{45} \sin 2\alpha_0 \quad (11)$$

zoodat:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha_0 - \tau_e - f \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha_0 \right) - K\eta D_{45} \sin 2\alpha_0 = 0 \quad (19)$$

Deze functie is maximaal in het vlak α_0 , wanneer

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha_0 + 2f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha_0 - 2K\eta D_{45} \cos 2\alpha_0 = 0 \quad (20)$$

of

$$(\sigma_1 - \sigma_3 - 2K\eta D_{45}) \cos 2\alpha_0 + f(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha_0 = 0 \quad (21)$$

of

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = - \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - 2K\eta D_{45}}{f(\sigma_1 - \sigma_3)} = - \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - 3K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}}{f(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (22)$$

Voor $\frac{d\varepsilon_1}{dt} = 0$ gaat deze formule over in formule (15).

Hier blijkt dus de waarde van α_0 afhankelijk te zijn van het verschil der hoofdspansingen en van de waarde van de viskeuze schuifspanning.

Stelt men $2\alpha_0 - 90 = \varphi'$, dan vindt men:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{f}{1 - \frac{3K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}}{\sigma_1 - \sigma_3}} \quad (23)$$

en uit (19) en (22)

$$\sin \varphi' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + \frac{2\tau_e}{f}} \quad (24)$$

Het blijkt dus, dat φ' met toenemende waarde van $K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}$ toeneemt, evenals met afnemende waarde van τ_e , dwz. lage initiaalweerstand en groote viskeuze weerstand geven een grootere helling aan het schuifvlak.

β . Neemt men evenwel in aansluiting aan de gebruikelijke beschouwingen aan, dat bij de deformatie van de vloeistofphase in deze phase normaalspanningen optreden, welke den druk, die de

aggregaatkorrels op elkaar uitoefenen verminderen, dan komt men tot een van het bovenstaande afwijkend resultaat.

Bij deformatie als zuiver viskeuze vloeistof van een vloeibare stof met een viscositeit $K\eta$ zullen de hoofdspanningen voor het drie-dimensionale spanningsgeval met twee onderling gelijke hoofdspanningen bedragen:

$$\sigma'_1 \text{ resp. } \sigma'_2 = \sigma'_3.$$

In het 45° vlak treedt dientengevolge een schuifspanning

$$\tau_{45} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$$

op, terwijl de schuifsnelheid bedraagt volgens (11):

$$D_{45} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_1}{dt}.$$

Dientengevolge geldt:

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = K\eta \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_1}{dt} \quad \dots \quad (25)$$

of

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = 3K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \quad \dots \quad (26)$$

(Vergelijk ook litt. (24), waar deze formule gegeven wordt in den vorm $\sigma = 3K\eta a$.)

Tengevolge van de aanwezigheid van dit spanningsstelsel, dat voor de beweging van de vloeistofphase als noodzakelijk wordt geacht, treden in een vlak α de volgende spanningen op:

$$\sigma'_\alpha = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} + \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos 2\alpha = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} + \frac{3}{2} K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \cos 2\alpha. \quad (27)$$

en

$$\tau'_\alpha = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin 2\alpha = \frac{3}{2} K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \sin 2\alpha. \quad \dots \quad (28)$$

Deze spanningen zijn noodig om den viskeuzen weerstand van het materiaal te overwinnen. De normaalspanning, die door de korrels moet worden overgeslagen bedraagt dus: $\sigma_\alpha - \sigma'_\alpha$.

De algemeene voorwaarde voor vloeï wordt nu:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha_0 - f \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha_0 - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{3}{2} K \eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \cos 2\alpha_0 \right) - \frac{3}{2} K \eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \sin 2\alpha_0 - \tau_e = 0 \dots \dots \dots (29)$$

Voor constante waarde van σ'_1 en σ'_3 geeft differentiatie:

$$2 \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{3}{2} K \eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \right) \cos 2\alpha_0 = 2f \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{3}{2} K \eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \right) \sin 2\alpha_0 \quad (30)$$

of

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = - \frac{1}{f} \dots \dots \dots (31)$$

zoodat thans de ligging van het glijdvlak onafhankelijk is van de waarde van den initiaalweerstand, alsmede ook van die van den viskeuzen weerstand.

Substitutie hiervan in (29) geeft, na invoering van $f = \operatorname{tg} \varphi_e$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3 - 3K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}}{2} \frac{1}{\cos \varphi_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - \sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \operatorname{tg} \varphi_e + \tau_e \dots (32)$$

Voor verdere uitwerking dient men nu aan te geven, welke waarde σ'_1 en σ'_3 bezitten. In het voorgaande werd onder sub α stilzweigend aangenomen, dat $\sigma'_1 = \sigma'_3 = 0$.

Neemt men evenwel aan ¹⁾, dat de hydrostatische druk in de vloeïstofphase = 0, hetgeen in verband met de aanwezigheid van eenige holle ruimte in het materiaal het meest voor de hand ligt, dan volgt daar uit:

$$\begin{aligned} \text{en dus} \quad & \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = 0 \\ & \sigma'_1 + 2\sigma'_3 = 0 \dots \dots \dots (33) \end{aligned}$$

in verband met

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = 3K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} \dots \dots \dots (26)$$

$$\sigma'_1 = 2K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}$$

$$\sigma'_3 = -K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}$$

¹⁾ Wij danken hier Prof. Ir. C. B. BIEZENO voor zijn hulp bij deze afleiding.

Dit substitueerend levert ten slotte

$$K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{2 \cos \varphi_e}{3 - \sin \varphi_e} \times \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi_e} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi_e - \tau_e \right). \quad (34)$$

γ . Op grond van de bovenstaande theoretische beschouwingen komt men tot de volgende voorstelling van de verschijnselen, die zich bij de celproef voordoen.

Zoowel de spanning als de deformatie en de deformatiesnelheid in verschillende vlakken zijn zuiver geometrische functies van het verschil tusschen de waarden der hoofdspansingen resp. de waarden der deformatie, resp. de deformatiesnelheid in verticale richting en zijn alle maximaal in het 45° vlak, waarbij waarden verkregen worden, die onafhankelijk zijn van het materiaal.

Bezit het materiaal de eigenschap, dat de schuifweerstand in een vlak lineair met de normaalspanning op het beschouwde vlak toeneemt, dan zal de weerstand van het materiaal worden overschreden in glijdvlakken, welke een van deze evenredigheid afhankelijkken hoek met het hoofdspansingsassenstelsel maken.

Daar bij elk glijdvlak een symmetrisch ten opzichte van het assenstelsel liggend toegevoegd glijdvlak behoort, treedt de maximale deformatie, resp. deformatiesnelheid toch in het 45° vlak op. De ligging van deze glijdvlakken wordt niet beïnvloed door den initiaalweerstand van het materiaal.

Bezit het materiaal bovendien bij belastingen boven de plasticiteitsgrens een constante differentieele viscositeit, dan is het nog niet mogelijk op grond van theoretische overwegingen een exacte theorie te ontwikkelen.

Neemt men aan, dat in de viskeus vloeïende phase, welke de holten van het aggregaat ten naaste bij vult, geen normaalspanning wordt ontwikkeld, dan volgt uit de berekening, dat de ligging van het schuifvlak mede van de waarde van den viskeuzen weerstand afhankelijk is.

Neemt men evenwel in aansluiting aan de gebruikelijke opvattingen omtrent de spanningen bij vloeï van een vloeibare stof aan, dat voor den vloeï in de viskeuze phase normaalspanningen noodig zijn, welke den druk, die via de aggregaatphase wordt overgebracht beïnvloeden, dan volgt uit de berekeningen, dat de ligging der schuifvlakken zoowel onafhankelijk is van de waarde van den

initiaalweerstand als van die van den viskeuzen weerstand. Deze laatste beschouwingwijze zal bij de bestudeering van den weerstand van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels tegen plastische deformatie als de meest waarschijnlijke worden aangehouden.

δ. Bij deze berekeningen werd verondersteld, dat de hydrostatische druk op de vloeistofphase gelijk nul is, zoodat de druk, die via de aggregaatphase (de zgn. „korrelspanning” uit de Grondmechanica) wordt overgebracht bij afwezigheid van viskeuze spanningen met de resultante van de uitwendige spanningen overeenkomt.

Mochten de uitwendige spanningen ook bij evenwicht reeds een statischen druk in de vloeistofphase ten gevolge hebben (de zgn. waterspanning der Grondmechanica), dan zal de korrelspanning deze vloeistofspanning lager zijn, dan uit de uitwendige spanningen zou volgen.

De verdeling der uitwendige spanningen over „korrelspanning” en „waterspanning” vormt een statisch onbepaald probleem, dat beheerscht wordt door de samendrukbaarheid der beide fasen. Deze waterspanning zal alleen kunnen optreden, indien de gasphase in het mengsel ontbreekt, daar bij aanwezigheid der gasphase een hydrostatische druk in de vloeistofphase niet denkbaar is.

Indien een zekere „waterspanning” aanwezig is, zal men uit de proefresultaten den indruk verkrijgen, dat de waarde van den hoek van inwendige wrijving lager is dan normaal. In werkelijkheid is evenwel de wrijvingsweerstand geringer, daar de korrelspanning lager is dan de normaalspanning in de verschillende vlakken.

Het bovenstaande geldt waarschijnlijk eveneens voor bitumen-mineraalaggregaat-mengsels. Het verdient voorkeur hierbij van „aggregaatspanning” en „vloeistofspanning” te spreken.

§ 5. *Uitwerken der resultaten van de proef volgens MOHR.*

a. Door MOHR is een grafische methode ontwikkeld om de spanningen (normaal- en schuifspanning) in elk vlak in een bepaald punt voor te stellen. Hij gaat hierbij uit van de waarden der hoofdspanningen in dat punt.

Terwijl voor een beschrijving van de door MOHR ontwikkelde

methode naar de literatuur (48, pag. 204), (25), kan worden verwezen, zij hier in het kort het resultaat samengevat.

Zet men op de horizontale as van een rechthoekig assenstelsel (fig. 2) de waarden der normaalspanningen σ_1 , σ_2 , σ_3 vanaf den oorsprong uit, en trekt men een drietal cirkels σ_1/σ_2 , σ_1/σ_3 en σ_2/σ_3 , waarvan de middelpunten op deze as gelegen zijn en de snijpunten met deze as in de punten gelegen zijn op afstanden σ_1 , σ_2 , σ_3 van den oorsprong, dan worden de spanningen in een willekeurig vlak voorgesteld door een punt, dat in het veld tusschen deze drie cirkels gelegen is. Hierbij zal de abscis (de σ -as) de normaalspanning, de ordinaat (de τ -as) de schuifspanning voorstellen.

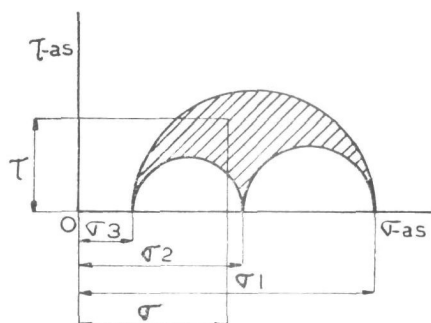


Fig. 2.

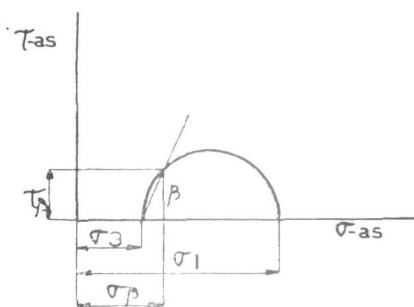


Fig. 3.

Zijn twee hoofdspanningen aan elkaar gelijk, zooals bij de celproef ($\sigma_2 = \sigma_3$), dan schrompelt het vlak tusschen de drie cirkels ineen tot een cirkel, waarop alle punten liggen, welke de spanningen in verschillende vlakken voorstellen (fig. 3). De spanning in een vlak, dat een hoek β maakt met de σ_3 -as der spanningen wordt daarbij voorgesteld door het snijpunt van den cirkel met een rechte, die uitgaat van het punt $\sigma_3/0$ onder een hoek β met de σ -as.

β . Van de in § 4 sub β ontwikkelde formule (34) kan het laatste deel van het tweede lid met behulp van de cirkels van MOHR op eenvoudige wijze worden voorgesteld (fig.4). Deze formule luidde:

$$K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \eta_m \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{2 \cos \varphi_e}{3 - \sin \varphi_e} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi_e} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi_e - \tau_e \right)$$

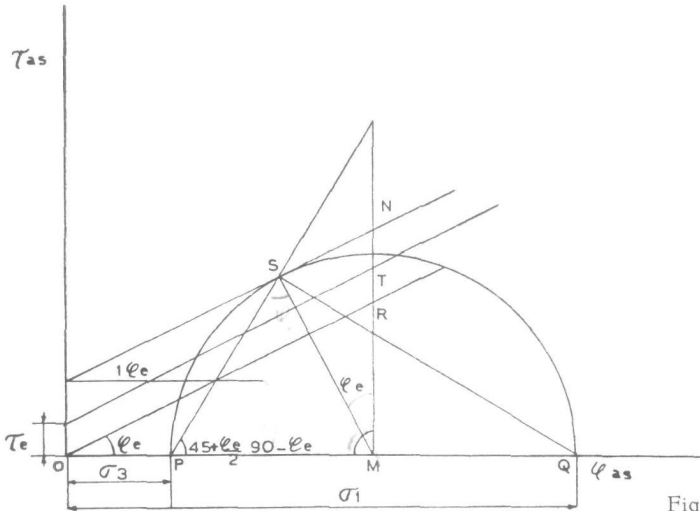


Fig. 4.

In figuur 4 zij de helling van de raaklijn in punt $S = \varphi_e$, zoodat $\angle SPQ = 45 + \frac{\varphi_e}{2}$ en $\angle NMS = \varphi_e$. Daar $SM = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, is dus $NM = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \frac{1}{\cos \varphi_e}$. Verder is $OM = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, zoodat $RM = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi_e$. Stel verder $TR = \tau_e$, dan is dus

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi_e} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi_e - \tau_e \right) = NM - RM - TR = NT.$$

Het blijkt dus, dat NT den viskeuzen schuifweerstand voorstelt, TR den initiaalweerstand en RM den wrijvingsweerstand bij een normaalspanning $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$.

In § 4 sub β werd afgeleid, dat de schuifvlakken een hoek $45 + \frac{\varphi_e}{2}$ met de σ -as maken. De spanningen in deze schuifvlakken worden dus voorgesteld door het punt S , dat bepaald kan worden door een raaklijn onder een hoek φ_e met de σ -as aan den spanningcirkel te trekken. Dezelfde raaklijn zal evenwel ook moeten raken aan een tweeden cirkel (σ'_1, σ'_3), indien de waarde van den viskeuzen weerstand onder deze spanningomstandigheden dezelfde is.

Bepaalt men nu bij gelijke deformatiesnelheid $\left(\frac{d\epsilon_1}{dt}\right)$ een tweetal

combinaties van verticale en horizontale spanningen, en stelt men deze volgens MOHR grafisch voor, dan geeft de gemeenschappelijke raaklijn de helling φ_e , welke een maat geeft voor de waarde van den weerstand van het materiaal in het glijdvlak, voor zoover deze van de normaalspanning op dit glijdvlak afhankelijk is.

Het snijpunt van deze raaklijn met de τ -as geeft de som van initiaal-weerstand en viskeuzen weerstand bij de deformatsiesnelheid $\left(\frac{d\varepsilon_1}{dt}\right)_1$ weer. Deze som wordt de schijnbare initiaalweerstand τ_{tot} genoemd.

Voert men nu nog een derde meting uit bij een andere deformatsiesnelheid $\left(\frac{d\varepsilon_1}{dt}\right)_2$ en bepaalt men de raaklijn onder denzelfden hoek φ_e met de τ -as, dan snijdt deze raaklijn van de τ -as wederom een stuk af dat den schijnbaren initiaalweerstand bij deformatsiesnelheid $\left(\frac{d\varepsilon_1}{dt}\right)_2$ voorstelt.

Daar volgens formule (34) de waarde van den viskeuzen weerstand met de deformatsiesnelheid evenredig is, kan op eenvoudige wijze langs grafischen weg in een $\tau_{tot} \left/ \frac{d\varepsilon_1}{dt} \right.$ diagram de waarde van den initiaalweerstand $\tau_e = \tau_{tot}$ voor $\frac{d\varepsilon_1}{dt} = 0$ bepaald worden.

Daarmede zijn alle gegevens (φ_e, τ_e) bekend, welke noodig zijn om ook de waarde van de viscositeit der massa $\eta_m = K\eta$ op grond van de in § 4 sub β van dit hoofdstuk ontwikkelde theorie te berekenen.

Langs dezen weg is het mogelijk op eenvoudige wijze uit de resultaten van de proef den weerstand tegen plastische deformatie van het materiaal te analyseeren en te ontleden in een deel, dat gekarakteriseerd wordt door den hoek van inwendige wrijving $\varphi_e^{(0)}$, een deel dat omschreven wordt door de (differentieele) viscositeit der massa η_m (poises) en een initiaal-weerstand τ_e (kg/cm²).

HOOFDSTUK V.

Beschrijving der apparatuur. Meetmethode. Bereiding der proefstukken.

§ 1. *Beschrijving der celapparaten.*

Bij de onderzoekingen der Grondmechanica zijn verschillende typen celapparaten in gebruik, welke door HOGENTOGLER (36) zijn beschreven. Hij maakt een indeeling der apparaten naar de wijze, waarop de proef wordt uitgevoerd en onderscheidt:

1. Proeven, gedurende welke het materiaal zijdelings niet kan uitwijken (zgn. „closed system”).
2. Proeven, waarbij deze zijdelingsche uitwijking mogelijk is (zgn. „open system”).

Bij de eerste wijze van onderzoek worden verschillende combinaties van verticale en horizontale spanningen bepaald, bij welke de resultante der uitwendige spanningen in elk vlak evenwicht maakt met den weerstand, welken het materiaal ontwikkelt, en het materiaal in rust verkeert.

Deze methode is uit den aard der zaak voor ons doel niet geschikt, daar zij geen gegevens omtrent dat deel van den weerstand van het materiaal, dat door de deformatiesnelheid wordt beïnvloed, kan verstrekken.

Voor het onderzoek naar den weerstand van bitumen-mineraal-aggregaat-mengsels tegen plastische deformatie is men dus aangevoerd op het open systeem, waarbij gelijkheid van weerstand en de resultante der uitwendige spanningen gepaard gaat met beweging. De constructie van het celapparaat dient dus een zijdelingsch uitwijken van het materiaal bij deformatie mogelijk te maken (fig. 5, pag. 53).

Een celapparaat bestaat uit een cilindrische kamer, waarin een eveneens cilindrische buis van geringeren diameter dan de kamer wordt ingebouwd. De ruimte tusschen buis en kamer is gevuld met een vloeistof (*i.c.* water). De druk, welke in deze vloeistof heerscht kan met behulp van een manometer worden afgelezen, terwijl deze

vloeistof via een nauwkeurig regelbaar naaldventiel kan worden afgetapt. Het te onderzoeken materiaal heeft een cilindrischen vorm en past juist in de binnenste buis.

De buitenwand is in staal uitgevoerd en berekend op een inwendigen druk van 20 kg/cm^2 (beproevingdruk 30 kg/cm^2). De

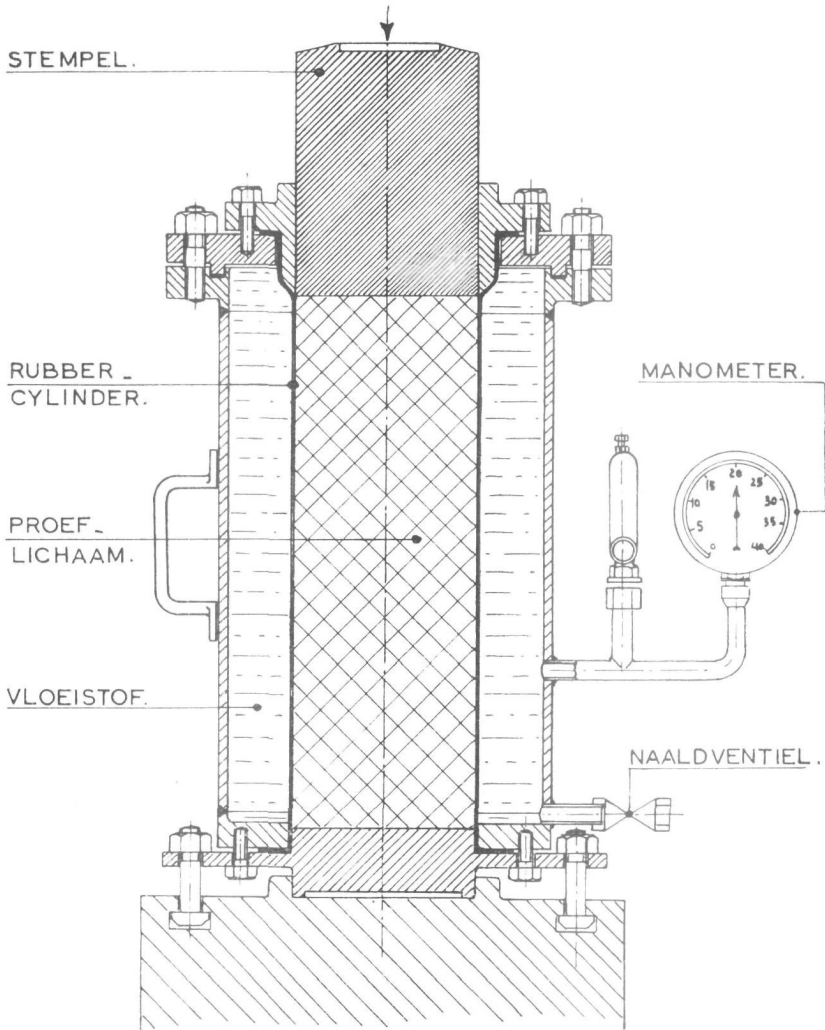


Fig. 5.

binnenbuis moet zeer gemakkelijk deformeerbaar zijn, daar de druk, welke in de vloeistof heerscht, volledig op het proefmateriaal moet worden overgebracht. Als materiaal voor de buis is rubber gekozen, dat bij beproeving reeds bij zeer lagen druk (minder dan 0.1 kg/cm^2) voldoende bleek te deformeeren.

Voor het onderzoek van asphaltbetonmengsels beschikten wij over een celapparaat, waarin cylinders van 15 cm diameter en 45 cm hoogte worden beproefd, terwijl voor het onderzoek van mengsels, die fijner aggregaat (tot 12 mm) bevatten een tweetal apparaten, waarin cylinders van 20 cm hoogte en 8 cm diameter (50 cm^2 doorsnede) kunnen worden beproefd, ter beschikking stonden. Bij beide apparaten werd een hoogste verticale druk van 50 kg/cm^2 toegepast, terwijl, zooals vermeld bij het ontwerp met een zijdelingschen druk van 20 kg/cm^2 rekening was gehouden.

Omtrent de keuze dezer afmetingen zij vermeld, dat volgens (36) een verhouding $H(\text{oogte})/D(\text{iameter}) > 2$ bij grondmechanica-onderzoekingen wenschelijk wordt geacht. In verband met de afmetingen van het grofste aggregaat en den hoekigen vorm er van werd door ons voor asphaltbeton-mengsels een $H/D = 3$ gekozen, terwijl voor de mengsels met fijner aggregaat werd volstaan met $H/D = 2\frac{1}{2}$.

De afmeting van het grofste aggregaat bedraagt voor beide apparaten ca. $\frac{1}{6}$ van den diameter van den proefcylinder, zoodat in doorsnede een enkel aggregaatsdeel $\frac{1}{36}$ deel = ca. 3% van de doorsnede van den cylinder inneemt. Het leek bij het ontwerpen der apparatuur waarschijnlijk, dat bij deze verhouding het materiaal zich met voldoende nauwkeurigheid als homogeen zal gedragen, in den zin, waarop dit in Hoofdstuk III § 2 werd besproken.

Verder zij vermeld, dat de celapparaten van een veiligheidsinrichting zijn voorzien, zoodat de werkdruk (20 kg/cm^2) niet kan worden overschreden.

Om gedurende de proef de temperatuur van de proefstukken constant te kunnen houden, is om de cel een watermantel aangebracht, waarin water van constante temperatuur circuleert.

De druk van de persen wordt via stalen vulstukken, die met een kogelscharnier op elkaar rusten, op het proeflichaam overgebracht.

§ 2. *Beschrijving van de 30 tons pers.*

Voor het onderzoek van asphaltbeton-mengsels in de groote cel-apparatuur werd beschikt over de zgn. „groote pers”. Dit is een verticaal gestelde hydraulische pers, met twee kolommen, welke in het bijzonder ingericht is tot het uitoefenen van een constante belasting gedurende de deformatie van het proeflichaam.

De pers, welke bijna 3 meter hoog is, bestaat uit twee deelen, nl. de eigenlijke pers (links op photo 1) en een drukaccumulator (rechts op de photo), welke dient om het drukmedium, waarvoor olie wordt gebruikt, onder spanning te brengen.

Deze drukaccumulator, waarvan het eigen gewicht is uitgebalanceerd, kan met water worden gevuld. Het gewicht van dit water drukt op een plunjer, welke in een met olie gevulden cylinder past, zoodat deze olie onder druk komt. Deze cylinder communiceert met den kop van de eigenlijke pers, waarin een plunjer den oliedruk op het proefstuk overbrengt. Voor de celproeven wordt de diameter van den plunjer in de pers gelijk aan dien van het proefstuk gekozen, zoodat de oliedruk gelijk is aan den druk op het proefstuk. De oliedruk wordt met behulp van manometers afgelezen.

Om de apparatuur onder druk te brengen is een tandradpompje, dat door een electrischen motor (1 PK) wordt aangedreven, aanwezig. Dit pompje onttrekt olie aan een open reservoir. De motor wordt automatisch ingeschakeld, wanneer de drukaccumulator zijn laagsten stand bereikt, zoodat ten gevolge van eventueele lekverliezen van de apparatuur de druk op het proefstuk niet kan wegvallen. In den hoogsten stand van den drukaccumulator wordt de motor, eveneens automatisch, uitgeschakeld.

De olieleiding tusschen drukaccumulator en pers is voorzien van de noodige veiligheidsinrichtingen, waardoor een te snelle daling van den drukaccumulator onmogelijk wordt.

De plunjer van de pers drukt op een traverse, welke den druk op het proefstuk overbrengt. Het gewicht van traverse en plunjer is uitgebalanceerd.

De pers is voorzien van een tweetal plunjers, welke in elkaar passen. Bij de proeven wordt de kleinste plunjer (ϕ 15 cm, $F = 176 \text{ cm}^2$) gebruikt. In dezen toestand wordt de groote plunjer vast met den cylinder verbonden. Er is bij het ontwerp op ge-

rekend, dat voor het vormen der proefcilinders grotere drukken moeten worden gebruikt. Daarbij werd door ons een druk van ca. 170 kg/cm^2 op het proefstuk noodzakelijk geacht, zoodat in totaal een kracht van $176 \times 170 = 30.000 \text{ kg}$ moest kunnen worden ontwikkeld. De binnenste plunjer met den buitensten plunjer samengekoppeld, bezitten een totale doorsnede van 600 cm^2 , zoodat bij volle belasting de oliedruk niet boven 50 kg/cm^2 stijgt.

Om lekkage van olie tusschen plunjer en cylinder tot een minimum te beperken, is een zgn. manchet aangebracht, welke bestaat uit een V-vormige leeren ring, welke door den oliedruk aangedrukt, een goede dichting teweegbrengt. Deze constructie, welke met het oog op lekkage noodzakelijk is, veroorzaakt een zekere wrijving, indien de plunjer ten opzichte van den cylinder beweegt. Deze wrijving is in richting tegengesteld aan de beweging en zal bij verticale beweging een verschil veroorzaken tusschen den druk op het proefstuk en de manometeraflecting. Wij hebben getracht den invloed van deze wrijving op den proefdruk zoo gering mogelijk te doen zijn. Daartoe is de constructie zoo uitgevoerd, dat de plunjer ten opzichte van den cylinder roteert met een omtreksnelheid, welke groot is vergeleken met de verplaatsingssnelheid in verticale richting. De resultante van beide bewegingen is dientengevolge vrijwel horizontaal gericht, zoodat ook de wrijvingsweerstand vrijwel horizontaal gericht is. De zeer geringe verticale component van de wrijvingskracht kan verwaarloosd worden, zoodat de werkelijke verticale druk op het proefstuk aan den oliedruk gelijkgesteld wordt.

De pers is voor het verkrijgen der rotatie voorzien van een inrichting, welke den cylinderwand ten opzichte van den op de traverse vaststaanden plunjer doet roteeren door middel van een 4 P.K. electromotor (rechts boven op de pers), terwijl bij den drukaccumulator de plunjer ten opzichte van den vaststaanden cylinder wordt bewogen door een electromotor van 1.5 P.K. (links boven op den drukaccumulator).

Om de deformatie van het proefstuk te bepalen wordt de verplaatsing van de traverse ten opzichte van de kolommen van de pers gemeten. Hiertoe beschikken wij over een penetrometer (aflecting in 0.1 mm) en een micrometerklokje (aflecting in 0.01 mm). De geheele pers is op een raam van I balken gemonteerd, dat direct op de binten van het gebouw rust.

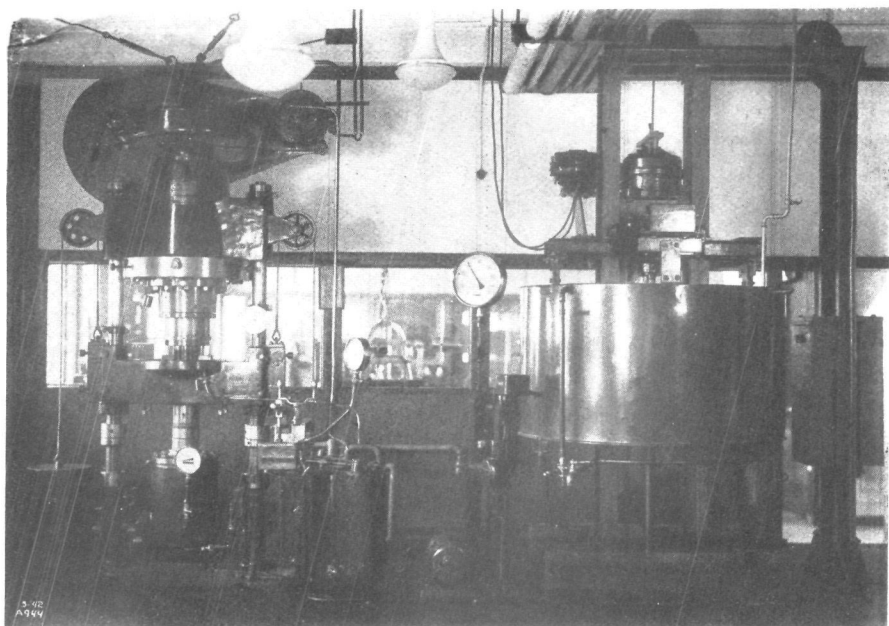


Foto 1.

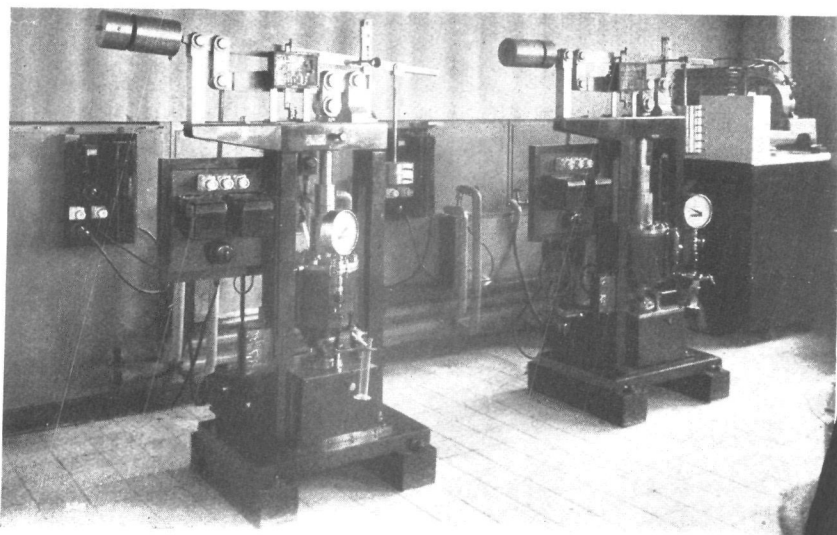


Foto 2.

§ 3. *Beschrijving der 2.5 tons persen.*

Voor de onderzoekingen met de kleine celapparaten, waarvan in verband met de uitgebreidheid van het onderzoek een tweetal werden aangeschaft, werden persen geconstrueerd, waarmede een drukspanning van 50 kg/cm^2 op het oppervlak der proefcilinders ($F = 50 \text{ cm}^2$) kan worden uitgeoefend.

Deze persen dienden dus in staat te zijn een kracht van 2.5 ton te ontwikkelen. Bij het ontwerp werd het hefboomtype gekozen, waarbij een dubbele hefboom (1 op 10 en 1 op 5) een totale vergrooting van den last van 1 op 50 mogelijk maakt. (Photo 2.)

De belasting, welke met behulp van ijzeren schijven wordt aangebracht geeft dus in kg den druk per cm^2 in het proeflichaam aan.

De deformatie van het proeflichaam wordt berekend uit de verplaatsing van den hefboom langs een in eenheden van 0.8 mm verdeelde schaal. Deze schaalverdeling is zoodanig geplaatst, dat een vergrooting der beweging van 1 op 40 verkregen wordt, zoodat een schaaldeel dus een deformatie van het proeflichaam van 20μ ($\frac{2}{10000} \text{ mm}$) aangeeft.

Daar de beweging van den last om constructieve redenen begrensd is (hier tot 15 cm), is de bewegelijkheid van den stempel, die de kracht op het proefstuk uitoefent, beperkt tot ca. 3 mm.

Om het mogelijk te maken de proeflichamen meer dan 3 mm te deformeeren, hebben wij de celapparaten op een beweegbare tafel opgesteld. Wanneer de hefboom zijn laagsten stand bereikt, wordt automatisch een elektrische stroomkring gesloten, waardoor een electromotor ($\frac{1}{3}$ P.K.) in beweging wordt gebracht. Deze motor doet de tafel, waarop het celapparaat is opgesteld naar boven bewegen, zoodat tafel + cel + hefboomstelsel naar boven worden verplaatst. In den hoogsten stand van den hefboom wordt de stroom, eveneens automatisch, verbroken.

In totaal kan de tafel 10 cm verplaatst worden. De uiterste standen van de tafel zijn automatisch beveiligd.

Om te vermijden, dat de massakrachten, welke bij het verplaatsen der tafel optreden, de spanning op het proefstuk beïnvloeden, is tusschen cel en pers een schokbreker aangebracht.

§ 4. *Installatie voor temperatuurregeling.*

Daar bitumen-mineraalaggregaat-mengsels temperatuurgevoelig zijn, is het noodzakelijk de temperatuur van het materiaal gedurende de proeven constant te houden. Zooals reeds in § 1 van dit hoofdstuk werd vermeld, geschiedt dit door middel van water, dat in een mantel om de cel heen circuleert. Dit water wordt uit een centraal reservoir door een centrifugaalpompje in een persleiding gepompt.

Het water in het reservoir wordt op een bepaalde temperatuur gehouden door het, al naar de omstandigheden dit noodig maken, te verwarmen of af te koelen. Verwarming geschiedt door elektrische elementen, welke tegen den wand van het reservoir zijn aangebouwd, afkoeling met behulp van een koelmachine, waarvan het koelmedium door een spiraal, welke in het reservoir is aangebracht, circuleert. Zoowel de verwarmingselementen als de koelmachine worden met behulp van een instelbaren contactthermometer in- en uitgeschakeld.

Het water in de persleiding wordt door de buizen van een warmte-uitwisselaar geleid en komt dan in een spiraal, welke in een met vloeistof gevuld reservoir is gedompeld. In den wand van dit reservoir zijn verwarmingselementen aangebracht, welke met behulp van een instelbaren contactthermometer, die op het celapparaat wordt geplaatst, worden in- en uitgeschakeld. Het water stroomt door den circulatiemantel van de cel en komt daarna via den warmte-uitwisselaar — waarin de warmte, welke het in het verwarmingselement heeft opgenomen, aan het toestroomende water wordt afgegeven — door een terugvoerleiding weer in het reservoir terug.

De temperatuur van het reservoir wordt zoo laag gesteld, dat zekerheid bestaat, dat in de cel, in welke de proef met de laagste temperatuur wordt uitgevoerd, deze temperatuur gehandhaafd kan worden. Voor de proeven, welke bij hoogere temperatuur plaats vinden, wordt het circulatiewater in de spiralen op de juiste temperatuur gebracht.

Bij deze opstelling der apparatuur kunnen met behulp van één centrale koudebron gelijktijdig proeven bij verschillende temperaturen worden uitgevoerd. De apparatuur is zoo berekend, dat een temperatuursverschil van 40° C tusschen de verschillende celapparaten mogelijk is. De hoogste temperatuur, waarbij normaal gewerkt

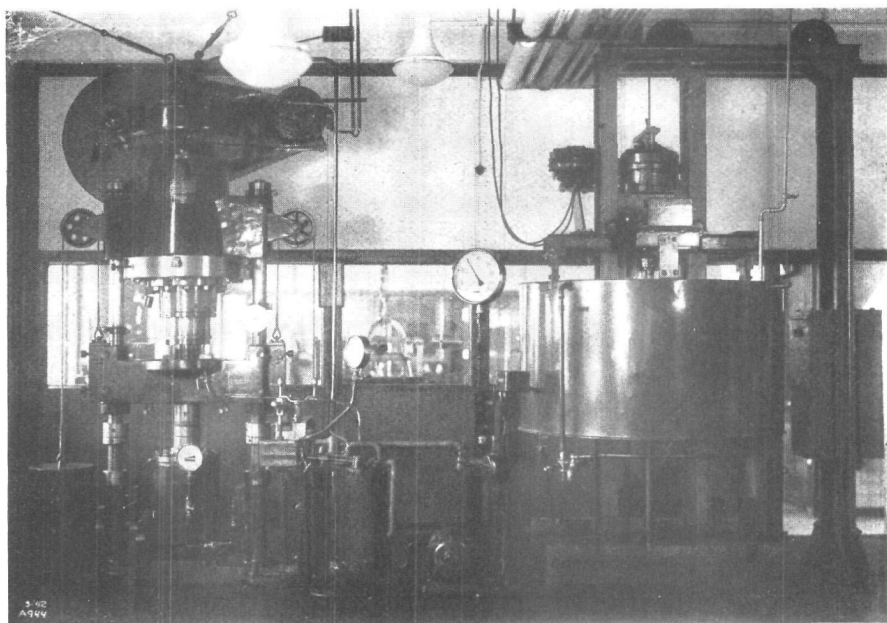


Foto 1.

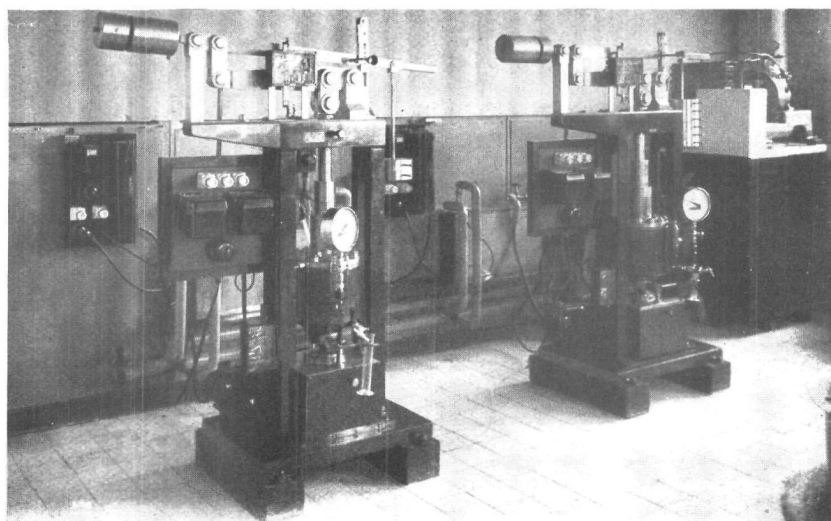
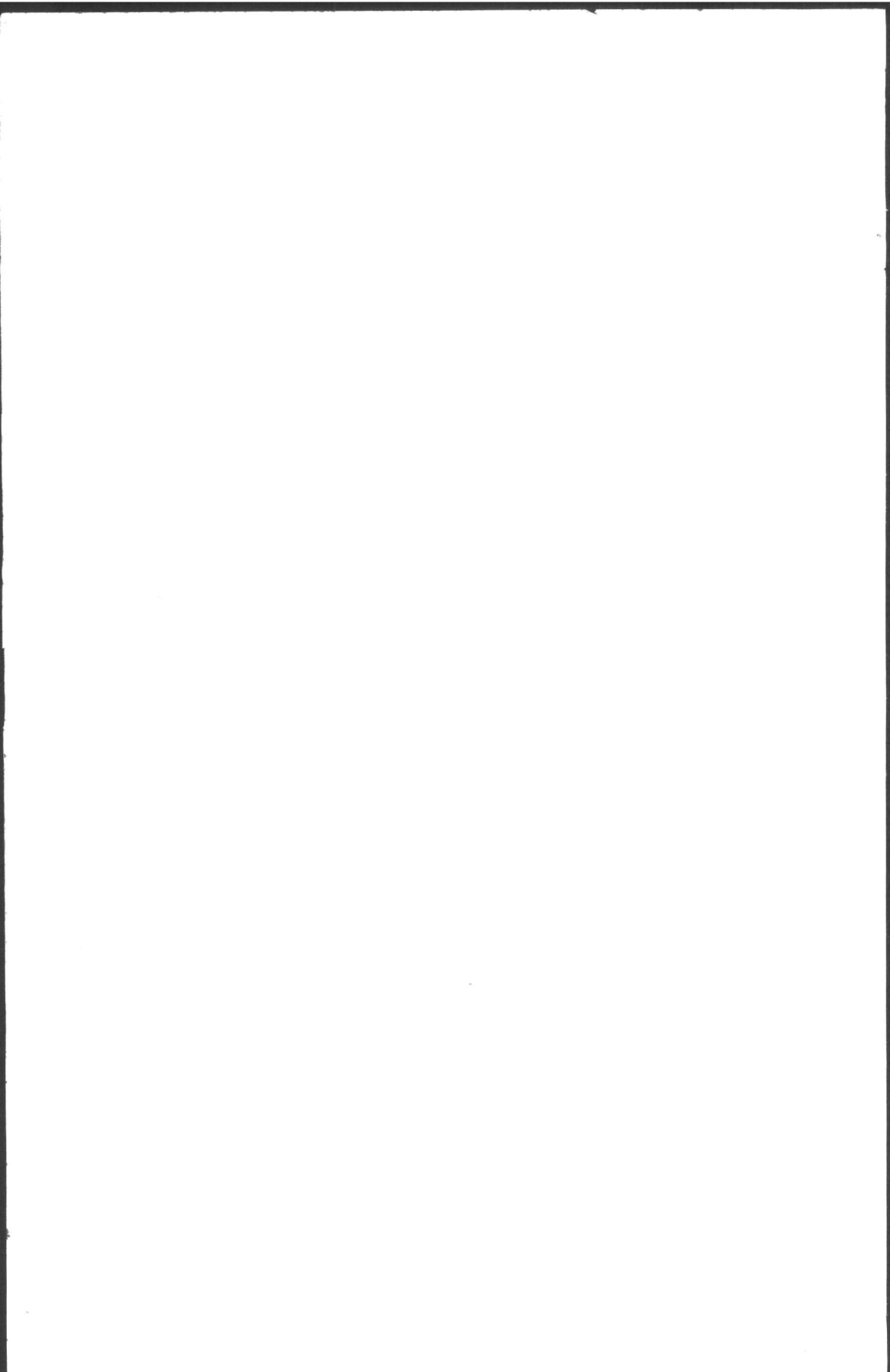


Foto 2.



wordt, is $+ 40^{\circ}$ C. Bij uitzondering werd een enkele proef bij $+ 60^{\circ}$ C uitgevoerd.

Voor proeven bij temperaturen beneden het vriespunt, dienen het circulatiemedium en de vloeistof in de celapparaten te bestaan uit een vloeistof met voldoende laag stolpunt, b.v. een zoutoplossing.

§ 5. *Persvormen.*

Voor het comprimeeren van de bitumenmineraalmengsels in den vorm van cilindrische lichamen van de in § 1 van dit hoofdstuk vermelde afmetingen, zijn door ons persvormen ontworpen, welke opgebouwd zijn uit een bodemplaat, en een cilindrisch deel. Dit laatste bestaat uit twee halfcirkelvormige cylinderschalen, waarvan de buitenmaat naar boven iets tapsch afneemt, en een buitencylinder, welke nauwkeurig daarom past.

In gemonteerden toestand grijpen de halve schalen met een groef in de bodemplaat, terwijl de buitencylinder om deze schalen nauwkeurig aansluit.

Bij het ontvormen van een proefcylinder wordt eerst de buitencylinder verwijderd, waarna de halve schalen van het proefblok worden losgemaakt.

De vormen zijn in vloeistaal uitgevoerd.

§ 6. *Meetmethode.*

Bij de celproeven hebben wij de volgende methode van meten gevolgd.

Nadat de cel op de gewenschte proeftemperatuur is gekomen, wordt een constante verticale belasting op het proeflichaam aangebracht. Het is gebleken, dat het proeflichaam onder een constanten last samengedrukt wordt. Deze samendrukking verloopt eerst snel, doch vertraagt meer en meer, tot eindelijk geen verdere deformatie meer wordt gemeten.

Gedurende deze periode loopt de zijdelingsche druk op en bereikt een eindwaarde te zelfder tijd, dat geen verdere deformatie meer wordt geconstateerd. In dezen toestand is het materiaal dus onder den invloed van verticale belasting en zijdelingschen steundruk in evenwicht.

Vervolgens wordt het onder druk staande water van de cel met behulp van het naaldventiel langzaam afgetapt. Het aftappen van dit water heeft ten gevolge, dat de steundruk gaat dalen, terwijl

de proefcilinder weer begint te deformeeren. De snelheid, waarmee de proefcilinder deformeert $\left(\frac{dl}{dt}\right)$ wordt met behulp van het naaldventiel geregeld, waarbij zorg wordt gedragen, dat een bepaalde deformatiesnelheid wordt verkregen. Het is nu gebleken, dat indien een constante deformatiesnelheid wordt aangehouden, de zijdelingsche druk tot een bepaalde waarde daalt en verder constant blijft.

In dezen toestand wordt dus het materiaal onder constante spanning (verticaal en horizontaal) met eenparige snelheid gedeformeerd.

Terwijl bij de meting in rusttoestand de spanningsgrenstoestand der plasticiteit wordt bepaald, en wel nadat de elastische deformaties volledig hebben plaats gehad, bepaalt men bij de meting bij een bepaalden bewegingstoestand den weerstand van het materiaal tegen plastische deformatie.

Nadat de meting heeft plaats gehad, wordt het naaldventiel gesloten. Vervolgens wordt de last verhoogd, waarna wederom wordt gewacht tot de rusttoestand is ingetreden, enz.

Als regel wordt door ons aan een enkelen proefcilinder een 9-tal metingen verricht bij verticale spanningen, welke trapsgewijs met ca 5 kg/cm² toenemen tot maximaal 50 kg/cm². De deformatiesnelheden bedragen 0.05, 0.10 en 0.20 mm per minuut per 20 cm hoogte en zijn voor de groote proefcilinders evenredig hooger.

Deze zeer kleine deformatiesnelheden zijn gekozen in verband met de sterke daling van den zijdelingschen steundruk bij grootere deformatiesnelheden, welke steundruk uit den aard der zaak niet beneden nul kan dalen.

De kleinste hoeveelheid water, welke per minuut wordt afgetapt, bedraagt 0.25 cc, hetgeen met eenige routine zeer wel uitvoerbaar is.

Daar gedurende de proef water aan de cel wordt onttrokken, neemt de diameter van het proeflichaam toe.

Voor de berekening van de werkelijk op het materiaal werkende verticale spanning wordt de hoeveelheid aan de cel onttrokken water bepaald. Dit volume wordt gelijkmatig over den cylinderomtrek van het proeflichaam verdeeld gedacht, waarna de doorsnede van dit lichaam wordt berekend en de last, gedeeld door deze doorsnede, de werkelijke spanning aangeeft.

Het is uit de resultaten der proeven gebleken, dat het uitvoeren

van 9 metingen aan een enkel proeflichaam geen bezwaar oplevert, indien de deformatie voldoende klein wordt gehouden. Met eenige ervaring is deze methode zeer goed uitvoerbaar.

De verdeling der enkele metingen over de verschillende verticale spanningen en snelheden geschiedt als volgt:

kleinste spanning, kleinste	snelheid
tweede	„ , middelste „
derde	„ , grootste „
vierde	„ , kleinste „
vijfde	„ , middelste „
enz.	

Bij het uitwerken der resultaten met behulp van de spanningscirkels van MOHR wordt op deze wijze een groepeeringscirkels van MOHR wordt op deze wijze een groepeeringscirkels verkregen, zoodanig dat bij het trekken der raaklijnen een zoo gering mogelijke fout wordt gemaakt.

Daar twee cirkels voldoende zijn om de waarde van den hoek van inwendige wrijving φ_e te bepalen, dient de bepaling van een derden cirkel voor elke snelheid eenerzijds ter controle van de waarde van φ_e , anderzijds ter opsporing van eventuele meetfouten. De bepaling van de waarde van den hoek van inwendige wrijving bij rust, op grond van de waarde der spanningen bij rust, geeft daarnaast nog een controle op de waarde van dezen hoek bij verschillende normaalspanningen.

Uit de spanningsdiagrammen wordt de waarde van den schijnbaren initiaalweerstand bij verschillende deformatiesnelheid bepaald. Deze waarden in een diagram tegen de deformatiesnelheid uitgezet, leveren bij extrapolatie voor een snelheid $= 0$ de waarde van den initiaalweerstand. De waarden van den viskeuzen weerstand bij verschillende snelheden geven na berekening volgens formule (34) de waarde van de viscositeit der massa. Veelal wordt voor deze berekening de waarde van den viskeuzen weerstand bij een bepaalde snelheid, $\left(\frac{d\varepsilon_1}{dt}\right) = 1$ mm/min per cm, gebruikt.

De waarde van den initiaalweerstand bij rust kan worden vergeleken met de waarde, die verkregen wordt door extrapolatie naar een snelheid $= 0$ van den schijnbaren initiaalweerstand, hetgeen een controle mogelijk maakt.

§ 7. *Bereiding der mengsels.*

Bij de bereiding der mengsels dient een intensieve menging der bestanddeelen plaats te vinden. Onvolledige menging zou verschillen in de eigenschappen van een proefflichaam op verschillende punten ten gevolge hebben, hetgeen in verband met den eisch van homogeniteit niet toelaatbaar moet worden geacht.

De menging geschiedt zooveel mogelijk machinaal, waartoe voor asphaltmortel-mengsels een kneedmolen, type „Pfleiderer” ter beschikking staat, terwijl voor asphaltbeton-mengsels van een „Hobart” menger gebruik wordt gemaakt. Beide mengmachines zijn gebaseerd op het principe van den „Zwangsmischer”, waarin het materiaal door mechanische middelen tot een gedwongen beweging wordt gebracht. Deze beweging van verschillende deelen der massa ten opzichte van elkaar heeft een intensieve menging ten gevolge.

Voor de menging wordt de benodigde hoeveelheid aggregaat (eventueel de hoeveelheden der verschillende fracties) afgewogen, evenals de hoeveelheid bindmiddel. Aggregaat en bindmiddel worden afzonderlijk verwarmd en vervolgens gedurende 3 minuten gemengd, waarna het mengsel nog 30 minuten bij dezelfde temperatuur wordt opgeslagen, voordat tot comprimeeren van het mengsel wordt overgegaan.

Om de grootst mogelijke zekerheid te hebben, dat mengsels met verschillende bindmiddelen op zooveel mogelijk identieke wijze worden gecomprimeerd, wordt voor alle mengsels de mengtemperatuur zoodanig gekozen, dat het bindmiddel een bepaalde viscositeit (waarvoor door ons arbitrair 500 centistokes werd gekozen) bezit. De opslag gedurende 30 minuten bij deze temperatuur heeft ten doel een gelijkmatige temperatuur in het mengsel te verzekeren.

§ 8. *Comprimeering der proefflichamen.*

De vorming van proefflichamen van cilindrischen vorm geschiedt als regel door comprimeering van in een cilindrische ruimte ingebracht materiaal. De eenvoudigste vorm van uitvoering bestaat hierin, dat op één zijde van het materiaal druk wordt uitgeoefend, tengevolge waarvan dit materiaal comprimeert. Evenwel zal bij deze samendrukking een normaal op den wand gerichte zijdelingsche druk ontstaan, welke een tegen de samendrukkende kracht gerichten wrijvingsweerstand ten gevolge heeft.

De druk in vlakken op eenigen afstand van het vlak, waarop de druk wordt uitgeoefend, zal dus geringer zijn dan de uitgeoefende druk.

Stel de druk op een hoogte $h = p$ (zie fig. 6), dan is de totale kracht op de doorsnede: $\frac{\pi D^2}{4} \times p$ en die op een doorsnede, dh verder gelegen, $\frac{\pi D^2}{4} (p + dp)$. Neem aan, dat de druk p een zijdelingschen druk $a \times p$ ten gevolge heeft, welke druk loodrecht op den wand gericht is. Ten gevolge van de beweging van het te comprimeeren materiaal ten opzichte van den wand zal een, den persdruk tegenwerkende kracht ontstaan, ter grootte van

$$f \times ap \times \pi D dh,$$

waarin de f den wrijvingscoëfficiënt van het materiaal tegen den wand voorstelt en $\pi D ap$ den totalen druk tegen den wand weer geeft.

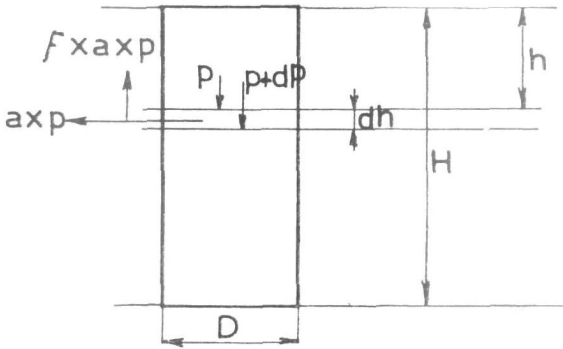


Fig. 6.

De vermindering van den persdruk is gelijk aan deze wrijving, zoodat:

$$-\frac{\pi D^2}{4} dp = f a p \pi D dh (35)$$

of

$$-\frac{dp}{p} = \frac{4}{D} f . a . dh,$$

waaruit volgt

$$\lg \frac{p}{p_0} = -\frac{4}{D} f \cdot a \cdot h. \quad (36)$$

Voor $h = 0$ is $p = p_0$, terwijl voor $h = H$,

$$\lg \frac{p}{p_0} = -\frac{4}{D} f \cdot a \cdot H = -4 f \cdot a \cdot \frac{H}{D}.$$

De verhouding tusschen de spanningen, waarmee het materiaal onder in den vorm wordt samengeperst (de compressiedruk) en de uitgeoefende druk, bedraagt dus:

$$\frac{p}{p_0} = e^{-4 \cdot f \cdot a \cdot \frac{H}{D}}. \quad (37)$$

Het blijkt dus, dat deze verhouding afhankelijk is van de H/D verhouding der proeflichamen. Om een indruk te krijgen van de verhouding dezer spanningen kan de volgende benaderende berekening dienen.

Op grond van de resultaten van grondmechanicaproeven kan worden aangenomen, dat $a = 0.30$. Bij het comprimeeren van asphaltbeton-mengsels, die een ruime hoeveelheid grof, hoekig aggregaat bevatten, bleek, dat de wand der stalen persvormen zware groeven vertoonde, welke er door het aggregaat waren ingedrukt. Men moet dus een hooge waarde van den wrijvingscoëfficiënt f aannemen, welke op $f = 0.6$ wordt geschat. Voor mengsels met rond aggregaat zij aangenomen dat $f = 0.2$.

Berekent men nu voor de in het voorgaande beschreven proeflichamen den compressiedruk onder in het proeflichaam, dan vindt men:

$$\text{asphaltbeton: } \frac{p}{p_0} = e^{-4 \times 0.6 \times 0.3 \times 3} = e^{-2.16} = 0.11,$$

dwz. 89 % van den uitgeoefenden persdruk is in het laagste punt door wrijving verloren gegaan;

$$\text{asphaltemortel: } \frac{p}{p_0} = e^{-4 \times 0.2 \times 0.3 \times 2.5} = e^{-0.6} = 0.55,$$

dwz. 45 % van den uitgeoefenden persdruk gaat door wrijving verloren.

Bij proefcilinders volgens den door HUBBARD (39) aangegeven vorm ($H/D = 1$) gaat daarentegen voor asphaltmortel 22 %, voor asphaltbeton 52 % van den persdruk verloren. Ook voor cubi vindt men overeenkomstige waarden.

Het is duidelijk, dat onder dergelijke omstandigheden in onze vormen geen homogene proeflichamen gevormd kunnen worden.

Daar de homogeniteit van het materiaal als een gebiedende voorwaarde voor het slagen van het onderzoek moest worden beschouwd, hebben wij nagegaan, op welke wijze de bezwaren konden worden ondervangen.

Indien bij het opvoeren van den persdruk een eindwaarde van de dichtheid zou kunnen worden bereikt, zou het langs dezen weg theoretisch mogelijk zijn tot het doel te geraken, daar hierbij de druk in het laagste deel van den vorm voldoende hoog zou kunnen worden opgevoerd.

Uit de literatuur blijkt evenwel — zie WILSON (97) — dat men daartoe den druk moet opvoeren tot ca. 1000 kg/cm^2 , hetgeen bij de afmetingen onzer proefstukken niet zonder zeer hoge kosten uitvoerbaar is. Bovendien moet men overwegen, dat een dergelijke druk ongewenscht moet worden geacht, daar volgens ADAM en MURDOCH (2) bij drukken boven ca. 210 kg/cm^2 korrelverbrijzeling optreedt.

Het zij terloops opgemerkt, dat deze korrelverbrijzeling waarschijnlijk de resultaten van WILSON (97) heeft beïnvloed.

Volgens onderzoekingen van het ROAD RESEARCH LABORATORY TE HARMONDSWORTH (77) wordt een zeer goede comprimeering verkregen, indien het materiaal niet eenvoudig geperst wordt, doch indien men door kneden de verdichting teweeg brengt. De oudere proeven van ADAM en MURDOCH (2) en van PAULS (65) wijzen ook in deze richting.

Bij den voor onze proeven gewenschten vorm der proeflichamen is evenwel het door walsen verdichten van het materiaal niet mogelijk.

Bestudeering van formule (37) toont ons, dat er een drietal wegen openstaan, om den compressiedruk over de geheele hoogte van den cylinder zoo min mogelijk te laten variëren.

a. De eerste methode bestaat in het reduceeren van de H/D-verhouding, hetgeen bereikt kan worden door het materiaal aan beide einden door een beweegbaren plunjer te belasten. Deze methode is reeds door HOWE en HUGHES (38) toegepast. Voor proeflichamen met een H/D-verhouding = ca. 3 beteekent dit, dat deze verhouding tot ca. $1\frac{1}{2}$ kan worden teruggebracht.

Voor asphaltbeton bedraagt dan $\frac{P}{P_0} = 0.34$ en voor asphaltmortel $\frac{P}{P_0} = 0.70$, hetgeen nog weinig bevredigend is, daar de compressedruk in het midden van het proeflichaam 66 % resp. 30 % lager is dan aan de einden.

β . De tweede methode bestaat in het verlagen van de H/D-verhouding door den proefcylinder uit afzonderlijk gecomprieeerde schijven van een gunstige H/D-verhouding samen te stellen. Deze methode werd door ons proefondervindelijk getoetst.

Een mengsel, bestaande uit:

85 gew. dln. rivierzand
 15 „ „ vulstof (Enci)
 11.5 „ „ Mexphalte 50/60

(Enci vulstof, een nevenproduct van de cementindustrie, is een fijn mineraal poeder.)

werd bij 150° C bereid en onder een druk van 150 kg/cm² gecomprieeerd tot schijven van 15 cm diameter en 7.5 cm dikte. Zes van deze schijven op elkaar gestapeld, werden in het celapparaat beproefd. Na afloop van de proef bleek, dat ter hoogte van de afscheiding der enkele schijven het proeflichaam een insnoering vertoonde, hetgeen op anisotropie wijst.

Deze anisotropie kwam ook tot uiting bij de volgende proeven.

Uit een serie schijven van 7 cm hoogte en van dezelfde samenstelling werden cubi gezaagd van 7 cm ribbe, welke op drukvastheid werden onderzocht. Op vier der cubi werd de drukproef zoodanig uitgevoerd, dat de drukrichting met de richting van comprimeeren samenviel. Bij een tweede serie drukproeven werd de drukrichting loodrecht op de richting van comprimeeren gekozen. De resultaten der proeven zijn in Tabel I verzameld. (Zie pag. 67.)

TABEL I.

*Drukvastheid van uit schijven gezaagde cubi bij 25° C.
(deformatiesnelheid 20 mm/min per 7 cm hoogte).*

Drukrichting // richting van comprimeeren	Drukrichting ⊥ richting van comprimeeren
27.4 kg/cm ²	23.3 kg/cm ²
28.3 ..	23.3 ..
29.7 ..	21.9 ..
28.1 ..	23.3 ..
gemidd. 28.4 kg/cm ²	gemidd. 23.0 kg/cm ²

Uit deze gegevens blijkt, dat de reproduceerbaarheid der drukk-
vastheidsbepalingen zeer goed is, doch dat er een aanzienlijk verschil
bestaat tusschen de waarden der drukk-
vastheid in verschillende rich-
tingen. Dit verschil bedraagt ca. 20 % en wijst op een belangrijk
gebrek aan isotropie.

Bij de samenstelling van proefcilinders uit schijven voor het
onderzoek van asphaltbeton is het trouwens niet mogelijk een
cilinder met homogene eigenschappen op te bouwen, daar op de
kopvlakken der schijven een zekere ordening van de grove aggre-
gaatdeelen onvermijdelijk is. Daarom hebben wij omgezien naar een
andere methode om tot proefcilinders van homogeen materiaal te
komen.

γ. Deze derde methode bestaat uit het verlagen van de wrijving
tusschen de te comprimeeren massa en den wand van den persvorm,
dus het verlagen van de waarde van den coëfficiënt f . Kan de
waarde van f belangrijk worden gereduceerd, dan kan een zeer
gunstige waarde voor de verhouding $\frac{p}{p_0}$ bereikt worden.

Verlaging der wrijving tusschen proeflichaam en persvorm kan
verkregen worden door den persvorm in trilling te brengen in een
richting loodrecht op den cilinderwand. Dit kan op eenvoudige
wijze geschieden met behulp van een pneumatischen hamer, welke
op den persvorm wordt geplaatst. Daarbij wordt tevens bereikt,
dat de geheele te comprimeeren massa in trilling wordt gebracht,
hetgeen den weerstand tegen comprimeeren zal verminderen.

Op deze wijze werden cilindervormige lichamen van een asphalt-

mortel vervaardigd, welke met een persdruk van slechts 50 kg/cm² werden gecompriëerd, bij gelijktijdige vibreering met behulp van den pneumatischen hamer.

Uit elken cylinder werd een drietal cubi gezaagd van 5.5 cm ribbe, waarvan een deel in de richting der comprimeering werd gedrukt, een deel in een richting loodrecht daarop. Het schijnbaar soortelijk gewicht (s.s.g.) der cylinders bedroeg 2.22 tot 2.19.

De resultaten der proeven zijn in Tabel II vermeld.

Uit de cijfers van deze tabel blijkt, dat niet alleen de waarden der drukvastheid van de op verschillende hoogte uitgezaagde cubi onderling weinig uiteenloopen, doch dat er thans ook weinig verschil meer bestaat tusschen de waarden der drukvastheid in de beide richtingen.

TABEL II.

Drukvastheid van uit cylinders gezaagde cubi van 5.5 cm ribbe bij 25° C.

Soort cubus	Drukrichting t. o. v. persrichting	Drukvastheid kg/cm ²		Opmerkingen
boven	↓	26.4	23.7	
midden	↓	25.2		
onder	↓			
boven	↓	27.6	25.3	
midden	↓	26.3		
onder	↓			
boven	↓	25.5	27.3	resp.
midden	↓	31.0		
onder	↓			
boven	↓	26.1	28.6	
midden	↓	28.1		
onder	↓			
gemiddeld		27.1	26.5	

Bij celproeven met op deze wijze vervaardigde cylinders bleek de vervorming van het materiaal over de geheele hoogte aanzienlijk gelijkmatiger te zijn dan bij het uit schijven opgebouwde proeflichaam, daar na de proef de diameter van het proeflichaam op verschillende niveau's slechts weinig varieerde.

Deze methode van comprimeeren is dus in principe voor ons doel geschikt. Het was evenwel noodzakelijk na te gaan, welke werkwijze de meest geschikte is voor de vervaardiging van proeflichamen van verschillende afmetingen (doch van dezelfde samenstelling), terwijl tevens de meest geschikte werkwijze voor het vervaardigen van asphaltbeton-proefstukken diende te worden bepaald. Hierbij werd uitgegaan van de idee, dat met behulp van eenzelfden trilhamer lichamen van verschillende afmetingen en van verschillende samenstelling tot een homogeen materiaal moeten worden gecomprimeerd.

Daar de trillingen (hier ca. 480 slagen per minuut) met een hamer van bepaalde capaciteit worden opgewekt in massa's van verschillende grootte, en in lichamen van verschillende stijfheid (de wand van den grooten persvorm is aanzienlijk dikker dan die van den kleinen persvorm), diende een compensatie voor deze verschillen gezocht te worden in de intensiteit van den compressiedruk.

Van de onder verschillende omstandigheden vervaardigde proeflichamen werd de holle ruimte bepaald en vergeleken met de holle ruimte, welke in normale wegdekken aanwezig is en daar veelal ca. 3 vol. % bedraagt.

De volgende resultaten werden verkregen met asphaltmortel- en asphaltbeton-mengsels:

TABEL III.

Holle ruimte (in vol. %) van met verschillenden druk gecomprimeerde proeflichamen.

Persdruk	Asphaltmortel		Asphaltbeton φ 15 cm
	φ 8 cm	φ 15 cm	
50 kg/cm ²	2.8	ca. 5	
75 ..		3.0	3.8
100 ..	2.0	ca. 1	2.3
150 ..	ca. 1		

Op grond van deze gegevens besloten wij voor asfaltmortelproeflichamen van 8 cm diameter den persdruk op 50 kg/cm² te stellen, voor 15 cm diameter op 75 kg/cm², en voor asphaltbeton ($\phi = 15$ cm) 100 kg/cm² aan te houden.

Bij het verdere onderzoek is gebleken, dat de deformatie der proeflichamen over de geheele hoogte voldoende gelijkmatig plaats vindt, zoodat geconcludeerd mag worden, dat op de boven omschreven wijze voldoende homogene proefcilinders worden vervaardigd.

§ 9. *Terugwinning van het bindmiddel.*

Gedurende het onderzoek bleek de wenschelijkheid de eigenschappen der mengsels te correleeren met de hardheid van het bindmiddel, hetgeen bepaling van de eigenschappen van het bindmiddel, zooals dit in het mengsel aanwezig is, noodzakelijk maakte.

Voor het asphaltbitumen, dat bij de later te beschrijven proeven als bindmiddel werd gebruikt, is het mogelijk door extractie het bindmiddel zonder verandering van eigenschappen uit het mengsel af te scheiden. Dit is geschied met behulp van warm CS₂ (30), waarna de penetratie van het bindmiddel op de gebruikelijke wijze werd bepaald.

HOOFDSTUK VI.

Proefondervindelijk onderzoek naar de geldigheid der theorie. Bespreking van eenige fysische verschijnselen, die zich bij de plastische deformatie van bitumen-mineraal- aggregaat-mengsels voordoen.

§ 1. *Inleiding.*

Bij de theoretische beschouwingen van Hoofdstuk IV hebben wij verschillende veronderstellingen gemaakt, waarvan de proefondervindelijke rechtvaardiging in dit hoofdstuk zal worden besproken.

Er zij aan herinnerd, dat de volgende hypothesen werden opgesteld:

1. Het materiaal is homogeen en isotroop (Hoofdstuk IV, § 2, sub β).
2. De waarde van den wrijvingscoëfficiënt ($= \operatorname{tg} \varphi$) is onafhankelijk van de normaalspanning (Hoofdstuk IV, § 3).
3. De waarde van den wrijvingscoëfficiënt is onafhankelijk van de deformatiesnelheid (Hoofdstuk IV, § 4).
4. De differentieele viscositeit bezit een van de deformatiesnelheid onafhankelijke waarde (Hoofdstuk IV, § 4).
5. De normaalspanning tusschen de korrels wordt door de spanningen, welke noodig zijn voor de beweging der vloeistofphase, beïnvloed (Hoofdstuk IV, § 4, sub β).
6. De waarde van den initiaalweerstand in den evenwichtstoestand is gelijk aan de door extrapolatie naar een deformatiesnelheid $= 0$ bepaalde waarde bij beweging (Hoofdstuk IV, § 3).
7. In de vloeistofphase heerscht geen hydrostatische druk (Hoofdstuk IV, § 4, sub α).
8. Bij de plastische deformatie blijft het volume van het materiaal constant (Hoofdstuk IV, § 2, sub β).

Uit de proefresultaten zal moeten blijken of de eigenschappen van het materiaal in overeenstemming zijn met deze hypothesen. Blijkt dit het geval te zijn, dan is een volledige omschrijving der

eigenschappen van het materiaal bij plastische deformatie met de vermelde drie fysieke grootheden mogelijk.

Blijkt evenwel de overeenstemming niet volledig te zijn, dan zal de geldigheid der met behulp der theorie voor deze fysieke grootheden bepaalde getalwaarden begrensd zijn. Het is zelfs mogelijk, dat onder bepaalde omstandigheden de ontwikkelde theorie niet gebruikt kan worden om de eigenschappen van het materiaal bij plastische deformatie te omschrijven.

De verschillende punten worden in de volgende paragrafen besproken.

§ 2. *Homogeniteit en isotropie.*

In § 8 van Hoofdstuk V werd reeds beschreven, welke maatregelen noodig bleken te zijn om homogene proeflichamen te verkrijgen. Er zij aan herinnerd, dat de homogeniteit van het materiaal beoordeeld werd op grond van de drukvastheidswaarden van uit de proeflichamen gezaagde cubi en op grond van de vervormingen, welke de proeflichamen na de celproef vertoonden.

Uit het feit, dat de waarde der drukvastheid onafhankelijk bleek te zijn van de richting, waarin de belasting werd aangebracht (vergeleken met de richting in welke het materiaal werd gecomprimeerd), kan een aanwijzing worden gezien, dat bij de beschreven werkwijze het materiaal der proeflichamen als isotroop mag worden opgevat.

Het lijkt nuttig op deze plaats er op te wijzen, dat de schuifvlakken, welke bij de theoretische beschouwingen ter sprake kwamen, geenszins opgevat mogen worden als reële vlakken, waarin de afschuiving plaats vindt, doch slechts een grootheid voorstellen, welke bij de berekening ter verheldering van den gedachtengang werd ingevoerd.

Er is geen reden om op grond der daarbij gegeven beschouwingen tot anisotropie van het materiaal bij plastische deformatie te besluiten.

§ 3. *Invloed van de normaalspanning op de waarde van den wrijvingscoëfficiënt.*

De invloed van de waarde der normaalspanning op den wrijvingscoëfficiënt blijkt uit de volgende proeven.

Proeflichamen van $\phi = 15$ cm, resp. 8 cm, werden vervaardigd van materialen van de volgende samenstelling:

TABEL IV.

Samenstelling van asphaltemortel resp. asfaltbeton in gew. dln.

Aggregaat	Asphaltemortel	Asfaltbeton
Split 10/30		50.1
5/12		7.8
3/6		2.9
Rivierzand	80	32.—
Vulstof (Enci)	20	8.—
Mexphalte 50/60 (op 100 gew. dln aggregaat)	10.5	5.5

De weerstand tegen plastische deformatie van deze materialen werd bepaald bij 20° C. bij een deformatiesnelheid van 0.05 mm/min. per 20 cm, resp. 0.2 mm/min. per 45 cm hoogte. De verticale hoofdspanning werd van 5 kg/cm² tot 40 kg/cm² gevarieerd.

De resultaten der metingen bij constante verticale belasting, constante deformatiesnelheid en constante waarde van den horizontalen steundruk zijn in Tabel V verzameld en in de grafieken I^c en II^c volgens MOHR uitgewerkt. (Zie pag. 74 en 75.)

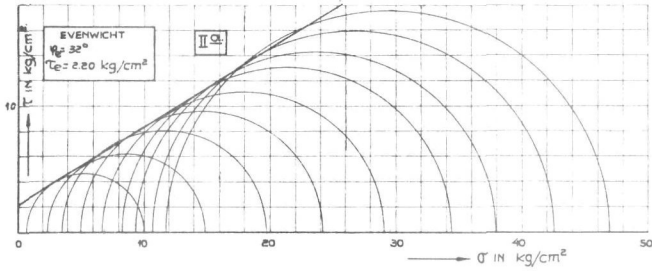
TABEL V.

Bepaling der horizontale hoofdspanningen van asphaltemortel- resp. asfaltbeton-cylinders bij verschillende verticale hoofdspanningen.

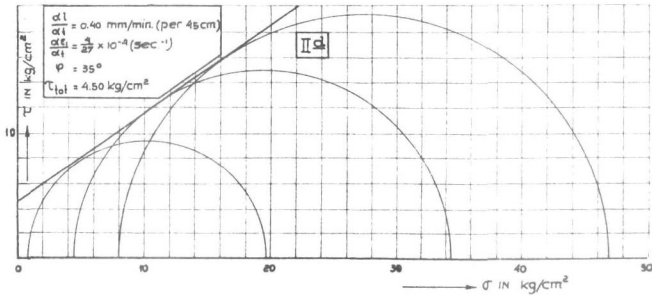
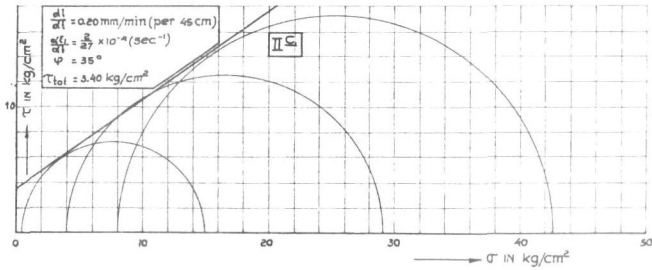
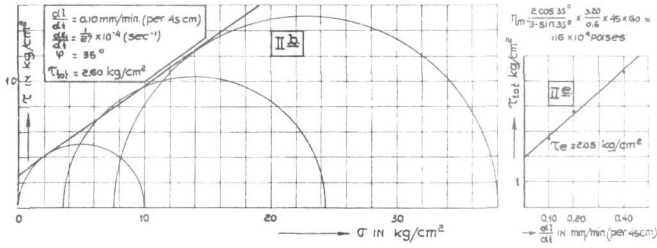
Asphaltemortel				Asfaltbeton			
$\frac{dl}{dt}$	$\frac{d\epsilon_1}{dt}(\text{sec}^{-1})$	σ_1 kg/cm ²	σ_3 kg/cm ²	$\frac{dl}{dt}$	$\frac{d\epsilon_1}{dt}(\text{sec}^{-1})$	σ_1 kg/cm ²	σ_3 kg/cm ²
0.05 mm/min (per 20 cm)	$\frac{1}{24} \times 10^{-4}$	9.9	1.5	0.2 mm/min (per 45 cm)	$\frac{1}{27} \times 10^{-4}$	14.9	0.5
		24.2	6.1			29.1	4.0
		35.0	11.2			42.6	8.0

De in deze tabel vermelde waarden der verticale hoofdspanning zijn reeds gecorrigeerd voor de werkelijke doorsnede van het proeflichaam.

GRAFIEK II.
Asphaltbeton.



Temp. 20°C



Uit de grafieken blijkt, dat de drie spanningscirkels voor ieder der beide materialen practisch een gemeenschappelijke raaklijn bezitten, waaruit volgt, dat de waarde van den wrijvingscoëfficiënt van de normaalspanning onafhankelijk is.

§ 4. *Invloed van de deformatiesnelheid op de waarde van den wrijvingscoëfficiënt.*

Bij de theoretische beschouwingen werd aangenomen, dat de waarde van den wrijvingscoëfficiënt niet door de deformatiesnelheid wordt beïnvloed. Afhankelijk van de bij het uitwerken der theorie gemaakte veronderstelling omtrent de bij het deformeeren van de vloeistofphase ontwikkelde normaalspanningen in deze phase, zal de helling der omhullende der MOHRsche cirkels al dan niet door de waarde der deformatiesnelheid worden beïnvloed.

Experimenteel werd nagegaan, of de helling der omhullende der MOHRsche cirkels door de deformatiesnelheid wordt beïnvloed.

Het onderzoek werd uitgevoerd met dezelfde materialen als dat in de vorige paragraaf. De daar vermelde resultaten zijn ontleend aan het volledige onderzoek der beschreven materialen.

De resultaten der metingen zijn in Tabel VI verzameld en in de grafieken I en II voorgesteld.

TABEL VI.

Waarden van de horizontale hoofdspinning bij verschillende verticale hoofdspinningen en bij verschillende deformatiesnelheden.

Asphaltnortel					Asphaltbeton				
σ_1 kg/cm ²	$\frac{dl}{dt}$ mm/min (per 20 cm)	$\frac{d\epsilon_1}{dt}$ (sec ⁻¹)	σ_3 kg/cm ² even- wicht	σ_3 kg/cm ² bewe- ging	σ_1 kg/cm ²	$\frac{dl}{dt}$ mm/min (per 45 cm)	$\frac{d\epsilon_1}{dt}$ (sec ⁻¹)	σ_3 kg/cm ² even- wicht	σ_3 kg/cm ² bewe- ging
9.9	0.05	$\frac{1}{2^4} \times 10^{-4}$	2.7	1.5	10.0	0.1	$\frac{1}{2^7} \times 10^{-4}$	0.8	0. —
14.9	0.1	$\frac{2}{2^4} \times 10^{-4}$	4.5	2.8	14.9	0.2	$\frac{2}{2^7} \times 10^{-4}$	2.4	0.5
19.6	0.2	$\frac{4}{2^4} \times 10^{-4}$	6.45	3.65	19.7	0.4	$\frac{4}{2^7} \times 10^{-4}$	3.6	0.8
24.2	0.05	$\frac{1}{2^4} \times 10^{-4}$	7.8	6.1	24.3	0.1	$\frac{1}{2^7} \times 10^{-4}$	5.0	3.6
28.9	0.1	$\frac{2}{2^4} \times 10^{-4}$	10.2	7.85	29.1	0.2	$\frac{2}{2^7} \times 10^{-4}$	6.8	4.0
33.3	0.2	$\frac{4}{2^4} \times 10^{-4}$	11.8	8.3	34.5	0.4	$\frac{4}{2^7} \times 10^{-4}$	8.3	4.5
38.0	0.05	$\frac{1}{2^4} \times 10^{-4}$	13.5	11.2	38.0	0.1	$\frac{1}{2^7} \times 10^{-4}$	9.4	7.65
42.4	0.1	$\frac{2}{2^4} \times 10^{-4}$	15.1	12.5	42.6	0.2	$\frac{2}{2^7} \times 10^{-4}$	10.8	8.0
46.5	0.2	$\frac{4}{2^4} \times 10^{-4}$	16.8	12.45	47.0	0.4	$\frac{4}{2^7} \times 10^{-4}$	11.8	8.0

In de tabel zijn tevens bijgevoegd de waarden van den zijdeling-schen druk bij verschillende verticale spanningen voor den even-wichtstoestand.

Uit de grafieken blijkt, dat de helling der omhullenden, welke ook hier rechte lijnen blijken te zijn, voor metingen bij verschillende deformatiesnelheden steeds hetzelfde is en hier voor asphaltmortel 28° , voor asphaltbeton 35° bedraagt.

Het blijkt evenwel, dat voor den evenwichtstoestand, dus voor den grensspanningstoestand der plasticiteit, de helling geringer is dan voor den bewegingstoestand, terwijl ook voor den evenwichtstoestand de waarde van den wrijvingscoëfficiënt f van de grootte der normaalspanning onafhankelijk is. De toeneming van de helling der omhullende der MOHRsche cirkels bij beweging ten opzichte van die voor den evenwichtstoestand, is in overeenstemming met de in Hoofdstuk IV, § 4, sub a , ontwikkelde theorie, en dus in strijd met de daar in sub β gegeven beschouwingen, welke wij als de waarschijnlijk meest juiste kwalificeerden.

Deze tegenstrijdigheid werd nu op de volgende wijze nader onderzocht.

Een mineraalaggregaat-mengsel van dezelfde samenstelling als in de asphaltmortel verwerkt, werd droog onderzocht bij verschillende deformatiesnelheden. Het bleek, dat de helling der omhul-lende der MOHRsche cirkels bij evenwicht eenige graden geringer was dan bij beweging.

De volgende waarden werden gevonden:

TABEL VII.

Waarden van den hoek η van droog mineraalaggregaat van de samenstelling van asphaltmortel bij verschillende deformatiesnelheden.

Deformatiesnelheid		η
$\frac{dl}{dt}$ (mm/min per 20 cm)	$\frac{d\epsilon_1}{dt}$ (sec ⁻¹)	
	evenwicht	35°
0.05	$\frac{1}{24} \times 10^{-4}$	$38^\circ 30'$
0.1	$\frac{2}{24} \times 10^{-4}$	$38^\circ 30'$
0.2	$\frac{4}{24} \times 10^{-4}$	$38^\circ 30'$

Het blijkt, dat het verschil tusschen de waarden van φ voor evenwicht en voor beweging een eigenschap van het mineraal-aggregaat is, waarvoor ons geen nadere verklaring bekend is. De sub β gegeven theorie wordt dus door dit verschijnsel niet aangetast.

Daar de resultaten der celproeven voor de practijk van belang zijn in verband met den weerstand van het materiaal tegen zeer langzaam plaats vindende deformaties, zal bij het uitwerken der beproevingsresultaten de waarde van φ voor den evenwichtstoestand (φ_e) aangehouden worden, om den weerstand van het materiaal, voor zoover van den spanningstoestand afhankelijk, te karakteriseeren.

§ 5. *Involed der deformatiesnelheid op de waarde der differentieele viscositeit.*

De in §§ 3 en 4 beschreven proeven werden in de grafieken I en II volgens de in Hoofdstuk IV, § 5 gegeven methode uitgezet.

Uit de grafieken Ib, c en d, resp. IIb, c en d, volgt, dat de waarde van den schijnbaren initiaalweerstand τ_{tot} bedraagt:

TABEL VIII.

Waarden van den schijnbaren initiaalweerstand bij verschillende deformatie-snelheden.

Asphaltnortel			Asphaltbeton		
Deformatiesnelheid $\frac{dl}{dt}$ mm/min (per 20 cm)	$\frac{d\varepsilon_1}{dt}$ (sec ⁻¹)	τ_{tot} (kg/cm ²)	Deformatiesnelheid $\frac{dl}{dt}$ mm/min (per 45 cm)	$\frac{d\varepsilon_1}{dt}$ (sec ⁻¹)	τ_{tot} (kg/cm ²)
0.05	$\frac{1}{24} \times 10^{-4}$	1.6	0.1	$\frac{1}{27} \times 10^{-4}$	2.6
0.1	$\frac{2}{24} \times 10^{-4}$	2.1	0.2	$\frac{2}{27} \times 10^{-4}$	3.6
0.2	$\frac{4}{24} \times 10^{-4}$	2.9	0.4	$\frac{4}{27} \times 10^{-4}$	4.5

Deze waarden zijn in de grafiek I^e en II^e uitgezet tegen de deformatiesnelheid. Het blijkt, dat een practisch rechtlijnig verloop der $\tau_{tot} \left/ \frac{dl}{dt} \right.$ lijn wordt gevonden, zoodat de in Hoofdstuk IV, § 4 veronderstelde onafhankelijkheid van de waarde der differentieele viscositeit (door ons de viscositeit der massa η_m , in tegenstelling

tot de viscositeit van het bitumen, genoemd) experimenteel met voldoende nauwkeurigheid wordt bevestigd.

De geringe afwijking der enkele punten van de getrokken lijnen in deze grafieken stemmen echter tot bedachtzaamheid, daar een lijn met zeer geringe kromming, welke tegen de horizontale as concaaf verloopt, door de punten getrokken kan worden.

Bij de in de volgende hoofdstukken te bespreken proeven is gebleken, dat het meerendeel der $\tau_{tot} \left/ \frac{dl}{dt} \right.$ diagrammen dit zwak concave beeld vertoont, terwijl een convexe lijn in een veel geringer aantal gevallen wordt gevonden. Ook zuiver rechte lijnen werden gevonden.

Daar de afwijkingen van een rechte lijn zeer gering zijn, lijkt het ons toe, dat voor het beoogde technische doel de waarde van de viscositeit der massa in het onderzochte snelheidsinterval als constant mag worden opgevat, doch dat men bij belangrijk grootere deformatiesnelheden er rekening mede moet houden, dat de waarde der differentieele viscositeit lager kan zijn dan de uit de resultaten der celproeven berekende waarde.

§ 6. *Vergelijking der waarden van den initiaalweerstand bij den grensspanningstoestand en de door extrapolatie in het schijnbare initiaalweerstand-snelheidsdiagram verkregen waarden.*

Vergelijken wij thans de waarde van den initiaalweerstand, zooals deze in het evenwichtsdiagram der spanningen wordt bepaald door extrapolatie van de waarde van den schuifweerstand naar een normaalspanning = 0 op het schuifvlak en de waarde, die door extrapolatie naar een deformatiesnelheid = 0 in het $\tau_{tot} \left/ \frac{dl}{dt} \right.$ diagram wordt gevonden.

TABEL IX.

Waarden van den initiaalweerstand, op verschillende wijze bepaald.

Asphal tmortel		Asphal t beton	
Evenwicht	Beweging	Evenwicht	Beweging
1.10 kg/cm ²	1.10 kg/cm ²	2.20 kg/cm ²	2.05 kg/cm ²

Uit tabel IX blijkt, dat de op verschillende wijzen berekende

waarden van den initiaalweerstand onderling goed overeenstemmen. Bij de verdere proeven werd hetzelfde geconstateerd. Dit wijst er op, dat de in Hoofdstuk IV, § 4 gevolgde gedachtengang, waarbij de viskeuze weerstand bij de andere deelen van den weerstand werd opgeteld, niet de feiten overeenstemt.

Uit den aard der zaak wordt hiermede niet aangetoond, dat de waarde van den wrijvingscoëfficiënt in het spanningsgebied beneden den laagsten spanningscirkel gelijk is aan die bij hoogere spanningen. Daar bij de practijktoepassingen het materiaal aan normaalspanningen wordt onderworpen, welke hooger zijn dan de laagste spanning bij de proeven, kan voor de practijk de hier vermelde waarde van den initiaalweerstand worden aangehouden.

Wel wordt het op grond dezer cijfers waarschijnlijk, dat de waarde der differentieele viscositeit bij zeer lage deformatiesnelheden weinig afwijkt van de in het onderzochte snelheidstraject bepaalde waarde.

§ 7. *Reproduceerbaarheid der proeven; invloed van de afmetingen der proeflichamen; nauwkeurigheid der beproevingsresultaten.*

Een serie proeven werd uitgevoerd om de reproduceerbaarheid na te gaan. Daarbij bleek, dat de reproduceerbaarheid zeer goed is. Toch werden de in de volgende hoofdstukken te bespreken proeven in duplo uitgevoerd, daar het wenschelijk leek bij de gecompliceerde eigenschappen van het materiaal een zoo groot mogelijke zekerheid te scheppen, dat het verkregen feitenmateriaal niet door toevallige, onopgemerkte omstandigheden wordt beïnvloed.

Uit de in deze hoofdstukken vermelde resultaten blijkt de goede reproduceerbaarheid der proeven.

Ook werd nagegaan, welchen invloed de afmetingen der proeflichamen op de resultaten hebben. Dit onderzoek moest met het oog op de afmetingen der grootste aggregaatdeelen en die der kleine celapparatuur beperkt blijven tot asphaltemortelmengsels.

Deze werden voor de kleine proeflichamen ($\phi = 8$ cm) gecompriemd met 50 kg/cm² persdruk, voor de groote proeflichamen ($\phi = 15$ cm) met 75 kg/cm².

De resultaten der proeven waren als volgt:

TABEL X.

Vergelijking der eigenschappen van groote en kleine proeflichamen bij 20° C.

	Kleine proeflichamen	Groote proeflichamen
Hoek van inwendige wrijving φ_e (°)	28°	27°
Initiaalweerstand τ_e (kg/cm ²)	1.95	1.85
Viscositeit der massa η_m ($\times 10^{-9}$ poises)	91	95

Uit deze gegevens blijkt, dat de afmetingen der proeflichamen de resultaten niet beïnvloeden.

Omtrent de nauwkeurigheid van de resultaten der proeven wordt het volgende opgemerkt.

Bij de gevolgde methode van berekening van de waarde van den hoek van inwendige wrijving φ_e , van den initiaalweerstand τ_e en van de viscositeit der massa η_m , zal voor φ_e de nauwkeurigheid ca. 1° bedragen, voor τ_e ca. 10 %, met een minimum van 0.05 kg/cm² en voor η_m ca. 10 %.

Deze cijfers zijn een schatting, welke gebaseerd is op de nauwkeurigheid, waarmee de verschillende grafieken geteekend kunnen worden en de afwijking van het theoretische verloop der lijnen, welke hierbij werd geconstateerd.

§ 8. *Invloed van het bitumengehalte op de resultaten der proeven.*

Uit proeven der Grondmechanica is bekend (in Hoofdstuk IV, § 4, sub δ , werd hierop reeds gewezen), dat onder bepaalde omstandigheden in de vloeistofphase een hydrostatische druk kan optreden, welke de resultaten der proeven in belangrijke mate beïnvloedt.

Daar het waarschijnlijk moest worden geacht, dat bitumen-mineeraalaggregaat-mengsels overeenkomstige verschijnselen vertoonen, werd hiernaar een proefondervindelijk onderzoek ingesteld, zoowel voor asphaltmortel- als voor asphaltbetonmengsels.

Mineraalaggregaat van de reeds in Tabel IV vermelde samenstelling, werd met verschillende hoeveelheden bitumen gemengd en tot proefcilinders gecompriëerd, welke werden onderzocht.

De resultaten dezer proeven vindt men in Tabel XI.

TABEL XI.

Invloed van de hoeveelheid bitumen op de eigenschappen van asphaltemortel en asphaltbeton.

Asphaltemortel	Holle ruimte (vol. 0/0)	φ_e	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises
8.5 gew. dln bitumen (op 100 gew. dln aggregaat)	9.0	27°	1.20	84
9.5 " " "	7.5	26°	1.10	82
10.5 " " " (normaal)	3.8	27°	1.05	83
11.5 " " "	2.6	28°—21°.30'	0.50	76
12.5 " " "	1.1	19°	0.—	28
Asphaltbeton				
5 gew. dln bitumen (op 100 gew. dln aggregaat)	3.3	30°	1.90	136
6 " " " (normaal)	2.5	30°	1.55	130
7 " " "	0.7	30°—19°	0.60	95

Omtrent de MOHRsche diagrammen dezer proeven dient vermeld te worden, dat de mengsels met laag bitumengehalte een normaal beeld vertoonen, doch dat voor mengsels, die meer bitumen bevatten en waarvan het holle-ruimte-percentages beneden 2 vol. % gelegen is, de omhullende der cirkels niet meer een rechte is, doch naar de σ -as concaaf verloopt.

Indien nog meer bitumen wordt toegevoegd, is de omhullende wederom ten naastenbij recht, doch de waarden van φ_e , τ_e en η_m zijn lager dan voor „normale” mengsels. Ter illustratie zijn in grafiek III de MOHRsche diagrammen voor het asphaltemortelmengsel met 11.5 gew. dln. bitumen weergegeven.

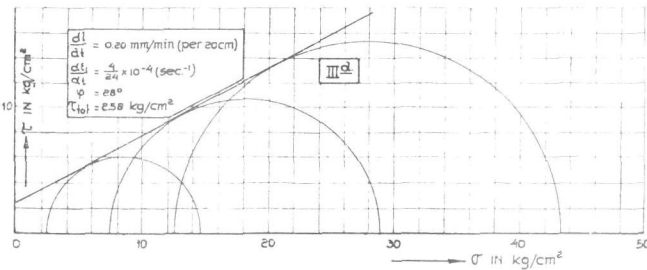
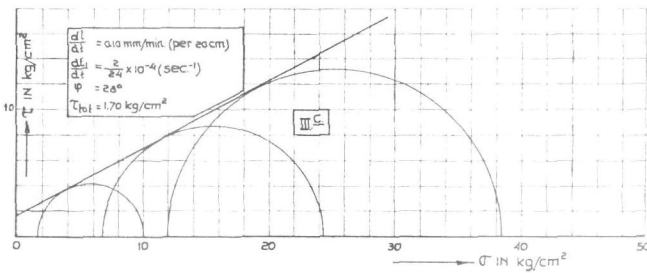
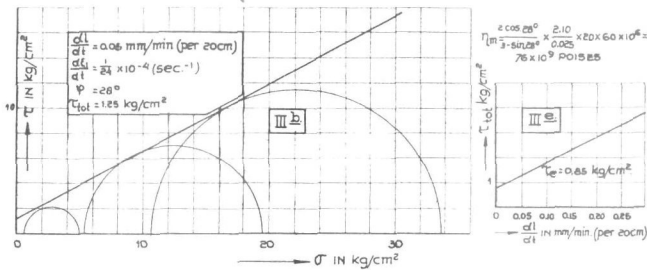
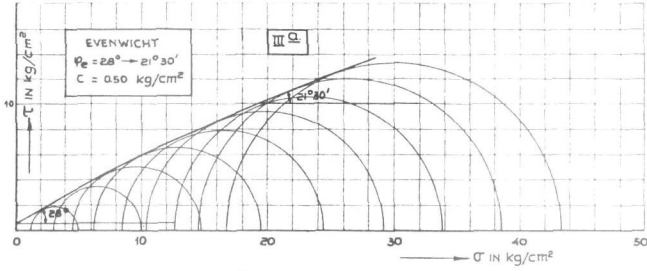
Uit Tabel XI blijkt, dat asphaltbeton aanzienlijk meer weerstand tegen plastische deformatie bezit dan asphaltemortel.

Vergelijkt men de mengsels van eenzelfde type, dan blijkt, dat de weerstand der mengsels met meer dan 3 vol. % holle ruimte onderling weinig verschillen.

Neemt de holle ruimte af tot beneden 3 vol. %, dan vermindert de weerstand zeer aanzienlijk. Vooral asphaltemortel blijkt hier zeer gevoelig te zijn, terwijl asphaltbeton bij zeer geringe holle ruimte

GRAFIEK III.
Asphaltemortel.

Samenstelling:
80 g. d. zand
20 g. d. vulstof
11.5 g. d. Mexphalte 50/60



(beneden 1 vol. %) nog een niet onbelangrijken weerstand ontwikkelt.

Beschouwt men de verschillende fysische grootheden, door welke de weerstand van het materiaal wordt gekarakteriseerd, afzonderlijk, dan blijkt, dat met toenemend bitumengehalte een zeer geleidelijke daling van de waarde van den initiaalweerstand plaats vindt, tot bij een holle ruimte van 2 % de daling zeer snel toeneemt.

De waarde van de viscositeit der massa vertoont een overeenkomstig verloop, terwijl de daling van de waarde van den hoek van inwendige wrijving ook bij geringe holle ruimte meer geleidelijk plaats vindt.

Deze vermindering van den weerstand van bitumen-mineraal-aggregaat-mengsels tegen plastische deformatie is reeds door vele onderzoekers vastgesteld. Veelal schrijven zij, zooals HERMANN (35), EWERS (21), dit toe aan een grootere dikte van de laag bitumen tusschen de korrels, indien overmaat bitumen aanwezig is. De grootere dikte dezer laag bitumen heeft een zekere smering tot gevolg, waardoor de weerstand van het materiaal vermindert.

Het is evenwel ten eenenmale onmogelijk, dat de dikte der laag bitumen toeneemt, wanneer de op het materiaal uitgeoefende spanningen worden verhoogd.

De resultaten der proeven met asphaltemortelmengsels, die 12.5 gew. dln. bitumen bevatten, kunnen zeer goed met behulp van een „laagdikte-theorie” worden verklaard, doch de resultaten van de in Grafiek III uitgewerkte proef, welke met behulp van deze theorie niet verklaard kunnen worden, dwingen ons naar een andere verklaring der verschijnselen om te zien.

Realiseert men zich, dat bij de celproef de op het proeflichaam werkende hoofdspanningen alle in grootte toenemen, hetgeen een volumevermindering van het lichaam medebrengt, dan moet tot een vermindering van de holle ruimte van het aggregaat geconcludeerd worden.

De geringe holle ruimte, welke het materiaal in onbelasten toestand bezit, wordt bij de deformatie ten gevolge der belasting practisch geheel met bitumen gevuld, zoodat in dit stadium de gasphase vrijwel geheel verdwijnt. Het aanwezige gas wordt daarbij tot een zekeren druk gecomprimeerd, waarbij een hydrostatische druk in gas- en vloeistofphase ontwikkeld wordt.

De uitwendige spanning wordt nu gedeeltelijk door de vloeistofphase (vloeistofspanning), gedeeltelijk door de aggregaatphase (aggregaatspanning) opgenomen, waarbij alleen de laatste een wrijvingsweerstand kan ontwikkelen, terwijl in de eerste een hydrostatische druk heerscht.

De verdeling der uitwendige spanning over de aggregaatspanning en de vloeistofspanning vormt, zooals reeds in Hoofdstuk IV, § 4, sub δ vermeld, een statisch onbepaald probleem, waarbij de compressibiliteit van aggregaatstapeling en vloeistof de drukverdeling beheerscht.

Met toenemende uitwendige spanning zal een grooter deel dezer spanning door de hydrostatische vloeistofspanning worden opgenomen, zoodat de omhullende der MOHRsche cirkels tegen de σ -as concaaf zal verlopen.

Onder deze omstandigheden verliest evenwel de formule (34) hare geldigheid, zoodat de in Tabel XI vermelde waarden der viscositeit der massa slechts als een benaderende omschrijving der materiaaleigenschappen kunnen gelden.

Vermindert men in formule (34) zoowel de waarde van σ_1 als van σ_3 met den hydrostatischen druk, dan zal in

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi_e} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi_e - \tau_e \right)$$

de middelste term kleiner worden, zoodat de waarde van K_{η} grooter is dan in Tabel XI aangegeven en zeer goed aan die van het mengsel met „normaal” bitumen gelijk kan zijn.

Wel moet men concludeeren, dat de initiaalweerstand bij aanwezigheid van een hydrostatischen druk in de vloeistofphase sterk in waarde terugloopt en zelfs tot nul kan dalen.

Dat de waarde van den initiaalweerstand voor asphaltbetonmengsels hooger is dan die van asphaltmortelmengsels en ook bij aanwezigheid van overmaat bitumen hooger blijft en niet tot nul terugloopt, zal in § 10 van dit hoofdstuk worden besproken.

Voor mengsels met meer dan 2 vol. % holle ruimte bezitten de in Hoofdstuk IV, § 4, sub 5 gegeven afleidingen dus geldigheid.

Daar in de practijk veelal bitumen-mineraalaggregaat-mengsels met meer dan 3 vol. % holle ruimte worden toegepast, is de hier ontwikkelde methode der celproeven voor het onderzoek naar den

weerstand van dergelijke mengsels tegen plastische deformatie geschikt. Voor mengsels met minder dan 2% holle ruimte, zoals gietasphalt, moeten de gevonden cijferwaarden met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd.

§ 9. Dilatatie.

Bij den in Hoofdstuk IV, § 4, ontwikkelden gedachtengang werd verondersteld, dat bij de deformatie de volumeverandering van het materiaal verwaarloosd mag worden.

Door LEE en MARKWICK (50) is evenwel aangetoond, dat bitumen-mineraalaggregaat-mengsels bij plastische deformatie geen constant volume behouden.

Getracht werd na te gaan, of dit verschijnsel, dat wij met den naam dilatatie aanduiden, bij celproeven ook kon worden vastgesteld en zoo ja, welken invloed het op de proefresultaten heeft.

Wij nemen aan, dat de relatieve lengte-toename in alle richtingen even groot is, en bij de plastische deformaties opgeteld mogen worden.

Stel de deformaties ten gevolge van vloeï = $\epsilon''_1, \epsilon''_2$ en ϵ''_3 , die ten gevolge van volumetoename = ϵ'_1, ϵ'_2 en ϵ'_3 .

In Hoofdstuk IV, § 2, werd gesteld:

$$(1 - \epsilon''_1)(1 - \epsilon''_2)(1 - \epsilon''_3) = 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

en

$$\epsilon''_2 = \epsilon''_3$$

waaruit volgde:

$$\epsilon''_1 = -2\epsilon''_3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Bij een volumetoename van het materiaal, welke gepaard gaat met in alle richtingen gelijke specifieke lengteveranderingen, geldt:

$$(1 - \epsilon'_1)(1 - \epsilon'_2)(1 - \epsilon'_3) = 1 + \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38)$$

waarin α de specifieke volumetoename van het materiaal voorstelt en

$$\epsilon'_1 = \epsilon'_2 = \epsilon'_3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (39)$$

Uit (38) en (39) volgt:

$$\epsilon_1' = -\frac{\alpha}{3} \cdot \dots \cdot \dots \quad (40)$$

De lengteverandering van het materiaal zal ten gevolge van beide verschijnselen bedragen:

$$\epsilon_1 = \epsilon_1' + \epsilon_1''; \epsilon_2 = \epsilon_2' + \epsilon_2''; \epsilon_3 = \epsilon_3' + \epsilon_3''. \dots \quad (41)$$

De absolute compressiesnelheid van het materiaal wordt gegeven door:

$$\frac{d\epsilon_1}{dt} = \frac{d\epsilon_1'}{dt} + \frac{d\epsilon_1''}{dt} \cdot \dots \cdot \dots \quad (42)$$

Vooruitlopende op de later te bespreken resultaten der proeven zij verondersteld, dat de specifieke volumetoename met de plastische deformatie bij constante spanningen en constante compressiesnelheid evenredig is, dus

$$\alpha = \beta \epsilon_1 \cdot \dots \cdot \dots \quad (43)$$

Uit (40) en (43) volgt, dat

$$3 \epsilon_1' = -\beta \epsilon_1 \cdot \dots \cdot \dots \quad (44)$$

Dit, na differentiatie naar den tijd, ingevoerd in (42), geeft:

$$\frac{d\epsilon_1}{dt} = -\frac{\beta}{3} \frac{d\epsilon_1}{dt} + \frac{d\epsilon_1''}{dt}$$

of

$$\frac{d\epsilon_1''}{dt} = \left(1 + \frac{\beta}{3}\right) \frac{d\epsilon_1}{dt} \cdot \dots \cdot \dots \quad (45)$$

De in formule (34) ingevoerde waarde van $\frac{d\epsilon_1}{dt}$ is dus een factor $\left(1 + \frac{\beta}{3}\right)$ te laag, zoodat de berekende waarden van η_m een factor $\left(1 + \frac{\beta}{3}\right)$ hooger zijn dan de werkelijke viscositeit der massa.

Proefondervindelijk werd het volgende gevonden.

Proeven werden uitgevoerd met asphaltmortelmengsels, van de samenstelling van Tabel IV, waarin evenwel bitumina van verschillende penetraties waren verwerkt, n.l. pen. 50/60, en pen. 80/100.

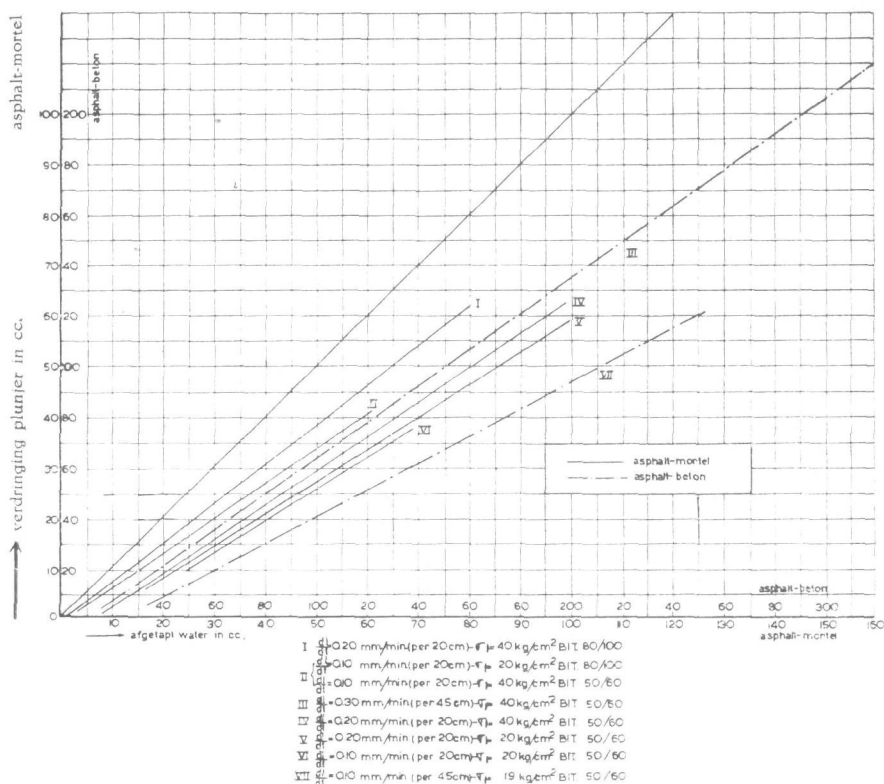
De proeven werden uitgevoerd bij verschillende, doch constante verticale belastingen, terwijl voor elke proef de deformatiesnelheid constant werd gehouden.

De deformatie werd hierbij verder voortgezet dan voor het verkrijgen van een constanten steundruk noodig was. Hierbij bleek, dat de steundruk in uiterst langzaam tempo verder afnam, hetgeen op grond van de langzame daling der verticale spanning, die volgt uit het constant blijven van de uitgeoefende kracht bij langzaam toenemende doorsnede van het proeflichaam, verwacht werd.

De hoeveelheid afgetapt water werd opgemeten. In grafiek IV is deze uitgezet tegen de volumeverplaatsing van den dalenden plunjier.

GRAFIEK IV.

Dilatatie van asphalt-mortel- en asphalt-beton mengsels.



Het blijkt uit deze grafiek, dat de hoeveelheid afgetapt water, behoudens een kleine afwijking bij kleine deformaties, welke afwijking wij aan elastische verschijnselen toeschrijven, met de volumeverplaatsing van den plunjer lineair toeneemt.

De verhouding van het volume van het afgetapte water en het volume van de plunjerplaatsing (feitelijk de verhouding van de toename van beide) blijkt eenigszins beïnvloed te worden door de grootte der spanningen en onafhankelijk te zijn van de deformatiesnelheid. Deze verhouding is een karakteristieke eigenschap van het aggregaat.

Voor asphaltemortel werd gevonden, dat deze verhouding ca 1.5 bedraagt, voor asphaltbeton bleek zij ca 1.65 te zijn.

Voor asphaltemortel geldt dus:

$$\beta = \text{ca. } 0.5,$$

zoodat $\frac{\beta}{3} = \frac{1}{6}$ en

$$\frac{d\varepsilon_1''}{dt} = \frac{7}{6} \frac{d\varepsilon_1}{dt}$$

terwijl voor asphaltbeton werd gevonden:

$$\beta = \text{ca. } 0.65 \quad \text{of} \quad \frac{\beta}{3} = \frac{2}{9}$$

of

$$\frac{d\varepsilon_1''}{dt} = \frac{11}{9} \frac{d\varepsilon_1}{dt}.$$

Uit de resultaten dezer proeven blijkt, dat voor het onderzochte asphaltemortelaggregaat de viscositeit der massa feitelijk $\frac{7}{6}$ maal zoo groot is als door ons werd berekend. Voor het onderzochte asphaltbetonaggregaat wordt dit $\frac{11}{9}$ maal.

Wij hebben overwogen, den term $\left(1 + \frac{\beta}{3}\right)$ voor verschillende aggregaatmengsels te bepalen om de feitelijke waarde van de viscositeit der massa te kunnen berekenen. Daar het verschijnsel evenwel ook optreedt bij de practische toepassing van het materiaal, waarbij voor de berekening van het gedrag van het materiaal onder een bepaalde belasting uit de met behulp der celproeven bepaalde physische grootheden deze term $1 + \frac{\beta}{3}$ wederom moet worden in-

gevoerd, om de snelheid, waarmede het materiaal deformeert, te berekenen en beide termen $1 + \frac{\beta}{3}$ tegen elkaar wegvallen, werd besloten bij het vastleggen van de resultaten van de celproeven den term $1 + \frac{\beta}{3}$ niet in te voeren.

Berekent men dus de deformatie van het materiaal met behulp van de in dit proefschrift gegeven waarde van de viscositeit der massa, dan vindt men de werkelijke deformatie van het materiaal.

§ 10. *Bespreking van eenige physische verschijnselen, welke bij de plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels optreden.*

Uit de vorige §§ van dit hoofdstuk is gebleken, dat een omschrijving van de eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels gedurende plastische deformatie met behulp van de in Hoofdstuk IV gegeven afleiding, mogelijk is. De beperkingen, die daarbij gelden, zijn besproken.

Bij de gegeven beschouwingen werden veronderstellingen gemaakt omtrent de eigenschappen van het materiaal, welke veronderstellingen op uit andere onderzoekingen bekende, analoge eigenschappen steunden. Twee dezer eigenschappen, n.l. de wrijving en de initiaalweerstand, zullen in het volgende nader worden belicht.

a. *Wrijving.*

Bij beweging van twee vaste lichamen over elkaar moet een zekere weerstand tegen verplaatsing overwonnen worden. Men onderscheidt de volgende gevallen (23).

1. Indien geen vloeistof tusschen de lichamen aanwezig is, spreekt men van COULOMBSche of contactwrijving. De weerstand tegen verplaatsing der lichamen ten opzichte van elkaar is gebleken evenredig te zijn met de normaalkracht, met welke de lichamen tegen elkaar worden gedrukt en onafhankelijk te zijn van de verplaatsingssnelheid. De wrijving zal daarbij beheerscht worden door de

elastische en plastische deformaties van de lichamen of van deelen daarvan.

2. Indien tusschen de lichamen een aaneengesloten laag vloeistof aanwezig is, zal de verplaatsing der lichamen ten opzichte van elkaar vloeiverschijnselen in deze vloeistoflaag ten gevolge hebben. De weerstand tegen verplaatsing (de wrijving) wordt dan beheerscht door den weerstand tegen vloeien van de vloeistoflaag en zal dientengevolge in tegenstelling met het vorige geval afhankelijk zijn van de snelheid, waarmede de verplaatsing geschiedt, waarbij thans de wrijving van den druk onafhankelijk zal zijn (hydrodynamische smering).

De weerstand zal verder beïnvloed worden door de viscositeit van de vloeistof.

De laag vloeistof, welke de lichamen van elkaar scheidt, zal door de kracht, welke de lichamen naar elkaar toedrukt, gedurende de beweging worden weggeperst, zoodat een eindtoestand wordt bereikt, waarin de vloeistoflaag een zekere, zeer geringe, dikte bezit. De eigenschappen van deze dunne laag vloeistof kunnen onder invloed van de krachten, welke de moleculen aan het oppervlak der lichamen er op uitoefenen, sterk van die der vloeistof, zooals deze in een dikkere laag worden bepaald, afwijken.

Bij aanwezigheid van lagen zeer sterk geadsorbeerde vloeistof zullen deze lagen a.h.w. één geheel met het materiaal van de vaste lichamen vormen.

Bij beweging der lichamen ten opzichte van elkaar zullen deze geadsorbeerde lagen over elkaar glijden op dezelfde wijze als de vaste materialen van het eerst besproken geval. Daarbij zal weer COULOMB'sche wrijving kunnen optreden, doch als regel zal de weerstand der over elkaar glijdende vloeistoflagen geringer zijn dan die van de droge materialen. De vloeistof zal ook hier dus een smerende werking uitoefenen.

Ook zal het mogelijk zijn, dat een combinatie van beide verschijnselen optreedt, zoodat de wrijving zoowel van druk als van verplaatsingssnelheid afhankelijk zal zijn.

Beschouwen wij thans de resultaten van eenige celproeven, waarbij een mineraalaggregaat-mengsel van het asphaltmorteltype droog en met verschillende vloeistoffen gemengd, werd onderzocht.

TABEL XII.

Resultaten van celproeven met mengsels van een mineraalaggregaat en verschillende vloeistoffen.

	φ_e	τ_{tot} (kg/cm ²)
Droog aggregaat	37°15'	0.1
Met toevoeging van water	38°	0.2
„ „ „ smeerolie	30°15'	0.4
„ „ „ Mexphalte 50/60	30°	2.1

De proeven werden uitgevoerd bij 20° C, terwijl de deformatiesnelheid $\frac{dl}{dt} = 0.2$ mm/min. per 45 cm bedroeg. De waarden van φ hebben dus betrekking op den „bewegingshoek“.

Beschouwing der tabel leidt tot het volgende:

De wrijving tusschen de aggregaatdeelen, welke bij droog aggregaat een contactwrijving is, wordt door de aanwezigheid van water niet beïnvloed. Water heeft dus geen smerende werking, in tegenstelling met smeerolie en met bitumen, welke in ongeveer gelijke mate de waarde van den hoek van inwendige wrijving verlagen, en waarvan de smerende werking dus ongeveer gelijk is. Het valt op, dat de daling der wrijving niet zeer groot is. De waarde van den wrijvingscoëfficiënt $f = tg \varphi$ daalt nl. van ca. 0.78 voor droog aggregaat resp. water tot $f =$ ca. 0.58 voor smeerolie en bitumen. Op grond van deze cijfers is het duidelijk, dat van een volledige hydrodynamische smering geen sprake is, en dat nog in belangrijke mate contactwrijving aanwezig moet zijn.

Deze gevolgtrekking wint aan waarschijnlijkheid door het vroeger in § 4 vermelde feit, dat de waarde van den inwendigen wrijvingshoek door de deformatiesnelheid niet wordt beïnvloed.

Het blijkt uit het cijfermateriaal, dat bitumen inderdaad een smerende werking op het mineraalaggregaat uitoefent, zooals ook reeds meerdere malen door andere onderzoekers (o.a. 37, 21, 88) naar voren werd gebracht, doch bij de kwantitatieve bepaling der smerende werking, welke bij de hier gevolgde onderzoekingsmethode mogelijk is geworden, blijkt dat deze smerende werking niet zeer groot is, zoodat de wrijvingscoëfficiënt ook bij aanwezigheid van bitumen nog een zeer hooge waarde ($f =$ ca. 0.60) behoudt.

Dientengevolge kan het aandeel van den totalen weerstand, dat

door wrijving wordt ontwikkeld, onder bepaalde omstandigheden voor het gestelde technische probleem van groot belang zijn.

In Hoofdstuk X van dit proefschrift wordt een dergelijk geval uitvoerig behandeld.

β. Initiaalweerstand.

In de grondmechanica werd bij onderzoeken aan sommige bodemmaterialen onder bepaalde omstandigheden gevonden, dat het materiaal bij het ontbreken van een normaalspanning op het schuifvlak toch een zekeren weerstand tegen deformatie kan ontwikkelen.

Bij analyse van dit probleem is men gekomen tot het onderscheiden van verschillende oorzaken, welke voor het ontstaan van een dergelijken weerstand zijn aan te wijzen.

1. Ten gevolge van de *echte cohesie* der mineraaldeelen, welke ontstaat ten gevolge van de VAN DER WAALS-krachten, welke deze onderling op elkaar uitoefenen (zie (45), pag. 137), ontstaat een alzijdige druk in het materiaal. De werkelijke normaalspanning in het materiaal is het bedrag van dezen alzijdigen druk hooger, dan uit de uitwendige spanningen volgt, zoodat een met dezen alzijdigen druk evenredig grootere weerstand wordt ontwikkeld.

De echte cohesie, welke grooter zal zijn naarmate de deeltjes van het mineraalaggregaat fijner zijn, zal bij het relatief grove aggregaat der bitumineuze mengsels geen waarde van eenig practisch belang verkrijgen.

2. Indien de poriën van een mineraalaggregaat stapeling gedeeltelijk met vloeistof zijn gevuld, zullen zich in deze poriën holle vloeistof-lucht menisci vormen, in welke de grensvlakspanning vloeistof-gas de aggregaatdeelen tegen elkaar tracht te trekken (zie (45) pag. 63). Dientengevolge ontstaat een drukspanning in de aggregaatphase, hetgeen weer een beginweerstand ten gevolge heeft. De waarde van deze spanningen zal evenredig zijn met de oppervlaktespanning en omgekeerd evenredig met den diameter van de openingen tusschen de aggregaatdeelen.

Daar bij vulling der poriën van de aggregaatstapeling de holle menisci verdwijnen, zal ook deze beginweerstand bij verzadiging van de holten van de aggregaatstapeling met vloeistof komen te vervallen. Men spreekt daarom van een *schijnbare cohesie*.

3. Ten slotte dient men nog volgens denzelfden auteur ((45) pag. 137) een *haakweerstand* te onderscheiden, welke ontstaat ten gevolge van het in elkaar haken van aggregaatdeelen bij de plastische deformatie.

Aan de hand van eenige proeven werd nagegaan, welke waarden deze deelen van den initiaalweerstand voor de ons interesseerende mengsels bezitten. De resultaten dezer proeven zijn in Tabel XIII verzameld.

TABEL XIII.
Waarden van den initiaalweerstand van verschillende mengsels.

Samenstelling der mengsels		Waarde van den initiaalweerstand τ_e (kg/cm ²)
Aggregaatphase	Vloeistofphase	
Asphaltmortel (Zie Tabel IV)	Droog	0.1
	Water	0.2
..	Bitumen Mexphalte 50/60 bij + 20° C.	1.05
..	Idem bij + 40° C.	0.40
Asphaltbeton (Zie Tabel IV)	Droog	0.55
	Water	0.65
..	Bitumen Mexphalte 50/60 bij + 20° C.	2.00
..	Idem bij + 40° C.	0.80

Uit de cijfers van Tabel XIII blijkt, dat de *haakweerstand* van de droge aggregaatmengsels 0.1 resp. 0.55 kg/cm² bedraagt voor de onderzochte mortel- resp. betonsamenstelling van het aggregaat.

De weerstand ten gevolge van de *schijnbare cohesie* blijkt 0.1 kg/cm² te bedragen, hetgeen volgt uit vergelijking der resultaten van proeven met droog aggregaat en met water als vloeistofphase. Overweegt men nu, dat de grensvlakspanning water-lucht ca. 75 dynes per cm² bedraagt tegen die van bitumen-lucht ca. 30 dynes per cm², dan is het duidelijk, dat onder vergelijkbare omstandigheden de weerstand ten gevolge van schijnbare cohesie voor door bitumen gebonden aggregaat ca. $\frac{30}{75} \times 0.1 = 0.04$ kg/cm² moet bedragen.

Hieruit blijkt, dat de schijnbare cohesie van bitumen-mineraal-aggregaat-mengsels verwaarloosd kan worden.

Uit de cijfers volgt verder, dat de waarde van den initiaalweerstand voor mengsels, welke bitumen als bindmiddel bevatten, van de temperatuur afhankelijk is. Ook bij 40° C, de hoogste hier toegepaste proeftemperatuur, bezit de initiaalweerstand nog een waarde van 0.45 resp. 0.80 kg/cm² voor asphaltnortel resp. asfaltbeton, welke waarden blijkens de proeven van Tabel XIII noch door een haakweerstand, noch door cohesie, noch door een schijnbare cohesie verklaard kunnen worden.

Het blijkt verder, dat de waarde van den initiaalweerstand der mengsels, welke bitumen als bindmiddel bevatten, met dalende temperatuur sterk toeneemt.

Daar de hardheid van het bitumen onder deze omstandigheden de eenige veranderlijke in het systeem vormt, ligt het voor de hand deze wijziging in de waarde van den initiaalweerstand aan eigenschappen van het bitumen toe te schrijven. Om deze redenen hebben wij gemeend, dat deel van den initiaalweerstand dat van de eigenschappen van het bitumen afhankelijk is, met den naam *bitumineuzen initiaalweerstand* (τ_b) te moeten aanduiden.

De in Tabel XIII vermelde resultaten van proeven toonen aan, dat de waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand voor beide onderzochte mengsels ca. 0.30 kg/cm² bedraagt bij 40° C en ca. 0.95 kg/cm² bij 20° C.

Het blijkt uit de tabel, dat haakweerstand en bitumineuze initiaalweerstand additief bij elkaar gevoegd kunnen worden, en samen den initiaalweerstand van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels vormen.

§ 11. *Critische vergelijking der in Hoofdstuk VI. § 4, sub a resp. sub β afgeleide formules.*

Bij de theoretische afleiding der formules, die het gedrag van het materiaal gedurende plastische deformatie beschrijven, werd een tweetal opvattingen naar voren gebracht. Volgens de eerste opvatting werd aangenomen, dat de vloeiverschijnselen in de vloeistofphase niet met normaalspanningen in deze phase gepaard gaan, terwijl bij de tweede opvatting, naar analogie van de gebruikelijke beschouwingen omtrent vloeiverschijnselen werd aangenomen, dat dit wel het geval zal zijn. Aan de laatste beschouwingwijze werd de voorkeur gegeven.

Thans zal worden nagegaan, of op grond van het experimenteele

materiaal een nadere motiveering dezer keuze gegeven kan worden.

De eerste opvatting leidde tot de formules:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{f}{1 - \frac{3 K_{\eta} \frac{d\varepsilon_1}{dt}}{\sigma_1 - \sigma_3}} \dots \dots \dots (23)$$

en

$$\sin \varphi' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + \frac{2 \tau_e}{f}} \dots \dots \dots (24)$$

Eliminatie van φ' uit de formules geeft, indien $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = R =$ straal MOHR'sche cirkel en $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\tau_e}{f} = X_0 =$ afstand van middelpunt van den cirkel tot het punt $-\frac{\tau_e}{f}$, welk laatste punt als nieuwe oorsprong wordt genomen en $\frac{3}{2} K_{\eta} \frac{d\varepsilon_1}{dt} = p$.

$$\left(\frac{X_0}{R}\right)^2 - 1 = \frac{1}{f^2} \left(1 - \frac{p}{R}\right)^2 \dots \dots \dots (46)$$

De MOHR'sche cirkels worden gegeven door:

$$F = (X_0 - x)^2 + y^2 - R^2 = 0 \dots \dots \dots (47)$$

De omhullende der MOHR'sche cirkels voor een constante waarde van p wordt omschreven door:

$$\frac{\delta F}{\delta R} = 0$$

Uitwerking onder verwaarloozing van hoogere machten van $\frac{p}{R}$ geeft ten slotte:

$$\frac{x}{p} = \frac{R}{p} \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{p}{R}\right)^2}{f^2} + 1} \frac{1 - \frac{p}{R}}{1 + f^2 - \frac{p}{R}} \dots \dots \dots (48)$$

De waarde van $\frac{y}{p}$ kan berekend worden uit:

$$\left(\frac{R}{p} \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{p}{R}\right)^2}{f^2} + 1 - \frac{x}{p}} \right)^2 + \frac{y^2}{p^2} = \frac{R^2}{p^2} \dots \dots (49)$$

Bij de proeven werd gevonden, dat

$$K\eta = \text{ca. } 10^{10} \text{ cgs tot ca. } 10^{11} \text{ cgs,}$$

terwijl

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1 \text{ tot } 4 \times 10^{-2}}{60 \times 45} = 0.5 \text{ tot } 2 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}.$$

In de volgende tabel zijn verschillende combinaties van $K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}$ en R , welke bij de proeven kunnen voorkomen, samengevat.

TABEL XIV.

Verskillende combinaties van $K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}$ en R bij celproeven.

$K\eta$ (poises)	10^{10}				10^{11}			
	$\frac{d\varepsilon_1}{dt}$ (sec ⁻¹)	0.5×10^{-5}		2×10^{-5}		0.5×10^{-5}		2×10^{-5}
$K\eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}$ (kg/cm ²)	0.075		0.3		0.75		3	
R (kg/cm ²)	5.5	17.5	7.5	20	7.5	17.5	10	20
$\frac{p}{R}$	0.015	0.004	0.04	0.015	0.1	0.04	0.3	0.15

De waarden van $\frac{x}{p}$ en $\frac{y}{p}$ werden nu voor de waarden van

$\frac{p}{R} = 0.005, 0.015, 0.05, 0.15$ en 0.3 berekend, waarbij wordt aangenomen dat $f = 0.58$ ($\varphi = 30^\circ$).

TABEL XV.

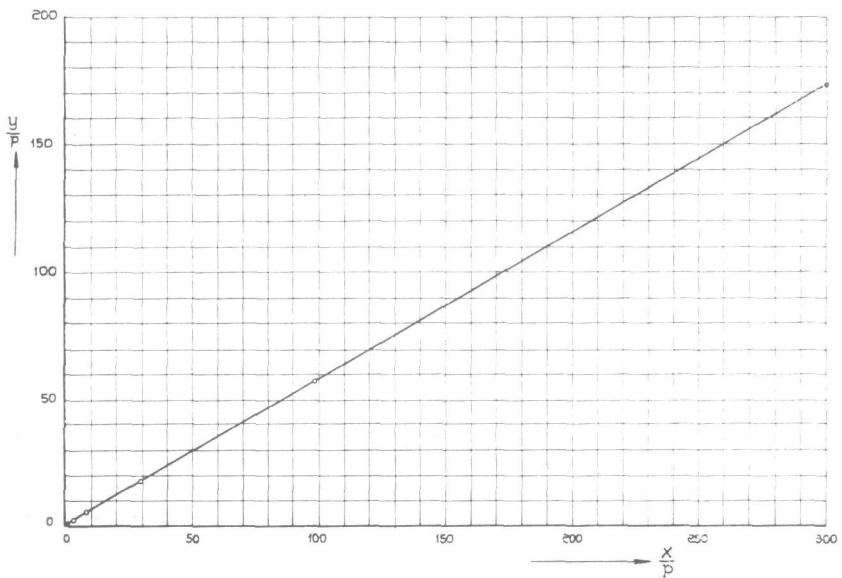
Waarden voor $\frac{x}{p}$ en $\frac{y}{p}$ voor verschillende waarden van $\frac{p}{R}$.

$\frac{p}{R}$	$\frac{x}{p}$	$\frac{y}{p}$
0,005	300	173
0,015	98	56,7
0,050	29,5	18,7
0,150	8,4	5,7
0,300	3,5	2,9

Bij uitzetten in grafiek V blijkt, dat de punten praktisch op een rechte liggen, welke een hoek van 30° met de $\frac{x}{p}$ as maakt en bijna door den oorsprong gaat.

GRAFIEK V.

Verband tusschen $\frac{x}{p}$ en $\frac{y}{p}$.



In het onderzochte gebied kunnen wij dus de omhullende der MOHR'sche cirkels, zooals deze uit de in Hoofdstuk IV, § 4, sub *a*, ontwikkelde theorie wordt berekend, als een rechte beschouwen.

De afwijkingen van de rechte lijn zijn zoo gering, dat zij ten gevolge van de proeffouten, welke het experimenteele materiaal bevat, niet met behulp van de resultaten der celproeven aangetoond kunnen worden.

Het is dus niet mogelijk, op grond van het experimenteele materiaal de voorkeur aan een der in Hoofdstuk IV, § 4, ontwikkelde theorieën te geven. Tegen de door ons gekozen theoretische beschouwing, welke in volkomen overeenstemming met de experimenteele feiten is en tot eenvoudige formules aanleiding geeft, bestaat dus geen bezwaar.

HOOFDSTUK VII.

Invloed van eenige eigenschappen van het bitumen op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.

§ 1. *Inleiding.*

Bij beschouwingen omtrent den weerstand van bitumineuze wegdekmaterialen tegen plaatselijke deformatie, waarbij langdurig aanhoudende spanningen zullen optreden, die met zeer kleine deformatiesnelheden gepaard zullen gaan, dient men in het oog te houden, dat de wegenbouwer door keuze van de afmetingen der constructie het resultaat slechts in zeer geringe mate kan beïnvloeden. Als eenig middel om zijn doel te bereiken beschikt hij over de mogelijkheid de samenstelling van zijn bitumineus wegdek-mengsel zoo te kiezen, dat het wegdek de gewenschte eigenschappen verkrijgt.

Het betreft hier een vraagstuk van sterkte van het materiaal. De elastische deformaties, welke ten gevolge van de spanningen optreden, zullen het resultaat in zóó geringe mate beïnvloeden, dat zij voor de practische oplossing van het probleem gevoegelijk verwaarloosd kunnen worden.

Bij de in de vorige hoofdstukken gegeven beschouwingen werd nagegaan of het toelaatbaar was het materiaal als een homogeen-isotroop materiaal op te vatten. Bij het onderzoek naar de mogelijkheid om door wijzigingen in de samenstelling der mengsels een bepaald technisch effect (hier voldoende weerstand tegen plaatselijke deformatie onder den last) te bereiken, blijven de daaromtrent gegeven beschouwingen onaangetast, daar de omschrijving van den weerstand van het materiaal tegen plastische deformatie steeds betrekking heeft op een doorsnede van zoodanige afmetingen, dat de bepaalde grootheden representatief zijn voor de gemiddelde waarden van den weerstand in die doorsnede.

Wanneer men evenwel nagaat, welken invloed wijzigingen in de samenstelling der mengsels hebben op de physische grootheden, welke den weerstand tegen plastische deformatie beschrijven, dan

dient men in het oog te houden, dat het materiaal niet homogeen is en dat in elke doorsnede de weerstand van het materiaal beheerscht wordt door den weerstand, welke de verschillende samenstellende deelen, eventueel in samenwerking met elkaar, ontwikkelen.

Terwijl het materiaal dus macroscopisch steeds als homogeen-isotroop wordt beschouwd, moet het, bij beoordeeling van den invloed, die elk der samenstellende deelen op de eigenschappen van het mengsel heeft, als microscopisch inhomogeen worden opgevat.

Gegevens omtrent den invloed van wijzigingen in de samenstelling der mengsels op de eigenschappen van er mede vervaardigde wegdekken, zijn o.m. verzameld door RICHARDSON (78), die de aan uitgevoerde constructies statistisch verzamelde ervaringen in verband bracht met de analyses der mengsels, en op grond van deze gegevens, welke van ca. 1900 dateeren, tot bepaalde conclusies kwam omtrent de meest gewenschte samenstelling van bitumineuze wegdekmenngsels. Het is duidelijk, dat zijn conclusies alleen geldigheid bezitten voor de toentertijd gebruikelijke constructietypen en de toen heerschende verkeersomstandigheden.

Een beschrijving van de mechanische eigenschappen der materialen wordt door hem niet gegeven, zoodat de door hem gegeven resultaten bij het ontwerpen van een bitumineuze wegdekconstructie slechts kunnen dienen om een globaal inzicht te verkrijgen in de geschiktheid der gekozen constructie.

Voor het rationeel ontwerpen van een constructie, zooals dit met andere constructiematerialen als cementbeton en vloeistaal mogelijk is, zijn deze gegevens evenwel ongeschikt.

Ook de door andere onderzoekers verrichte onderzoekingen, welke in dit en de volgende hoofdstukken besproken zullen worden, lijden aan hetzelfde euvel, voornamelijk omdat bij deze studies slechts één der componenten van het materiaal werd beschouwd, doch een omschrijving van de eigenschappen van het geheele mengsel achterwege bleef.

In dit hoofdstuk wordt nagegaan, welken invloed eenige eigenschappen van het bitumen op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels uitoefenen, terwijl in de volgende hoofdstukken de invloed van het fijnste aggregaat (de zgn. vulstof) resp. van het grovere aggregaat zal worden besproken.

Bij deze onderzoeken zijn de proefomstandigheden in overeenstemming met de in Hoofdstuk I gegeven analyse zóó gekozen, dat zoowel de grootte-orde der spanningen als die der deformatiesnelheid met die in de praktijk overeenkomen. De temperatuur, bij welke de proeven worden uitgevoerd, werd gevarieerd, om een overzicht te verkrijgen van het gedrag van het materiaal onder praktijkomstandigheden.

§ 2. *Keuze der proefmaterialen; proefomstandigheden en resultaten.*

Bij de beoordeeling van de geschiktheid van een bitumineus bindmiddel voor verwerking in een wegdek-mengsel wordt als regel de nadruk gelegd op de fysische eigenschappen van het bindmiddel.

Men heeft zich in de eerste plaats gericht naar de hardheid van het bindmiddel bij een bepaalde temperatuur, waarvoor algemeen 25° C wordt gekozen. De hardheid wordt daarbij uitgedrukt in de penetratie in „0.1 mm” van een naald van gestandaardiseerden vorm, welke gedurende 5 sec. met 100 g wordt belast (10). In wezen is deze meting een viscositeitsbepaling (zie (81)).

Bij van 25° C afwijkende temperaturen zullen verschillende bindmiddelen, welke bij 25° C eenzelfde penetratie bezitten, verschillende waarden der penetratie vertoonen, hetgeen het gevolg is van verschillen in de temperatuurgevoeligheid dezer bindmiddelen. Dit is voor sommige onderzoekers aanleiding geweest om aan deze temperatuurgevoeligheid bijzondere aandacht te besteden. Voor asphaltbitumen, dat ons in verband met onze onderzoeken, waarbij uitsluitend dit bindmiddel is gebruikt, in het bijzonder interesseert, is een systeem uitgewerkt, waarbij deze temperatuurgevoeligheid uitgedrukt wordt in een Penetratie-Index (P.I.) (67).

Een waarde van den P.I. < -2 geeft een zeer temperatuurgevoelig bitumen aan, een P.I. tusschen -2 en +2 een „normaal” bitumen en een P.I. > +2 een geblazen bitumen.

Op deze wijze kunnen de vloeieigenschappen van een asphaltbitumen gekarakteriseerd worden door de penetratie bij 25° C en den P.I.

Naast de vloeieigenschappen wordt door NELLENSTEYN (59) in het bijzonder nog de nadruk gelegd op het colloïdale karakter van asphaltbitumen. Hij meent op grond van zijn onderzoeken bijzondere waarde te moeten hechten aan het percentage van het bitumen,

dat in bepaalde oplosmiddelen (aromaatvrije 60—80 benzine, d.i. benzine met een kooktraject van 60—80° C, of ook wel diaethyl-aether), niet oplost. Het niet oplosbare deel noemt men de asphaltenen.

Analysen van de samenstelling van asphaltbitumina, zooals door ABRAHAM (1) gegeven, bieden weinig aanknoopingspunten voor de in dit proefschrift gegeven beschouwingen. Ook de veelal vermelde gegevens omtrent soortelijk gewicht, zwavel- en paraffinegehalte, ductiliteit, e.d. zijn herkenninggegevens, doch voor het doel van deze studie van ondergeschikt belang. Ook de publicatie van MAASS (52) geeft weinig aanknoopingspunten.

Terwijl logischerwijs een verband verondersteld mag worden tusschen de hardheid van het bitumen en den weerstand tegen plastische deformatie van een dit bitumen bevattend bitumen-mineraalaggregaat-mengsel — in het bijzonder verdient de viscositeit der massa onze aandacht — lijkt een verband tusschen de andere eigenschappen van het bitumen en den weerstand van het mengsel minder voor de hand liggend.

Wij beperkten ons tot het onderzoek van een tweetal wegdektypen, n.l. een asphaltmortel en een asphaltbeton, waarin Venezolaansche bitumina van verschillende hardheid — en wel pen. bij 25°: 20/30, 50/60, 80/100 resp. 180/200 — waren verwerkt, alsmede tot eenige proeven, waarbij aan de mengsels Mexicaansche bitumina van dezelfde penetraties waren toegevoegd.

De samenstelling van het mineraalaggregaat is dezelfde als in Tabel IV aangegeven.

De proeftemperatuur werd gevarieerd tusschen + 5° C en + 40° C. De proeven werden in duplo uitgevoerd, waarbij bleek, dat de reproduceerbaarheid zeer goed was. Hieruit volgt, dat zoowel aan de bereiding van de mengsels als aan de comprimeering voldoende zorg werd besteed.

Het bitumen uit de mengsels werd na de proef teruggewonnen volgens de in Hoofdstuk V § 9 aangeduide methode.

De resultaten der onderzoekingen aan mengsels, waarin Venezolaansch bitumen is verwerkt, zijn in Tabel XVI gegeven, en uitgedrukt in de waarde van den hoek van inwendige wrijving (in

TABEL XVI.

Resultaten van celproeven bij verschillende temperaturen met asphaltmortel- resp. asphaltbetonmengsels, die Venezolaansch bitumen van verschillende uitgangspenetratie bevatten.

Asphaltmortel mengsels								
Bindmiddel	Temp. °C	Resultaten der proeven				Penetratie van het terug- gewonnen bitumen		P. I.
		η_e	τ_e (kg/cm ²)	η_m $\times 10^{-9}$ poises	$\frac{1}{\eta_m}$ $\times 10^{11}$	proef- temp.	25° C	
Mexphalte 20/30	20	25°	2.80	141	0.71	12	17½	+0.7
		26°	2.45	147	0.68	12½	17½	+0.7
	30	29°30'	1.00	81	1.24	20	13	+0.3
		30°	1.20	79	1.26	20½	14	+0.4
	40	29°	0.35	50	2.00	44	14	+0.6
		28°30'	0.45	47.5	2.15	57	17½	+0.25
Mexphalte 50/60	10	27°30'	1.80	111	0.90	8.2*	33	+0.1
		26°	2.00	108	0.93	8.8*	33½	+0.05
	20	28°	1.10	81	1.24	22	31	+0.8
		27°	1.05	86	1.16	21½	33	0
	30	29°	0.70	50	2.00	49	31½	-0.35
		31°30'	0.70	51	1.96	55	35	-0.2
	40	31°30'	0.40	31	3.20	106	29	+0.2
		27°30'	0.40	28	3.60	106	29	+0.3
Mexphalte 80/100	10	27°	1.05	97.5	1.00	22½	48	-0.2
		29°	0.35	54	1.85	41	68	-0.2
	20	28°	0.35	56	1.80	40	67	-0.4
		28°30'	0.30	37	2.70	75	47	-0.2
	40	31°	0.30	27.5	3.65	275	65	-0.4
		28°30'	0.40	27	3.70	271	65	-0.4
Mexphalte 180/200	5	27°30'	1.15	76	1.32	20	137	0
		28°	0.80	78	1.30	19	136	-0.1
	20	30°30'	0.35	38	2.60	76	131	-0.2
		30°	0.25	36	2.80	63	103	-0.3
	30	31°	0.40	27.5	3.65	150	97	-0.6
		28°	0.60	27	3.70	148	90	-0.2
	40	28°	0.50	23	4.30	500	113	-0.4
		30°	0.40	25.5	3.90	530	115	-0.5
Asphaltbeton mengsels								
Mexphalte 20/30	20	30°	3.80	314	0.32	11	16	+0.3
	37	32°	0.75	104	0.96	47	17	+0.2
Mexphalte 50/60	10	28°	4.00	334	0.30	9½	35	-0.2
	20	30°	2.00	133	0.75	26	37	+0.2
	40	32°	0.80	64	1.56	137	37	+0.25
Mexphalte 80/100	20	33°	1.05	110	0.91	42	61	-0.2
	37	31°	0.90	62.5	1.60	193	64	0
Mexphalte 180/200	15	31°	1.70	130	0.77	38	105	-0.2
	20	33°	0.90	85	1.18	59	94	-0.2
	37	32°	1.00	47.5	2.10	490	130	-0.2

De met *) aangeduide waarden zijn door extrapolatie bepaald en in verband met de relatieve fout in decimalen aangegeven, hoewel de directe bepaling minder nauwkeurig is.

evenwichtstoestand) φ_e , den initiaalweerstand τ_e en de viscositeit der massa η_m (de differentieele viscositeit).

Deze proefresultaten worden in de volgende §§ besproken. Allereerst volgt een bespreking, waarbij in het bijzonder het verband tusschen de waarde dezer physische grootheden en de penetratie van het bitumen bij de temperatuur der proef wordt nagegaan.

In aansluiting hieraan wordt een rangschikking naar de temperatuur gegeven.

§ 3. *Rangschikking van de resultaten der proeven naar de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur.*

Gaat men de waarde der penetratie van het teruggewonnen bitumen bij $+25^\circ\text{C}$ na, dan blijkt, dat in het algemeen voor de duplo proeven, waarvan de proeflichamen uit één mengsel zijn vervaardigd, goed overeenstemmende waarden worden gevonden, doch dat de eigenschappen van het bitumen voor verschillende mengingen vrij belangrijk uiteenloopen. Het valt op dat de penetratie van het teruggewonnen bitumen aanzienlijk lager is dan die van het uitgangsbetumen. Daar, zooals reeds bij oppervlakkige beschouwing der cijfers blijkt, de eigenschappen van het materiaal door de penetratie van het bitumen worden beïnvloed, moet de terugwinning van het bitumen uit de proeflichamen en de bepaling van de penetratie er van als een integreerend deel van het onderzoek worden beschouwd.

In het volgende wordt het verband nagegaan tusschen de bij deze proeven bepaalde waarden der drie physische grootheden, welke het gedrag van het materiaal bij plastische deformatie omschrijven en de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur.

a. Hoek van inwendige wrijving (φ_e).

In het algemeen blijkt de waarde van den hoek van inwendige wrijving voor asphaltbeton eenige graden hooger te zijn dan voor asphaltmortel.

Gaat men de verschillen in de waarden van den hoek van inwendige wrijving voor elk der aggregaattypen na, dan blijkt, dat een lagere waarde gevonden wordt, naarmate het bitumen harder is, m.a.w. een harder bitumen heeft een sterker smerende werking dan een zachter bitumen. Daarbij doet de hardheid van het uitgangs-

bitumen weinig ter zake en is voornamelijk de hardheid van het bitumen bij proeftemperatuur beslissend.

Men krijgt den indruk, dat bij penetraties $> ca. 30$ bij proeftemperatuur de waarde van den hoek van inwendige wrijving weinig meer door de penetratie van het bitumen wordt beïnvloed, al is deze grens uit den aard der zaak bij de kleine verschillen in de waarden van φ_e niet zeer scherp. Boven deze grens worden waarden voor den inwendigen wrijvingshoek gevonden van ca. 29° resp. 32° voor asphaltemortel resp. asfaltbeton.

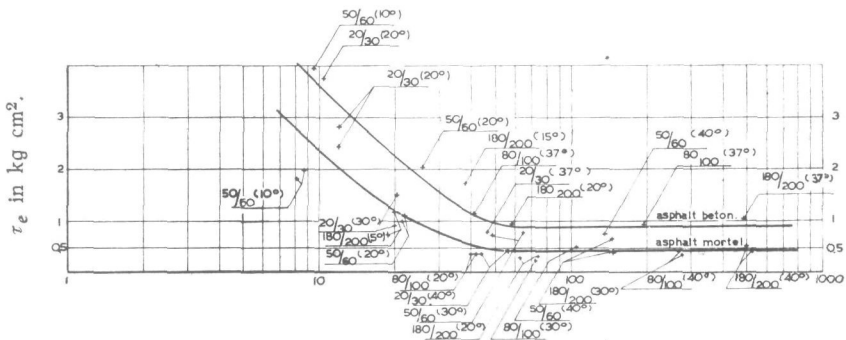
β . *Initiaalweerstand τ_e .*

Uit de cijfers van Tabel XVI blijkt, dat de waarden van den initiaalweerstand τ_e voor mengsels van eenzelfde aggregaattypen sterk kunnen verschillen. De gevonden waarden variëren tusschen ca. 3.00 kg/cm^2 en ca. 0.35 kg/cm^2 voor de asphaltemortel-mengsels en ca. 4.00 kg/cm^2 tot ca. 0.85 kg/cm^2 voor asfaltbetonmengsels.

De waarde van den initiaalweerstand is voor eenzelfde mengsel-type hooger naarmate het bitumen bij proeftemperatuur harder is. In grafiek VIa zijn de waarden uit tabel XV uitgezet tegen de logarithme van de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur.

GRAFIEK VIa.

Verband tusschen de waarden van den initiaalweerstand τ_e en de penetratie van het teruggewonnen bitumen bij de proeftemperatuur.



Penetratie van het teruggewonnen bitumen bij de proeftemperatuur.

Uit deze grafiek blijkt, dat naast het aggregaattypen, de waarde van deze penetratie beslissend is voor de waarde van den initiaal-

weerstand, doch dat de penetratie van het uitgangsbetumen (welke steeds bij 25° C bepaald wordt) weinig invloed heeft op de waarde van den initiaalweerstand.

Tevens blijkt, dat de initiaalweerstand van de asphaltbetonmengsels steeds hoger is dan die van asphaltmortelmengsels, indien de penetratie van het bitumen der mengsels gedurende de proef gelijk gekozen wordt. Het verschil bedraagt bij hogere waarden der penetratie ca. 0.50 kg/cm². Wij meenen ter verklaring van dit verschil te moeten aannemen, dat de haakweerstand (zie Hoofdstuk VI § 10, sub β) van het aggregaat in het asphaltbetonmengsel dit bedrag hoger is dan die van het aggregaat der asphaltmortelmengsels.

Uit de grafiek VIa blijkt verder, dat bij waarden der penetratie hoger dan ca. 50 bij proeftemperatuur de waarde van den initiaalweerstand slechts weinig van de penetratie van het bitumen afhankelijk is.

Daar de waarde van den initiaalweerstand in dit gebied voor asphaltmortel ca. 0.35 kg/cm² bedraagt en voor asphaltbeton ca. 0.85 kg/cm², mag men niet vergeten, dat de relatieve fout in deze waarden vrij groot kan zijn, daar bij het grafisch uitwerken der proefresultaten een dubbele extrapolatie wordt uitgevoerd. Wij geven er daarom de voorkeur aan, dit verschijnsel als volgt te formuleeren.

Bij een penetratie $>$ ca. 50 bij proeftemperatuur wordt de gevoeligheid van de waarde van den initiaalweerstand voor de penetratie van het bindmiddel zoo gering, dat bij de celproef geen verschillen in de waarden van den initiaalweerstand meer kunnen worden bepaald. Deze waarde blijkt onafhankelijk te zijn van de hardheid van het uitgangsbetumen, en bedraagt voor het onderzochte asphaltmortelmengsel ca. 0.35 kg/cm², voor het asphaltbeton ca. 0.85 kg/cm².

De toename van de waarde van den initiaalweerstand bij aanwezigheid van een harder bindmiddel bij proeftemperatuur schrijven wij toe aan de toename van den bitumineuzen initiaalweerstand met toenemende hardheid van het bitumen. Uit de in Hoofdstuk VI § 10 sub β besproken proeven volgt, dat de initiaalweerstand van het droge aggregaat der mortelmengsels ca. 0.1 kg/cm² bedraagt, die van het asphaltbetonmengsel ca. 0.55 kg/cm². Bij penetratie $>$ 50

bezit de bitumineuze initiaalweerstand dus nog een waarde van ca. 0.25 kg/cm^2 voor beide typen mengsel.

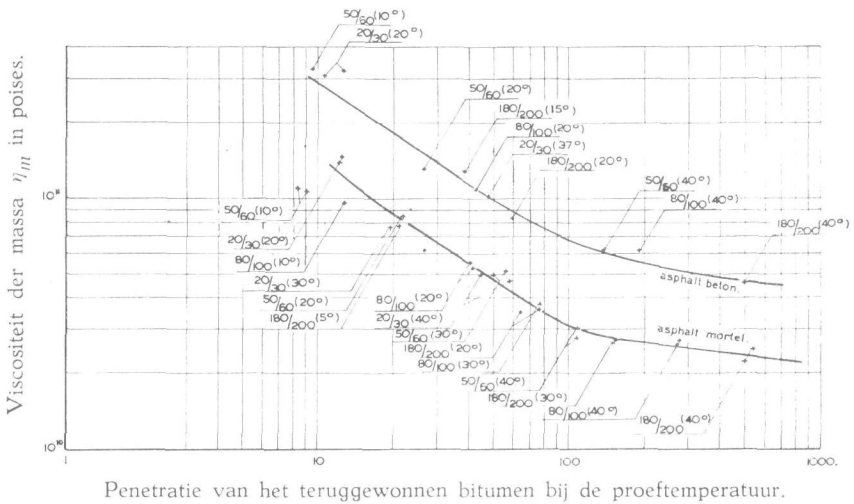
γ . Viscositeit der massa η_m .

Het wekt geen verwondering, dat, zooals uit de cijfers van Tabel XVI blijkt, de waarde van de viscositeit der massa η_m , toeneemt met dalende penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur.

De waarden van de viscositeit der massa zijn op dubbel logaritmische schaal tegen de penetraties van het bitumen bij proeftemperatuur uitgezet in grafiek VIb. Ook hier blijkt, dat de penetratie

GRAFIEK VIb.

Verband tusschen de waarden van de viscositeit der massa η_m en de penetratie van het teruggewonnen bitumen bij de proeftemperatuur.



van het bitumen bij proeftemperatuur, naast de eigenschappen van het aggregaat, van invloed is op den weerstand van de mengsels, doch dat de hardheid van het uitgangsbetumen praktisch zonder belang is. Door de enkele punten in de grafische voorstelling kan een vloeiend verloopende lijn getrokken worden, die de waarden van de viscositeit der massa bij verschillende waarden der penetratie van het bitumen aangeeft. Voor asphaltmortel en asphaltbeton worden weer verschillende lijnen gevonden, die vrijwel evenwijdig

loopen. Hieruit volgt, dat de viscositeit der massa voor asphaltbetonmengsels een meervoud (hier ca. een 2-voud) bedraagt van die van asphaltmortelmengsels.

Uit de grafiek blijkt verder, dat in afwijking van hetgeen bij den initiaalweerstand werd gevonden, de viscositeit der massa met toenemende penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur voortdurend daalt. Deze daling is het sterkst, indien de penetratie een lage waarde bezit en is geringer bij hooge waarden der penetratie, doch een van de penetratie onafhankelijk gebied voor de waarde van de viscositeit der massa is niet aanwezig.

δ. Samenvatting.

Uit het voorgaande volgt, dat de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur een belangrijken invloed heeft op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaatmengsels, in het bijzonder op de waarde van den initiaalweerstand en op die van de viscositeit der massa. De waarde van den hoek van inwendige wrijving varieert slechts in zeer beperkte mate. De hardheid van het uitgangsbetumen heeft weinig invloed op de waarden dezer grootheden.

Naast dezen invloed van het bitumen wordt een aanzienlijke invloed van het aggregaat op den weerstand van het materiaal geconstateerd.

Voor asphaltbetonmengsels worden voor gelijke waarden der penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur steeds hogere waarden voor de physische grootheden, die den weerstand van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels tegen plastische deformatie beschrijven, gevonden dan voor asphaltmortelmengsels.

Asphaltbetonmengsels bieden dus — een gelijke penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur vooropgesteld — steeds een hooger weerstand tegen plastische deformatie dan asphaltmortelmengsels.

Daar de weerstand van het materiaal in evenwichtstoestand (dus bij de plasticiteitsgrens) beheerscht wordt door de waarde van den hoek van inwendige wrijving en door die van den initiaalweerstand en de waarden van beide bij hogere penetraties van het bitumen weinig met de waarde van deze penetratie veranderen, zal in den evenwichtstoestand bij aanwezigheid van een zachter bitumen

(pen. $>$ ca. 50) de weerstand van het materiaal weinig door den toestand, waarin het bitumen verkeert, worden beïnvloed.

§ 4. *Rangschikking der proefresultaten naar de temperatuur.*

De beoordeeling van de praktische bruikbaarheid van een gegeven wegdek materiaal dient te geschieden op grond van de eigenschappen, die dit materiaal bij verschillende temperaturen bezit. In Hoofdstuk I, § 4, werd er reeds op gewezen, dat voor West-Europa met een temperatuurinterval van -20° C tot $+50^{\circ}$ C rekening moet worden gehouden.

In het onderstaande worden de resultaten der proeven uit Tabel XVI nu besproken in verband met de temperatuur, waarbij de proeven zijn uitgevoerd.

a. Hoek van inwendige wrijving.

Bij verwerking van bitumina, die een uitgangspenetratie bij 25° C $>$ 25 bezitten, en dit zijn alle in den wegebouw gebruikelijke bitumina, zal steeds bij een temperatuur van $+40^{\circ}$ C de penetratie van het bitumen hooger dan 30 zijn. Dientengevolge zal bij de hoogste temperatuur de hoek van inwendige wrijving steeds de hoogste waarde bezitten, en verder van de samenstelling van het aggregaat afhankelijk zijn (zie ook § 3, sub *a*).

Bij lagere temperaturen zal de waarde van den hoek van inwendige wrijving afnemen. Dit zal voor mengsels met verschillende bitumina plaats vinden bij een hogere temperatuur, naarmate een harder bitumen is verwerkt.

Vooruitlopende op de beschouwingen van Hoofdstuk X zij thans reeds vermeld, dat deze geringe daling van de waarde van den hoek van inwendige wrijving voor de practijk van geen belang is, daar de weerstand tegen plaatselijke deformatie van het materiaal bij de hoogste in de practijk optredende temperatuur maatgevend is.

β. Initiaalweerstand.

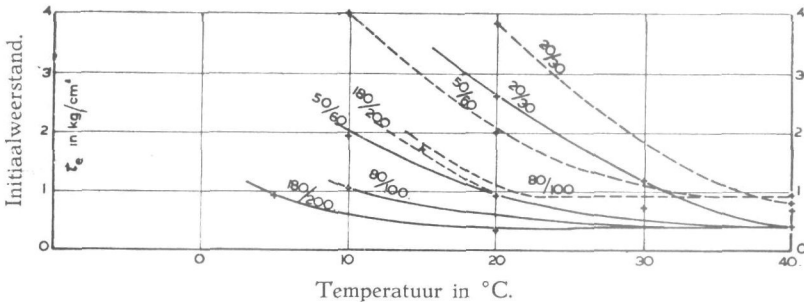
De invloed van de temperatuur op de waarde van den initiaalweerstand kan het eenvoudigste worden nagegaan in de grafische voorstelling van grafiek VII. Het blijkt, dat met toenemende temperatuur de waarde van den initiaalweerstand afneemt, totdat voor alle onderzochte mengsels van eenzelfde type een gelijke waarde

wordt bereikt. Dit geldt zoowel voor asphaltemortel- als voor asphaltbetonmengsels, waarbij voor beton een hoogere waarde wordt gevonden dan voor asphaltemortel en wel ca. 0.85 kg/cm^2 tegen 0.35 kg/cm^2 . Dit verschil wordt in aansluiting aan het in § 3, sub β besprokene aan het verschil in de waarde van den haakweerstand der aggregaatmengsels toegeschreven.

GRAFIEK VII.

Verband tusschen den initiaalweerstand τ_e en de temperatuur.

———— asphalt mortel.
 - - - - - asphalt beton.



Verder blijkt uit grafiek VII, dat de waarden van den initiaalweerstand van asphaltbeton ook bij lagere temperaturen hooger zijn dan die van asphaltemortel bij dezelfde temperatuur, indien bitumina van gelijke uitgangspenetratie zijn verwerkt.

γ . Viscositeit der massa.

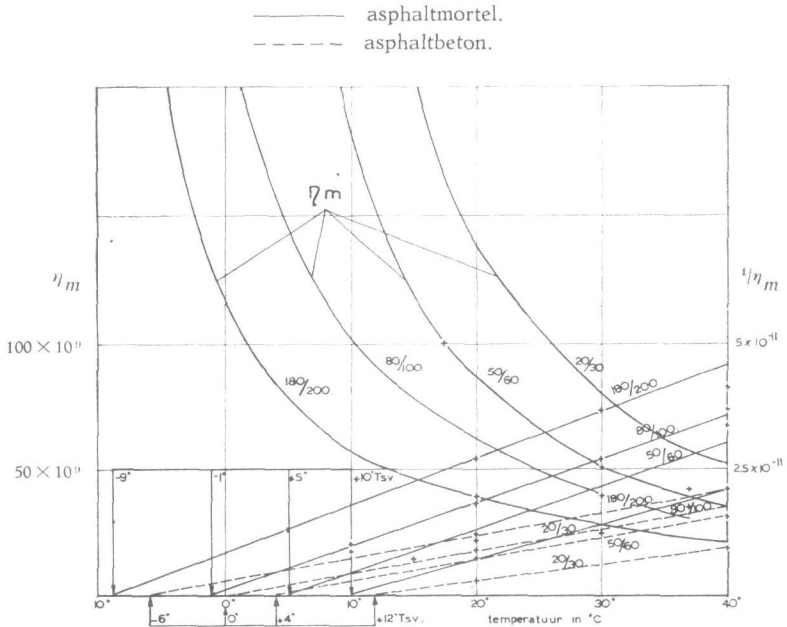
Uit de cijfers van Tabel XVI, voorgesteld in grafiek VIII (pag. 112), blijkt, dat de waarde van de viscositeit der massa lager is, naarmate een zachter bitumen in de mengsels is verwerkt, gelijke proeftemperatuur vooropgesteld. Voor elk mengsel is bij hogere temperaturen de toename van de waarde van de viscositeit der massa met dalende temperatuur betrekkelijk gering, doch in een gebied van lagere temperaturen wordt zij zeer belangrijk. Daarbij ligt het gebied der groote wijzigingen in de waarden van de viscositeit der massa bij hogere temperatuur naarmate een harder bitumen bij de bereiding der mengsels is gebruikt.

Een meer eenvoudige voorstelling van het verband tusschen de besproken grootheden kan verkregen worden, indien men niet de

viscositeit der massa, doch haar reciproke waarde tegen de temperatuur uitzet. Dan blijkt nl., dat het verband tusschen de waarden van $\frac{1}{\eta_m}$ en T rechtlijnig verloopt. (Zie grafiek VIII.)

GRAFIEK VIII.

Verband tusschen de waarden resp. de reciproke waarden van de viscositeit der massa η_m en de temperatuur van asphaltemortel en asphaltbeton.



Voor mengsels, die eenzelfde aggregaat, doch bitumina van verschillende hardheid bevatten, blijken deze lijnen evenwijdig te loopen. De helling der lijnen blijkt evenwel van het aggregaattypen afhankelijk te zijn.

δ. Eigenschappen der mengsels bij +50° C.

In Hoofdstuk I, § 4, werd reeds opgemerkt, dat bij het beoordeelen van de geschiktheid van een bitumen-mineraalaggregaatmengsel voor toepassing als wegdek materiaal rekening gehouden moet worden met het feit, dat de eigenschappen van dergelijke mengsels door de temperatuur beïnvloed worden. In het voorgaande

werd gevonden, dat in het algemeen de weerstand van het materiaal tegen plastische deformatie afneemt met stijgende temperatuur.

Voor de practijk is het dus van belang dezen weerstand te kennen bij de hoogste optredende temperatuur, welke volgens (14) in West-Europa $+50^{\circ}$ C bedraagt.

Wij zullen thans nagaan, in hoeverre de eigenschappen van de mengsels bij $+50^{\circ}$ C door de hardheid van het uitgangsbetumen worden beïnvloed.

In deze § werd sub α reeds vermeld, dat alle onderzochte mengsels bij $+40^{\circ}$ C — en dus ook bij $+50^{\circ}$ C — een bitumen bevatten, dat reeds zoo zacht is, dat de hoek van inwendige wrijving zijn hoogste waarde bezit. Deze bedroeg voor asphaltmortel ca. 29° en voor asphaltbeton ca. 32° .

De initiaalweerstand had volgens sub β van deze § reeds bij $+40^{\circ}$ C voor alle mengsels zijn laagste waarde bereikt, welke waarde voor asphaltmortelmengsels 0.35 kg/cm^2 , voor asphaltbeton 0.85 kg/cm^2 bedroeg. In aansluiting aan § 3, sub β , kan worden aangenomen, dat bij een temperatuur van $+50^{\circ}$ C, waarbij de penetratie van het bitumen grooter is dan bij $+40^{\circ}$ C, de initiaalweerstand voor de beide aggregaattypen dezelfde waarde behoudt.

De waarden van beide physische grootheden blijken dus bij $+50^{\circ}$ C niet te worden beïnvloed door de penetratie van de onderzochte uitgangsbetumina.

Voor de berekening van de waarde van de viscositeit der massa wordt gebruik gemaakt van de grafische voorstelling, waarbij in een $\frac{1}{\eta_m} / T$ diagram een rechtlijnig verloop werd gevonden.

Voor de verschillende mengsels wordt op deze wijze de waarde van de viscositeit der massa bij $+50^{\circ}$ C als volgt berekend. (Zie tabel XVII op de volgende bladzijde.)

In de tabel zijn tevens de verhoudingsgetallen bijgevoegd, die men vindt als men de waarden van de viscositeit der massa met die van mengsels met pen. 50/60 bitumen = 1.00 vergelijkt. Voor asphaltmortelmengsel en voor asphaltbeton worden ongeveer gelijke verhoudingsgetallen gevonden, welke bij de groote verschillen in de hardheid van het uitgangsbetumen betrekkelijk weinig van de eenheid blijken af te wijken, m.a.w. door de aangebrachte variatie in de hardheid van het in de mengsels verwerkte bitumen varieert

TABEL XVII.

Waarden van de viscositeit der massa bij $+50^{\circ}$ voor mengsels met uitgangsbittumina van verschillende hardheid.

Uitgangsbittumen	pen. 20/30	pen. 50/60	pen. 80/100	pen. 180/200
Asphalbmortel	36×10^9 poises	27×10^9 poises	23×10^9 poises	18×10^9 poises
Asphaltbeton	77×10^9 poises	48×10^9 poises	45×10^9 poises	40×10^9 poises
Verhoudingsgetal Asphalbmortel	1.34	1.00	0.85	0.67
Verhoudingsgetal Asphaltbeton	1.60	1.00	0.94	0.87

de waarde van de viscositeit der massa bij de maatgevende temperatuur slechts binnen relatief nauwe grenzen.

Overweegt men nu bovendien, dat de waarde van den initiaalweerstand en die van den hoek van inwendige wrijving, beide bij $+50^{\circ}$ C, door de hardheid van het uitgangsbittumen niet worden beïnvloed, dan is het duidelijk, dat deze hardheid bij de keuze van het bindmiddel in verband met den weerstand tegen plastische deformatie bij $+50^{\circ}$ C een factor van ondergeschikt belang vormt.

Het blijkt dus, dat de samenstelling van het aggregaat onder deze omstandigheden een invloed op den weerstand van het materiaal tegen locale deformatie uitoefent, welke veel belangrijker is dan de invloed van de hardheid van het uitgangsbittumen.

Ten slotte zij er op gewezen, dat bij de beschouwde temperatuur de weerstand der asphaltbetonmengsels, ook bij verwerking van het zachtste bittumen, nog grooter is dan die van het asphaltmortelmengsel met het hardste der onderzochte bittumina.

§ 5. *Initiaalverstarringstemperatuur.*

In § 4, sub β , van dit hoofdstuk werd er reeds op gewezen, dat bij hoogere temperatuur de initiaalweerstand een constante waarde bezit, welke in belangrijke mate door het aggregaat-type wordt beïnvloed.

Beschouwt men het verloop van de waarde van den initiaalweerstand met dalende temperatuur, dan blijkt, dat bij een zekere

temperatuur de waarde van den initiaalweerstand met dalende temperatuur begint toe te nemen.

Dit beteekent, dat bij deze temperatuur een zekere verstarring van het materiaal optreedt, welke een gevolg is van een toename van den initiaalweerstand. Wij hebben aan deze temperatuur, welke een karakteristiek van het materiaal vormt, den naam van „*Initiaalverstarringstemperatuur*” (T_{si}) gegeven.

Uit grafiek VII kan worden afgelezen, dat de waarde van de initiaalverstarringstemperatuur voor asphaltemortelmengsels en asfaltbeton dezelfde is, indien bitumina van eenzelfde hardheid in de mengsels zijn verwerkt.

Verder blijkt, dat de waarde van T_{si} hooger is, naarmate de penetratie van het uitgangsbisumen lager is.

De waarde van T_{si} der mengsels is in Tabel XVIII aangegeven.

TABEL XVIII.

Waarden van de initiaalverstarringstemperatuur T_{si} (in °C) van mengsels, waarin Venezolaansch bitumen is verwerkt.

Penetratie van het uitgangsbisumen	20/30	50/60	80/100	180/200
Initiaalverstarringstemperatuur T_{si} voor:				
Asphaltemortel	+ 40°C	+ 34°C	+ 24°C	+ 18°C
Asfaltbeton	+ 40°C	+ 34°C	+ 24°C	+ 20°C

Uit de tabel blijkt tevens, dat de waarde van T_{si} , zelfs voor het hardste der gebruikte bitumina, nog gelegen is beneden de hoogste in West-Europa in een wegdek optredende temperatuur. Voor de practijk beteekent dit, dat van mengsels met deze bitumina bereid, bij de voor de locale deformatie van het wegdek onder den last beslissende temperatuur, de initiaalweerstand steeds zijn laagste waarde zal bezitten. De aanduiding van de initiaalverstarringstemperatuur maakt het echter mogelijk snel te beoordeelen of onder bepaalde klimatologische omstandigheden met de laagste waarde van den initiaalweerstand rekening moet worden gehouden.

§ 6. *Viskeuze verstarringstemperatuur.*

Verlengt men in grafiek VIII de $\frac{1}{\eta_m} / T$ -lijnen naar lagere waar-

den van de temperatuur, dan blijkt, dat bij een zekere temperatuur de $\frac{1}{\eta_m} / T$ -lijn de temperatuur-as snijdt. Indien deze extrapolatie reëel zou zijn, zou dit beteekenen, dat bij deze temperatuur de waarde van $\frac{1}{\eta_m} = 0$, dus de waarde van η_m oneindig groot zou worden, hetgeen beduidt, dat bij deze temperatuur het materiaal niet meer plastisch deformeerbaar zou zijn, doch zich als een ideaal elastische stof zou gaan gedragen.

Er zijn aanwijzingen, verkregen uit proeven welke buiten het bestek van dit proefschrift liggen, dat deze extrapolatie de feiten niet geheel juist weergeeft en dat ook bij lagere temperaturen het materiaal nog plastisch deformeerbaar blijft, doch de viscositeit der massa verkrijgt dan zulk een hooge waarde, dat ook bij lage deformatiesnelheden een groote weerstand overwonnen moet worden.

Het lijkt ons daarom gemotiveerd de temperatuur van het door extrapolatie bepaalde snijpunt van de $\frac{1}{\eta_m} / T$ -lijn met de temperatuur-as als een karakteristiek van het materiaal te beschouwen, waaraan wij den naam „Viskeuze verstarings temperatuur” (T_{sv}) gegeven hebben. Men kan de viskeuze verstarings temperatuur ook berekenen met behulp van de formule

$$T_{sv} = 20 \frac{p-2}{p-1} \text{ (in } ^\circ\text{C)} \dots \dots \dots (50)$$

waarin $p = \frac{\eta_{m 20^\circ\text{C}}}{\eta_{m 40^\circ\text{C}}}$.

Het verdient vermelding, dat de deformatie welke het materiaal vertoont, wanneer bij drukvastheidsbepalingen de drukvastheid wordt overschreden, boven de viskeuze verstarings temperatuur een constante waarde bezit, welke waarde bij de viskeuze verstarings temperatuur sprongsgewijze daalt om bij lagere temperatuur verder deze lagere waarde te behouden.

Dit wijst op de waarschijnlijkheid, dat de viskeuze verstarings temperatuur van het materiaal met het probleem der scheurvorming in een wegdek in verband staat, hetgeen zonder meer duidelijk is, wanneer men de deformatie, welke een wegdek op een ongelijkmatig zettende fundeering moet kunnen volgen, beschouwt.

De waarden van de viskeuze verstarringstemperatuur voor de verschillende mengsels zijn in onderstaande tabel vereenigd.

TABEL XIX.

Waarden van de viskeuze verstarringstemperatuur voor asphaltmortel- en asphaltbetonmengsels, waarin Venezolaansche bitumina van verschillende hardheid zijn verwerkt.

Penetratie van het uitgangsbisumen	20/30	50/60	80/100	180/200
Asphaltmortel	+10°C	+5°C	-1°C	-9°C
Asphaltbeton	+12°C	+4°C	0	-6°C

Het blijkt, dat voor asphaltmortel- en voor asphaltbetonmengsels bij gelijke penetratie van het uitgangsbisumen ongeveer gelijke waarden der viskeuze verstarringstemperatuur worden gevonden, welke waarden hooger zijn, naarmate van een harder bisumen wordt uitgegaan.

Een invloed van de samenstelling van het aggregaat op de waarde van de viskeuze verstarringstemperatuur blijkt niet aanwezig te zijn.

§ 7. *Temperatuurindex van de viscositeit der massa.*

Thans willen wij nog aandacht wijden aan de verandering in de waarde van de viscositeit der massa met de temperatuur. Zooals in § 4, sub γ , werd vermeld, verlopen de $\frac{1}{\eta_m} / T$ -lijnen rechtlijnig. Hierdoor is het mogelijk de veranderingen in de waarde van de viscositeit der massa met de temperatuur op eenvoudige wijze vast te leggen. Wij bepaalden daartoe het temperatuurtraject T_η , waarover de waarde van $\frac{1}{\eta_m}$ met een constant bedrag verandert — waartoe arbitrair 10^{-10} werd gekozen — en duidden dat temperatuurtraject aan met den naam: „*Temperatuurindex van de viscositeit der massa*”.

Men kan de waarde van T_η berekenen met behulp van de formule

$$T_\eta = \frac{20 \times \eta_{m 20^\circ\text{C}}}{p-1} \times 10^{-10} \text{ (in } ^\circ\text{C)} \dots \dots (51)$$

waarin $p = \frac{\eta_{m 20^\circ\text{C}}}{\eta_{m 40^\circ\text{C}}}$.

Een lage waarde van T_η duidt op een snelle wijziging van de waarde van $\frac{1}{\eta_m}$ en dus van de viscositeit der massa met de temperatuur, een hoge waarde van T_η op een geringe gevoeligheid van de viscositeit der massa voor temperatuursverschillen.

Deze temperatuur-index heeft alleen betrekking op de viscositeit der massa en geeft dus iets anders weer dan de door VOKAC (95) ontwikkelde M(ixture) S(usceptibility) I(ndex), welke een maat geeft voor de wijziging van de drukvastheid met de temperatuur en van de temperatuur afhankelijk bleek te zijn.

Daar, zooals in § 4, sub γ vermeld, de $\frac{1}{\eta_m} / T$ -lijnen evenwijdig loopen, indien men mineraalaggregaatmengsels van eenzelfde samenstelling, doch met bitumen van verschillende uitgangspenetratie beschouwt, wordt voor dergelijke mengsels steeds eenzelfde waarde van den temperatuur-index van de viscositeit der massa gevonden.

Mengsels van een andere aggregaatsamenstelling blijken evenwel een andere waarde van T_η te bezitten.

Voor asphaltemortel- resp. asfaltbetonmengsels, waarin Venezolaansch bitumen was verwerkt, worden in grafiek VIII voor T_η waarden gevonden van 120°C resp. 240°C , waaruit blijkt, dat asfaltbeton veel minder temperatuurgevoelig is dan asphaltemortel.

De viscositeit der massa van een mengsel is nu volledig gekarakteriseerd door de waarde van de viskeuze verstarringstemperatuur en den temperatuur-index van de viscositeit der massa. Berekening van de waarde van de viscositeit der massa uit beide gegevens geschiedt het eenvoudigste langs grafischen weg in een $\frac{1}{\eta_m} / T$ diagram.

§ 8. *Vergelijking van de eigenschappen van mengsels, waarin Venezolaansche resp. Mexicaansche bitumina zijn verwerkt.*

Zooals reeds in § 1 vermeld, wordt door verschillende onderzoekers bijzondere waarde gehecht aan de eene of de andere eigenschap, of aan een complex eigenschappen, welke aan het bitumen bepaald kunnen worden. Een waardeering van de geschiktheid van

een willekeurig bitumen voor verwerking in een wegebouwingsmengsel op grond van dergelijke gegevens zal evenwel steeds belangrijke risico's in zich sluiten. De risico's zullen vermeden worden, indien men zijn oordeel grondt op de eigenschappen van de mengsels zelve.

In het onderstaande wordt de weerstand tegen plastische deformatie vergeleken van asphaltmortelmengsels en van asphaltbeton, waarin bitumina van Venezolaansche resp. Mexicaansche origine zijn verwerkt.

De resultaten der proeven, verricht met de mengsels met Venezolaansch bitumen zijn in de vorige §§ vermeld. Die der proeven met mengsels met Mexicaansche bitumina zijn samengevat in Tabel XX. (Zie pag. 120.) De samenstelling van het aggregaat was daarbij dezelfde als in Tabel IV aangegeven.

Stelt men de in deze tabel verzamelde waarden naast die van Tabel XVI, dan blijkt, dat de waarden van den hoek van inwendige wrijving in beide tabellen bij gelijke penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur practisch gelijk zijn. Voor de viscositeit der massa vindt men eveneens een vrijwel volledige overeenstemming der waarden bij gelijke penetratie. De waarden van de mengsels met Mexicaansch bitumen schijnen gemiddeld iets hooger te zijn dan die van de mengsels met Venezolaansch bitumen.

Voor de waarden van den initiaalweerstand worden duidelijke verschillen gevonden, waarbij de weerstand van asphaltmortelmengsels, die het Mexicaansche bitumen bevatten, hooger is dan die van de mengsels met Venezolaansch bitumen. Dit geldt evenwel alleen voor de lagere waarden der penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur, daar bij hogere penetraties practisch gelijke waarden worden gevonden.

Het is duidelijk, dat bij de lagere waarden der penetratie — dus bij lagere temperatuur — de mengsels met het Mexicaansche bitumen een hooger weerstand tegen deformatie zullen bieden dan die met het Venezolaansch bitumen.

Bij de beoordeeling van den weerstand tegen plastische deformatie der mengsels onder practijkomstandigheden is evenwel de weerstand bij hogere temperatuur maatgevend. Voor de hier besproken mengsels zijn evenals voor die van Tabel XVI de eigenschappen bij $+50^{\circ}$ C berekend.

De gevonden waarden zijn, tezamen met de waarden van initiaal-

TABEL XX.

Eigenschappen van asphaltnortel resp. asphaltbeton, waarin Mexicaansche bitumina zijn verwerkt.

Asphaltnortelmengsels									
Bind- middel	Temp. °C	Proefresultaten				$\frac{1}{\eta_m}$ $\times 10^{11}$	Penetratie van het terugge- wonnen bitumen		P.I.
		φ_e	τ_e (kg/cm ²)	η_m $\times 10^{-9}$ poises	Proef- temp.		25° C		
20/30	20	26°30'	3.10	132	0.76	11	17½	+1.7	
		24°	3.50	129	0.78	11	14	+1.6	
	40	28°	0.60	50	2.0	43	16	+1.3	
		30°30'	0.50	49 ⁵	2.02	51	17	+1.2	
50/60	15	28°	2.00	108	0.93	16	34	+0.7	
		27°	2.10	114	0.88	14½	33½	+1.2	
	20	29°	1.55	95	1.05	22	33	+1.3	
		26°	1.80	91 ⁵	1.10	20	40	+0.8	
	30	29°30'	0.65	48 ⁵	2.06	56	38	+1.0	
		28°	0.55	48 ⁵	2.06	49	34	+0.9	
	40	29°	0.35	35	2.86	96	32	+1.0	
		27°	0.25	37	2.70	95	30½	+0.85	
80/100	20	30°	0.75	76	1.32	35	55½	+0.9	
		32°	0.75	69	1.45	35	45	+0.9	
	40	30°	0.60	27 ⁵	3.65	180	56	+0.8	
		31°	0.35	28	3.60	170	54	+0.8 ⁵	
180/200	5	30°	0.95	81	1.23	25	130	+0.2 ⁵	
		28°30'	1.00	75	1.35	25	128	+0.2 ⁵	
	20	32°	0.35	41 ⁵	2.40	61½	94	+0.4	
		30°	0.35	43	2.35	64	99	+0.4	
	40	28°	0.40	23 ⁵	4.30	410	114	+0.6	
		30°	0.40	23 ⁵	4.30	360	119	+0.7	
Asphaltbetonmengsels									
50/60	20	32°	2.00	155	0.65	25	37½	+0.8	
	40	34°	1.00	85	1.18	118	37½	+0.8	

en viskeuze verstarringstemperatuur, samengebracht in Tabel XXI.

TABEL XXI.

Vergelijking der beslissende eigenschappen van mengsels met Mexicaansche resp. Venezolaansche bitumina.

Asphaltmortel								
Bitumen			Bij 50° C			T_{si} °C	T_{sv} °C	T_{η} °C
			q'_e	τ_e kg/cm ²	η_m ×10 ⁻⁹ poises			
Pen.	Origine	P.I.						
Mexphalte 20/30	Mex.	+1.5	ca. 29°	0.40	35	+44	+11	
	Ven.	+0.5	ca. 29°	0.40	36	+40	+10	
Mexphalte 50/60	Mex.	+1.0	ca. 29°	0.35	29	+35	+5	Mex. 130 Ven. 120
	Ven.	+0.1	ca. 29°	0.45	27	+34	+5	
Mexphalte 80/100	Mex.	+0.9	ca. 29°	0.40	27	+26	+1	
	Ven.	-0.3	ca. 29°	0.35	23	+24	-1	
Mexph. 180/200	Mex.	+0.4	ca. 29°	0.40	20	+18	-9	
	Ven.	-0.3	ca. 29°	0.40	18	+18	-9	

Asphaltbeton								
Mexphalte 50/60	Mex.	+0.8	ca. 32°	0.90	53	+34	+4	290
	Ven.	-0.1	ca. 32°	0.80	48	+35	+4	240

Uit deze gegevens blijkt, dat bij +50° C de eigenschappen der mengsels vrijwel niet beïnvloed worden door de herkomst van het verwerkte bitumen. Zoowel voor de waarden van den hoek van inwendige wrijving als die van den initiaalweerstand zijn de verschillen, zoo zij al bestaan, zóó klein, dat zij in de cijfers niet tot uiting komen. Voor de viscositeit der massa worden voor de mengsels met het Mexicaansche bitumen waarden gevonden, welke ca. 10 % hooger zijn dan die van de mengsels met Venezolaansch bitumen.

Er zij aan herinnerd, dat voor het weerstandsvermogen van een wegdek tegen locale deformatie, waarbij de evenwichtstoestand niet of nauwelijks mag worden overschreden, door de viscositeit der massa slechts in beperkte mate tot dit weerstandsvermogen wordt bijgedragen.

De gevonden verschillen zijn dus voor de practijk van geen belang. Wel kunnen zij bij proeven als drukvastheidsbepalingen,

waarbij met relatief groote snelheid wordt gedefformeerd, het resultaat der proef in vrij belangrijke mate beïnvloeden.

De waarden van de initiaalverstarringstemperatuur T_{si} zijn voor de mengsels met het Mexicaansche bitumen enkele °C hooger dan voor de andere mengsels, doch zij zijn steeds lager dan de hoogste in het wegdek optredende temperatuur, zoodat ook deze verschillen practisch zonder belang zijn.

De waarden van de viskeuze verstarringstemperatuur vertoonen practisch geen verschillen als gevolg van de toevoeging van bitumina van verschillend origine.

Bij beschouwing van de waarden van den temperatuurindex van de viscositeit der massa blijkt, dat de verschillen in de waarden van T_{η} zeer gering zijn, terwijl de waarden van den Penetratie-Index verschillen van ca. 1 vertoonen. Dit betrekkelijk groote verschil in de temperatuurgevoeligheid van het bitumen blijkt slechts een zeer beperkten invloed op de temperatuurgevoeligheid van de viscositeit der massa van het mengsel uit te oefenen.

Samenvattend kan gezegd worden, dat verschillen in de eigenschappen van bitumina van verschillend origine, zooals deze tot uiting worden gebracht in het asphalteengehalte vlg. NELLESTEYN — er zij op gewezen dat het Mexicaansche bitumen ca. 22 % asphaltenen bevat tegen het Venezolaansch bitumen 18 % — of den Penetratie-Index volgens PFEIFFER en VAN DOORMAAL, practisch de eigenschappen van met deze bitumina bereide mengsels niet beïnvloeden.

§ 9. *Beschouwingen omtrent de functie van het bitumen in bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.*

Wanneer men zich een oordeel wil vormen omtrent de functie, welke het bitumen in bitumen-mineraalaggregaat-mengsels vervult, dient men voor oogen te houden, dat het materiaal daarbij als microscopisch heteroog dient te worden opgevat. De verschijnselen, welke het materiaal in zijn geheel bij plastische deformatie vertoont, zijn daarbij een gevolg van verschijnselen in de samenstellende deelen van het materiaal.

In ons geval, waar de weerstand van het materiaal de aandacht heeft, dient men na te gaan, welke verschijnselen zich in een vlak

voordoen, i.c. hoe de verdeling der componenten van het materiaal over een dergelijk vlak is, en welke spanningen in elk dezer componenten optreden.

Van elke vlakke doorsnede zal een gedeelte door de aggregaat-phase, een gedeelte door de vloeistofphase en de rest door de gas-phase worden ingenomen.

Zou plastische deformatie van het materiaal in een dergelijk vlak plaats vinden, dan zou dit gepaard moeten gaan met breuk in de aggregaatdeelen, hetgeen slechts bij hoge spanningen kan geschieden, daar de schuifweerstand van het mineraalaggregaat hoog is, vergeleken met den weerstand van het mengsel.

Plastische deformatie van het materiaal zal daarom plaats vinden in een gebogen vlak, dat door de contactpunten der aggregaatdeelen ligt. De weerstand van het materiaal, zooals deze bij de proeven werd bepaald, is dus in feite de projectie van de spanningen in dit gebogen vlak op het platte schuifvlak.

Een geïdealiseerde voorstelling van de verschijnselen, welke bij plastische deformatie van het materiaal optreden, verkrijgt men, indien men de contactpunten der aggregaatdeelen in het schuifvlak geplaatst denkt (fig. 7).

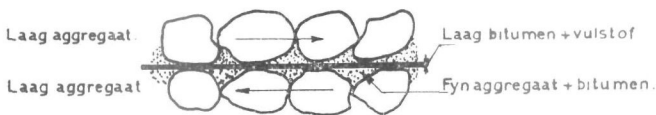


Fig. 7.

Men kan zich de stapeling van het aggregaat zoodanig denken, dat de grovere deelen tegen elkaar steunen, eventueel via tusschenliggende vulstofdeeltjes. De holten tusschen dit grovere aggregaat zijn opgevuld met fijn aggregaat resp. vulstof, gemengd met bitumen of met een mengsel hiervan.

Bij afschuiving van de in lagen gedachte grovere aggregaatsdeelen ten opzichte van elkaar zal het tusschenliggende materiaal worden medegenomen. Dit tusschenliggende materiaal, waarop uit den aard der zaak zekere krachten worden uitgeoefend, behoeft daarbij nog niet noodzakelijkerwijs het grovere aggregaat steun te verlenen, al zal de mogelijkheid hiervan aanwezig moeten worden geacht.

Men kan zich de korrelstapeling zoodanig denken, dat een deel er van in staat is normaalspanningen in het schuifvlak over te brengen (het aggregaatskelet), terwijl de rest alleen schuifspanningen in dit vlak overbrengt.

Het is duidelijk, dat de wrijvingsweerstand ontwikkeld wordt tusschen de deelen van het aggregaatskelet, welke elkaar in meerdere contactpunten zullen raken.

De grootte der daarbij optredende spanningen kan benaderend worden berekend met behulp van de door HERTZ (48, pag. 321 e.v.) ontwikkelde formules, welke voor elastische materialen gelden, en waarbij men in het onderhavige geval voor de aggregaatdeelen den bolvorm kan aannemen. Ook zijn meer directe metingen omtrent de grootte der contactvlakken tusschen aggregaatdeelen bekend uit een publicatie van TERZAGHI (90), welke op grond van zijn proeven tot de conclusie komt, dat het oppervlak der werkelijke contactvlakken tusschen de korrels slechts enkele procenten der totale doorsnede bedraagt. Daar het werkelijke glijdvlak bij ons materiaal door de contactpunten dezer aggregaatdeelen gelegen is, moet bij ons materiaal met een soortgelijke verhouding van het werkelijke contactvlak en de doorsnede gerekend worden.

Hieruit volgt, dat de wrijvingsweerstand ontwikkeld wordt bij normaalspanningen, welke tot het 100-voudige kunnen bedragen van de gemiddelde normaalspanning, zooals deze uit de uitwendige spanningen wordt berekend, d.w.z. de plaatselijk optredende normaalspanningen bedragen bij onze proeven, die met een gemiddelden druk van maximaal 30 kg/cm² werden uitgevoerd, tot 3000 kg/cm².

Uit het feit, dat blijkens een zekere smerende werking het bitumen in de contactvlakken niet geheel wordt weggeperst, waardoor een contact van de aggregaatoppervlakken zou ontstaan, volgt o.i. dat het bitumen door sterke adsorptiekrachten aan het aggregaatoppervlak gebonden moet zijn.

De sterkte van deze binding blijkt voornamelijk van de hardheid van het bitumen af te hangen, daar bij een penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur $<$ ca. 30 de smerende werking sterker wordt (lagere waarde van den hoek van inwendige wrijving, zie § 3, sub *a*). De temperatuur blijkt daarbij weinig invloed op de waarde van den hoek van inwendige wrijving uit te oefenen.

Indien de penetratie van het bitumen grooter dan ca. 30 is, blijkt de waarde van den hoek van inwendige wrijving niet meer door de hardheid van het bitumen of door de temperatuur te worden beïnvloed, hetgeen o.i. er op wijst, dat de adsorbeerende krachten dan een overheerschenden invloed hebben op de eigenschappen der laag bitumen.

Het is opvallend, dat de invloed van de temperatuur bij deze verschijnselen zoo gering is in vergelijking met die van de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur. In het algemeen wordt aangenomen, dat bij adsorptieverschijnselen de hoeveelheid geadsorbeerd materiaal met dalende temperatuur toeneemt. Het hier gevonden verschijnsel moet wellicht zóó worden verklaard, dat in het hier onderzochte systeem de hoeveelheid geadsorbeerd materiaal weinig van de temperatuur afhankelijk is. De eigenschappen van dit materiaal vertoonen daarbij een zeker verband met de hardheid van de vloeistofphase. In hoeverre een en ander samenhangt met den micellairen opbouw van het bindmiddel, blijve hier onbesproken.

Bij de plastische deformatie van een bitumen-mineraalaggregaatmengsel zal de afschuifsnelheid in de vloeistofphase het grootst zijn op die plaatsen, waar de dikte van de vloeistoflaag tusschen twee aggregaatdeelen het geringst is. Deze laagdikte zal gering zijn op die plaatsen, waar de aggregaatdeelen elkaar dicht naderen. Dit geldt niet alleen voor de deelen van het dragende aggregaatskelet, doch ook de andere aggregaatdeelen, welke de holten tusschen het skelet opvullen. De viskeuze schuifspanning, zooals deze bij de proeven wordt bepaald, dient te worden opgevat als het gemiddelde per eenheid van doorsnede van de krachten, welke in de nabijheid der contactpunten der aggregaatdeelen worden uitgeoefend.

Op grond van beschouwingen, welke in het volgende hoofdstuk zullen worden gegeven, nemen wij aan, dat de spanning bij deze contactpunten ongeveer het 5-voudige zal kunnen bedragen van de gemiddelde spanning, zoodat op de vloeistofphase plaatselijk schuifspanningen van 10 à 20 kg/cm² worden uitgeoefend.

Ditzelfde geldt ook voor den initiaalweerstand, waarvan wij aannemen, dat de plaatselijk optredende spanningen tot het 5-voudige van de gemiddelde waarde kunnen stijgen, en dus tot 10 à 20 kg/cm² kunnen oploopen.

Men dient nu wel voor oogen te houden, dat de groote spanningen,

welke een gevolg zijn van den initiaalweerstand, opgenomen worden door het bitumen, dat zich tusschen aggregaatdeelen bevindt, zonder dat vloeï daarbij behoeft op te treden.

Dit materiaal bezit dus een afschuifweerstand, welke het op een vaste stof doet gelijken.

Wij hebben gemeend een onderscheid te moeten maken tusschen dit materiaal en het bitumen in den vorm, waarin het gewoonlijk onderzocht wordt, en duiden het verschil aan, door voor dit bitumen met abnormale eigenschappen den naam *gebonden bitumen* te gebruiken. Deze naam is gekozen naar analogie van overeenkomstige verschijnselen uit de Grondmechanica, waar het op het klei-oppervlak gebonden water naar K. ENDELL en medewerkers (20) aannemen, onder zeer hoogen druk staat. Naar daarbij aangenomen wordt, is deze hooge druk, welke tot meerdere tientallen kg/cm^2 kan bedragen, een gevolg van krachten, welke in het aggregaatoppervlak op de vloeïstof inwerken.

Wij nemen aan, dat soortgelijke verschijnselen in het grensvlak mineraalaggregaat-bitumen optreden, en het bitumen, of bestanddeelen daarvan, aan het aggregaat binden, zoodat een dunne laag van het bindmiddel zich als een vaste stof gedraagt.

Uit de resultaten der proeven blijkt, dat het weerstandsvermogen van de laag gebonden bitumen in sterke mate van de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur afhankelijk is voor temperaturen beneden de initiaalverstarringstemperatuur, terwijl bij hoogere temperatuur de adsorptiekrachten de eigenschappen dezer laag beheerschen.

Deze verschijnselen vertoonen een groote overeenstemming met die, welke bij bespreking der wrijving zijn vermeld. Ook daar werd er reeds op gewezen, dat de gevonden waarden voor den hoek van inwendige wrijving slechts verklaard kunnen worden met behulp van een „adsorptie“-hypothese.

Beschouwen wij thans nog de viscositeit der massa. Het bitumen, dat als vloeïend medium in het mengsel aanwezig is, dient uit den aard der zaak in belangrijke mate op het normale — of zooals wij in tegenstelling tot het gebonden bitumen kunnen zeggen — op het vrije bitumen te gelijken.

Ook dit bitumen bezit echter eigenschappen, die van die van het vrije bitumen afwijken, hetgeen uit het volgende blijkt.

Volgens SAAL en KOENS (81) kan de viscositeit van een bitumen uit de penetratie worden berekend met behulp van de formule

$$\eta_B = \frac{5.31 \times 10^9}{pen^{1.93}} \text{ poises}$$

of

$$\log \eta_B = -1.93 \log pen + \log 5.31 \times 10^9.$$

Indien er nu evenredigheid zou bestaan tusschen de waarde van de viscositeit van het bitumen en die van de viscositeit der massa, dan zou moeten gelden:

$$\log \eta_m = -1.93 \log pen + \log 5.31 \times 10^9 + \log K.$$

In grafiek VIII kan men evenwel aflezen, dat de helling der $\log \eta_m - \log pen$. lijn in het gebied der lage waarden der penetratie -0.70 bedraagt, en voor de hogere waarden der penetratie -0.13 .

Hieruit volgt, dat de waarde van de viscositeit der massa geenszins evenredig is met die van het vrije bitumen, doch in aanzienlijk geringere mate varieert dan op grond van deze evenredigheid verwacht kan worden.

Ook hier nemen wij aan, dat het bitumen, waarin de vloeï plaats vindt, onder invloed staat van adsorptiekrachten, welke het aggregaat er op uitoefent, doch deze adsorptiekrachten hebben een geringere uitwerking op de eigenschappen van het bitumen dan bij de wrijvingsverschijnselen en bij de bespreking van de waarde van den initiaalweerstand werd gevonden.

Samenvattend kan worden vastgesteld, dat de bij de voorgaande proeven gevonden variaties in de waarde van de drie fysische grootheden, welke het gedrag van bitumen-mineraalaggregaatmengsels bij plastische deformatie omschrijven, met behulp van een enkele hypothese verklaard kunnen worden.

Deze hypothese, welke ook door andere onderzoekers als WILHELMI (96), HERRMANN (35) en NELLENSTEYN en LOMAN (58) op grond van proeven van geheel ander karakter werd opgesteld, is nauw verwant met de verklaring, welke wordt gegeven aan overeenkomstige verschijnselen, welke zich voordoen bij deformatie van een materiaal, dat op analoge wijze uit een aggregaatphase, een vloeïstofphase en een gasphase is opgebouwd.

HOOFDSTUK VIII.

Invloed van de vulstof op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.

§ 1. *Inleiding. Oudere onderzoekingen omtrent de functie van de vulstof in bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.*

Met den naam „vulstof” duidt men poedervormige aggregaten aan, welke in bitumen-mineraalaggregaat-mengsels worden verwerkt en waarvan de deeltjesgrootte volgens de gangbare meening in Nederland en in Amerika (42, 78) gelegen is beneden 74μ (0.074 mm), terwijl in Duitschland (15) 90μ als grens wordt aangehouden.

Zooals de naam aangeeft, werd dit materiaal in den beginne aan bitumen-mineraalaggregaat-mengsels toegevoegd om de holle ruimte van het grove aggregaat op te vullen, zoodat met een lager percentage bitumen kon worden volstaan om een mengsel met geringe holle ruimte te verkrijgen. Bij de heerschende prijsverhoudingen betekende dit, dat een deel van het kostbare bitumen door de goedkoopere vulstof kon worden vervangen.

Reeds spoedig bleek, dat dit fijne poedervormige aggregaat een verstijvend invloed op het mengsel uitoefent, en den weerstand tegen deformatie ervan verhoogt.

Reeds RICHARDSON (78) wijst op den invloed, welchen de hoeveelheid en de fijnheid van de vulstof op haar stabiliseerende werking heeft. Ditzelfde wordt later door TAYLOR (88), STANTON en HVEEM (85), HERRMANN (35, pag. 314—323), WILHELMI (96), NELLENSTEYN (58) e.a. betoogd.

Verschillende onderzoekingen zijn in den loop der jaren uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in de wijze waarop de vulstof de eigenschappen van het mengsel beïnvloedt en om de eigenschappen te bepalen, welke een vulstof dient te bezitten, teneinde bitumen-mineraalaggregaat-mengsels te verkrijgen, welke de voor de practijk gewenschte eigenschappen bezitten.

De meeste dezer onderzoeken bleven beperkt tot het systeem vulstof-bitumen, waarbij de omstandigheden bij het onderzoek vaak sterk afweken van die der practijk.

Zoo onderzocht WILHELMI (96) den invloed van de toevoeging van verschillende hoeveelheden vulstof op de waarde van het smeltpunt van het vulstof-bitumenmengsel en concludeerde op grond van zijne proeven tot het optreden van adsorptieverschijnselen in het grensvlak vulstof-bindmiddel.

NELLENSTEYN (58) welke het bitumen in zeer verdunde oplossing van xylol bracht en de kleurverandering van deze oplossing na toevoeging van de vulstof, naging kwam eveneens tot de gevolgtrekking, dat adsorptieverschijnselen optreden.

Ook Amerikaansche onderzoekers, o.a. MILLER en TRAXLER (57) voerden dergelijke proeven uit.

Op grond van de in de vorige hoofdstukken behandelde proeven kwamen wij eveneens tot de conclusie dat in het grensvlak aggregaat-bitumen adsorptieverschijnselen optreden. Wij meenden de bijzondere eigenschappen welke het bitumen onder invloed dezer adsorptiekrachten verkrijgt tot uitdrukking te moeten brengen door van „gebonden bitumen” te spreken.

De kwantitatieve beoordeeling van den invloed van de vulstof op de eigenschappen der mengsels stuit bij de oudere onderzoeken op onoverkomelijke moeilijkheden.

Bij de onderzoeken van NELLENSTEYN, welke, zooals vermeld, met zeer verdunde oplossingen van bitumen in xylol werkte, wijken de proefomstandigheden zoo sterk van die van de practijk af, dat een voor de practijk bruikbare kwantitatieve interpretatie der gegevens zeer moeilijk is.

Ook bij andere onderzoeken, waarbij vulstof-bitumenmengsels werden onderzocht, is men er niet in geslaagd de eigenschappen van de vulstof op zoodanige wijze vast te leggen, dat de verkregen gegevens voor constructieve doeleinden bruikbaar zijn.

WILHELMI (96) kwam tot de conclusie, dat de eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels in sterke mate worden beïnvloed door die van het vulstof-bitumenmengsel, dat als een mastiek de holtten van het grovere aggregaat vult. Hij stelde den eisch, dat voor West-Europa deze mastiek een smeltpunt van 83° C dient te bezitten.

Het werk van WILHELMI is later door EWERS (21) gecritiseerd. Deze toonde aan, dat de door WILHELMI gevonden verschillen tusschen de eigenschappen van verschillende mengsels verklaard worden door verschillen in de holle ruimte van de vulstof en dat de smeltpuntsverhooging van het bitumen bij toevoeging van vulstof beheerscht wordt door de overmaat bitumen, welke boven deze holle ruimte aanwezig is.

Ook door andere onderzoekers (74, 57) is op den grooten invloed van de holle ruimte van de vulstof op de eigenschappen van vulstof-bitumenmengsels gewezen.

Vele onderzoekers, waarvan in de eerste plaats HERRMANN (35, pag. 139) genoemd moet worden, schrijven aan het op het aggregaat geadsorbeerde bitumen een groot mechanisch weerstandsvermogen toe en wel grooter, naarmate de laag dunner is. Het is volgens hen van belang, dat deze laag een bepaalde dikte niet overschrijdt.

Berekening van de dikte dezer laag geschiedt uit het volume van het toegevoegde bitumen en het totale oppervlak van het aggregaat.

Daar het oppervlak van een aggregaat per gewichtseenheid grooter is, naarmate de aggregaatdeeltjes kleiner zijn, zijn berekeningen opgesteld, met behulp waarvan het totale oppervlak van het aggregaat kan worden berekend uit de zeefanalyse van het materiaal.

HERRMANN en ook PÖPEL (68) berekenden uit de zeefanalyse van de vulstof het totale oppervlak. Later werd door ZIEGS en NÜSSEL (98), door GEISSLER en EWERS (26) en door GONELL (28) aangetoond, dat de door hen berekende waarden aanzienlijk te laag zijn.

Al deze onderzoekers slaagden er evenwel niet in een verband te leggen tusschen de eigenschappen van de vulstof en den weerstand van het mengsel tegen deformatie.

Bij een later onderzoek trachtte EWERS (23) een dergelijk verband te leggen. De door hem gevolgde onderzoekingsmethode (drukvastheidsbepaling van kubussen en trekvastheidsbepaling) is reeds in Hoofdstuk II, § 4 en 6 van dit proefschrift aan kritiek onderworpen en laat o. i. het trekken van voor constructieve doeleinden bruikbare conclusies niet toe.

NELLENSTEYN (58) huldigt omtrent de functie der vulstof een aparte meening. Volgens hem doen de vulstofdeeltjes dienst als kernen, welke tezamen met de asphaltenen in het asphaltbitumen (resp. de micronen in teer) een skelet vormen, dat het mengsel mechanische sterkte verleent. De kwantitatieve beoordeeling van de geschiktheid van een bepaalde vulstof baseert hij volgens een latere publicatie (60) op de fijnheid van de vulstof, de trekvastheid van mengsels van vulstof en bitumen en de verdringing van bitumen uit het grensvlak vulstof—bitumen door water.

T'enslotte zij vermeld, dat de verschillende onderzoekers zoowel verschillen in de werking van verschillende vulstoffen als van verschillende bitumina vaststellen.

§ 2. *Werkhypothese.*

In het voorgaande werd er reeds op gewezen, dat wij op grond van onze onderzoekingen tot de slotsom zijn gekomen, dat tengevolge van adsorptie-verschijnselen op het aggregaat een laag gebonden bitumen gevormd wordt, die een hoogen weerstand tegen deformatie bezit.

Bij het in Hoofdstuk VII beschreven onderzoek werden twee verschillende aggregaattypen betrokken, terwijl de eigenschappen der vloeistofphase werden gevarieerd. De gasphase bleef bij deze proeven voor elk type steeds dezelfde.

De weerstand tegen plastische deformatie, welke bij deze proeven ontwikkeld werd, dient — zoo concludeerden wij — deels toegeschreven te worden aan de wrijving, welke de dragende deelen van het aggregaat (het skelet) ontwikkelen, deels aan den weerstand, welken het gebonden bitumen, dat op het fijnere aggregaat is geadsorbeerd, tegen deformatie biedt.

Wijzigt men nu de samenstelling van het mengsel op zoodanige wijze, dat het grove skelet in dezelfde stapeling blijft bestaan, dan zullen alleen veranderingen optreden in de verdeeling van het fijne aggregaat door de massa, terwijl ook de grootte der gasphase wijzigingen kan ondergaan.

Daar de weerstand van het materiaal, zooals deze tot uitdrukking komt in de waarde van bitumineuzen initiaalweerstand en van de viscositeit der massa, afhankelijk is van dien van het op het fijne aggregaat geadsorbeerde gebonden bitumen, ligt het

voor de hand, een verband te zoeken tusschen de waarden van dezen bitumineuzen initiaalweerstand en van de viscositeit der massa en het aantal plaatsen in een doorsnede, waar de lagen gebonden bitumen elkaar raken. Dit aantal plaatsen zal bepaald worden door het aantal punten, waarin de fijnere aggregaatdeelen met elkaar in contact komen.

De invloed van wijzigingen in de samenstelling van het mengsel op het aantal contactpunten kan benaderend worden nagegaan.

Bij het uitwerken dezer „*Contactpunten-theorie*”, welken naam wij aan deze werkhypothese hebben gegeven, wordt de invloed van de volgende variaties in de samenstelling der mengsels nagegaan.

- I. Wijzigingen in de grootte der holle ruimte (gasphase).
- II. Wijzigingen in de volumeverhouding vulstof — bitumen.
- III. Wijziging in de deeltjesgrootte der vulstof.

In de volgende §§ wordt de invloed van deze wijzigingen op de waarde van den weerstand van het materiaal tegen plastische deformatie nagegaan. De mathematische betrekkingen tusschen de wijzigingen in de samenstelling der mengsels en het aantal contactpunten wordt in elke § afgeleid, en aan de hand van experimenteel onderzoek wordt vastgesteld of bovenstaande werkhypothese de gemeten verschillen in den weerstand van het materiaal verklaart.

Dit onderzoek wordt uitgevoerd met asphaltemortelmengsels, daar de haakweerstand, die asphaltbetonmengsels bezitten, het beeld vertroebelt. Zooals reeds vermeld, nemen wij aan, dat de stapeling van het grove aggregaat onveranderd blijft. Venezolaansch bitumen wordt voor deze proeven verwerkt.

§ 3. *Invloed van de holle ruimte op den weerstand tegen plastische deformatie.*

a. Theoretisch gedeelte.

Denkt men zich in een korrelstapeling de poriën geheel of gedeeltelijk opgevuld met een mengsel van vulstof en bitumen, dan kan men aannemen, dat de overblijvende holle ruimte (de gasphase) gelijkelijk over de massa verdeeld is.

Men kan zich de verdeling van deze holle ruimte in het mengsel op twee wijzen denken.

1. Voor het comprimeeren van het mengsel bestaat dit uit los op elkaar liggende korrels van het grofste aggregaat, omhuld met een mastiek van vulstof en bitumen.

Na comprimeeren zal er dan in de ruimte tusschen de onderling contact makende grove korrels (het skelet) slechts een enkele porie of eventueel een gesloten holle ruimte zijn, en wel ongeveer midden tusschen de korrels.

2. Voor het comprimeeren bestaat het mengsel uit los op elkaar liggende korrels van het grofste aggregaat en van fijner aggregaat, dat met een vulstof-bitumenmengsel omhuld is.

Na comprimeeren zullen er dan in de ruimten tusschen een aantal onderling contact makende grove korrels (het skelet) talrijke poriën of gesloten ruimten liggen.

Wij namen in § 2 aan, dat er een evenredigheid bestaat tusschen het aantal contactpunten in een doorsnede en de waarden van den initiaalweerstand en van de viscositeit der massa van het materiaal. Daar het aantal contactpunten groot is, indien de korrelstapelung uit kleine deeltjes zooals vulstof bestaat, is het dus van belang na te gaan, hoe de verdeling van deze vulstof in de massa is.

In geval 1 kan men aannemen, dat het vulstof-bitumenmengsel gelijkmatig tusschen de deelen van het dragende skelet verdeeld is, waarbij midden tusschen de deelen van dit skelet een zekere holle ruimte open blijft. Dit geval zal benaderd worden door een asphalt-mortelmengsel.

In geval 2 zal tusschen de deelen van het dragende skelet fijner aggregaat, dat met een vulstof-bitumenmengsel omhuld is, aanwezig zijn. Dit geval zal door asphaltbeton worden benaderd.

Men dient dus na te gaan, hoe in beide gevallen de holle ruimte den weerstand tegen deformatie van het materiaal beïnvloedt.

In het eerste geval zal een vlak, dat door de contactpunten van de aggregaatdeelen, die het skelet vormen, gelegen is en in welk vlak de glijding plaats vindt, de holle ruimte steeds doorsnijden. Stel, dat van een lijn in dit vlak per cm lengte a cm in de holle ruimte ligt, dan neemt de holle ruimte a^3 cm³ per 1 cm³ in, terwijl a^2 cm² van 1 cm² van het glijdvlak in de holle ruimte ligt.

In het tweede geval zullen de poriën ook buiten het glijdvlak

liggen en wel midden tusschen de naast fijnere korrels. Indien het grofste aggregaat per 1 cm³ schijnbaar volume van het mengsel b cm³ inneemt, zal a^3 cm³ holle ruimte per 1 cm³ schijnbaar volume van het mengsel zijn verdeeld over $1-b$ cm³ mortel en de holle ruimte, daarop betrokken, dus $\frac{a^3}{1-b}$ bedragen.

Een door deze mortel gelegd vlak zal per cm² $\frac{a^3}{1-b}$ cm² leeg oppervlak bevatten en een in dit vlak gelegde lijn zal per cm $\frac{a^3}{1-b}$ cm door holle ruimte loopen, daar een uit het geheele materiaal gesneden zeer dunne schijf of staaf gemiddeld eenzelfde schijnbaar soortelijk gewicht zal moeten hebben als het geheele materiaal.

Het aantal contactpunten, dat bij een gelijke samenstelling van het vulstof-bitumenmengsel in een vlak ligt, zal in het eerste geval evenredig zijn met $1-a^2 = 1-(HR)^{2/3}$, in het tweede geval met $1 - \frac{a^3}{1-b} = 1 - \frac{HR}{1-b}$.

Stelt men $b = 1/2$, hetgeen voor een splitrijk asphaltbeton vrijwel juist is, dan vindt men de volgende waarden voor deze factoren.

TABEL XXII.

Waarden van de factoren $1 - (HR)^{2/3}$ en $1 - \frac{HR}{1-b}$ voor verschillende waarden van de holle ruimte.

Holle ruimte (vol. 0/0)	$1 - (HR)^{2/3}$	$1 - \frac{HR}{1-b}$
1 0/0	0.95	0.98
3 0/0	0.91	0.94
5 0/0	0.86	0.90
10 0/0	0.79	0.80
20 0/0	0.66	0.60

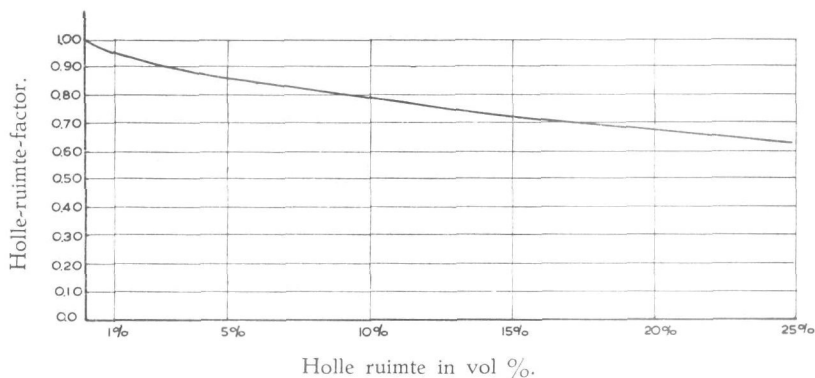
Het blijkt, dat beide factoren numeriek weinig verschillen, zoodat eenvoudigheidshalve met één ervan kan worden volstaan.

Aangezien het experimenteel onderzoek naar de juistheid der werkhypothese aan asphaltmortelmengsels wordt uitgevoerd, hebben wij daarvoor den factor $1 - (HR)^{2/3}$ gekozen, welchen wij verder met den naam „Holle-ruimte-factor” (HR-factor) aanduiden. De

waarde van den holle-ruimte-factor is in grafiek IX voor verschillende waarden der holle ruimte weergegeven.

GRAFIEK IX.

Verband tusschen de holle ruimte en de HR-factor $\left(\frac{1.00-(HR)^{2/3}}{1.00}\right)$.



Het aantal contactpunten der fijne aggregaatdeelen zal nu evenredig zijn met dezen HR-factor, zoodat bij een gelijk aandeel in de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa voor elk contactpunt de waarden van deze grootheden eveneens met de waarde van den HR-factor evenredig moet zijn. De waarde van den hoek van inwendige wrijving wordt volgens de ontwikkelde hypothese niet door den HR-factor beïnvloed.

Daar de waarde van de viscositeit der massa voor elke temperatuur met de waarde van den HR-factor evenredig is, zal de waarde van de viskeuze verstaringsstemperatuur T_{sv} volgens formule (51) van de waarde van den HR-factor onafhankelijk zijn, terwijl de temperatuurindex van de viscositeit der massa T_{η} met den HR-factor evenredig moet zijn.

Ook de waarde van de initiaalverstaringsstemperatuur T_{si} zal van den HR-factor onafhankelijk moeten zijn.

β. Experimenteel gedeelte.

Het experimenteele onderzoek naar de juistheid van het bovenstaande werd uitgevoerd aan asphaltmortelmengsels, waarin een vulstof-bitumenmengsel van een en dezelfde samenstelling in wisselende hoeveelheid was verwerkt. Hierdoor werd bereikt, dat de

eigenschappen van de mortel bij deze proeven steeds dezelfde waren. Het onderzoek werd uitgevoerd bij $+20^{\circ}\text{C}$ en $+40^{\circ}\text{C}$.

De samenstelling der mengsels is in Tabel XXIII (pag. 137) aangegeven, tezamen met de resultaten der proeven en de waarden van den HR-factor, welke uit de holle ruimte (in vol. %) werden bepaald met behulp van grafiek IX.

Bepaling der holle ruimte geschiedde door berekening uit het waar s.g. van het mengsel en het schijnbaar s.g. ervan.

Het waar s.g. kon direct uit de samenstelling der mengsels worden berekend; het schijnbaar s.g. werd voor de meer gesloten mengsels berekend uit de resultaten van wegingen aan de lucht en onder water, terwijl voor meer open mengsels werd volstaan met de berekening van het volume uit de afmetingen van het proeflichaam.

Tevens zijn in de Tabel opgenomen de waarden van initiaalweerstand en van viscositeit der massa, welke volgens de hypothese een materiaal, dat bitumen en vulstof in dezelfde mengverhouding bevat, zal bezitten, indien de HR-factor = 1.— (Holle ruimte = 0 %).

Uit de tabel, welke het gemiddelde resultaat van duploproeven aangeeft, blijkt, dat de experimenteele resultaten de theorie op fraaie wijze bevestigen.

Berekent men den invloed van de HR-factor op de waarde van den initiaalweerstand onder de aanname, dat alleen de waarde van den bitumineuzen weerstand door den HR-factor wordt beïnvloed, dan wordt de overeenstemming nog fraaier. Daar bij de onderzochte mengsels de waarde van den haakweerstand laag is ten opzichte van die van den bitumineuzen initiaalweerstand bij 20°C heeft deze berekeningswijze op de op 20°C betrekking hebbende cijfers weinig invloed.

Voor de berekening van den invloed van den HR-factor op de waarde van den initiaalweerstand bij $+40^{\circ}\text{C}$ zou men rekening kunnen houden met een haakweerstand ten bedrage van 0.10 kg/cm^2 (zie Hoofdstuk VI, § 10, sub β), waardoor ook dit resultaat echter zoo weinig verandert, dat de verschillen binnen de waarnemingsfout vallen. Om deze redenen laten wij de meer gecompliceerde berekening, welke de bewijskracht der cijfers niet verhoogt, achterwege.

Wij wijzen er verder op, dat de waarde van den hoek van inwen-

TABEL XXIII.

Samenstelling en eigenschappen van asphaltmortelmengsels met verschillende HR-factor (bitumen Mexphalte 50/60).

Samenstelling (gew. dln.)			HR- vol. 0/0	HR- factor	Proef temp.	Proefresultaten			Na correctie voor HR-factor = 1		T_{si} °C	T_{η} °C	$\frac{T_{\eta}}{\text{HR-factor}}$ °C
Zand	Vulstof (Enci)	Bitumen (Venez.)				τ_e	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises			
80	20	10.5	3	0.91	20° C	27° 30'	1.20	90	1.32	99	+9	95	105
					40° C	29°	0.45	31	0.50	34			
85	15	7.5	12.8	0.75	20° C	25°	1.00	74	1.34	99	+8	92	121
					40° C	25°	0.40	28	0.54	37 ⁵			
90	10	5	19.9	0.66	20° C	24°	0.90	68	1.37	103	+8	84	127
					40° C	24°	0.35	26	0.53	39 ⁵			

dige wrijving φ_e , in afwijking van de theorie, niet te verwaarloozen verschillen vertoont. In de volgende §§ komen wij op deze kwestie terug.

De gegevens zijn onvoldoende in aantal om de waarde van de initiaalverstarringstemperatuur te bepalen.

Om een vergelijking van de eigenschappen van mengsels met verschillende HR-factor mogelijk te maken, zullen bij de verdere proeven de waarden van den initiaalweerstand en van de viscositeit der massa herleid worden tot die, welke de mengsels zouden bezitten, indien de waarde van den HR-factor = 1 bedroeg.

§ 4. *Invloed van de verhouding vulstof-bitumen op den weerstand tegen plastische deformatie.*

a. Theoretisch gedeelte.

Beschouwen wij thans mengsels, waarvan de HR-factor = 1 bedraagt, en waarin eenzelfde zand, eenzelfde vulstof en eenzelfde bitumen zijn verwerkt, doch waarin de verhouding vulstof tot bitumen is gevarieerd.

De holle ruimte van het zand zal daarbij opgevuld zijn met een vulstof-bitumenmengsel, waarvan de samenstelling variabel is.

De weerstand tegen deformatie van dit vulstof-bitumenmengsel zal maatgevend zijn voor den bitumineuzen initiaalweerstand en de viscositeit der massa van het mengsel, terwijl de waarde van den hoek van inwendige wrijving waarschijnlijk hoofdzakelijk bepaald zal worden door de eigenschappen van het zand.

Wanneer men in gedachten uitgaat van een vulstof-bitumenmengsel, waarin per eenheid van lengte a vulstofdeeltjes gerangschikt zijn, dan zullen per eenheid van doorsnede a^2 deeltjes aanwezig zijn en per eenheid van volume a^3 deeltjes.

Het aantal deeltjes per eenheid van doorsnede bedraagt dus het aantal vulstofdeeltjes per eenheid van volume tot de macht $2/3$, en is dus evenredig met $\left(\frac{\text{volume vulstof}}{\text{vol. vulstof} + \text{vol. bitumen}}\right)^{2/3}$, hetgeen wij schrijven als $\left(\frac{F}{F+B}\right)^{2/3}$. Aan dezen factor hebben wij den naam „Vulstof-bitumen factor” (FB-factor) gegeven.

Het aantal contactpunten in een doorsnede zal nu afhankelijk zijn

van dezen FB-factor en van de stapeling van het aggregaat in de ruimte.

In dit verband dient erop te worden gewezen, dat bij aanwezigheid van zeer weinig vulstof geen directe onderlinge raking der vulstofdeeltjes zal plaats vinden, zoodat het aantal contactpunten niet evenredig zal zijn met de waarde van den FB-factor, terwijl bij hogere concentratie van de vulstof het aantal contactpunten in een doorsnede door de korrelstapeling beïnvloed zal worden, en sterker zal toenemen met toenemende concentratie van de vulstof dan evenredig met de waarde van den FB-factor.

In het algemeen kan men dus stellen, dat het aantal contactpunten een functie van den FB-factor zal zijn.

Indien de waarden van den bitumineuzen initiaalweerstand en van de viscositeit der massa, zooals in § 2 besproken, nu evenredig zijn met het aantal contactpunten, moet de waarde van beide met deze functie van den FB-factor evenredig zijn.

De waarde van den hoek van inwendige wrijving zal niet door den FB-factor beïnvloed worden, terwijl, volgens eenzelfde beschouwing als in de vorige § gegeven, de waarde van den temperatuur-index van de viscositeit der massa T_{η} met deze functie van den FB-factor evenredig zal moeten zijn en de waarden van initiaal- en viskeuze verstarings temperatuur (T_{si} en T_{sv}) er niet door worden beïnvloed.

Wij zullen de resultaten van ons experimenteele onderzoek vergelijken met de waarde van den FB-factor om op deze wijze een indruk te verkrijgen van de functie, welke het verband tusschen den FB-factor en het aantal contactpunten weergeeft.

β. Experimenteel gedeelte.

Het experimenteele onderzoek naar den invloed van den FB-factor op de mechanische eigenschappen van asphaltmortelmengsels werd uitgevoerd aan mengsels met verschillende hoeveelheden vulstof, waarbij voor een gedeelte der proeven het bitumengehalte constant werd gehouden (10.5 gew. dln. op 100 gew. dln. aggregaat), voor de andere proeven zoo werd gekozen, dat nog eenige % HR in het mengsel aanwezig waren.

Alle mengsels werden bereid met Mexphalte 50/60. De resultaten der proeven, welke bij 20° C en 40° C werden uitgevoerd, zijn

TABEL XXIV. Samenstelling en eigenschappen van asphaltmortelmengsels met verschillende FB-factor.

Samenstelling (gew. dln.)			Proef temp. °C	HR-vol. 0/0	HR-factor	Proefresultaat			Na corr. voor HR-factor = 1		T_{sv} °C	T_{η} (HR-factor = 1) °C	FB-factor		T_{η} FB-factor °C
Zand	Vulstof (Enci.)	Bitumen				τ_e	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises			Alle vulstof	Alleen vulstof < 74 μ	
100	—	10.5	20	14.0	0.73	29°	0	23	0	31	+7.3	39	0	0	—
			40			25°	0.05	9	0.05	12					
95	5	15.0	20	5.0	0.86	24°	0	40	0	46	+9.3	49	0.23	0.19	213
			40			24°	0	14	0	16					
90	10	10.5	20	6.1	0.84	25°	0.30	48	0.35	57	+4.4	89	0.41	0.35	217
			40			25°	0.10	21	0.12	25					
80	20	10.5	20	3.0	0.91	27°30'	1.05	77	1.15	85	+8.0	105	0.55 ⁵	0.49 ⁵	189
			40			29°	0.40	29	0.45	32					
70	30	10.5	20	5.2	0.86	27°	1.75	12	2.05	95	+4.9	144	0.64	0.60	225
			40			29°	0.70	35	0.80	41					
70	30	11.3	20	3.5	0.89	27°	1.90	82	2.15	92	+6.6	124	0.62 ⁵	0.58 ⁵	199
			40			29°	0.75	33	0.85	37					
60	40	10.5	20	12.0	0.76	26°30'	2.60	82	3.30	105	+7.2	135	0.70	0.64	193
			40			29°	1.20	32	1.54	41					
60	40	12.7	20	3.8	0.89	27°	2.60	83	2.90	93	—	—	0.66 ⁵	0.61 ⁵	—
			40			—	—	—	—	—					
50	50	10.5	20	16.5	0.70	29°	2.10	82	3.16	117	+2.8	202	0.74	0.68 ⁵	(276)
			40			27°	1.25	36	1.80	54					
50	50	14.4	20	3.2	0.90	26°	3.10	80	3.45	89	+2.2	152	0.68	0.62	224
			40			29°	1.20	37	1.35	41					

samengevat in Tabel XXIV, waarin tevens de holle ruimte der mengsels, de waarde van den HR-factor en van den FB-factor zijn vermeld. De waarden van den initiaalweerstand en van de viscositeit der massa zijn in de tabel herleid tot die voor mengsels met een HR-factor = 1. De waarden van de viskeuze verstarringstemperatuur zijn tevens in de tabel opgenomen, herleid tot die van mengsels met een HR-factor = 1.

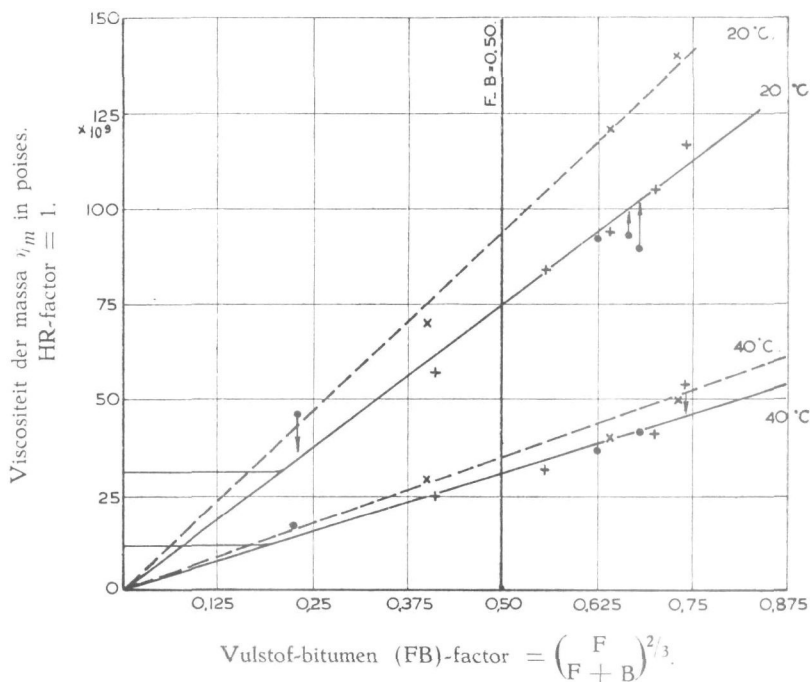
De waarde van de initiaalverstarringstemperatuur kan ook bij deze proeven niet bepaald worden.

De voor een HR-factor = 1 berekende waarden van viscositeit der massa en initiaalweerstand zijn in de grafieken Xa en b voorgesteld.

GRAFIEK Xa.

Verband tusschen de waarden van de viscositeit der massa η_m (HR-factor = 1) en de vulstof-bitumen (FB)-factor.

- | | | |
|---|---|-----------------|
| + | Asphaltnortel met constant bitumengehalte |) Enci vulstof. |
| ● | „ „ aangepast „ | |
| × | „ „ kalksteenpoeder 1 | |



Bij beschouwing der grafiek *Xa* blijkt, dat, behoudens voor zeer lage waarden van den FB-factor, de waarde van de viscositeit der massa evenredig is met den FB-factor.

Bij zeer lage waarde van den FB-factor wordt een waarde van de viscositeit der massa gevonden, welke van de rechte lijn in grafiek *Xa* afwijkt. De viscositeit der massa van mengsels zonder vulstof, welke op grond van bovengenoemde evenredigheid gelijk nihil zou moeten zijn, bezit zooals logischerwijze verwacht mag worden een eindige waarde. Eerst bij een waarde van den FB-factor = ca. 0.20 begint de invloed van de vulstof merkbaar te worden. Voor de practijk is dit verschijnsel zonder belang. Dit resultaat bevestigt dus, dat bij zeer lage waarden van den FB-factor (gevonden werd < 0.20) geen onderlinge raking der vulstofdeeltjes plaats vindt.

Men zou, indien geen invloed der stapeling aanwezig zou zijn, verwachten, dat de stijging van de viscositeit der massa van vulstof bevattende mengsels ten opzichte van die van mengsels zonder vulstof lineair met den FB-factor zou verlopen.

Er wordt evenwel bij benadering een gebroken lijn gevonden, hetgeen in overeenstemming is met de theoretische beschouwingen.

Dat in grafiek *Xa* een evenredigheid van de waarde van η_m en FB-factor wordt gevonden, moet dan ook als een toevalligheid worden beschouwd.

De evenredigheidsconstante van de waarde van de viscositeit der massa en van den FB-factor heeft een waarde, welke voor de beide onderzochte temperaturen verschillend is. Zij is grooter bij grootere hardheid van het bitumen bij proeftemperatuur.

De waarde van den temperatuur-index van de viscositeit der massa neemt eveneens evenredig met den FB-factor toe.

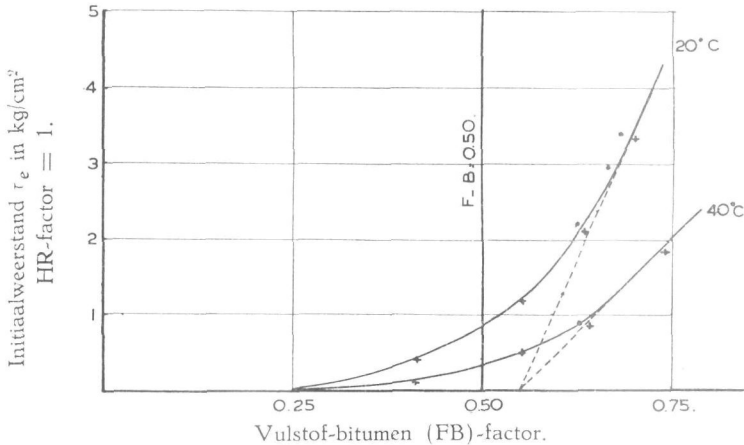
Bij beschouwing van de waarden van den initiaalweerstand in grafiek *Xb* (pag. 143) blijkt, dat bij waarden van den FB-factor > 0.65 een lineaire toename van de waarde van den initiaalweerstand met stijgenden FB-factor wordt gevonden, welke toename grooter is, naarmate het bitumen bij proeftemperatuur harder is.

Bij waarden van den FB-factor < 0.65 neemt de initiaalweerstand geleidelijk tot nul af. In de grafiek wordt dit verband door een gebogen lijn voorgesteld.

GRAFIEK Xb.

Verband tusschen de waarden van den initiaalweerstand τ_e (HR-factor = 1) en de vulstof-bitumen (FB)-factor.

+ Asphaltmortel met constant bitumengehalte } Enci vulstof.
 ● „ „ aangepast „ }



Hier blijkt, dat bij een FB-factor = ca. 0.25 onderlinge rakingen der vulstofdeeltjes beginnen op te treden, hetgeen de theorie nog nader bevestigt, evenals de zeer sterke stijging van de waarde van τ_e bij hooge waarden van den FB-factor.

Uit deze resultaten volgt, dat een herleiding van de waarde van de viscositeit der massa van een mengsel tot die van een mengsel met een andere waarde van den FB-factor zonder bezwaar mogelijk is. Voor de herleiding van de waarde van den initiaalweerstand stuit dit evenwel op moeilijkheden. Daarom is naar een andere voorstelling gezocht van het verband tusschen de waarden van den initiaalweerstand en den FB-factor. Op dubbellogarithmische schaal geteekend, blijkt het verband tusschen deze grootheden rechtlijnig te verlopen (zie grafiek XI, pag. 144). De helling der lijn blijkt onafhankelijk te zijn van de penetratie van het bitumen bij proef-temperatuur en zeer steil te verlopen. Dit steile verloop duidt op een groote gevoeligheid van den initiaalweerstand voor de waarde van den FB-factor.

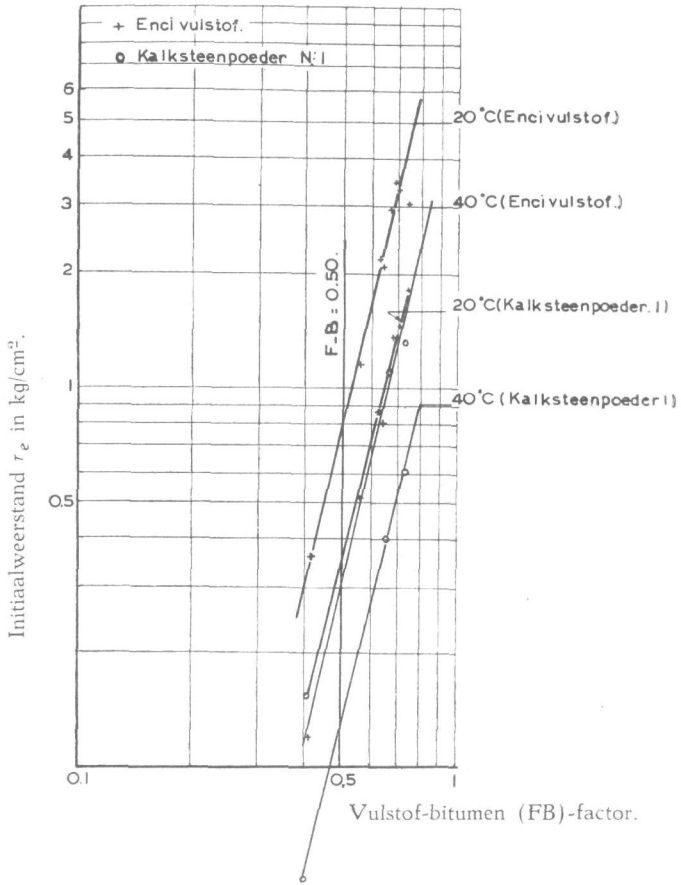
Gezien het groote belang van de hier gevonden regels voor het

verdere onderzoek, werd met een andere soort vulstof, n.l. kalksteenpoeder (No. I) een serie parallelproeven uitgevoerd.

De resultaten dezer proeven zijn in Tabel XXV (pag. 145) verzameld.

GRAFIEK XI.

Verband tusschen $\log \tau_e$ en $\log FB$ -factor.



Deze waarden zijn tevens in de grafieken Xa en XI voorgesteld en geven eenzelfde beeld als de resultaten der met Enci-vulstof samengestelde mengsels.

Het is van bijzonder belang, dat voor beide soorten vulstof in grafiek XI parallel loopende lijnen worden gevonden, zoodat rede-

TABEL XXV.

Samenstelling en eigenschappen van asphaltmortelmengsels met verschillend gehalte aan kalksteenvulstof (No. 1).

Samenstelling (gew. dln.)			HR-factor	Temp. °C	Proefresultaten			Bij HR-factor = 1		FB-factor	T_{sv} °C	T_{η} HR-factor = 1 °C
Zand	Vulstof	Bitumen			φ_e	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises			
60	40	9	0.91	20	27°30	1.25	132	1.36	144	0.73	+ 7.3	153
				40	27°	0.55	45	0.60	50			
80	20	7	0.81	20	26°30	0.90	98	1.10	121	0.64	+10.0	120
				40	27°	0.35	33	0.40	40			
90	10	11.5	0.87	20	24°	0.12 ⁵	62	0.15	71	0.46	+ 5.5	100
				40	24°30	0.05	26	0.06	30			

lijkerwijs aangenomen mag worden, dat voor verschillende soorten vulstof de helling der lijnen in het $\log \tau_e - \log$ FB-factor diagram weinig varieert en de noodzaak om de helling der lijn voor elke soort vulstof apart te bepalen niet aanwezig is. Dit argument heeft temeer waarde, omdat de granulometrische samenstelling der beide vulstoffen, welke samenstelling in tabel XXIX, § 7 van dit hoofdstuk (pag. 160) wordt gegeven, sterk uiteen loopt.

Uit de gegevens van een proef bij een willekeurigen FB-factor kan nu met behulp van de grafieken Xa en XI de eigenschappen van een mengsel, dat uit dezelfde bestanddeelen is samengesteld, doch dat een anderen FB-factor bezit, worden bepaald.

Bij het verdere onderzoek zullen de eigenschappen der mengsels worden herleid tot die van mengsels met een HR-factor = 1 en een FB-factor = 0.5. Deze herleiding heeft alleen betrekking op de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa. Wat de eerste betreft is zij alleen toelaatbaar voor mengsels zonder of met zeer geringen haakweerstand, wat de laatste betreft, zijn er geen gronden om beperkingen op te leggen.

Uit de waarden van den hoek van inwendige wrijving φ_e , welke in de tabellen XXIV en XXV zijn vermeld, blijkt, dat deze waarden, in afwijking van de theoretische beschouwingen niet constant, doch voor de mengsels met weinig vulstof lager zijn, dan voor de vulstofrijke mengsels.

Indien 20 gew. dln. vulstof of meer op 100 gew. dln. aggregaat

aanwezig zijn, blijkt de waarde van φ_e voor Enci-vulstof, respectievelijk kalksteen vulstof ca. 28° resp. ca. 27° te bedragen. Is minder vulstof aanwezig, dan daalt deze waarde tot 24° (voor mengfels zonder vulstof).

Wij meenen de volgende verklaring aan dit verschijnsel te moeten geven:

Indien geen, of weinig vulstof in de mengfels verwerkt is, wordt het dragende skelet gevormd door de zandkorrels, welke vrij rond van vorm zijn.

De druk op de smerende laag bitumen, welke deze korrels van elkaar scheidt, is, in verband met den relatief grooten straal der lichamen, betrekkelijk laag, hoewel in absoluten zin altijd nog hoog, (grootte-orde 1000 kg/cm^2).

Volgens HERTZ (zie (48) pag. 321) geldt voor twee bolvormige lichamen:

$$a^3 = \frac{3P}{4} \frac{E_1' + E_2'}{E_1' E_2'} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = \frac{3P}{4} \frac{\frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \quad (52)$$

waarin a = straal van het contactvlak,

P = overgebrachte kracht,

r_1 en r_2 = straal der bollen,

$$E_1' \text{ resp. } E_2' = \frac{m_1^2}{m_1^2 - 1} E_1 \text{ resp. } \frac{m_2^2}{m_2^2 - 1} E_2$$

m = coëfficiënt der zijdelingsche samentrekking,

E_1 en E_2 = elasticiteitsmoduli.

Is meer vulstof aanwezig, dan wordt het skelet niet uitsluitend gevormd door de zandkorrels, doch tusschen deze korrels zijn nog een of meerdere vulstofdeeltjes aanwezig. De werkelijke druk op het aanrakingsvlak van zandkorrels en vulstofdeeltjes is tengevolge van den kleinen diameter der vulstofdeeltjes aanzienlijk hooger dan in het voorgaande geval. Dientengevolge wordt de smerende werking van het bitumen minder merkbaar en neemt de waarde van den hoek van inwendige wrijving toe.

Vergelijkt men de eigenschappen van mengfels met verschillende vulstoffen, dan zullen de elastische eigenschappen van het materiaal, waaruit de vulstof bestaat, tevens invloed hebben op de werkelijke spanning tusschen de korrels.

Een vulstof, bestaande uit een gesteente met een kleine elasticiteitsmodulus zal een grooten straal van het contactvlak geven en dus een kleinen oppervlaktedruk en dientengevolge een sterkere daling van den hoek van inwendige wrijving vertoonen.

Daar kalksteen, naar aan te nemen is, een lagere waarde van de elasticiteitsmodulus bezit, dan de uit gesinterd materiaal bereide Enci-vulstof, verklaart deze hypothese de in deze en de vorige §§ gevonden feiten op tevredenstellende wijze.

Ook indien de oppervlaktedruk zoo groot wordt, dat de deformaties niet meer, zooals HERTZ aanneemt, elastisch zijn en de hardheid van het aggregaat een belangrijken invloed op den oppervlaktedruk gaat uitoefenen, lijkt het waarschijnlijk, dat tusschen beide vulstofsoorten overeenkomstige verschillen in de waarden van den oppervlaktedruk zullen blijven bestaan.

Daarnaast blijft het mogelijk, dat de verschillen in de waarden van den hoek van inwendige wrijving voor mengsels met verschillende soorten vulstof een gevolg zijn van den min of meer hoekigen vorm der vulstofkorrels. GEISLER en EWERS (25) wijzen er evenwel op, dat de vorm der korrels bij verschillende soorten vulstof weinig verschil vertoont, zoodat dit argument waarschijnlijk van ondergeschikt belang is.

Tenslotte dient nog op het volgende gewezen te worden.

Men kan zich afvragen, bij welke afmeting der aggregaatdeelen men de grens moet leggen van wat men wel en wat men niet onder vulstof wil rangschikken.

Volgens Amerikaansche gegevens (78) zou deze grens bij 74μ liggen, hetgeen ook in Nederland (42) wordt aangenomen. Volgens de Duitsche opvatting (15) ligt de grens bij 90μ .

Wij hebben nu in tabel XXIV aangegeven de waarden van den FB-factor, berekend zoowel onder de aanname dat alleen de deeltjes $< 74 \mu$ als vulstof moeten worden beschouwd, als onder de aanname, dat alles wat als „vulstof” werd toegevoegd als zoodanig bij de berekening van den FB-factor in aanmerking wordt genomen.

Het blijkt dat de verschillen in de getalwaarden van den FB-factor voor beide berekeningsmethoden zeer gering zijn, niettegenstaande het relatief groote percentage, n.l. ca. 25 %, van de vulstof dat $> 74 \mu$ was.

Voorloopig meenen wij voor de berekening van den FB-factor

alle vulstof in rekening te moeten brengen. In een latere § wordt op deze kwestie teruggekomen.

§ 5. *Invloed van de fijnheid van de vulstof op den weerstand tegen plastische deformatie.*

a. *Theoretisch gedeelte.*

Thans zal worden nagegaan, op welke wijze de weerstand van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels wordt beïnvloed door de fijnheid (deeltjesgrootte) der daarin verwerkte vulstof. Hierbij wordt in het mengsel het grovere aggregaat constant gehouden.

Nemen wij voorloopig aan, dat alle vulstofdeeltjes dezelfde afmetingen bezitten, terwijl de FB-factor = 0.5 en de HR-factor = 1, dan zal per eenheid van lengte bij een deeltjesgrootte = d het aantal deeltjes $\frac{1}{d}$ bedragen, per eenheid van doorsnede $\frac{1}{d^2}$ en per eenheid van volume $\frac{1}{d^3}$.

Het aantal deeltjes en naar wij aannemen ook het aantal contactpunten per eenheid van doorsnede zal dan evenredig zijn met $\frac{1}{d^2}$.

Indien als eenvoudigste veronderstelling weer wordt aangenomen, dat de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa per contactpunt constant zijn, dan zullen de waarden van bitumineuzen initiaalweerstand en viscositeit der massa omgekeerd evenredig moeten zijn met de deeltjesgrootte d in het kwadraat. In formule gebracht geeft dit:

$$d^2 \tau_e = K_1 \dots \dots \dots (53)$$

resp.

$$d^2 \eta_m = K_2 \dots \dots \dots (54)$$

waarin K_1 en K_2 constanten voorstellen, wier waarden onder meer afhankelijk zijn van de eigenschappen van de laag gebonden bitumen.

Een tweede mogelijkheid is de volgende. Denkt men zich de vulstofdeeltjes als bollen met een diameter = d , waarop een laag bitumen ter dikte van δ is geadsorbeerd, dan kan men de grootte van het vlak van de snijding van de gebonden lagen berekenen (zie fig. 8) uit:

$$r^2 = \left(\frac{d}{2} + \delta\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 = d\delta$$

en

$$\pi r^2 = \pi d\delta$$

Nemen wij aan, dat de laag gebonden bitumen per eenheid van

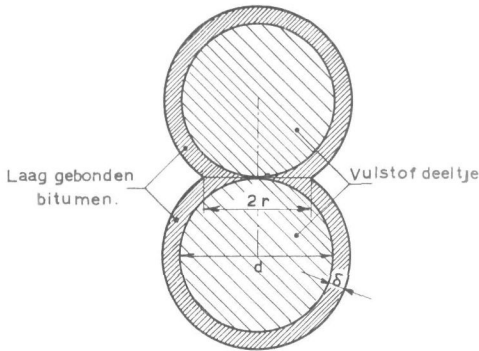


Fig. 8.

doorsnede een weerstand K_3 ontwikkelt, dan wordt de weerstand per contactpunt $W = K_3\pi d\delta$ en geldt:

$$d\tau_e = K_4 \dots \dots \dots (55)$$

resp.

$$d\eta_m = K_5 \dots \dots \dots (56)$$

De bitumineuze initiaalweerstand en de viscositeit der massa zijn bij deze veronderstelling omgekeerd evenredig met de deeltjesgrootte d .

Ook is het mogelijk, dat de vulstofdeeltjes met platte vlakken tegen elkaar rusten. Denkt men zich de vulstofdeeltjes van cubischen vorm, dan is het bij een regelmatige stapeling mogelijk, dat de gehele doorsnede door gebonden bitumen wordt ingenomen, zoodat de weerstand onafhankelijk wordt van de deeltjesgrootte.

Dan geldt:

$$\tau_e = K_6 \dots \dots \dots (57)$$

$$\eta_m = K_7 \dots \dots \dots (58)$$

Het lijkt niet mogelijk langs theoretischen weg na te gaan aan welke dezer hypothesen de voorkeur moet worden gegeven. Waarschijnlijk zal voor elk materiaal aan alle drie hypothesen door een gedeelte van het materiaal worden voldaan.

Daarom stellen wij in het algemeen:

$$\tau_e = Ad^n \dots \dots \dots (59)$$

$$\eta_m = Bd^m \dots \dots \dots (60)$$

Uit het experimenteele onderzoek zal moeten blijken, of deze formules de eigenschappen van het materiaal met voldoende nauwkeurigheid omschrijven.

Voor vulstoffen, die bestaan uit mengsels van verschillende fracties, is het mogelijk, met behulp van de formules (59) en (60) te berekenen, welke waarden τ_e en η_m zullen bezitten, indien de waarden van A en B bekend zijn.

Denkt men zich in een doorsnede deze fracties achter elkaar gerangschikt, dan zal de weerstand in deze doorsnede gelijk zijn aan de som van de weerstanden der fracties, zoodat:

$$\tau_e = \sum_i \tau_{e_i} \dots \dots \dots (60)$$

en

$$\eta_m = \sum_i \eta_{m_i} \dots \dots \dots (61)$$

of

$$\tau_e = \sum_i Ad_i^n \dots \dots \dots (62)$$

en

$$\eta_m = \sum_i Bd_i^m \dots \dots \dots (63)$$

waarin d de gemiddelde deeltjesgrootte der fracties voorstelt.

Indien elk der fracties a_1, a_2 etc. gew. % van de vulstof uitmaakt, gaat dit over in:

$$\tau_e = \frac{A}{100} \sum_i a_i d_i^n \dots \dots \dots (64)$$

en

$$\eta_m = \frac{B}{100} \sum_i a_i d_i^m \dots \dots \dots (65)$$

Men kan nu verder de fijnheid van een vulstof karakteriseeren door aan te geven de waarde van de aequivalente deeltjesgrootte D , welke, indien de geheele vulstof uit deeltjes van die grootte bestond, een mengsel met eenzelfde waarde van bitumineuzen initiaalweerstand en viscositeit der massa zou geven als de uit verschillende fracties bestaande vulstof.

De waarde van D kan worden berekend uit:

$$AD_1^n = \frac{A}{100} \sum_i a_i d_i^n \quad (66)$$

of uit $BD_2^m = \frac{B}{100} \sum_i a_i d_i^m \quad (67)$

Indien de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa — zooals in § 2 werd verondersteld — met het aantal contactpunten evenredig zijn, zullen voor D_1 en D_2 gelijke waarden moeten worden gevonden. Dit is alleen mogelijk, indien $n = m$. Uit het experimenteele materiaal zal moeten blijken, of aan deze gelijkheid wordt voldaan.

De waarden van A en B zullen worden beïnvloed door de eigenschappen van de laag gebonden bitumen en dus door de proeftemperatuur.

Voor verschillende temperaturen zullen veranderingen in de fijnheid van de vulstof op eenzelfde manier tot uiting komen, zoodat de waarde van de viskeuze verstarringstemperatuur niet door de fijnheid van de vulstof zal worden beïnvloed, de waarde van de temperatuur-index van de viscositeit der massa wel ervan afhankelijk zal zijn.

De waarde van de initiaalverstarringstemperatuur zal niet door de fijnheid van de vulstof worden beïnvloed.

β. Experimenteel gedeelte.

Het leek wenschelijk bij dit onderzoek zorg te dragen alleen zulke vulstoffen te gebruiken, waarvan met zekerheid verwacht mag worden, dat het eenige verschil tusschen de verschillende fracties dat in deeltjesgrootte is. Daarom werd de bij de vorige onderzoeken veelal gebruikte Enci-vulstof, waarvan mogelijkwerwijs de fijnste (donkergekleurde) fractie vliegasch bevat, voor dit onderzoek ongeschikt geacht en werd de voorkeur gegeven aan gemalen homogeen natuurlijk gesteente.

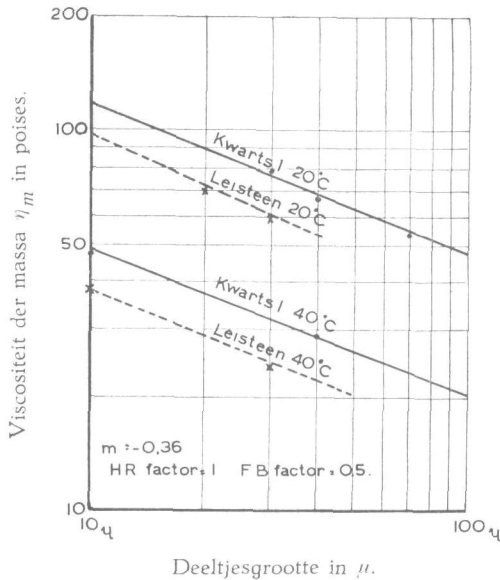
Dit onderzoek werd om verrassingen uit te sluiten, uitgevoerd met een tweetal vulstoffen, welke door „blazen” in fracties werden gesplitst. Met deze fracties werden asphaltemortelmengsels samengesteld, waarbij steeds eenzelfde zand en eenzelfde bitumen werd verwerkt. De mengsels werden onderzocht bij 20° C en bij 40° C. Uit de proefresultaten werden de waarden van initiaalweerstand en

viscositeit der massa berekend voor HR-factor = 1 en FB-factor = 0.5. (Zie Tabel XXVI pag. 153.)

De voor een HR-factor = 1 en een FB-factor = 0.5 berekende waarden van viscositeit der massa en initiaalweerstand zijn in de grafieken XIIa en b tegenover de deeltjesgrootte der vulstof op dubbel-logarithmische schaal uitgezet. Daarbij is als deeltjesgrootte voor elke fractie het rekenkundig gemiddelde der fractiegrenzen aangehouden.

GRAFIEK XIIa.

Verband tusschen de \log van de viscositeit der massa $\eta_m \times 10^{-9}$ poises en de \log der deeltjes-grootte van een tweetal vulstoffen.



Beschouwing van grafiek XIIa toont onmiddellijk, dat door de punten, die de waarden van η_m bij verschillende deeltjesgrootte der vulstof bij een bepaalde temperatuur voorstellen, een rechte lijn getrokken kan worden.

Voor proeven bij verschillende temperatuur en voor mengsels met verschillende soorten vulstof blijken de lijnen evenwijdig te loopen en een helling tegen den horizontaal van $-0,36$ te maken, zoodat in formule (60), $\eta_m = B \times d^m$, de waarde van $m = -0,36$ bedraagt.

TABEL XXVI.

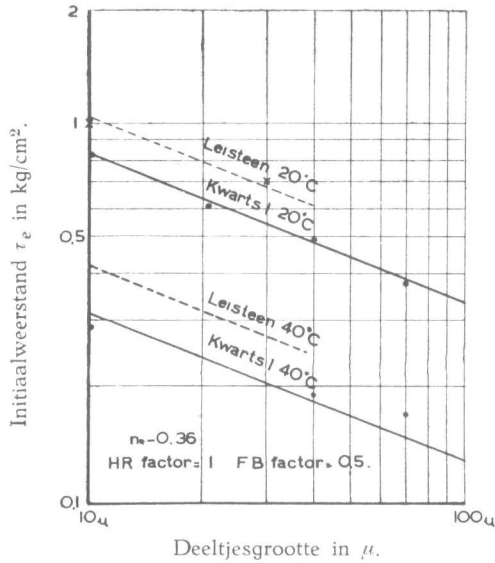
Eigenschappen van met fracties van vulstoffen bereide asphaltemortelmengsels.

Samenstelling			HR-factor	FB-factor	Proef temp. °C	Proefresultaten			Na correctie voor HR-factor = 1		Na corr. v. HR-factor = 1 en FB-factor = 0.50		HR-factor = 1 FB-factor = 0.5	
Zand 80 gew. dln.	Vulstof 20 gew. dln.	Bitumen Mexphalte 50/60 gew. dln.				τ_e	τ_e	η_m	τ_e	η_m	τ_e	η_m	T_{sv}	T_η
						kg/cm ²	×10 ⁻⁹ poises	kg/cm ²	×10 ⁻⁹ poises	kg/cm ²	×10 ⁻⁹ poises	°C	°C	
Kwarts-poeder	0—20 μ (d=10 μ)	7.6	0.81	0.64	20	27°30	1.80	98	2.22	121	0.80	95	+0.4	186
					40	30°	0.65	48	0.82	60	0.21	47		
	20—40 μ (d=30 μ)	7.8	0.83	0.63	20	28°30	1.40	85	1.68	102	0.60	81		
					40	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	30—60 μ (d=50 μ)	8.0	0.83	0.62	20	27°	1.00	70	1.20	84	0.50	67	+4.7	102
					40	27°	0.40	30	0.48	36	0.19	29		
	> 50 μ (d=70 μ)	9.5	0.81	0.59	20	27°	0.75	56	0.92	64	0.40	54	+5.2	80
					40	25°	0.30	22	0.37	27	0.18	23		
	Mengsel	9.9	0.91	0.58	20	29°	0.70	62	0.77	68	0.56	59	+3.1	106
					40	27°30	0.25	28	0.27	31	0.14	27		
Lei-steen-poeder	0—20 μ (d=10 μ)	8.7	0.80	0.60	20	25°	1.70	75	2.12	93	1.00	77	+1.5	143
					40	25°	0.80	36	1.00	45	0.45	37		
	20—40 μ (d=30 μ)	8.8	0.86	0.60	20	28°	1.30	63	1.51	73	0.70	61	+7.0	79
					40	26°30	0.50	25	0.58	29	0.25	24		
	Mengsel	9.7	0.86	0.58	20	25°30	1.70	92	1.77	96	0.95	83	+3.1	140
					40	28°	0.60	42	0.12	44	0.31	38		

Deze zeer lage waarde duidt erop, dat de laatste hypothese van het theoretische gedeelte van deze § het best de feiten benadert, zoodat aangenomen moet worden, dat een relatief groot deel eener doorsnede door de contactpunten van de vulstof door gebonden bitumen wordt ingenomen.

GRAFIEK XIIb.

Verband tusschen de \log van den initiaalweerstand τ_e en de \log der deeltjesgrootte van een tweetal vulstoffen.



Uit grafiek XIIb blijkt, dat voor den initiaalweerstand van mengsels met fracties der beide vulstoffen eveneens evenwijdige lijnen worden gevonden, welke onder dezelfde helling met de horizontale as verlopen. Hierbij wordt dus gevonden, dat in formule (59) de waarde van $n = -0.36$ bedraagt, hetgeen genoemde hypothese verder ondersteunt.

De gelijkheid der waarden van $n = m$, welke uit het experimentele materiaal volgt, bewijst dat de contactpuntentheorie op goede gronden berust.

Uit de lage waarde van n en m volgt verder, dat de fijnheid der vulstof geen overheerschen invloed op de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa uitoefent.

Berekening van de aequivalente deeltjesgrootte D van een vulstof kan met behulp van de grafieken XIIa en b worden uitgevoerd, indien men b.v. de lijnen, welke voor de kwartsvulstof werden gevonden als basis neemt.

De waarden van initiaalweerstand resp. viscositeit der massa (Ad^n , resp. Bd^m) van elk der fracties kunnen in deze grafiek worden afgelezen en het aandeel dat deze fractie in den weerstand heeft (aAd^n , resp. aBd^m) worden berekend. Voor beide onderzochte vulstoffen is dit in tabel XXVII uitgevoerd.

TABEL XXVII.

Berekening van de aequivalente deeltjesgrootte van een tweetal vulstoffen.

Fractie	Waarde van $\tau_e = Ad^n$ kg/cm ²	Waarde van $\eta_m = Bd^m \times 10^{-9}$ poises	Kwartspoeder I			Leisteenpoeder		
			Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bd^m$ 100	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bd^m$ 100
<20 μ , $d=10 \mu$	0.80	115	34	0.272	39.1	82	0.66	94.3
0-30 μ , $d=25 \mu$	0.60	80	15	0.090	12.0	10 ⁵	0.06	8.4
0-55 μ , $d=40 \mu$	0.50	70	19	0.095	17.1	7 ⁵	0.04	5.3
5-75 μ , $d=60 \mu$	0.42	60	20	0.084	12.0			
>75 μ , $d=80 \mu$	0.38	53	12	0.045	6.4			
			Σ	0.586	86.6		0.76	108
Aequivalente deeltjesgrootte D in μ				24 μ	22 μ		12 μ	11 μ

De waarde van de aequivalente deeltjesgrootte D kan dan in de grafieken XIIa en b worden afgelezen.

Zooals verwacht werd op grond van de gelijkheid van n en m blijkt, dat voor D , zowel berekend uit de waarden van τ_e als uit die van η_m eenzelfde waarde wordt gevonden. Dit geldt ook als men de waarde van D voor het mengsel met leisteenpoeder uit de gegevens, welke aan de mengsels met kwartsvulstof zijn bepaald, berekent.

Vergelijkt men nu de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa voor een mengsel, dat een vulstof met deeltjesgrootte D bevat met de waarden voor mengsels, die de vulstof zelve bevatten, dan vindt men het volgende resultaat. (Zie tabel op blz. 156).

Uit de tabel blijkt, dat er een redelijke overeenstemming bestaat tusschen de gemeten en de berekende waarden van beide grootheden, indien men in aanmerking neemt, dat de penetratie van het

TABEL XXVIII.

Berekende en gemeten waarden van den initiaalweerstand en de viscositeit der massa voor asphaltmortelmengsels, die verschillende vulstoffen bevatten (HR-factor = 1, FB-factor = 0.5).

Tempe- ratuur	Kwartspoeder I. $D = 23 \mu$				Leisteenpoeder $D = 12 \mu$			
	berekend		gemeten		berekend		gemeten	
	τ_e kg/cm ²	η_m $\times 10^{-9}$ poises	τ_e kg/cm ²	η_m $\times 10^{-9}$ poises	τ_e kg/cm ²	η_m $\times 10^{-9}$ poises	τ_e kg/cm ²	η_m $\times 10^{-9}$ poises
20° C	0.59	82	0.56	59	0.96	81	0.95	83
40° C	0.21	35	0.14	27	0.40	35	0.31	38

bindmiddel in de mengsels met kwartspoeder bij de proeven, waaruit de „berekende” waarden werden afgeleid pen. 22 resp. 125 bedroeg tegen pen. 27 resp. 155, bij 20° C resp. 40° C voor de proeven der „gemeten” waarden.

Beschouwing van de waarden van de viskeuze verstarringstemperatuur T_{sv} en van de temperatuurindex van de viscositeit der massa T_η in tabel XXVI toont aan, dat de waarde van T_η overeenkomstig de berekeningen met toenemende fijnheid van de vulstof stijgt. De waarden van de viskeuze verstarringstemperatuur blijken nogal te variëren, hetgeen wij aan te lage waarden van de viscositeit der massa bij 20° C van de mengsels met het fijnste kwartspoeder en het fijnste leisteenpoeder meenen te moeten toeschrijven.

Wil men een vergelijking trekken tusschen de mechanische eigenschappen van mengsels, waarin verschillende vulstoffen zijn verwerkt, dan dient men den weerstand van het materiaal te herleiden tot die van mengsels, welke alle vulstof van eenzelfde aequivalente deeltjesgrootte D bevatten.

Grafisch kan dit op eenvoudige wijze geschieden in de grafieken XII a en b. Men trekke daartoe door de gevonden punten lijnen onder een helling = -0.36 en bepale de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa voor een bepaalde waarde van de aequivalente deeltjesgrootte = D_0 .

Als vergelijkingsbasis wordt door ons aangehouden:

$$D_0 = 10 \mu.$$

§ 6. *Analytische behandeling van het verband tusschen de verschillende grootheden.*

In het voorgaande werd langs grafischen weg het verband nagegaan tusschen de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa eenerzijds en de waarden van HR-factor, FB-factor en aequivalente deeltjesgrootte D der vulstof anderzijds. Hieronder wordt hetzelfde analytisch behandeld.

Wij vonden in § 3, dat de waarden van initiaalweerstand en viscositeit der massa met den HR-factor evenredig zijn, dus:

$$\tau_e = (HR) \times K_1 \quad \dots \quad (68)$$

$$\eta_m = (HR) \times K_2 \quad \dots \quad (69)$$

in welke formules K_1 , resp. K_2 de waarden van den initiaalweerstand, resp. de viscositeit der massa voor een HR-factor = 1 aanduiden.

In § 4 werd gevonden, dat het verband tusschen de waarden van bitumineuzen initiaalweerstand en FB-factor door een machtsfunctie werd omschreven, terwijl de viscositeit der massa en de FB-factor met elkaar evenredig zijn.

In formule gebracht geeft dit:

$$\tau_e = K_3 \left(\frac{FB}{0.5} \right)^{4.2} \quad \dots \quad (70)$$

$$\eta_m = K_4 \left(\frac{FB}{0.5} \right) \quad \dots \quad (71)$$

K_3 en K_4 zijn constanten, die de waarden van τ_e , resp. η_m aangeven voor FB-factor = 0.5.

In § 5 werd aangetoond, dat de waarden van initiaalweerstand en van viscositeit der massa beide met de aequivalente deeltjesgrootte D verbonden zijn door een machtsfunctie.

$$\tau_e = K_5 \times \left(\frac{D}{D_0} \right)^{-0.36} \quad \dots \quad (72)$$

$$\eta_m = K_6 \times \left(\frac{D}{D_0} \right)^{-0.36} \quad \dots \quad (73)$$

Hierin geven K_5 , resp. K_6 de waarden van τ_e resp. η_m aan voor $D = D_0 = 10 \mu$.

Combinatie dezer formules geeft:

$$\tau_e = (HR) \times \left(\frac{FB}{0.5}\right)^{4.2} \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-0.36} \times A. \quad (74)$$

$$\eta_m = (HR) \times \left(\frac{FB}{0.5}\right) \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-0.36} \times B. \quad (75)$$

waarin A de waarde van den initiaalweerstand voorstelt voor HR-factor = 1, FB-factor = 0.5 en $D = D_0 = 10 \mu$ terwijl B = de waarde van de viscositeit der massa voor HR-factor = 1, FB-factor = 0.5 en $D = D_0 = 10 \mu$ geeft. De grootheid A wordt dus uitgedrukt in kg/cm^2 , B in poises.

Deze grootheden zullen in de volgende § worden gebruikt, om sommige eigenschappen van verschillende vulstoffen te vergelijken.

Wij willen niet nalaten, erop te wijzen, dat de op deze wijze berekende waarden van A en B alleen gelden voor het onderzochte grovere aggregaat.

§ 7. Invloed van het chemisch-physische karakter van de vulstof op den weerstand tegen plastische deformatie.

a. Theoretisch gedeelte.

Bij de beoordeeling van de geschiktheid van minerale poeders voor toepassing als vulstof in bitumen-mineraalaggregaat-mengsels dient te worden nagegaan, of, en in hoeverre het chemisch-physisch karakter — hieronder verstaan wij de chemische samenstelling van de vulstof, de porositeit van het materiaal, de vorm en de eigenschappen van het oppervlak der deeltjes — den weerstand tegen plastische deformatie van met deze vulstoffen bereide bitumen-mineraalaggregaat-mengsels beïnvloedt.

Na het in de vorige §§ behandelde is het duidelijk, dat een betrouwbare vergelijking van verschillende vulstoffen alleen mogelijk is, indien de besproken factoren voor de verschillende mengsels gelijk gekozen worden.

Daartoe werd door ons arbitrair bepaald, dat deze vergelijking

zal geschieden voor mengsels met een HR-factor = 1, een FB-factor = 0.5 en $D = 10 \mu$.

Vergelijking van de waarden van A , resp. B , zoals in de vorige § afgeleid, stelt ons in staat een oordeel uit te spreken omtrent de geschiktheid van verschillende vulstoffen.

Hierbij dient vergelijking zoowel te geschieden bij 20°C als bij 40°C . In verband met verschillen in de penetraties der verwerkte bitumina, hebben wij het verzamelde cijfermateriaal grafisch uitgezet tegen de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur.

β. Experimenteel gedeelte.

Mexphalte 50/60 werd met verschillende vulstoffen en het reeds vroeger vermelde zand verwerkt tot asphaltemortels, waarvan de weerstand tegen plastische deformatie bij 20°C en 40°C werd bepaald.

In deze mengsels werd steeds aan 20 gew. dln. vulstof en 80 gew. dln. zand zooveel bitumen toegevoegd, dat nog eenige vol. % holle ruimte in de gecompriëerde mengsels aanwezig was.

Voor de verwerkte vulstoffen werd de aequivalente deeltjesgrootte D berekend op de wijze, zoals in § 5 aangegeven. Als vergelijkingsbasis werd weer de voor het kwartspoeder I bepaalde eigenschappen aangehouden (zie Tabel XXVI).

De berekening is in Tabel XXIV (pag. 160) uitgevoerd.

Uit de tabel blijkt, dat beide berekeningsmethoden voor elke vulstof weer eenzelfde waarde voor D leveren.

De resultaten der proeven zijn in Tabel XXX (pag. 161) samengebracht.

In deze tabel is tevens de berekening van de waarden van A en B uitgevoerd, waarbij gebruik werd gemaakt van de grafieken XIIa en b.

De op deze wijze bepaalde waarden van A en B zijn vervolgens in de grafieken XIIIa (pag. 163) en b (pag. 164) uitgezet tegen de logarithme van de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur.

Uit de grafieken blijkt, dat door de punten, onverschillig welke vulstof is gebruikt, een gebogen lijn kan worden getrokken, welke het verband tusschen de waarden van A resp. B en de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur voor asphaltemortelmengsels,

TABEL XXIX. Berekening der aequivalente deeltjesgrootte D van verschillende vulstoffen (basis = kwartspoeder I bij 20° C).

Fractie	Basiscijfers		Kwartspoeder I			Lafarge			Porfierpoeder			Kalksteenp. I			Leisteenpoeder			Kalksteenp. II			Enci			
	τ_e kg/cm ²	η_m ×10 ⁻⁹ poises	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bdm$ 100	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bdm$ 100	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bdm$ 100	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bdm$ 100	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bdm$ 100	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bdm$ 100	Analyse gew. 0/0	$a \times Ad^n$ 100	$a \times Bdm$ 100	
< 20 μ	d = 10 μ	0.80	115	34	0.272	39.1	44	0.352	50.6	51	0.408	58.7	67	0.536	76.0	82	0.66	94.3	86	0.680	98.9	35	0.280	40.3
20-30	25 μ	0.60	80	15	0.090	12.0	16	0.096	12.8	14	0.084	11.2	11	0.066	8.8	10 ⁵	0.06	8.4	5	0.030	4.0	9	0.054	7.2
30-55	40 μ	0.50	70	19	0.095	17.1	24	0.120	16.8	15	0.075	10.5	16	0.080	8.1	7 ⁵	0.04	5.3	2	0.010	1.4	21	0.105	14.7
55-75	60 μ	0.42	60	20	0.084	12.0	12	0.050	7.2	13	0.054	7.8	6	0.025	3.6	—	—	—	7	0.029	4.2	10	0.042	6.0
> 75 μ	80 μ	0.38	53	12	0.045	6.4	4	0.015	2.1	7	0.027	3.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	0.095	13.3
				Σ	0.586	86.6	—	0.632	89.5	—	0.648	91.9	—	0.707	96.5	—	0.76	108	—	0.749	108.5	—	0.576	81.5
Aequivalente deeltjesgrootte D				—	24 μ	22 μ	—	20 μ	20 μ	—	19 μ	18 μ	—	14 μ	16 μ	—	12 μ	12 μ	—	13 μ	12 μ	—	26 μ	25 μ
				Clinkerdust			Vliegasch																	
				20	0.160	23.0	55	0.440	63.3															
				29	0.174	23.2	18	0.108	14.4															
				18	0.090	12.6	24	0.120	16.8															
				18	0.076	10.8	3	0.013	1.8															
				15	0.057	80.0	—	—	—															
				—	0.557	77.6	—	0.681	96.3															
				—	28 μ	29 μ	—	16 μ	16 μ															

TABEL XXX.

Eigenschappen van asphaltemortelmengsels, die verschillende vulstoffen bevatten, bij 20° C en 40° C.

Vulstof	Temp. in °C	D in μ	HR- factor	FB- factor	Proefresultaat			Na correctie HR-factor = 1		Na correctie HR-factor = 1 FB-factor = 0.50		Pen. Bitumen bij proef- temp.	A kg/cm ²	B ×10 ⁻⁹ poises	Uit grafiek XIII a/b	
					φ_e	τ_e kg/cm ² × 10 ⁻⁹	η_m poises	τ_e kg/cm ² × 10 ⁻⁹	η_m poises	τ_e kg/cm ² × 10 ⁻⁹	η_m poises				A kg/cm ² × 10 ⁻⁹	B poises
Kwartspoeder I	20	23	0.91	0.58	29°	0.70	64	0.77	70	0.40	61	27½	0.52	85	0.78	80
	40				27°30	0.25	28	0.27	31	0.14	27	155	0.19	37	0.36	36
Lafarge	20	20	0.86	0.57	27°	1.30	62	1.51	72	0.85	63	22	1.13	82	1.08	102
	40				28°	0.60	26	0.70	30	0.40	26	145	0.53	34	0.36	37
Porfierpoeder	20	19	0.92	0.57	27°30	1.00	70	1.09	76	0.70	67	25	0.90	85	0.90	88
	40				27°	0.50	30	0.54	33	0.30	29	165	0.39	37	0.36	36
Kalksteenp. I	20	15	0.93	0.57	28°	1.00	75	1.07	81	0.60	71	28	0.70	88	0.78	78
	40				28°	0.40	32	0.43	34	0.25	30	150	0.29	35	0.36	37
Leisteenpoeder	20	12	0.96	0.58	26°30	1.70	92	1.77	96	0.95	83	27	1.02	89	0.84	82
	40				28°	0.60	42	0.62	44	0.31	34	170	0.33	41	0.36	38
Kalksteenp II	20	12	0.90	0.62	24°	2.05	77	2.28	86	0.80	70	24½	0.85	76	0.90	90
	40				25°	1.10	37	1.22	41	0.40	33	140	0.43	35	0.36	37
Enci	20	26	0.91	0.55	27°30	1.05	77	1.15	85	0.80	77	22½	1.14	110	1.02	100
	40				29°	0.45	29	0.50	32	0.30	29	140	0.43	41	0.36	37
					1) 28°	1.20	87	1.32	96	0.85	87	20	1.20	125	1.20	115
Clinkerdust	20	28	0.89	0.60	1) 28°	0.45	47	0.50	52	0.32	47	50	0.46	67	0.46	54
					26°	1.25	102	1.40	115	0.70	95	17	1.05	140	1.50	147
					26°30	0.40	24	0.45	27	0.20	22	85	0.32	34	0.36	44
= Vliegash	20	16	0.77	0.55	25°	1.50	95	1.94	123	1.30	112	17½	1.56	132	1.44	140
	40				25°	0.80	38	1.04	49	0.70	44	89	0.84	52	0.36	43

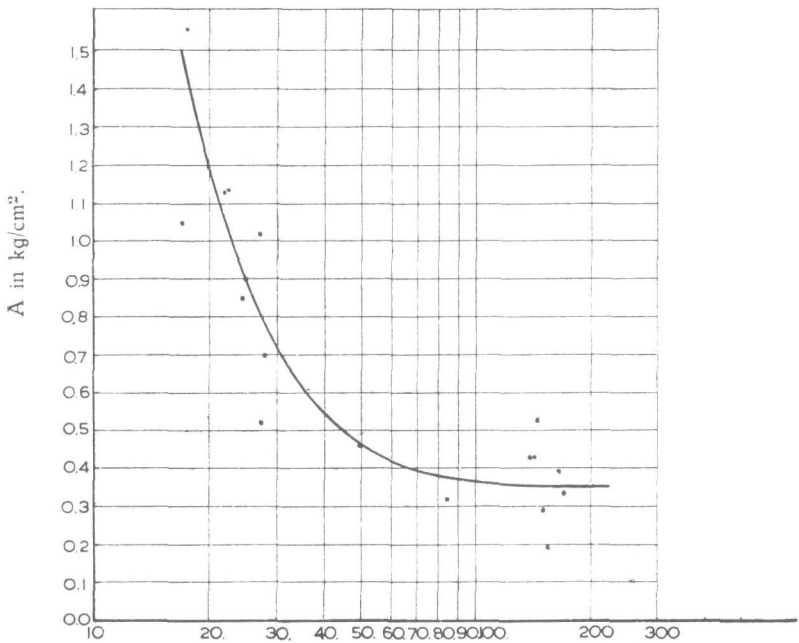
1) Deze gegevens zijn aan Hoofdstuk VII ontleend.

welke het betrokken zand bevatten, aangeeft. De afwijkingen der punten van de lijn zijn zoo onregelmatig, dat een bepaalde invloed van het chemisch-physisch karakter van de vulstof niet te herkennen valt.

Beschouwt men de waarden van A nader, dan blijkt, dat de spreiding der enkele punten voor de hogere waarden van de penetratie vrij groot wordt, hetgeen geen verwondering behoeft te wek-

GRAFIEK XIIIa.

Waarden van A in kg/cm^2 voor asfaltmortelmengsels met verschillende soorten vulstof.



Penetratie van het teruggewonnen bitumen bij de proeftemperatuur.

ken, daar de bepaling van den initiaalweerstand bij de lage waarden van τ_e (ca. 0.4 kg/cm^2), waaruit deze waarden van A zijn afgeleid, een relatief hoge fout vertoont (zie ook Hoofdstuk VI, § 7). Bij lagere penetraties is de relatieve fout geringer en zooals blijkt de afwijking kleiner.

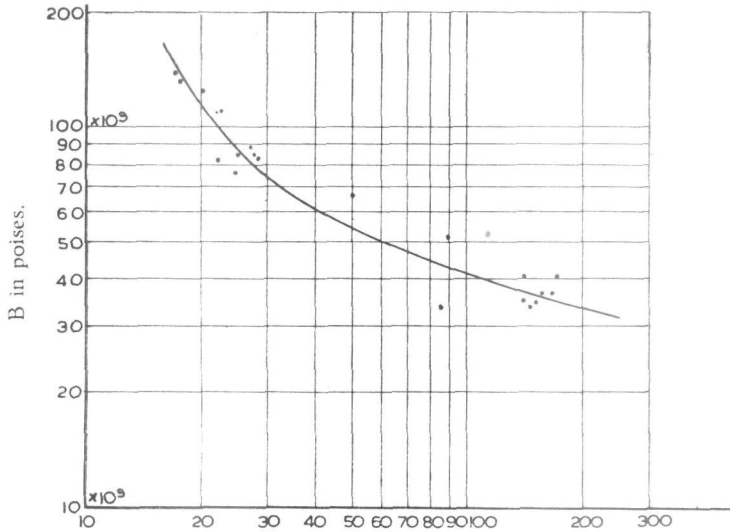
Ter vergelijking zijn in Tabel XXX tevens opgenomen de

waarden van A resp. B van de punten welke bij eenzelfde penetratie van het bitumen op de gebogen lijnen zijn gelegen.

Wij komen thans terug op de vraag, in hoeverre het gemotiveerd is, zooals wij deden, alle vulstof voor de berekening van den FB-factor in rekening te brengen, dan wel alleen de deeltjes $< 74 \mu$

GRAFIEK XIIIb.

Waarden van B in poises voor asphaltemortelmengsels met verschillende soorten vulstof.



Penetratie van het teruggewonnen bitumen bij de proeftemperatuur.

als vulstof op te vatten en de grovere deeltjes als zand te beschouwen.

Aan de hand van de eigenschappen van mengsels bereid met vulstoffen, welke een relatief groot percentage materiaal $> 74 \mu$ bevatten, kan eenig inzicht worden verkregen in de wenschelijkheid aan een der rekenwijzen voorkeur te verleen.

Uit de proefseries met de vulstoffen Enci en Clinkerdust zijn de waarden van A en B op beide wijzen berekend en vergeleken met de waarden van A en B uit de grafieken XIIIa en b, waarin de geteekende krommen bij het groote aantal gegevens omtrent mengsels met vulstoffen, die weinig grof materiaal bevatten, door deze berekeningswijze niet wordt beïnvloed.

De resultaten dezer berekeningen zijn in Tabel XXXI verzameld.

TABEL XXXI.
Waarden van A en B op verschillende wijzen berekend.

Vulstof	Temp. °C	Alle vulstof			Alleen vulstof < 74 μ			Uit grafiek	
		D in μ	A kg/cm ²	B $\times 10^{-9}$ poises	D in μ	A kg/cm ²	B $\times 10^{-9}$ poises	A kg/cm ²	B $\times 10^{-9}$ poises
Enci	20	26	1.14	110	20	1.05	98	1.02	100
	40		0.43	41		0.39	37	0.36	37
Clinkerdust	20	28	1.05	140	24	0.98	125	1.50	147
	40		0.32	34		0.28	31	0.36	44

Uit de tabel blijkt, dat de verschillen tusschen de berekende waarden van *A* en *B* gering zijn.

De afwijkingen van de berekende waarden van *A* en *B* van die, welke aan grafiek XIIIa en *b* ontnomen zijn, zijn grooter dan de verschillen tusschen de op verschillende wijze berekende waarden.

De verschillen tusschen de resultaten van beide berekeningswijzen zijn zoo gering, dat er geen bezwaar bestaat om alle vulstof als zodanig in rekening te brengen.

Tenslotte komen wij nog terug op de in § 4 besproken verschillen in de waarden van den hoek van inwendige wrijving voor mengsels, waarin verschillende soorten vulstof zijn verwerkt. In Tabel XXX blijkt, dat van de mengsels, welke alle 20 gew. dln. vulstof op 80 gew. dln. zand bevatten, die met kalksteenpoeder II, met Clinkerdust en met vliegensch, drie uitgesproken zachte vulstoffen, een abnormaal lage waarde van φ_e vertoonen. Wij zien hierin een bevestiging van de in § 4 geponeerde stelling, dat de hardheid van het materiaal, waaruit de vulstof is samengesteld, de grootte van het contactvlak, en diensgevolge de spanning in dit vlak beïnvloedt tengevolge waarvan een vulstof uit een zacht materiaal bestaande, een grooter contactvlak vulstof-skeletdeel, dus een geringeren contactdruk en sterkere smerende werking van het bitumen en een sterkere verlaging van den hoek van inwendige wrijving van het mengsel zal bezitten, dan een vulstof uit een hard materiaal. De gevonden verschillen wijzen erop, dat tusschen twee skeletdeelen nog vulstof aanwezig moet zijn.

HOOFDSTUK IX.

Invloed van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.

§ 1. *Inleiding.*

In de vorige hoofdstukken werd nagegaan op welke wijze het bindmiddel resp. de vulstof den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels beïnvloedt. Thans zal de invloed van het grovere aggregaat, waaronder wij al het aggregaat dat grover is dan de vulstof verstaan, worden besproken.

Door verschillende onderzoekers (o.a. 53) zijn verschillende eigenschappen van het grovere aggregaat en van de granulometrische samenstelling, waaraan het dient te voldoen, beschreven. Een bespreking van de onderzoekingen, waarbij de eigenschappen van het mineraal, waaruit het is samengesteld, worden bepaald, zal hier achterwege blijven. Een bespreking der verschillende proeven werd door NELLENSTEYN en LOMAN (58) gegeven.

Van Duitsche zijde (HERRMANN, zie (95), pag. 374 e.v.) werd er op gewezen, dat bij een bepaalde granulometrische samenstelling van het aggregaat de verbrijzeling van de korrels, welke onder hooge drukken optreedt, relatief gering is. Deze verbrijzeling neemt evenwel slechts ernstige vormen aan, indien drukken van meerdere honderden kg/cm² worden uitgeoefend, zoodat de omstandigheden bij deze proeven zeer ver afwijken van die der practijk.

Het verdient volgens hem aanbeveling de granulatie van het aggregaat zoodanig te kiezen, dat de in de korrelstapeling overblijvende holle ruimte zoo gering mogelijk is. Hij beoogt hierdoor een samenstelling van het mengsel te verkrijgen, bij welke de hoeveelheid bitumen, welke dient te worden toegevoegd om een dicht materiaal te verkrijgen, zoo gering mogelijk is, hetgeen economische voordeelen biedt, terwijl bovendien aan het aanwezige bitumen een zoo groot mogelijk aggregaatoppervlak wordt geboden, zoodat volgens zijn redeneering dit bitumen in een dunne laag aanwezig is en een materiaal met gunstige mechanische eigenschappen wordt verkregen.

De door dezen onderzoeker gepropageerde zgn. Minimum-holle

ruimte-kromme, sluit aan bij de voor cementbeton aanbevolen zeefkrommen van GRAF, FULLER en HERRMANN (zie 31) en wijkt slechts weinig af van de granulometrische samenstelling van het aggregaat, waarbij weinig korrelverbrijzeling optreedt.

Een verband tusschen de mechanische eigenschappen der bitumen-mineraalaggregaat-mengsels en de zeefkrommen wordt door bovengenoemden onderzoeker niet aangetoond.

Door verschillende andere onderzoekers op dit gebied, o.a. JOHANNSEN (40), wordt het standpunt ingenomen, dat op deze wijze mengsels worden verkregen, welke een te geringe hoeveelheid bitumen bevatten. Men heeft dit wel geformuleerd door te stellen, dat het mineraalaggregaat voldoende holle ruimte moet bezitten om een zekere minimum hoeveelheid bitumen in onschadelijken vorm te kunnen opnemen.

Ook STELLWAAG (84) wijst er op, dat de beste resultaten in de praktijk verkregen worden met mengsels, waarvan de granulometrische samenstelling vrij aanzienlijk afwijkt van die, welke de geringste holle ruimte in het aggregaat geeft. Hij geeft twee redenen aan voor deze afwijkingen, welke redenen betrekking hebben op den invloed van onnauwkeurigheden bij de bereiding der mengsels en op moeilijkheden bij de comprimeering (het walsen) der mengsels.

Beide argumenten liggen buiten het bestek van deze studie, zoodat wij hier met de vermelding meenen te moeten volstaan.

Reeds vroeger werd door RICHARDSON (78) in zijn bekende boek zeer duidelijke aanwijzingen gegeven omtrent de meest gewenschte granulometrische samenstelling van het aggregaat. Hij bepaalde weliswaar niet de mechanische eigenschappen der bitumineuze mengsels en baseerde zijn aanbeveling op het gedrag der door hem geobserveerde mengsels in de praktijk, doch zijn conclusies worden wel degelijk, evenals later die van STELLWAAG, door de mechanische eigenschappen der mengsels beïnvloed. De door hem aangegeven zeefkromme voor asphaltemortel-mengsels treft men thans nog onveranderd in verschillende voorschriften aan.

Door EWERS (21) werden later proeven uitgevoerd, waarbij deze onderzoeker met behulp van drukvastheidsbepalingen en trekproeven naging, op welke wijze de dichtheid van het aggregaat de mechanische eigenschappen der mengsels beïnvloedt. Uit zijn proeven, welke beperkt bleven tot asphaltemortel-mengsels, trekt hij de

conclusie, dat de mengsels met het dichtste aggregaat den grootsten weerstand tegen deformatie bezitten.

§ 2. *Theoretische beschouwingen.*

Indien men den invloed van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformaties van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels wil nagaan, dient men zich wel te realiseeren, dat dit grove aggregaat door meerdere eigenschappen gekarakteriseerd wordt.

Wij onderscheiden korrelgrootte, korrelvorm, hoeveelheid materiaal van eenzelfde of van verschillende korrelgrootte (concentratie resp. zeefkromme) en het fysisch-chemisch karakter van het aggregaat.

Na hetgeen bij het vulstofonderzoek is gebleken, kunnen wij zonder meer aannemen, dat noch de chemische samenstelling van het aggregaat, noch de eigenschappen van het oppervlak van het aggregaat den weerstand van het bitumineuze mengsel zal beïnvloeden. Wel is het mogelijk, dat de hardheid van het gesteente, waaruit het aggregaat bestaat, een zekeren invloed heeft op de waarde van den hoek van inwendige wrijving, waarbij een gesteente met een lagere hardheid een lagere waarde voor de wrijving zou moeten bezitten, daar onder deze omstandigheden een contactvlak van grootere afmetingen wordt gevormd, hetgeen tot lagere contactspanningen aanleiding geeft, zooals in Hoofdstuk VIII § 4 is besproken.

Gaan wij na, op welke wijze de verschillende variabelen de eigenschappen van het mengsel kunnen beïnvloeden, dan komen wij tot het volgende:

A. *Invloed van de korrelgrootte.*

Denken wij ons een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel, waarin zooveel grof aggregaat van een enkele korrelgrootte D is verwerkt, dat dit grove aggregaat een skelet vormt. Wijziging van de korrelgrootte zal, naar verwacht wordt, op de eigenschappen der mengsels den volgende invloed hebben.

a. *Hoek van inwendige wrijving.*

De straal van het contactvlak tusschen twee korrels van het grove

aggregaat wordt bij elastische deformatie van het aggregaat aangegeven door de formule van HERTZ (zie 48, p. 321)

$$a^3 = \frac{3P}{4} \frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \dots \dots \dots (52)$$

of

$$a^3 = \frac{3\pi D^2 \sigma}{8 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} \dots \dots \dots (76)$$

waarin P vervangen is door

$$P = \frac{\pi D^2 \sigma}{4}$$

(σ = druk per cm^2 op het mengsel.)

Voor bolvormig aggregaat zal ten naastebij gelden:

$$D = 2 r_1 = 2 r_2,$$

waardoor de formule overgaat in:

$$a^3 = \frac{3\pi D^3 \sigma}{32} \frac{1}{E'} \dots \dots \dots (77)$$

De spanning σ' in het contactvlak is omgekeerd evenredig met de waarde van a , en evenredig met P , zoodat

$$\sigma' = \frac{P}{\pi a^2} = 4 \sigma'^{1/3} \sqrt[3]{\left(\frac{E'}{6\pi} \right)^2} \dots \dots \dots (78)$$

De spanning is dus onafhankelijk van de korrelgrootte en zal slechts weinig worden beïnvloed door de normaalspanning σ in het materiaal.

Voor hoekig aggregaat kan men aannemen, dat de waarde van r_1 onafhankelijk is van de afmetingen der korrels, terwijl de korrels veelal met de punt tegen een vlakke zijde van een andere korrel zullen raken (fig. 9).

De formules gaan dan over in:

$$a^3 = \frac{3\pi D^2 \sigma}{8 \frac{1}{r_1}} \frac{1}{E'} \dots \dots \dots (79)$$

$$\sigma' = D^{2/3} \sigma^{1/3} \sqrt[3]{\left(\frac{E'}{3\pi r_1}\right)^2} \dots \dots \dots (80)$$

Wij vinden hier denzelfden invloed van de normaalspanning op de waarde van σ' als bij rond aggregaat, doch tevens een toename



Fig. 9.

van σ' met toenemende korrelgrootte. Daar r_1 klein is, zullen deze laatste waarden hooger zijn dan die van formule (78), zoodat de waarde van φ_e , indien eenige smering optreedt, voor hoekig aggregaat, hooger zal zijn dan die van rond aggregaat.

Ook voor die omstandigheden, waarbij de hardheid van het materiaal maatgevend wordt voor de waarde van φ_e , (men vergelijkte pag. 148), zal deze waarde waarschijnlijk hooger zijn voor hoekig dan voor rond aggregaat.

β . *Initiaalweerstand.*

Bij de beschouwingen van Hoofdstuk IV werd de initiaalweerstand omschreven als dat deel van den schuifweerstand, dat bij afwezigheid van COULOMB'schen wrijvingsweerstand en viskeuzen weerstand door het materiaal ontwikkeld wordt.

In Hoofdstuk VI, § 10, werd deze initiaalweerstand gesplitst in een van de eigenschappen van het bindmiddel afhankelijk deel (den bitumineuzen initiaalweerstand) en een haakweerstand. De waarde van dezen laatste werd bepaald aan mengsels, welke geen bindmiddel bevatten.

In de Hoofdstukken VII en VIII werd aangetoond, dat de waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand nauw samenhangt met de

eigenschappen van de fijnste aggregaatdeelen, de zgn. vulstof en die van het bindmiddel. De waarde van den haakweerstand bleek in Hoofdstuk VI, § 10, zeer gering te zijn voor aggregaat-samenstellingen, welke geen materiaal grover dan zand bevatten, doch aanzienlijk grooter te zijn voor mengsels, waarin grover aggregaat was verwerkt.

Bij de bestudeering van den invloed van het grove aggregaat op den initiaalweerstand van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels dienen wij dus onze aandacht te richten op dezen haakweerstand, welke wordt toegeschreven aan het in elkaar grijpen der aggregaatdeelen.

Bij beweging der omringende massa zal een dergelijk aggregaatdeel aan een roteerende beweging worden onderworpen. De weerstand tegen rotatie, welke elke korrel ontwikkelt, zal afhankelijk zijn van de krachten, welke het omgevende materiaal op de korrel uitoefent. Deze weerstand zou het gevolg kunnen zijn van het optreden van den bitumineuzen initiaalweerstand langs het oppervlak van het roteerende aggregaatdeel, in welk geval de waarde van den haakweerstand met den bitumineuzen initiaalweerstand lineair zou moeten toenemen. Uit het experimenteele materiaal zal moeten blijken, of deze opvatting met de feiten in overeenstemming is.

Daarnaast meenen wij op een tweede verklaring voor het optreden van den haakweerstand te moeten wijzen. Bij de rotatie van het aggregaatdeeltje zal de druk, welke op de omliggende korrels wordt uitgeoefend, gaan afwijken van den druk, die met de homogene spanningsverdeeling in het materiaal overeenkomt. Door deze afwijkingen zal een moment ontstaan, dat de rotatie van het deeltje tegengaat, zoodat een haakweerstand tot ontwikkeling kan komen. Indien de spanningstoestand in het materiaal zoodanig is, dat tusschen de korrels steeds een drukspanning aanwezig blijft, dan zal de locale verstoring van den homogenen spanningstoestand geen invloed hebben op de waarde van den wrijvingsweerstand. Wordt evenwel plaatselijk de druk tusschen twee korrels ten gevolge der rotatie opgeheven, dan zal de ontwikkeling van den haakweerstand afhankelijk zijn van den spanningstoestand.

In dit geval zal bij lage waarden van de normaalspanning de haakweerstand niet volledig tot ontwikkeling komen, terwijl de aanwezigheid van een haakweerstand ondenkbaar is, indien het materiaal op trek wordt belast.

Zijn de korrels verbonden door een medium, dat in staat is trekspanningen op te nemen — en hiertoe is een vulstof-bitumenmengsel ongetwijfeld in staat — dan is het mogelijk, dat bij lage waarden van de gemiddelde hoofdspinning wel de haakweerstand volledig tot ontwikkeling komt, terwijl de wrijvingsweerstand geen verandering ondergaat. In dit geval is het mogelijk, dat een haakweerstand tot ontwikkeling komt, indien in het materiaal trekspanningen optreden.

Wij wijzen er op, dat uit de resultaten der celproeven blijkt — men zie de grafieken I, II en III — dat in het bij deze proeven onderzochte spanningsgebied de haakweerstand geheel tot ontwikkeling is gekomen, zoodat aan de in Hoofdstuk IV, § 1, gestelde voorwaarden wordt voldaan.

Wij kunnen ons de krachten, welke voor al deze gevallen de rotatie van een aggregaatdeeltje trachten tegen te gaan, gelijkmatig over den omtrek van de korrel verdeeld denken. Het draaiend moment op een enkele korrel uitgeoefend, zal dan bedragen:

$$\tau_g D^2 \times aD = a\tau_g D^3 \quad (81)$$

waarin τ_g de gelijkmatig aangrijpende spanning voorstelt,

D de korrelgrootte en

a een constante, welke van den vorm van de korrel afhankelijk is.

De arm, waaraan dit moment werkt, bedraagt bD , ($b =$ wederom een van den korrelvorm afhankelijke constante), zoodat de dwarskracht, welke in elke korrel optreedt, groot is:

$$\tau' = \frac{a\tau_g D^3}{bD} = \frac{a}{b} \tau_g D^2 \quad (82)$$

In een materiaal, dat geheel uit aggregaatdeelen van de afmeting D is opgebouwd, zal in een doorsnede het aantal korrels evenredig zijn met D^{-2} , zoodat de haakweerstand zal bedragen

$$\tau_h = \frac{a}{b} \tau_g D^2 \times D^{-2} c = \frac{ac}{b} \tau_g \quad (83)$$

(c is een constante, welke het aantal korrels per cm^2 voor $D = 1 \text{ cm}$ aangeeft).

Uit deze berekening blijkt, dat de waarde van den haakweerstand, indien de gestelde hypothesen juist zijn, van de korrelgrootte D onafhankelijk zou moeten zijn. Uit de experimenteele resultaten zal moeten blijken, of dit inderdaad bevestigd wordt.

Het is in ieder geval te verwachten, dat de vorm van de korrel invloed zal hebben op de waarde van den haakweerstand. Bij hoekig aggregaat zal het draaiend moment op een korrel grooter zijn dan bij rond aggregaat, dat door eenzelfde zeefopening passeert, daar bij hoekig aggregaat de verstoring van den homogenen spannings-toestand ernstiger zal zijn dan bij rond aggregaat, hetgeen een hoogere waarde van τ_h ten gevolge moet hebben.

γ. Viscositeit der massa.

Denkt men zich de aggregaatdeelen omhuld door een laag vloeistof van een dikte δ , welke vloeistof in elk punt van het schuifvlak eenzelfde weerstand tegen vloeï ontwikkelt, dan zal de weerstand tegen vloeï in een doorsnede kunnen worden berekend op analoge wijze als dit in Hoofdstuk VIII, § 5, bij de bespreking van den invloed van de deeltjesgrootte van de vulstof is geschied. In het onderhavige geval zal evenwel de viscositeit der massa niet alleen bepaald worden door den weerstand per eenheid van doorsnede, doch tevens door de dikte van de lamellen, welke als een vaste stof met de vloeistof mede verplaatst worden. De dikte van deze lamellen zal van de korrelgrootte afhankelijk zijn. Wij nemen aan, dat zij daarmede evenredig is. Het aantal bewegende vloeistoflagen tusschen de lamellen zal met de dikte dezer lamellen omgekeerd evenredig zijn, indien de vloeï der massa gelijkmatig over de bewegende lagen verdeeld is.

In Hoofdstuk VIII, § 5, werd afgeleid, dat bij een constanten weerstand per eenheid van doorsnede van de vloeibare stof, welke de korrels omhult, de weerstand van het materiaal omgekeerd evenredig zou moeten zijn met de korrelgrootte. Uitgaande van dezelfde veronderstelling komt men, indien men rekening houdt met het aantal lamellen, tot de waarschijnlijkheid, dat de viscositeit der massa onafhankelijk zal zijn van de korrelgrootte.

B. Invloed van de hoeveelheid grof aggregaat.

Beschouwen wij thans bitumen-mineraalaggregaat-mengsels,

waarin naast grof aggregaat zooveel fijn is verwerkt, dat het grove aggregaat geen doorgaand skelet meer vormt, doch min of meer geïsoleerd in de massa geplaatst is.

Met toenemende hoeveelheid grof aggregaat gaat dit systeem in het vorige over. De invloed van de hoeveelheid grof aggregaat komt op de volgende wijze tot uiting:

a. Hoek van inwendige wrijving.

Indien het materiaal zeer weinig grof bevat, zal de waarde van den hoek van inwendige wrijving gelijk zijn aan die van het mortelmengsel. Indien het grove aggregaat in zoo groote hoeveelheid aanwezig is, dat het een skelet kan vormen, dan zal de hoek van inwendige wrijving worden bepaald door het grove aggregaat.

Is het grove aggregaat rond van vorm (b.v. grind), dan zal dit een verlaging van de waarde van den hoek van inwendige wrijving t.o.v. die van de mortel ten gevolge hebben; is het aggregaat hoekig, dan zal een hogere waarde van φ_e verkregen worden.

De hoeveelheid grof aggregaat, die noodig is om deze skeletvorming mogelijk te maken, is niet nauwkeurig aan te geven, doch zal naar schatting zeker 30 à 40 vol. dln split op 100 vol. dln materiaal bedragen.

β. Initiaalweerstand.

Indien de haakweerstand evenredig is met den bitumineuzen initiaalweerstand, zal de waarde van den haakweerstand tevens evenredig zijn met het aantal deeltjes grof aggregaat per eenheid van doorsnede. Stel het volume van het grof aggregaat bedraagt C vol. dln per vol. deel gecompriëerd mengsel, (wij noemen verder C de concentratie van het grove aggregaat), dan zal het aantal deeltjes grof per eenheid van doorsnede bedragen $C^{2/3}$, zoodat de toename van de waarde van den haakweerstand met $C^{2/3}$ evenredig zou moeten zijn.

Is de waarde van den haakweerstand afhankelijk van de afwijking van den homogenen spanningstoestand in de nabijheid van het grove aggregaatdeeltje, dan zal wederom de haakweerstand evenredig zijn met $C^{2/3}$, doch het is waarschijnlijk, dat de mate, waarin de spanningstoestand verstoord wordt en dientengevolge de waarde van den haakweerstand, beïnvloed wordt door de eigenschappen

van het omliggende aggregaat. Het meest voor de hand ligt een toenemende waarde van den haakweerstand, naarmate het omringende aggregaat grover en hoekiger is. Bij lage waarden van C , waarbij de grove aggregaatdeelen door zandkorrels worden gesteund, verwachten wij daarom een geringere toename van den haakweerstand met toenemende concentratie, dan bij hogere waarden van C , waar de grove aggregaatdeelen tegen elkaar steunen. Het experiment zal moeten aantonen of dergelijke verschijnselen optreden.

γ. *Viscositeit der massa.*

Indien kleine hoeveelheden grof aggregaat in het mengsel aanwezig zijn, kan men zich deze grove deelen als vaste lichamen bevestigend denken in een vloeibare stof, welke door bitumen en fijn mineraalaggregaat wordt gevormd. Bij grootere concentratie van het grove aggregaat zal ongetwijfeld sterische hindering optreden. Door EILERS en VAN DIJCK (17) is, voortbouwende op het werk van andere onderzoekers, een formule opgesteld, welke het verloop van de viscositeit van een systeem, waarvan de gedispergeerde phase uit vaste bolvormige deeltjes van gelijken diameter bestaat, bij verschillende concentraties der gedispergeerde phase zeer goed beschrijft.

Deze formule schrijven wij:

$$\eta_m = \eta_0 \left(1 + \frac{1,25 C}{1 - a C} \right)^2 \dots \dots \dots (84)$$

waarin η_m = viscositeit der massa

η_0 = viscositeit der disperse phase

C = concentratie (vol. %) der gedispergeerde phase

a = een constante, wier waarde afhankelijk is van de concentratie, waarbij de dichtste stapeling van de gedispergeerde phase bereikt wordt ($a = 1,35$ bij een gedispergeerde phase, welke uit bolvormige lichamen van gelijkmatigen diameter bestaat, en zal voor gegraneleerd, hoekig materiaal een lagere waarde bezitten).

C. *Invloed der granulatie van het grove aggregaat.*

Wij beschouwen thans mengsels, waarvan het grove aggregaat bestaat uit korrels van verschillende afmetingen en gaan na, welke

invloed van de granulometrische samenstelling van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie van het mengsel op grond van theoretische beschouwingen verwacht kan worden.

In het voorgaande werd er op gewezen, dat er geen redenen zijn om aan te nemen, dat de invloed van de korrelgrootte op de drie fundamenteele fysieke grootheden, welke het gedrag van het materiaal gedurende plastische deformatie omschrijven, van groot belang zal zijn (zie sub A).

Wel zijn er redenen om te veronderstellen, dat de invloed van de hoeveelheid grof aggregaat aanzienlijk zal zijn.

Het ligt daarom in de lijn der verwachting, dat de granulometrische samenstelling van het grove aggregaat voornamelijk de materiaaleigenschappen zal beïnvloeden ten gevolge van de hoeveelheid grof aggregaat, welke bij verschillende granulometrische samenstelling er van in een mengsel kan worden verwerkt. In dit verband dient ook aan de afmetingen van het grofste aggregaat een zeker belang te worden toegekend, daar in het algemeen de hoeveelheid grof aggregaat, die in een mengsel wordt verwerkt in de practijk grooter is, naarmate het grofste aggregaat grooter afmetingen heeft.

§ 3. *Onderzoek naar den invloed van de afmetingen van grof aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels, waarin grof aggregaat van een enkele korrelgrootte is verwerkt.*

Dit onderzoek werd uitgevoerd met hoekig aggregaat (split) en rond aggregaat (grind) van de afmetingen 0—2 mm, 3—6 mm en 9—12 mm. Aan het aggregaat werd toegevoegd:

bitumen uit Venezolaansche grondstof
bitumen + vulstof
bitumen + zand

in de hoeveelheid, die voor de mengsels met alleen bitumen noodig was om het aggregaat goed te omhullen, terwijl voor de andere mengsels zooveel werd toegevoegd als noodig was, om een materiaal met eenige vol. % holle ruimte na comprimeering te verkrijgen. Daarbij werd de samenstelling zoodanig gekozen, dat de verhouding vulstof-bitumen resp. zand-bitumen bij de verschillende mengsels steeds dezelfde was.

Met de uit deze mengsels, waarvan de samenstelling in Tabel XXXII is aangegeven, bereide proeflichamen werden celproeven uitgevoerd bij $+20^{\circ}\text{C}$ en bij $+40^{\circ}\text{C}$.

TABEL XXXII.

Samenstelling in gew. dln. der mengsels met grof aggregaat, waarvan de holle ruimte op verschillende wijze gevuld is.

	Grof aggregaat		Zand	Vulstof	Bitumen Mexphalte 50/60	C Concentratie grind resp. split (in vol. dln.)
	Afmetingen m.m.	Hoeveelheid				
Split	9/12	100	—	—	1.5	0.59
		81	—	19.0	9.5	0.58
		80	20	—	10.0	0.30
	3/6	100	—	—	2.0	0.58
		77	—	23.0	11.5	0.49
		80	20	—	10.0	0.54
	0/2	100	—	—	3.0	0.59
		80.6	—	19.4	9.7	0.56
		80	20	—	9.7	0.51
Grind	9/12	100	—	—	1.5	0.64
		80.6	—	19.4	9.7	0.62
		80	20	—	9.7	0.59
	3/6	100	—	—	2.5	0.63
		80.6	—	19.4	9.7	0.62
		80	20	—	9.7	0.59
	0/2	100	—	—	2.5	0.63
		80	—	20.0	10.0	0.61
		80	20	—	10.0	0.59

In de tabel is bijgevoegd de waarde van C, de concentratie van het grind resp. split.

De resultaten der proeven zijn in Tabel XXXIII verzameld.

In deze tabel zijn verder aangegeven de penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur en de waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand voor mengsels met denzelfden FB-factor en denzelfden HR-factor bij een penetratie van 22 resp. 105. Met behulp van de

TABEL XXXIII.

Eigenschappen van de mengsels van Tabel XXXII.

Samenstelling	Proef-temp. in °C	Proefresultaten			Pen. proef-temp.	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises voor pen. = 22 resp. 105	τ_b voor penetratie als bij proef temperatuur kg/cm ²	τ_h kg/cm ²	C Concen- tratie grind resp. split in vol. dl.
		φ_e	τ_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises					
Split 9/12 + bit.	20	31°	0.45	32	15	23	0	0.45	0.59
	40	31°	0.40	15	59	11	0	0.40	
3/6	20	31°	0.55	31	16 $\frac{1}{2}$	25	0	0.55	0.58
	40	30°	0.50	18	74	14	0	0.50	
0/2	20	30°	0.55	41	15	30	0	0.55	0.59
	40	30°	0.55	21	69	14	0	0.55	
.. 9/12 + vulst. + bit.	20	30°	1.1	44	23	50	0.70	0.40	0.58
	40	30°	0.60	24	160	25	0.30	0.30	
3/6	20	24°	2.00	71	20	68	1.20	0.80	0.49
	40	29°	1.30	26	94	29	0.40	0.90	
0/2	20	26°	2.75	84	21	83	1.00	1.75	0.56
	40	30°	1.30	36	127	37	0.95	0.95	
.. 9/12 + zand + bit.	20	31°	0.80	47	22	47	0	0.80	0.60
	40	32°	0.50	25	123	25	0	0.50	
3/6	20	34°	1.30	55	22	55	0	1.30	0.54
	40	32°	1.10	28	117	28	0	1.10	
0/2	20	31°	1.50	72	18 $\frac{1}{2}$	63	0	1.50	0.51
	40	32°	0.50	30	98	27	0	0.50	
Grind 9/12 + bit.	20	26°	0.30	22	11 $\frac{1}{2}$	13	0	0.30	0.64
	40	26°	0.30	15	36	7 ⁵	0	0.30	
3/6	20	24°	0.25	24	11 $\frac{1}{2}$	14	0	0.25	0.63
	40	24°	0.25	16	36 $\frac{1}{2}$	8	0	0.25	
0/2	20	28°	0.25	21	17 $\frac{1}{2}$	18	0	0.25	0.63
	40	24°	0.25	11	86	9 ⁵	0	0.25	
.. 9/12 + vulst. + bit.	20	25°	1.60	60	25	60	0.90	0.70	0.62
	40	24°	0.80	20	169	22	0.40	0.40	
3/6	20	23°30'	1.60	64	24	64	0.90	0.70	0.62
	40	26°	0.80	23	134	24	0.40	0.40	
0/2	20	25°	1.40	76	27	76	0.70	0.70	0.60
	40	20°	0.80	26	169	27	0.40	0.40	
.. 9/12 + zand + bit.	20	30°	0.45	37	22	36	0	0.45	0.59
	40	30°	0.40	18	131	18	0	0.40	
3/6	20	27°	1.00	45	22	45	0	1.00	0.59
	40	30°	0.35	22	137	22	0	0.35	
0/2	20	26°	0.20	48	21	48	0	0.20	0.59
	40	28°	0.00	23	126	33	0	0.30	
Asphalmmortel	20		1.05	81	22	81		0.10	
	40		0.40	31	106	31		0.10	

waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand is de haakweerstand berekend. Tevens is de waarde van de viscositeit der massa herleid tot die, behorende bij een penetratie = 22 (bij 20° C), resp. 105 (bij 40° C) van het bitumen bij proeftemperatuur. Dit laatste is geschied om bij vergelijking der waarden van η_m de verschillen ten gevolge van verschillende penetraties van het bitumen bij proeftemperatuur te elimineeren.

a. Hoek van inwendige wrijving.

Uit de cijfers van Tabel XXXIII blijkt, dat de waarde van den hoek van inwendige wrijving van de mengsels met rond aggregaat kleiner is dan die van de mengsels met hoekig aggregaat, nl. ca. 26° tegen ca. 30°, hetgeen in overeenstemming is met hetgeen in § 2 onder A sub α werd afgeleid.

De invloed van de afmetingen van het aggregaat op de waarde van φ_e blijkt zeer gering te zijn, zoodat ook op dit punt de berekeningen van dezelfde § experimenteel bevestigd worden.

Verder volgt uit de cijfers, dat de waarden van φ_e voor de mengsels van grind resp. split + zand + bitumen wat hooger zijn dan voor de andere onderzochte mengsels, welke onderling weinig verschillen voor proeven met eenzelfde type aggregaat.

β . Initiaalweerstand.

Bij het uitwerken der proefresultaten bleek, dat in meerdere gevallen de MOHR'sche cirkel met de kleinste verticale hoofdspanning niet aan de gemeenschappelijke raaklijn der andere cirkels raakt, hetgeen o.i. er op wijst, dat bij deze mengsels, die een zeer abnormale samenstelling bezitten, de ontwikkeling van den haakweerstand slechts zeer geleidelijk met toenemende spanning plaats vindt. Dit verschijnsel wijst er op, dat de in § 2 onder A, sub γ , ontwikkelde verklaring omtrent het ontstaan van den haakweerstand zeker gegrond is.

Uit Tabel XXXIII blijkt, dat de mengsels, welke split bevatten, een haakweerstand bezitten, welks waarde weinig door de korrelgrootte wordt beïnvloed, en ca. 0,50 kg/cm² bedraagt, hetgeen qua grootteorde in goede overeenstemming is met de in Hoofdstuk VI, § 10 gevonden waarden.

Uit de tabel volgt verder, dat de concentratie C van het grove

aggregaat in de thans onderzochte mengsels weinig varieert, hetgeen de onderlinge vergelijking der resultaten vergemakkelijkt.

Het blijkt uit de resultaten, dat de waarde van τ_h weinig wordt beïnvloed door de eigenschappen van het bitumen, resp. zand-bitumen mengsel, waarmede het is gemengd. Over den invloed van de eigenschappen van het vulstof-bitumen mengsel op de waarde van den haakweerstand zal in een latere § gesproken worden. De hier gegeven cijfers wijzen er op, dat de waarde van τ_h met toenemende waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand toeneemt, zooals ook op theoretische gronden werd verwacht.

Dit geldt zoowel voor hoekig aggregaat (split) als voor rond aggregaat (grind). Voor het laatste aggregaat is de waarde van den haakweerstand, zooals verwacht werd, lager dan voor hoekig aggregaat en bedraagt ca. 0,35 kg/cm² tegen 0,55 kg/cm². Dit verschil is geringer dan wij verwacht hadden.

Het valt op, dat voor de mengsels met grind een niet onbelangrijke waarde van den haakweerstand wordt gevonden, welke waarde van de korrelgrootte onafhankelijk is, terwijl voor de mengsels met zand (zie Hoofdstuk VI, § 10, sub β), de waarde van den haakweerstand slechts 0,1 kg/cm² bedroeg. Wij meenen deze verschillen evenwel niet aan de korrelgrootte, doch aan den vorm der korrels te moeten toeschrijven, daar in het grove grind als regel een aantal korrels wordt aangetroffen, waarvan de vorm vrij sterk van den bolvorm afwijkt, terwijl dit in zand in aanzienlijk mindere mate het geval is.

Wij hebben er van afgezien kwalitatief en kwantitatief den vorm van het ronde aggregaat te bepalen op een wijze, zooals dit b.v. in HARMONDSWORTH (53) is uitgevoerd, daar in de practijk de levering van grind van een bepaalden korrelvorm niet uitvoerbaar is. Bij split wordt door de bereiding van het materiaal de zekerheid verkregen, dat een aggregaat van hoekigen vorm wordt geleverd.

γ . Viscositeit der massa.

Bij beschouwing van Tabel XXXIII blijkt, dat voor iedere groep proeven de waarde van de viscositeit der massa slechts in geringe mate toeneemt, naarmate de afmetingen van het grove aggregaat kleiner worden. Hier wordt dus de in § 2, sub γ geuite verwachting

bevestigd. In grafieken XIV a/b zijn de waarden van η_m op dubbel logarithmische schaal uitgezet tegen de korrelgrootte. Voor deze laatste is aangehouden de gemiddelde waarde van de openingen der maaszeven, met behulp waarvan de betreffende fracties van het overige aggregaat zouden kunnen worden gescheiden.

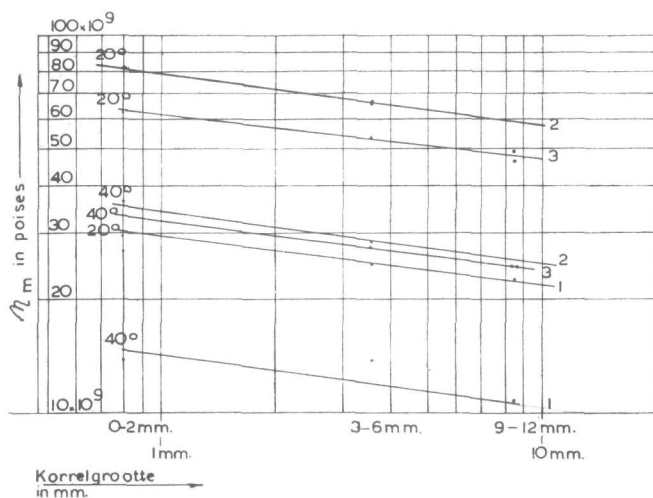
In werkelijkheid is het zeven over rondzeven geschied, zoodat een herleiding der fractiegrenzen noodig was.

Deze herleiding is volgens ROTHFUCHS (79) geschied en gaf de volgende waarden:

Fractie 0— 2 mm (rondzeef)	=	0,8 mm (maaszeef)
3— 6 „ „	=	3,5 „ „
9—12 „ „	=	8,3 „ „

GRAFIEK XIVa.

Verband tusschen η_m (in poises) voor pen = 22 resp. pen = 105 en de korrelgrootte voor splitmengsels.



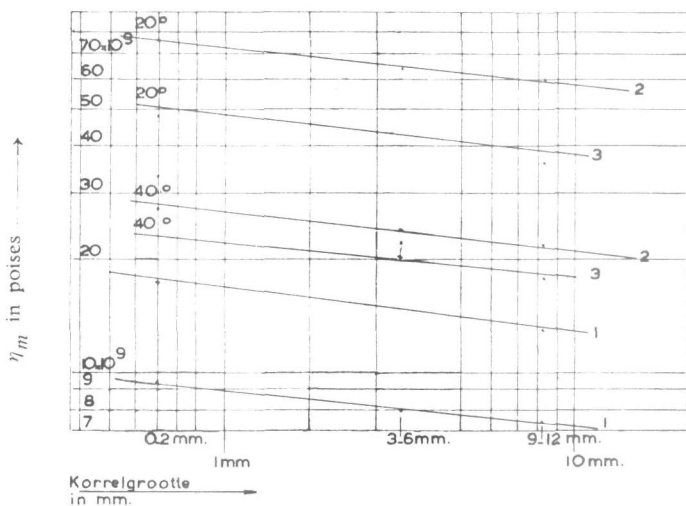
- 1 Split + bitumen.
- 2 Split + vulstof + bitumen.
- 3 Split + zand + vulstof + bitumen.

In de grafieken worden nu evenwijdige rechte lijnen gevonden voor series proeven, waarbij de korrelgrootte van het grove aggregaat gevarieerd werd. De helling dezer lijnen bedraagt — 0,14 tegen de

abscis en is onafhankelijk van den vorm van het verwerkte grove aggregaat. Men kan dus op eenvoudige wijze de viscositeit der

GRAFIEK XIVb.

Verband tusschen η_m (in poises) voor pen = 22 resp. pen = 105 en de korrelgrootte voor grindmengsels.



- 1 = Grind + bitumen.
 2 = Grind + vulstof + bitumen.
 3 = Grind + zand + vulstof + bitumen.

massa van een mengsel met korrels van een willekeurige grootte herleiden tot die van een mengsel met korrels van een andere afmeting. Wij zullen de waarde van η_m , waar noodig, herleiden tot die van mengsels met korrels van 10 mm.

Het blijkt uit de grafieken, dat grotere hardheid van het bindmiddel voor mengsels met een bepaalde aggregaatsamenstelling hogere waarden voor de viscositeit der massa geeft dan een bitumen van geringere hardheid.

Daarnaast blijkt, dat de toevoeging van fijn aggregaat een grooten invloed heeft op de waarde van η_m . Bij toevoeging van fijn aggregaat aan het mengsel wordt de waarde van η_m sprongsgewijs verhoogd, waarbij eenzelfde invloed van korrelgrootte en hardheid van het bitumen wordt gevonden als voor mengsels, waarin dit fijne

aggregaat ontbreekt. Wij meenen dit feit op de volgende wijze te moeten verklaren.

De vloeibare stof, welke tusschen de grove aggregaatdeelen aanwezig is, bestaat in het eene geval uit bitumen, in het andere geval uit bitumen + vulstof resp. zand.

Evenals de viscositeit van het bitumen een zekeren invloed heeft op de viscositeit der massa, beïnvloedt de viscositeit van het mengsel bitumen + fijn aggregaat die viscositeit. Wij hebben dus te doen met een systeem, waarin het grove aggregaat omhuld wordt door een vloeibare stof, welke laatste eventueel nog aggregaat als vaste phase kan bevatten.

De waarden van de viscositeit der massa voor mengsels met een korrelgrootte van 10 mm. zijn in Tabel XXXIV samengevat.

TABEL XXXIV.

Waarde van $\eta_m \times 10^{-9}$ poises voor $D = 10$ mm.
(penetratie 22 resp. 105).

Samenstelling	Pen.			Pen.	
	22	105		22	105
Grind + bitumen	13	7	Split + bitumen	21 ⁵	11
„ + vulstof + bit.	56	21	„ + vulstof + bit.	55	25
„ + zand + bit.	37	17 ⁵	„ + zand + bit.	45	23

Uit de tabel blijkt, dat merkwaardigerwijs de waarden van de viscositeit der massa voor mengsels met grind resp. split, vulstof en bitumen, en die van mengsels met grind resp. split, zand en bitumen betrekkelijk weinig verschillen bij gelijke penetratie van het bitumen. De bespreking van dit verschijnsel zal in de volgende § geschieden.

Verder blijkt, dat de viscositeit der massa van mengsels, die split als grof aggregaat bevatten, hooger is dan die van overeenkomstige mengsels met rond aggregaat.

Bij toevoeging van vulstof blijkt dit verschil, waarvoor wij geen verklaring kunnen geven, geringer te worden.

δ. Samenvatting.

Uit dit onderzoek blijkt, dat de haakweerstand toegeschreven moet worden aan de afwijkingen van den homogenen spannings-toestand, welke een gevolg is van de op de korrels werkende momenten, terwijl aanwijzingen verkregen worden, dat ook de bitu-

mineuze initiaalweerstand de waarde van den haakweerstand beïnvloedt. Dit verschijnsel treedt op bij aggregaat, dat van den bolvorm afwijkt. In de practijk zal slechts zekerheid omtrent het optreden van den haakweerstand bestaan bij het verwerken van gebroken aggregaat. De korrelgrootte is niet van belang.

De waarde van de viscositeit der massa blijkt voornamelijk afhankelijk te zijn van de viscositeit van de vloeibare stof, welke het grove aggregaat omhult. Deze vloeibare stof kan zoowel alleen uit bitumen als uit bitumen + vulstof resp. zand bestaan.

De afmetingen van het grove aggregaat beïnvloeden de waarden van de viscositeit der massa weinig, doch er bestaat voor mengsels zonder vulstof een niet verklaard verschil tusschen de waarden van η_m voor mengsels met split en die met grind. De waarden voor de eerste zijn hooger dan die voor de grind-bevattende mengsels.

De waarde van den hoek van inwendige wrijving blijkt hooger te zijn voor hoekig dan voor rond aggregaat, hetgeen het gevolg is van een hogere contactspanning in de raakpunten der aggregaatdeelen. De korrelgrootte heeft weinig invloed op de waarde van q_e .

§ 4. *Onderzoek naar den invloed van de concentratie van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels, waarin grof aggregaat van een enkele korrelgrootte is verwerkt.*

Voor dit onderzoek werd hoekig aggregaat (split) en rond aggregaat (grind) gemengd met een mortel, bestaande uit zand en een vulstof-bitumenmengsel, waarbij de samenstelling van dit laatste constant werd gehouden. De verhouding van grof aggregaat tot zand werd gevarieerd, terwijl steeds zooveel vulstof-bitumenmengsel werd toegevoegd, dat nog eenige vol. % holle ruimte in het gecompriëerde materiaal aanwezig was. Bij deze proeven werd de waarde van den FB-factor en die van den HR-factor constant gehouden. Zij bedroegen 0,55⁵ resp. 0,90.

Het grove aggregaat had dezelfde afmetingen als dat in de vorige § beschreven.

De proeven werden wederom uitgevoerd bij + 20° C en + 40° C. Ook hier was het noodzakelijk om ter verkrijging van een betrouwbare vergelijking van de eigenschappen der verschillende mengsels

de proefresultaten te herleiden tot die voor mengfels, met een penetratie van het bitumen bij proeftemperatuur = 22 resp. 105.

De samenstelling der mengfels, de proefresultaten en de herleiding der gevonden grootheden vindt men in Tabel XXXV, waarin tevens is aangegeven de concentratie C van het grind resp. split en de concentratie C' van grind + zand, resp. split + zand.

a. Hoek van inwendige wrijving.

Wij herinneren er aan, dat de waarde van den hoek van inwendige wrijving φ_e voor de asphaltemortel, welke hier de ruimte in het grove aggregaat opvult, ca. 29° bedraagt.

Bij beschouwing van Tabel XXXV blijkt, dat de mengfels met grind een lagere waarde van φ_e bezitten, terwijl de splithoudende mengfels een hogere waarde van φ_e vertoonen, indien de concentratie C van het split 0,34 bedraagt. Bij de zeer kleine verschillen, welke hier optreden, meenen wij te moeten volstaan met het vastleggen der feiten.

β. Initiaalweerstand.

Van de uit de proeven berekende waarden van den initiaalweerstand zijn in de tabel afgetrokken de waarden van den bitumineuzen initiaalweerstand. Het overblijvende deel wordt gevormd door den haakweerstand.

De op deze wijze verkregen gegevens zijn in Tabel XXXVI ge-

TABEL XXXVI.
Haakweerstand der mengfels van Tabel XXXV.

C grind resp. split vol. dln.	Afmetingen grof aggregaat	Grind				Split			
		20° C		40° C		20° C		40° C	
		τ_b kg/cm ²	τ_h kg/cm ²	τ_b kg/cm ²	τ_h kg/cm ²	τ_b kg/cm ²	τ_h kg/cm ²	τ_b kg/cm ²	τ_h kg/cm ²
0.06	9/12	1.50	0.10	0.40	0.05	1.05	0.10	0.40	?
	3/6	1.45	0.05	0.40	0.10	1.05	0.15	0.40	0.05
	0/2	1.30	0.20	0.40	0.10	1.00	0.10	0.40	0.10
0.20	9/12	1.30	0.20	0.40	0.30	1.05	0.35	0.40	0.15
	3/6	1.35	0.35	0.40	0.30	1.00	0.20	0.40	0.20
	0/2	1.10	0.20	0.40	?	1.10	0.20	0.40	0.40
0.34	9/12	1.25	0.95	0.40	0.45	1.25	0.85	0.40	0.60
	3/6	1.30	0.90	0.40	0.50	1.00	1.00	0.40	0.45
	0/2	1.05	0.45?	0.40	?	1.05	0.95	0.40	0.65

TABEL XXXV. Resultaten der proeven met mengsels, die verschillende hoeveelheden grof aggregaat bevatten.
(FB-factor = 0.55⁵, HR-factor = 0.90).

Afmetingen grof aggregaat	Samenstelling mengsel (gew. dln.)				Proef- temp. °C	Proefresultaten			Pen. proef- temp.	Na correctie tot pen. 22 resp. 105. η_m $\times 10^{-9}$ poises	τ_b kg/cm ² voor pen. proef- temp.	τ_h kg/cm ²	C grind resp. split vol. dln.	C' grind resp. split + zand vol. dln.
	grof	zand	vulstof	bitumen Mexphalte 50/60		τ_e	η_m	$\times 10^{-9}$						
9/12 Grind	8.1	72.9	19.0	9.5	20	25°	1.60	115	16½	94	1.50	0.10	0.06	0.63
					40	25°	0.45	39	94	0.40	0.05			
	24.9	58.1	17.0	8.5	20	24°	1.50	130	18½	109	1.30	0.20	0.20	0.67
					40	24°	0.70	50	106	0.40	0.30			
43.5	43.5	13.0	6.5	20	25°	2.20	122	19	114	1.25	0.95	0.36	0.73	
				40	25°	0.85	46	105	0.40	0.45				
3/6 Grind	8.1	72.9	19.0	9.5	20	25° 30'	1.50	110	17	92	1.45	0.05	0.06	0.61
					40	24°	0.50	37	93	0.40	0.10			
	25.2	58.8	16.0	8.0	20	23°	1.70	121	18	109	1.35	0.35	0.20	0.66
					40	25°	0.70	34	103	0.40	0.30			
43.0	43.0	14.0	7.0	20	27°	2.20	115	18½	104	1.30	0.90	0.35	0.71	
				40	27°	0.90	44	92	0.40	0.50				
0/2 Grind	8.0	71.6	20.4	10.2	20	26°	1.50	100	18½	87	1.30	0.20	0.06	0.61
					40	25°	0.50	35	112	0.40	0.10			
	24.5	57.1	18.4	9.2	20	26°	1.30	114	21½	114	1.10	0.20	0.19	0.64
					40	22°	0.35	33	143	0.40	?			
41.5	41.5	17.0	8.5	20	25°	1.50	126	22½	126	1.05	0.45	0.33	0.67	
				40	19°	0.30	45	150	0.40	?				
9/12 Split	8.2	58.4	18.6	9.3	20	24° 30'	1.15	104	22	104	1.05	0.10	0.06	0.64
					40	23°	0.25	29	138	0.40	?			
	25.1	58.4	16.5	8.3	20	26°	1.40	125	22	125	1.05	0.35	0.19	0.68
					40	26° 30'	0.55	41	130	0.40	0.15			
44.0	44.0	12.0	6.0	20	28° 30'	2.10	121	19	117	1.25	0.85	0.34	0.73	
				40	30°	1.00	45	116	0.40	0.60				
3/6 Split	8.2	74.2	17.6	8.8	20	25° 30'	1.20	95	22½	95	1.05	0.15	0.06	0.65
					40	26°	0.45	29	135	0.40	0.05			
	24.9	58.1	17.0	8.5	20	25° 30'	1.20	117	23½	123	1.00	0.20	0.18	0.66
					40	25°	0.60	30	126	0.40	0.20			
43.5	43.5	13.0	6.5	20	29° 30'	2.00	122	23½	128	1.00	1.00	0.33	0.69	
				40	30°	0.85	42	170	0.40	0.45				
0/2 Split	8.1	72.9	19.0	9.5	20	27°	1.10	98	23½	103	1.00	0.10	0.06	0.64
					40	25°	0.50	35	135	0.40	0.10			
	24.8	58.0	17.2	8.6	20	28°	1.30	110	21½	110	1.10	0.20	0.19	0.68
					40	30°	0.80	36	114	0.40	0.40			
41.5	41.5	17.0	8.5	20	31°	2.00	125	22½	125	1.05	0.95	0.31	0.66	
				40	31°	1.05	48	124	0.40	0.65				

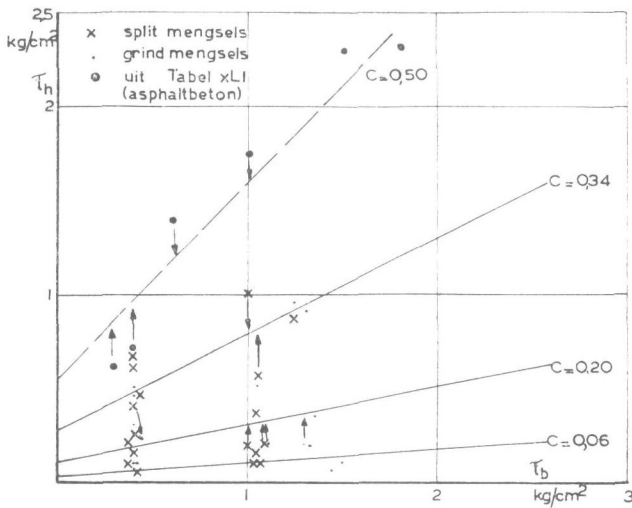
rangschikt naar de concentratie van het grove aggregaat, waarbij in aansluiting aan de vorige § blijkt, dat de korrelgrootte de waarde van den haakweerstand niet beïnvloedt.

Uit de cijfers komt thans duidelijk naar voren, dat de haakweerstand toeneemt met toenemende waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand.

In grafiek XV is het verband tusschen de waarden van haakweer-

GRAFIEK XV.

Verband tusschen den haakweerstand τ_h en den bitumineuzen initiaalweerstand τ_b



stand en bitumineuzen initiaalweerstand voorgesteld voor verschillende waarden van de concentratie van het grove aggregaat.

Het blijkt, dat de toename van de waarde van τ_h met die van τ_b rechtlijnig verloopt. Bij afwezigheid van een bitumineuzen initiaalweerstand bezit de haakweerstand nog een eindige waarde, welke blijkbaar van de concentratie van het grind resp. split afhankelijk is en met deze in waarde toeneemt. Wij meenen dit deel van den haakweerstand als den eigenlijken haakweerstand τ_{hh} te moeten opvatten, in tegenstelling met het deel (τ_{hb}), dat van den bitumineuzen weerstand afhankelijk is.

De waarde van τ_{hh} (zie ook graf. XVI) bedraagt voor verschillende concentraties:

TABEL XXXVII.

Waarden van den eigenlijken haakweerstand τ_{hh} in kg/cm^2 bij verschillende concentraties C van het grind resp. split.

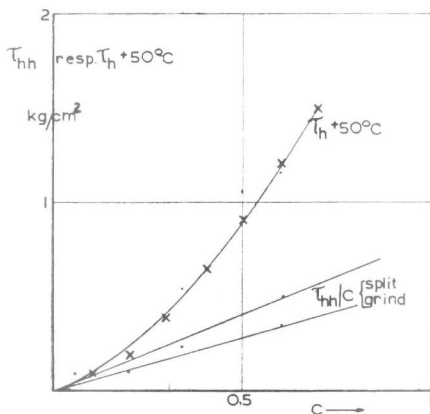
C	Grind	Split
0.06	0.05	0.05
0.20	0.10	0.10
0.34	0.25	0.25
0.60 *)	0.35	0.50

*) Uit Tabel XXXIII.

Bij de lage waarde van τ_{hh} voor lagere waarden van C is het niet mogelijk een verschil in waarde vast te stellen voor mengsels met

GRAFIEK XVI.

Verband tusschen den echten haakweerstand τ_{hh} (.) resp. den haakweerstand bij $+50^\circ\text{C}$ (\times) en de concentratie van het grind resp. split.



split en met grind. Bij een waarde van $C = 0.60$ (uit Tabel XXXIII) is dit wel mogelijk. Voor de practijk is dit punt, zooals reeds vermeld, van geen belang.

De toename van den haakweerstand met stijgende waarde van

τ_b (dus feitelijk de toename van τ_{hb}) blijkt eveneens met stijgende waarde van C toe te nemen.

Uit grafiek XV leiden wij af, dat het verband tusschen beide grootheden als volgt verloopt:

TABEL XXXVIII.

Toename van den haakweerstand (τ_{hb}) met de concentratie C van het grind resp. split.

C	$\Delta\tau_h/\Delta\tau_b$
0.06	0.07
0.20	0.18
0.34	0.48
0.55	1.26 *)

*) Uit Tabel XXXIII.

Voor de practijk nu is in het bijzonder van belang de waarde van den haakweerstand bij de hoogste in het wegdek optredende temperatuur ($+50^\circ \text{C}$). Hierbij zal de waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand ca. 0.30 à 0.40 kg/cm^2 bedragen. De waarde van den haakweerstand bedraagt dan (zie ook grafiek XVI)

TABEL XXXIX.

Waarden van τ_h voor verschillende waarden van C bij 50°C .

C	τ_h kg/cm^2
0.1	0.1
0.2	0.2
0.3	0.4
0.4	0.6 ⁵
0.5	0.9
0.6	1.2
0.7	1.5

Op deze wijze kan men zonder groote moeilijkheden een schatting maken van de waarde van den haakweerstand van een mengsel, waarvan de granulometrische samenstelling bekend is.

γ. Viscositeit der massa.

De cijfers van Tabel XXXV toonen aan, dat de waarde van de viscositeit der massa bij deze proeven nog minder door de afmetingen van het grove aggregaat wordt beïnvloed, dan dit bij die van de vorige § het geval was. De kleine verschillen, die hier gevonden worden, kunnen o.i. zeer wel aan de spreiding der proefresultaten worden toegeschreven.

In Tabel XL zijn de gemiddelde waarden van de viscositeit der

TABEL XL.

Waarden van $\eta_m \times 10^{-9}$ poises voor mengsels met grof aggregaat van verschillende korrelgrootte.

C vol. dln.	C' vol. dln.	Proef- temp. °C	Grind			Split			Gemiddeld		Opmerkingen
			9/12	3/6	0/2	9/12	3/6	0/2	Grind	Split	
0.06	0.63	20	94	92	87	104	95	103	91	101	
		40	35	35	35	32	31	36	35	33	
0.20	0.65	20	109	109	114	125	123	110	111	119	
		40	50	34	35	44	39	36	40	40	
0.34	0.70	20	114	104	126	117	128	125	115	123	
		40	46	36	46	46	45	51	43	47	
0.60		20	60	64	76	50	68	83	67	67	} grof + vulstof } + bitumen
		40	22	24	27	25	29	37	24	30	
0.60	0.75	20	36	45	48	47	55	63	43	55	} grof + zand } + bitumen
		40	18	22	23	25	28	27	21	27	
0.62		20							82		asphalt- mortel
		40							31		

massa voor mengsels met grof aggregaat van verschillende samenstelling nogmaals gegeven.

In de tabel zijn bijgevoegd de gemiddelde waarden van η_m voor de vulstof resp. zand bevattende mengsels van Tabel XXXIII en voor het asphaltemortel mengsel uit Tabel XVI.

Uit de gegevens blijkt, dat de waarde van de viscositeit der massa bij lage waarden van C sterker toeneemt dan bij hooge waarden van C.

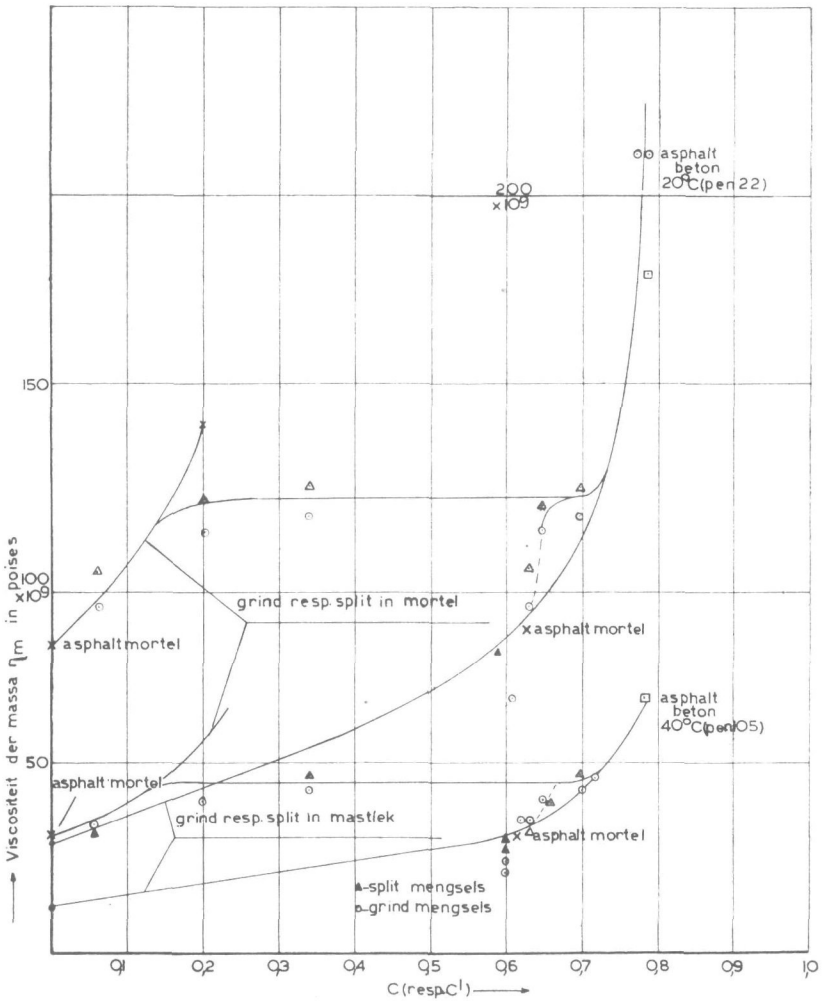
In grafiek XVII zijn de waarden van η_m en die van C tegen elkaar uitgezet. In de grafiek is aangegeven het verloop van de

waarde van η_m met de waarde van C, indien het materiaal zou voldoen aan formule (84).

Uit de grafiek blijkt, dat bij lagere waarden van C inderdaad aan

GRAFIEK XVII.

Verband tusschen de viscositeit der massa, η_m in poises (bij pen. bitumen = 22 resp. 105, HR-factor = 0.90 en FB-factor = 0.55³) en de concentratie van het grind resp. split in de bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.



formule (84) wordt voldaan, doch bij een concentratie $C > \text{ca. } 0.15$ blijft de waarde van η_m bij die, welke uit de formule volgt, ten achter, om zelfs tusschen $C = 0.20$ en $C = 0.35$ vrijwel constant te worden.

Wij herinneren er aan, dat de afleiding van formule (84) uitgaat van de aanwezigheid van vrije gedispergeerde deeltjes in een dispergeerend medium. Bij lagere concentraties van het grof aggregaat blijkt aan deze veronderstelling te worden voldaan. Bij hogere waarden van C treden evenwel complicaties op, ten gevolge waarvan een deel van het andere aggregaat met de grove aggregaatdeelen wordt medebewogen.

Wij kunnen ons denken dat het systeem grind (resp. split) in mortel overgaat in een systeem grind (resp. split) + zand in mastiek.

Dit heeft uit den aard der zaak een verhooging van de concentratie van de gedispergeerde phase ten gevolge, doch de viscositeit der disperse phase wordt lager, daar het asphaltmortel-mengsel een hogere viscositeit heeft dan de mastiek.

Directe bepaling van de waarde van η_m van vulstof-bitumenmengsels stuit op moeilijkheden.

Een schatting van deze waarde kan evenwel als volgt worden verkregen.

In Hoofdstuk VIII, § 4, vinden wij in Tabel XXIV aangegeven, dat de waarde van η_m voor een zand-bitumenmengsel (100 gew. dln. zand en 10.5 gew. dln. bitumen) 30 resp. 12×10^9 poises bedraagt bij 20° resp. 40° C.

Bij een aequivalente deeltjesgrootte D van dit zand van ca. 400μ (een globale schatting) kan in grafiek XIV door extrapolatie benaderend worden bepaald, welke waarde η_m zou hebben in een overeenkomstig mengsel met een deeltjesgrootte $D = 26 \mu$ van de vulstof. Men vindt dan $\eta_m = 45$ resp. 19×10^9 poises, welke waarden gelden voor een mengsel uit 100 gew. dln. vulstof en 10.5 gew. dln. bitumen bestaande. De FB-factor van dit mengsel bedraagt 0.85^5 .

Een mengsel met een FB-factor $= 0.55^5$ zou dus een waarde van $\eta_m = 29$ resp. 12×10^9 poises bezitten.

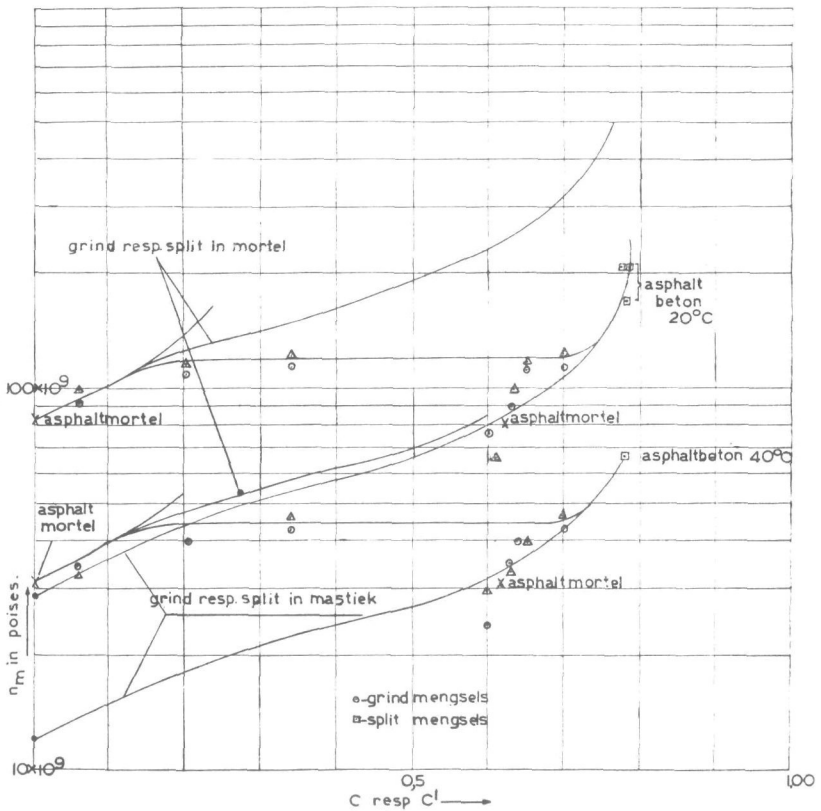
Wij beschikken nu over de waarden van de viscositeit der massa van verschillende mengsels van deze mastiek en grof aggregaat,

nl. asphaltmortel uit Hoofdstuk VII en de mengsels uit Tabel XXXIII met een $C = 0.34$ ($C' = 0.70$), alsmede de mengsels met vulstof en grof aggregaat uit Tabel XXXIII.

De waarde van de viscositeit der massa dezer mengsels is nu in grafiek XVIII op semilogarithmische schaal uitgezet tegen de waarde van C resp. C' .

GRAFIEK XVIII.

Verband tusschen de logarithme van de viscositeit der massa (η_m) in poises (bij pen. bitumen = 22 resp. 105, HR-factor = 0.90 en FB-factor = 0.55⁵) en de concentratie van het grind resp. split in de bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.



Wij kunnen nu in het gebied van de lage waarden van C de lijn, die het verband tusschen C en $\lg \eta_m$ aangeeft construeeren met behulp van de formule (84).

Dit geconstrueerde deel van de kromme sluit zeer goed aan bij de lijn, die door de uit metingen bepaalde punten kan worden getrokken, hetgeen zoowel geldt voor de waarden van η_m bij 20° C als bij 40° C.

Bij de gekozen schaal van teekening worden nu evenwijdige lijnen gevonden, zoowel voor de mengsels van mastiek en grind (resp. split) als voor die van mortel en grind (resp. split). Van deze laatste kan natuurlijk alleen het traject met een lage waarde van C experimenteel worden gecontroleerd.

Uit deze resultaten blijkt, dat de overgang van het grind (resp. split) — mortel systeem in het grind (resp. split) + zand — mastiek systeem de feiten verklaart.

δ. Samenvatting.

Uit het voorgaande volgt, dat de concentratie van het grove aggregaat in een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel van groot belang is.

De haakweerstand blijkt te bestaan uit een deel (den eigenlijken haakweerstand τ_{hh}), waarvan de waarde afhankelijk is van de concentratie van het grove, van den bolvorm afwijkende aggregaat, en een deel (de bitumineuze haakweerstand τ_{hb}), dat afhankelijk is van den bitumineuzen initiaalweerstand. Vooral bij hooge waarde van τ_b kan dit deel belangrijk worden.

Bij de beschouwing van de waarde van de viscositeit der massa blijkt het volgende. Bij lage waarden van C wordt formule (84) gevolgd, doch bij hoogere concentratie gaat het systeem, dat bestond uit grind resp. split in een mortel, over in een systeem, bestaande uit grind resp. split + zand in een mastiek. Hoewel de viscositeit van de mastiek lager is dan die van de mortel valt, ten gevolge van de zeer belangrijke concentratieverhoging bij aanwezigheid van voldoende grof aggregaat, toch een verhoging van de waarde van de viscositeit der massa waar te nemen.

§ 5. Invloed van de granulometrische samenstelling van het grove aggregaat op den weerstand tegen plastische deformatie.

In de voorgaande §§ bleek, dat de afmetingen van het grof aggregaat van weinig, de hoeveelheid grof aggregaat van groot belang

is voor den weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.

Op grond daarvan kan men verwachten, dat de granulometrische samenstelling van dergelijke mengsels alleen in zooverre van belang is als de concentratie van het grove aggregaat er door wordt beïnvloed.

Dit werd nagegaan aan de hand van de resultaten van celproeven met mengsels, waarin hoekig aggregaat was verwerkt. De samenstelling der mengsels was zoo gekozen, dat de mengsels representatief waren voor asphaltbeton, splitrijk asphaltfijnbeton en splitarm asphaltfijnbeton (zgn. Topeka).

De samenstelling der mengsels is in Tabel XLI aangegeven.

De proeven werden wederom uitgevoerd bij 20° C en 40° C. De waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand werd met behulp van de gegevens van Hoofdstuk VIII bepaald..

Het vermelde asphaltbeton is dat van Hoofdstuk VII. De betreffende resultaten zijn ontleend aan Tabel XVI.

TABEL XLI.

Samenstelling van verschillende mengsels, welke hoekig grof aggregaat bevatten.

					Grof asphalt- beton	Splitrijk asphaltfijn- beton	Splitarm asphaltfijn- beton
		op zeef (rond)	1''	—	—	—	—
door zeef (rond)	1''	" " "	$\frac{3}{4}$ ''	27.2	60.0	10.7	42.3
" " "	$\frac{3}{4}$ ''	" " "	$\frac{1}{2}$ ''	22.4		10.7	
" " "	$\frac{1}{2}$ ''	" " "	$\frac{1}{4}$ ''	7.3	16.9	13.1	5.3
" " "	$\frac{1}{4}$ ''	" " "	$\frac{1}{8}$ ''	2.8		14.2	18.8
" " "	$\frac{1}{8}$ ''	op ASTM zeef	10	0.3	32.6	4.3	2.8
" ASTM	10	" " "	20	22.3		14.6	11.7
" " "	20	" " "	30	3.2	16.9	2.6	6.2
" " "	30	" " "	40	7.1		3.5	5.0
" " "	40	" " "	50	8.9	10.9	4.0	7.0
" " "	50	" " "	80	8.0		14.6	19.5
" " "	80	" " "	100	1.0	4.5	3.1	4.3
" " "	100	" " "	200	3.5		7.8	12.2
" " "	200	" " "		6 0		7.5	7.2
Bitumen	Mexphalte 50/60	op					
100 gew. dln	aggregaat.....			5.5		5.3	8.2

TABEL XLII.

Resultaten der celproeven met de mengsels uit Tabel XLI.

Mengsel	Proef- temp. °C	Proefresultaten			Pen. proef- temp.	τ_b kg/cm ²	τ_h kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises		FB- factor	C (vol. dln)	C' (vol. dln)	
		η_e	τ_e kg/cm ²	η_m $\times 10^{-9}$ poises				voor FB- factor = 0.55 ⁵	voor FB factor = 0.55 ⁵ , pen. = 22 resp. 105				
Splitrijk asfaltfijnbeton	20	31°	2.10	96	27½	0.60	1 50	102	120	0.52	0.42	0.72	
	40	32°	1.15	39	127	0.30	0.85	42	45				
Splitarm asfaltfijnbeton	20	31°	1.10	69	24	0.75	0.35	74	79	0.51	0.28	0.69	
	40	31°	0.75	30	128	0.30	0.45	33	35				
Grof asphaltbeton (bit. pen. 50/60)	10	28°	4.00	334	9½	1.70	2.30	371	210 (22)	0.50	0.50	0.78	
	20/30	20	30°	3.80	314	11	1.50	2.30	348				210 (22)
	50/60	20	30°	2.00	133	26	0.60	1.40	148				170 (22)
	80/100	20	33°	1.05	110	42	0.40	0.65	122				80 (105)
	180/200	20	33°	0.90	85	59	0.30	0.60	94				68 (105)
	50/60	40	32°	0.80	64	137	0.27 ⁵	0.52 ⁵	71				68 (105)

Voor alle mengsels bedroeg de waarde van den HR-factor = 0.90, terwijl de waarde van den FB-factor varieerde.

De resultaten der proeven vindt men in Tabel XLI (pag. 195).

a. Hoek van inwendige wrijving.

Voor den hoek van inwendige wrijving vindt men waarden, die zeer goed in het algemeene beeld passen. Bij kleine onderlinge verschillen neemt de waarde van φ_e toe met toenemend gehalte aan scherp aggregaat.

β. Initiaalweerstand.

De initiaalweerstand is gesplitst in den bitumineuzen initiaalweerstand en den haakweerstand. De gevonden waarden zijn in grafiek XV ingeteekend, en blijken in goede overeenstemming te zijn met de in § 4 gevonden waarden, zoodat het daar gegeven verband tusschen de waarde van den haakweerstand τ_h en den bitumineuzen initiaalweerstand nader bevestigd wordt.

Voor de waarden van den initiaalweerstand bij 50° C kunnen dus de in Tabel XXXIX gegeven waarden worden aangehouden.

γ. Viscositeit der massa.

De waarden der viscositeit der massa zijn na correctie tot die van mengsels met een FB-factor = 0.555 en een penetratie van het bitumen van 22 resp. 105 in de grafieken XVII en XVIII ingeteekend.

Het blijkt, dat deze waarden zeer goed in het algemeene beeld passen.

Het lijkt waarschijnlijk dat bij een waarde van $C = \text{ca. } 0.90$ de waarde van de viscositeit der massa oneindig groot wordt. Dit geeft in formule (84) aan den factor a een waarde = ca. 1.10.

δ. Opmerking.

In het voorgaande hebben wij de physische grootheden, welke het gedrag van het materiaal bij plastische deformatie omschrijven, in afwijking van hetgeen in Hoofdstuk VIII werd aangegeven, niet herleid tot die van mengsels met een HR-factor = 1 en een FB-factor = 0.50. De reden hiervoor is de volgende.

De holle ruimte factor werd afgeleid voor mengsels, bij welke de

weerstand gelijkmatig over de doorsnede (macroscopisch beschouwd) verdeeld was.

Bij mengsels met grof aggregaat wordt van deze voorwaarde betrekkelijk ver afgeweken, zoodat wij er de voorkeur aan gaven, mengsels met een constante holle ruimte te onderzoeken en geen correctie aan te brengen.

Wat den FB-factor betreft, deze werd voor de meeste mengsels, welke in dit hoofdstuk werden beschreven, constant gehouden en bedroeg daarbij: $FB\text{-factor} = 0.55^5$. Voor de enkele onderzochte mengsels met een afwijkende waarde van den FB-factor werd de viscositeit der massa herleid tot die van een mengsel met $FB\text{-factor} = 0.55^5$. Herleiding der waarden van alle mengsels tot die van mengsels met een $FB\text{-factor} = 0.50$, werd eenvoudigheidshalve achterwege gelaten.

Wij vermelden nog, dat de aequivalente deeltjesgrootte D van de vulstof $D = 26 \mu$ bedroeg.

Voor de bepaling van den haakweerstand, waarvan de waarde afhangt van de hoeveelheid hoekig aggregaat en van de waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand, heeft herleiding tot de waarde van τ_h bij een bepaalden HR-factor weinig zin.

De in de grafieken XVII en XVIII aangegeven waarden van de viscositeit der massa gelden voor een HR-factor $= 0.90$ en een FB-factor $= 0.55^5$ bij een $D = 26 \mu$ en voor mengsels met Venezolaansch bitumen.

Voor overeenkomstige mengsels met een FB-factor $= 0.50$, $D = 10 \mu$ en een HR-factor $= 1.$ —, worden waarden (de grootheid B uit Hoofdstuk VIII) gevonden, welke 40 % hooger zijn, hetgeen in grafiek XVIII een evenwijdige verschuiving der lijnen naar boven ten gevolge heeft.

Ter wille van de overzichtelijkheid van de grafiek hebben wij deze lijnen weggelaten.

HOOFDSTUK X.

Conus- en stempelproeven.

§ 1. *Inleiding.*

In Hoofdstuk I, § 2, van dit proefschrift werd er op gewezen, dat een bitumineus wegdek onder een stilstaanden last, welke een spanning tot ca. 15 kg/cm² kan uitoefenen, na een beperkten tijdsduur geen hinderlijke locale deformatie mag vertoonen. In § 5 van dat hoofdstuk werd geschat, dat een indrukking van 1 mm na een belastingduur van 30 minuten nog toelaatbaar is.

In Hoofdstuk II, § 9, werden beproevingsmethoden besproken, welke door verschillende onderzoekers zijn ontwikkeld, om proefondervindelijk na te gaan of een materiaal voldoende weerstand tegen plaatselijke deformatie bezit. Bezwaren tegen deze onderzoekingsmethoden werden door ons in dit hoofdstuk ontwikkeld. Zij betroffen zoowel de grootte der uitgeoefende spanning als de omstandigheden, onder welke de proeven worden uitgevoerd (temperatuur, zijdelingsche steun).

In het volgende zal nu worden nagegaan, welke samenhang er bestaat tusschen de resultaten der celproef en die van proeven, waarbij de weerstand tegen plaatselijke deformatie van een bitumineus materiaal wordt bepaald volgens een werkwijze, waarbij genoemde bezwaren zijn ondervangen. Hierbij wordt getracht de resultaten dezer laatste proeven in verband te brengen met de waarde der physische grootheden, welke bij de celproef worden bepaald.

§ 2. *Theoretische beschouwingen.*

a. Door PRANDTL (69) is een theorie ontwikkeld, met behulp waarvan de maximale gelijkmatig verdeelde belasting, welke op een „lineair-plastisch” materiaal kan worden uitgeoefend zonder tot hinderlijke deformaties aanleiding te geven, kan worden berekend uit de waarden van den hoek van inwendige wrijving en van, hetgeen wij noemen, den initiaalweerstand.

Onder een „lineair-plastisch” materiaal verstaat PRANDTL een

materiaal, waarvan de zwichspanning in een vlak lineair met de normaalspanning op dit vlak toeneemt.

Een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel voldoet volgens de in de vorige hoofdstukken gegeven beschouwingen aan deze voorwaarden.

De door PRANDTL gegeven oplossing geldt alleen voor het tweedimensionale probleem in den evenwichtstoestand. Proefondervindelijk kan aan deze voorwaarden worden voldaan door een lange smalle strook op zoodanige wijze te belasten, dat de evenwichtstoestand juist niet wordt overschreden.

PRANDTL bepaalde de algemeene voorwaarden voor het evenwicht van het materiaal, waarbij hij door het mathematisch formuleeren van den door hem waargenomen vorm van de glijdvlakken, volgens welke het materiaal afschuift indien de evenwichtsdruk wordt overschreden, er in slaagde voor dit bijzondere geval een oplossing te vinden.

β. In den evenwichtstoestand.

PRANDTL neemt op grond van zijn waarnemingen aan, dat onder den last een driehoekig lichaam ABC (zie fig. 10) rechtstandig naar

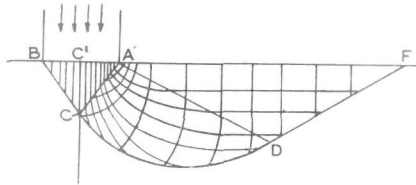


Fig. 10.

beneden verplaatst wordt bij overschrijding van den evenwichtstoestand, terwijl een lichaam ADF naar boven wordt bewogen.

In het lichaam CAD , dat behalve door de platte vlakken CA en DA begrensd wordt door een gebogen vlak CD , waarvan de doorsnede met een verticaal vlak loodrecht op de lange as van het belastingvlak een logarithmische spiraal is, treedt een meer gecompliceerde vervorming van het materiaal op. Het verloop der spanningen is in de figuur aangegeven. De grootte dezer spanningen is in fig. 11 geteekend.

In elk punt van de $\triangle ADF$ bedraagt de verticale hoofdspanning $\sigma_v = 0$, zoodat de waarde van de horizontale hoofdspanning F_h

bepaald is door de waarde van den initiaalweerstand τ_e en den hoek van inwendige φ_e . De spanningstoestand in elk punt in $\triangle ADF$ wordt aangegeven door den spanningscirkel OF_h .

In $\triangle ABC$ bedraagt de verticale hoofdspanning Z_e (= het draagvermogen). De spanningscirkel, welke de spanningen in elk

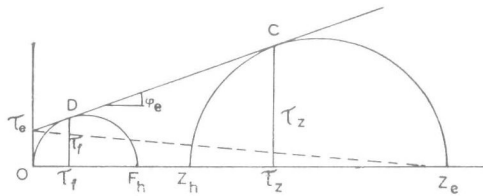


Fig. 11.

punt in dezen driehoek voorstelt, gaat door het punt Z_e en raakt aan de raaklijn $\tau_e D$ van den cirkel OF_h . Hierdoor is deze spanningscirkel $Z_h Z_e$ geheel bepaald.

De maatgevende spanningen in den driehoek ABC bedragen dientengevolge $\tau_z = C\tau_z$ en $\sigma_z = 0\tau_z$.

Uit de theorie volgt verder, dat

$$Z_e = \frac{\tau_e}{I'(\varphi_e)} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (85)$$

waarin

$$I'(\varphi_e) = \frac{\text{tg } \varphi_e}{\frac{1 + \sin \varphi_e}{1 - \sin \varphi_e} \cdot e^{\text{tg } \varphi_e} - 1} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (86)$$

In fig. 11 kunnen wij dus aangeven

$$\frac{\tau_e}{0Z_e} = I'(\varphi_e) = \text{tg } \gamma.$$

Indien dus de waarde van τ_e en van φ_e (en dus ook $\text{tg } \gamma$) bekend zijn, kunnen langs graphischen weg de spanningen in de $\triangle ABC$ en ADF worden bepaald.

De spanningstoestand in $\triangle ABC$ komt blijkbaar geheel overeen met dien bij de celproef in den evenwichtstoestand bij gelijke verticale hoofdspanning.

γ . *In bewegingstoestand.*

Voeren wij de belasting op het oppervlak op tot een waarde grooter dan het draagvermogen, dan zal een niet tot rust komende vervorming optreden. De vervormingssnelheid zal afhankelijk zijn van de grootte der belasting.

Beschouwen wij in het bijzonder den spanningstoestand in $\triangle ABC$.

In den evenwichtstoestand was de spanningstoestand in elk punt van dit lichaam dezelfde. Nemen wij aan, dat ook bij overschrijding der verticale evenwichtsspanning Z_e , de spanningstoestand in elk punt van $\triangle ABC$ nog dezelfde zal zijn.

In dat geval moet de deformatiesnelheid in elk punt van dit lichaam dezelfde zijn (zie ook Hoofdstuk IV, § 2). De $\triangle ABC$ zal dus niet, zooals PRANDTL aanneemt, in zijn geheel naar beneden verplaatst worden, doch over zijn geheele hoogte gelijkmatig deformeeren. De snelheid, waarmede de last beweegt, is gelijk aan de snelheid, waarmede de loodlijn CC' in lengte vermindert. Bij een zeer geringe overschrijding van den evenwichtslast, nemen wij de lengte van deze loodlijn gelijk aan die in den evenwichtstoestand.

Uit fig. 12 volgt, dat $CC' = C'B \cotg \left(45 - \frac{\varphi_e}{2} \right)$. Voor een cirkelvormig belastingsvlak met straal = r geldt dus:

$$CC' = r \left(45 - \frac{\varphi_e}{2} \right).$$

Hier dient te worden opgemerkt, dat de waarde van φ die bij

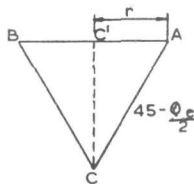


Fig. 12.

beweging is, indien de deformatiesnelheid $\frac{d\epsilon_1}{dt}$ gelijk is aan die der celproeven.

Zakt de stempel met een snelheid v (cm/sec.) dan wordt

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{v}{CC'} = \frac{v}{r \cotg \left(45 - \frac{\varphi_{bew}}{2} \right)} \dots \dots \dots (87)$$

Nemen wij nu aan, dat de formule van PRANDTL ook hier mag worden toegepast, dan geldt

$$Z_v = \frac{\tau_{tot}}{(\varphi_{bew})}$$

waarin

$$\Gamma(\varphi_{bew}) = \frac{tg \varphi_{bew}}{1 + \frac{\sin \varphi_{bew}}{1 - \sin \varphi_{bew}} e^{-\tau tg \varphi_{bew}} - 1} \dots \dots \dots (88)$$

Uit de onderzoeken van Hoofdstuk VI is gebleken, dat het verschil tusschen φ_{bew} en φ_e ca. 2° bedraagt.

De waarden van $\frac{1}{\Gamma(\varphi)}$ zijn in Tabel XLIII aangegeven.

TABEL XLIII.

Waarden van $\frac{1}{\Gamma(\varphi)}$.

φ	$\frac{1}{\Gamma(\varphi)}$
25°	20.7
26°	22.3
27°	23.9
28°	25.8
29°	27.9
30°	30.1
31°	32.7
32°	35.5
33°	38.6
34°	42.2
35°	46.1

Bij een verschil van ca. 2° tusschen de waarde van φ_{bew} en φ_e is de waarde van

$$\frac{1}{\Gamma(\varphi_e)} \times 1.2 = \frac{1}{\Gamma(\varphi_{bew})}$$

zoodat formule (85) ook geschreven kan worden.

$$\tau_e = 1,2 Z_e \times \Gamma(\varphi_{bew}).$$

De waarde van de viscositeit der massa kan nu berekend worden met behulp van formule (34), welke wij hier in den vorm

$$\eta_m = \frac{2 \cos \varphi}{3 - \sin \varphi} \frac{\tau_{tot} - \tau_e}{\frac{d\varepsilon_1}{dt}} \dots \dots \dots (89)$$

schrijven.

Deze formule gaat over in:

$$\eta_m = \frac{2 \cos \varphi_{bew}}{3 - \sin \varphi_{bew}} \times \Gamma(\varphi_{bew}) \times \frac{Z_v - 1,2 Z_e}{v} r \cotg \left(45 - \frac{\varphi_{bew}}{2} \right). \quad (90)$$

Stelt men voor een rondkorrelig aggregaat $\varphi_{bew} = 30^\circ$, voor een hoekig aggregaat $\varphi_{bew} = 35^\circ$, dan gaat deze formule over in:

$$\eta_m = \left\{ \begin{array}{l} 0,04 \\ 0,028 \end{array} \right\} \frac{Z_v - 1,2 Z_e}{v} r \left\{ \begin{array}{l} \text{rond} \\ \text{hoekig} \end{array} \right\} \text{aggregaat} \dots \dots (91)$$

Drukt men Z_e en Z_v uit in kg/cm^2 , v in mm per uur en r in cm en η_m in poises, dan ontstaat:

$$\eta_m = \left\{ \begin{array}{l} 1,44 \\ 1,01 \end{array} \right\} \times 10^9 \frac{Z_v - 1,2 Z_e}{v} r \left\{ \begin{array}{l} \text{rond aggregaat b.v. asphaltnortel} \\ \text{hoekig aggregaat b.v. asphalbeton} \end{array} \right\} \quad (92)$$

In bovenstaande berekening werd aangenomen, dat de hoogte van het deformeerende lichaam onafhankelijk is van de grootte der belasting Z_v , hetgeen slechts bij geringe overschrijding der evenwichtsbelasting Z_e juist zal zijn. Nemen wij aan, dat de hoogte van het deformeerende lichaam toeneemt evenredig met de verhouding $\frac{Z_v}{Z_e}$, dan gaan de formules (90), (91) en (92) over in

$$\eta_m = \frac{2 \cos \varphi_{bew}}{3 - \sin \varphi_{bew}} \Gamma(\varphi_{bew}) \frac{Z_v - 1,2 Z_e}{v} \frac{Z_v}{Z_e} r \cotg \left(45 - \frac{\varphi_{bew}}{2} \right) \quad (93)$$

en

$$\eta_m = \left\{ \begin{array}{l} 0,04 \\ 0,028 \end{array} \right\} \frac{Z_v - 1,2 Z_e}{v} \frac{Z_v}{Z_e} r, \dots \dots \dots (94)$$

welke indien Z_e en Z_v uitgedrukt worden in kg/cm^2 , v mm per uur, r in cm, η_m in poises overgaat in

$$\eta_m = \begin{cases} 1,44 \\ 1,01 \end{cases} \times 10^9 \frac{Z_v - 1,2 Z_e Z_v}{v Z_e r} \begin{cases} \text{rond aggregaat b.v. asphaltemortel} \\ \text{hoekig aggregaat b.v. asfaltbeton} \end{cases} \quad (95)$$

Uit de experimenteele resultaten zal moeten blijken of deze ruwe berekening een bruikbaar resultaat oplevert.

§ 3. *Proefondervindelijk onderzoek naar de juistheid der theorie bij den evenwichtstoestand.*

Wij herinneren er aan, dat de door PRANDTL. ontwikkelde theorie op het twee-dimensionale probleem betrekking heeft. Verder veronderstelt hij, dat het materiaal homogeen isotroop is, zoodat de afmetingen van het belaste oppervlak zeer groot moeten zijn ten opzichte van de afmetingen der enkele aggregaatdeelen. Wij nemen aan, dat ook hier de afmeting van het aggregaat hoogstens $\frac{1}{6}$ deel mag vormen van de afmeting van het belaste oppervlak.

Voor grof asfaltbeton met aggregaat tot 25 mm zou het belaste oppervlak dus een diameter van 15 cm moeten bezitten; voor mengsels met aggregaat tot 12 mm wordt dit 7.5 cm diameter, terwijl voor asphaltemortelmengsels met aggregaat tot ca. 2 mm met een belast oppervlak met 1.2 cm diameter kan worden volstaan.

Bij spanningen, welke zooals later zal blijken tot $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ bedragen, moeten dus krachten worden uitgeoefend tot 8800 kg, resp. 2200 kg, resp. ca. 60 kg.

Beschouwing van fig. 10 geeft ons verder aanleiding om te veronderstellen, dat geen belangrijke fout bij de meting zal worden gemaakt, indien men zorg draagt, dat de afstand $C'F$ minstens het 6-voud bedraagt van den afstand $C'A$, daar in dat geval het geheele geplasticeerde gebied valt binnen de grenzen van het proeflichaam. Daarbij zal men tevens zorg moeten dragen, dat de zijwanden van het materiaal begrensd worden door een stof, welke een voldoende weerstand tegen deformatie biedt, zoodat de totale inzakking beheerscht wordt door de deformatie van het te onderzoeken materiaal.

Wij merken hierbij op, dat de door HERRMANN ontwikkelde

stempelproof aan dezen eisch niet voldoet en dientengevolge tot onbetrouwbare resultaten moet voeren.

De afmetingen van het proefstuk zouden op grond van deze beschouwingen moeten bedragen

- ϕ 90 cm voor asphaltbeton,
- ϕ 45 cm voor mengsels met aggregaat tot 12 mm
- en ϕ 7.2 cm voor asphaltmortel.

De dikte van het proeflichaam zou blijkens dezelfde figuur circa het 3-voud van den stempeldiameter moeten bedragen, hetgeen voert tot 45 cm resp. 22.5 cm resp. 3.6 cm.

Het is duidelijk, dat deze proefmethode alleen geschikt is voor het onderzoek naar den weerstand van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels, waarin het grofste aggregaat niet grooter is dan 2 mm. Het experimenteele onderzoek naar de juistheid der ontwikkelde theorie werd dan ook tot dergelijke mengsels beperkt.

Hiertoe werden de mengsels in een stalen cylinder van 15 cm diameter en 7 cm diepte gecompriemd bij 50 kg/cm² druk, bij gelijktijdige vibratie.

Bij het onderzoek naar het draagvermogen van het materiaal in den evenwichtstoestand werd de zgn. conusproef der grondmechanica toegepast.

Een beschrijving der proef, waarbij een conusvormig lichaam in het te onderzoeken materiaal dringt tot evenwicht is bereikt, vindt men in de literatuur (44). De spanning in de conus, ter hoogte van het oorspronkelijke oppervlak van het materiaal noemt men de conuswaarde van het materiaal. Deze waarde is gebleken onafhankelijk te zijn van de grootte der indringing.

Ons onderzoek werd uitgevoerd met de in Tabel XVI vermelde asphaltmortel mengsels.

De resultaten dezer proeven zijn in Tabel XLIV (pag. 206) samengebracht, tezamen met de uit de celproeven verkregen resultaten, waaruit de conuswaarde is berekend volgens formule (85).

Uit de tabel blijkt, dat een zeer behoorlijke overeenstemming bestaat tusschen de gemeten en de uit de resultaten der celproef berekende conuswaarde.

Daar het hierboven besproken materiaal praktisch geen haakweerstand bezit, werd ook nog een proef uitgevoerd met een meng-

TABEL XLIV.

Conuswaarden van eenige asphaltmortelmengsels bij 20° C in vergelijking met de resultaten van celproeven.

Bindmiddel	Conuswaarde (kg/cm ²)	Resultaten der celproeven		
		q_e	τ_e (kg/cm ²)	Berekende conus- waarde (kg/cm ²)
Mexphalte 20/30	34,8	25°	2.0	41
„ 50/60	18.8	27°	1.05	25
„ 80/100	13.0	28°	0.50	13
„ 180/200	11.2	30°	0.40	12

sel, dat uit split 0—2 mm (80 gew. dln.) en vulstof (20 gew. dln.) en 10 gew. dln. bitumen (Mexphalte 50/60) bestond. In Hoofdstuk IX werden de resultaten van de celproeven vermeld.

TABEL XLV.

Conuswaarde van een bitumen-mineraalaggregaatmengsel, dat een niet onaanzienlijken haakweerstand bezit bij 20° in vergelijking met de resultaten der celproef.

Conuswaarde kg/cm ² (Mexphalte 50/60)	Resultaten der celproef		
	q_e	τ_e (kg/cm ²)	Berekende conus- waarde (kg/cm ²)
55	30°	2.00	60

Ook hier wordt een tevredenstellende overeenstemming tusschen berekende en gemeten conuswaarde gevonden.

Op grond van deze proefresultaten mag dus worden aangenomen, dat voor ons materiaal de theorie van PRANDTL ook voor het drie-dimensionale geval in den evenwichtstoestand toegepast mag worden.

§ 4. *Proefondervindelijk onderzoek naar de juistheid der theorie bij beweging.*

Bij het proefondervindelijk onderzoek naar de juistheid der in § 2, sub γ , ontwikkelde theorie kunnen twee verschillende methoden worden gevolgd.

Zij hebben gemeen, dat bij beide een verband gezocht wordt

tusschen de spanning, welke door de belasting op het materiaal over een gedeelte van zijn oppervlak wordt uitgeoefend en de snelheid, waarmede dit belaste deel van het oppervlak wordt ingedrukt. Bij de eene methode wordt de proef op dusdanige wijze uitgevoerd, dat de deformatie met een eenparige snelheid plaats vindt, waarbij de hiervoor benoodigde spanning wordt bepaald; bij de andere methode wordt een constante belasting aangebracht, en wordt de snelheid bepaald.

a. Proeven met constante snelheid.

Bij deze proeven werden lichamen van verschillenden vorm (afgeknotte wig, strip, ronde stempel) met een eenparige snelheid in het materiaal gedrukt. Het bleek bij al deze proeven, dat zoowel de kracht, die op deze lichamen uitgeoefend moest worden als de spanning op het oppervlak van het materiaal met toenemende indrukking toenam. Er bleek dus geen constante spanningstoestand bereikt te worden, hetgeen wij aan de aanwezigheid van niet te verwaarloozen elastische deformaties toeschrijven. De spanningen bereikten, ook bij de kleinste indruksnelheid, welke met de ons ter beschikking staande apparatuur kan worden tot stand gebracht, nog waarden boven 100 kg/cm^2 , zoodat de verkregen resultaten geen betrouwbaren indruk kunnen geven omtrent het gedrag van het materiaal onder de zooveel kleinere spanningen, waaraan het in de practijk is onderworpen.

β. Proeven met constante belasting.

De bij de onder sub *a* vermelde proeven ondervonden bezwaren worden ondervangen, indien men de proef bij constante belasting uitvoert.

Wij plaatsten hiertoe een rond stempel met de vlakke onderzijde op het te onderzoeken materiaal en belastten den stempel met een constante kracht.

Indien deze belasting hoog genoeg is, zakt de stempel in het materiaal, in het begin snel en later langzamer, tot een constante indringingssnelheid bereikt wordt.

Het snelle verloop der indringing in het begin van de belastingperiode moet o.i. worden toegeschreven aan deformaties, welke na een relatief korten tijd haar eindwaarde bereiken, zoodat pas daarna alleen de vloeiverschijnselen de deformatiesnelheid bepalen.

Bij belastingen lager of overeenkomend met het draagvermogen van het materiaal komt de indringing na verloop van tijd tot stilstand.

De proeven worden nu zoo uitgevoerd, dat bij verschillende belastingen de eenparige indringingssnelheid van den stempel wordt bepaald.

Langs graphischen weg kan uit deze gegevens door extrapolatie de waarde van het draagvermogen Z_e (bij een snelheid = 0) worden bepaald, waarna berekening van de waarde van de viscositeit der massa η_m volgens formule (92) of formule (95) geen moeilijkheden meer biedt. De proeven werden uitgevoerd op asfaltmortelmengsels van de in Tabel IV vermelde samenstelling.

Men kan de periode, welke noodig is om een constante indringingssnelheid te verkrijgen, aanzienlijk bekorten, indien men tevoren gedurende korten tijd een hoogere belasting aanbrengt.

a. Afmetingen van het belaste oppervlak.

Allereerst werd nagegaan of de afmetingen van den stempel de proefresultaten beïnvloeden. Als afmetingen der stempels werd ϕ 2.5 cm (5 cm² doorsnede) en ϕ 1.6 cm (2 cm²) gekozen.

Aan het aggregaat werd 10.5 gew. dln. (op 100 gew. dln. aggregaat) Mexphalte 50/60 toegevoegd. Deze mengsels werden onder 50 kg/cm² druk gecompriëerd, in combinatie met vibreeren.

Het onderzoek werd uitgevoerd bij +20° C. De resultaten zijn in Tabel XLVI samengevat.

TABEL XLVI.

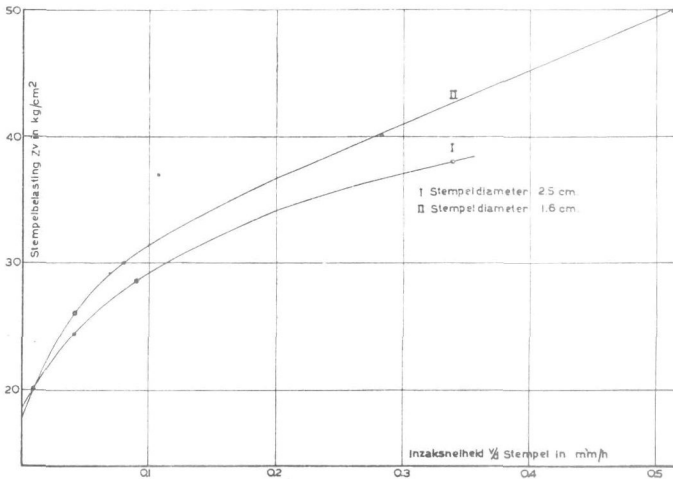
Verband tusschen stempeldruk en indringingssnelheid.

Stempel ϕ 2.5 cm ($F = 5$ cm ²)		Stempel ϕ 1.6 cm ($F = 2$ cm ²)	
Belasting kg/cm ²	Snelheid in mm/uur	Belasting kg/cm ²	Snelheid in mm/uur
20	0.01	20	0.01
26	0.052	25	0.043
31	0.128	30	0.08
38	0.34	40	0.28
41	0.70	50	0.51
45	1.30	57.5	1.08

In grafiek XIX zijn deze cijfers uitgezet. Het blijkt, dat de lijnen in hun beginpunt (deformatiesnelheid = 0) praktisch samenvallen

GRAFIEK XIX.

Verband tusschen de stempelbelasting en de inzaksnelheid.



bij $Z_e = 18 \text{ kg/cm}^2$. De conusproef leverde voor dit materiaal 18.8 kg/cm^2 .

De beginhelling der lijnen bedraagt:

$$\frac{Z_v - Z_e}{\frac{dl}{dt}} = \frac{4}{0,02} \text{ resp. } \frac{6}{0,02},$$

zoodat volgens formule (92)

$$\eta_m = 1,44 \times 10^9 \times \frac{4}{0,02} \times \frac{2,5}{2} = 360 \times 10^9 \text{ poises,}$$

resp.

$$\eta_m = 1,44 \times 10^9 \times \frac{6}{0,02} \times \frac{1,6}{2} = 346 \times 10^9 \text{ poises,}$$

terwijl bij de celproef gevonden werd $\eta_m = 83 \times 10^9$ poises.

Berekent men evenwel met behulp van formule (95) de waarde van de viscositeit der massa, dan komt men tot het volgende:

TABEL XLVII.

Berekening van de waarde van η_m met behulp van formule (95) uit de gegevens van Tabel XLVI.

Z_v kg/cm ²	$\frac{dl}{dt}$ mm/h	$\frac{dl Z_e}{dt Z_v}$	$\frac{Z_v - 1.2 Z_e Z_v}{Z_e} \frac{dl}{dt}$	Z_v kg/cm ²	$\frac{dl}{dt}$	$\frac{dl Z_e}{dt Z_v}$	$\frac{Z_v - 1.2 Z_e Z_v}{Z_e} \frac{dl}{dt}$
20	0.01	0.0075	—	20	0.01	0.0075	—
26	0.052	0.030	} 102	25	0.043	0.026	92
31	0.128	0.062		} 104	30	0.081	0.041
38	0.34	0.126	} 86	40	0.28	0.105	} 122
41	0.70	0.259	53	50	0.52	0.15	} 130
45	1.30	0.434	38	57.5	1.08	0.284	88
Gemiddelde 3 bepalingen			92	Gemiddelde 3 bepalingen			132
„	3	„	$\times r = 121$	„	3	„	$\times r = 106$

Uit deze tabel volgt, dat als gemiddelde voor beide series berekend wordt:

$$\eta_m = 1,44 \times 10^9 \times 114 = 164 \times 10^9 \text{ poises.}$$

Uit de cijfers blijkt, dat tusschen beide series een bevredigende overeenstemming bestaat. Evenwel is de waarde van de viscositeit der massa aanzienlijk grooter dan de uit de celproef berekende waarde. Gezien de ruwe berekeningswijze kan het niet verwonderen, dat de verkregen cijfers een dergelijke afwijking vertoonen.

b. *Vergelijking van de resultaten van stempelproef en celproef.*

Een serie proeven werd uitgevoerd op asphaltemortelmengsels, waarvan het aggregaat de samenstelling had, die in Tabel IV is aangegeven. Toegevoegd werden bitumina van verschillende penetratie. De resultaten dezer proeven zijn in Tabel XLVIII vergeleken met die van celproeven en van de in de vorige § beschreven conusproeven.

Voor de waarde van Z_e wordt, de verschillen in de omstandigheden gedurende het comprimeeren in aanmerking genomen, een goede overeenstemming gevonden. De waarden van de viscositeit der massa, uit de resultaten der stempelproef berekend, zijn evenwel aanzienlijk hooger dan de uit de celproef verkregen waarden. De verhouding dezer waarden bedraagt ca. 1.5. Het benaderende

karakter der theorie in aanmerking genomen, kan dit resultaat, zooals reeds vermeld, geen verwondering wekken.

TABEL XLVIII.

Vergelijking der resultaten van cel-, conus- en stempelproeven met asphalt-mortel-mengsels bij 20° C.

Bitumen	Celproef				Stempelproef			Conusproef	Verhouding	
	τ_e kg/cm ²	φ_e	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises	Z_e kg/cm ² bere- kend	φ_e aange- nomen	Z_e kg/cm ²	$\eta_m \times 10^{-9}$ poises	τ_e kg/cm ²	η_m stempel	η_m cel
Mexphalte 20/30	2.00	25°	144	40	28	35	205	35	1.4	} gem. 1.5
„ 50/60	1.05	27°	83	25	28	18	164	79	2.0	
„ 80/100	0.50	28°	55	122 ⁵	28	13	83	83	1.5	
„ 180/200	0.35	30°	37	10 ⁵	28	8	43	11	1.2	

Het blijkt dus practisch mogelijk onder aannahme van een bepaalde waarde voor den hoek van inwendige wrijving, de viscositeit der massa met behulp van de stempelproef voldoende nauwkeurig te bepalen. De uit de stempelproef met behulp van formule (95) berekende waarde voor de viscositeit der massa dient evenwel nog door een factor, welke wij gelijk 1.5 stellen, gedeeld te worden.

γ. Nabeschouwing.

De hier besproken uitvoeringswijze der stempelproef komt aan de tegen de bekende proefuitvoering van HERMANN (15) geuite bezwaren tegemoet. De resultaten, die hierbij verkregen worden, kunnen op zoodanige wijze worden geïnterpreteerd, dat een voldoende inzicht in de eigenschappen van het materiaal wordt verkregen, indien slechts bij de voor de berekening noodzakelijke aannahme van de waarde van den hoek van inwendige wrijving geen groote fout wordt gemaakt. Dit kan voor „normale” mengsels gecontroleerd worden door de bepaling of de berekening van de holle ruimte van het mengsel, welke holle ruimte 2 vol. % of meer moet bedragen wil een betrouwbare schatting van de waarde van φ_e mogelijk zijn.

Wij wijzen er verder nog op, dat bij een geringe overschrijding der evenwichtsbelasting de inzaksnelheid van den stempel zeer gering is. Wanneer de belasting opgevoerd wordt tot ca. $1.5 \times$ de evenwichtslast begint de inzaksnelheid snel toe te nemen, doch pas bij

een belasting, die het dubbele van de evenwichtsbelasting bedraagt, wordt de inzaksnelheid zoo groot (namelijk 0.5 mm/h voor $\phi = 2.5$ cm, resp. 0.3 mm/h voor $\phi = 1.6$ cm, overeenkomende met 1 mm/30 min. voor een dek van 5 cm dikte (zie Hoofdstuk I, § 5)), dat de in de practijk toelaatbare grens wordt overschreden.

Hieruit volgt, dat een belasting tot het dubbele van den evenwichtslast in de practijk toelaatbaar kan worden geacht.

HOOFDSTUK XI.

Toepassingen.

§ 1. *Inleiding.*

De resultaten van het in het voorgaande beschreven onderzoek kunnen benut worden bij de samenstelling van bitumineuze wegdek-mengsels. Reeds in Hoofdstuk I, § 6, werd er op gewezen, dat wij ons voornamelijk moeten beperken tot de beoordeeling van den weerstand van het materiaal tegen locale deformatie. Aan de hand van de verkregen resultaten is het mogelijk ons een goed begrip te vormen omtrent het gevaar van deformatie van het wegdek bij overschrijding der evenwichtsbelasting, terwijl daarnaast ook het gevaar van de beschadiging der constructie ten gevolge van horizontale door het wiel uitgeoefende spanningen tot op zekere hoogte beoordeeld kan worden.

§ 2. *Gevaar van beschadiging van een wegdek ten gevolge van door een wiel uitgeoefende horizontale krachten.*

In Hoofdstuk I, § 2, werd er op gewezen, dat de hoogste spanning, welke door een wiel op het wegdek wordt uitgeoefend voor massieve rubberbanden ca. 35 kg/cm^2 bedraagt. Dergelijke wielen zullen, indien het voertuig zwaar wordt geremd, tegelijkertijd een horizontale spanning van ca. $0.7 \times 35 \text{ kg/cm}^2 = 24.5 \text{ kg/cm}^2$ op het wegdek uitoefenen.

Uit de resultaten der proeven is gebleken, dat voor „normale” mengsels, met een waarde van den hoek van inwendige wrijving bij beweging $\varphi = \text{ca. } 32^\circ$ ($f = \text{ca. } 0.60$) gerekend mag worden, zoodat de wrijvingsweerstand van het materiaal bedraagt $0.60 \times 35 = 21 \text{ kg/cm}^2$. De schijnbare initiaalweerstand (= initiaalweerstand + viskeuze weerstand) dient dus $24.5 - 21 = 3.5 \text{ kg/cm}^2$ te bedragen. Stellen wij den initiaalweerstand op 0.5 kg/cm^2 , dan zal bij langdurig aanhoudende belasting het materiaal met een dus-

danige snelheid gaan vloeien, dat de viskeuze weerstand 3 kg/cm^2 bedraagt. Uit deze gegevens kan de afschuifsnellheid $\frac{d\gamma}{dt}$ worden berekend

$$\tau_{visk} = \eta_m \frac{d\gamma}{dt} \dots \dots \dots (96)$$

en voor $\eta_m = 30 \times 10^9$ (bij $+50^\circ \text{ C}$)

$$3 \times 10^6 = 30 \times 10^9 \frac{d\gamma}{dt}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = 10^{-4} \text{ (rad./sec.)}$$

De tijd, gedurende welke de belasting wordt uitgeoefend, kan als volgt benaderd worden berekend. Stel een rijsnellheid van $3,6 \text{ km/h}$ of 100 cm/sec . en een lengte van het contactvlak bandrijweg van 25 cm , dan wordt de last gedurende $\frac{1}{4} \text{ sec}$. uitgeoefend. De afschuiving bedraagt gedurende dien tijd:

$$d = \frac{1}{4} \times 10^{-4} = 2,5 \times 10^{-5} \text{ rad.}$$

Indien het materiaal geen inwendige wrijving ontwikkelt, zoals de in Hoofdstuk VI, § 8 beschreven mengsels met overmaat bitumen, dan zal de geheele schuifspanning door den viskeuzen weerstand moeten worden opgenomen, zoodat de deformatiesnellheid onder dezelfde aanname voor de waarde van de viscositeit der massa ongeveer 8 maal zoo groot zal worden en $20 \times 10^{-5} \text{ rad}$. zal bedragen.

Uit deze gegevens blijkt, dat bij aanwezigheid van overmaat bitumen in het mengsel het gevaar van deformatie van het wegdek onder den invloed der horizontale schuifspanningen, welke het wiel er op uitoefent, aanzienlijk grooter is dan bij „normale” mengsels.

§ 3. *Draagvermogen van een wegdek.*

In Hoofdstuk X, § 3, werd aangetoond, dat de grootste verticale spanning, welke een wegdek kan opnemen zonder op den langen duur ernstige plaatselijke deformaties te vertoonen, berekend kan

worden uit de waarden van den hoek van inwendige wrijving en den initiaalweerstand met behulp van formule

$$Z_e = \frac{\tau_e}{\Gamma(\varphi_e)} \cdot \dots \dots \dots (85)$$

Voor normale mengsels met een $\varphi_e = \text{ca. } 25^\circ$ (lage waarde) gaat deze formule over in

$$Z_e = 20,7 \tau_e \cdot \dots \dots \dots (97)$$

De waarde van den initiaalweerstand τ_e hangt voor mengsels met een zeer geringen haakweerstand volgens formule (74) samen met de waarde van den HR-factor, den FB-factor en de aequivalente deeltjesgrootte D van de vulstof en de eigenschappen van de laag gebonden bitumen, volgens

$$\tau_e = (HR) \times \left(\frac{FB}{0,5}\right)^{4,2} \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-0,36} \times A \cdot \dots \dots (74)$$

waarin A de weerstand van de laag gebonden bitumen tegen afschuiving voorstelt bij HR-factor = 1.—, FB-factor = 0,5 en $D = D_0$. Voor de hoogste in een wegdek in West-Europa optredende temperatuur ($+50^\circ \text{C}$) werd gevonden $A = \text{ca. } 0,36 \text{ kg/cm}^2$ (zie Tabel XXX, Hoofdstuk VIII, § 7). Combineeren wij formule (85) met formule (74) dan vinden wij voor het draagvermogen Z_e :

$$Z_e = 20,7 \times (HR) \times \left(\frac{FB}{0,5}\right)^{4,2} \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-0,36} \times A \cdot \dots \dots (98)$$

Voeren wij in deze formule in:

$$\text{HR-factor} = 0,90$$

$$A = 0,36 \text{ kg/cm}^2.$$

$$D_0 = 10 \mu, \text{}$$

dan gaat zij over in:

$$Z_e = 285 \left(\frac{FB}{D^{0,36}}\right)^{4,2} \cdot \dots \dots \dots (99)$$

Deze formule is in bovenstaanden vorm minder geschikt voor de practijk.

Bij het samenstellen van mengsels wordt vaak eerst de meest

gewenschte samenstelling van het aggregaat bepaald, waarna vervolgens wordt nagegaan hoeveel bitumen noodig is om de in het aggregaat overblijvende holle ruimte tot op eenige vol. % na, te vullen. Door het Rijkswegenbouwlaboratorium wordt voor asphaltmortel mengsels een andere weg gevolgd. Men gaat eerst de gunstigste verhouding van vulstof tot bitumen en van grof aggregaat tot bitumen na en vult vervolgens de holle ruimte van het grove aggregaat op met een mastiek van vulstof en bitumen in een dusdanige verhouding, dat zoowel voor de vulstof als voor het zand bitumen in de gunstigste verhouding aanwezig is (zie 58). Hoewel de beproevingsmethode, welke daarbij wordt toegepast (nl. trekproeven op proefstukken van den vorm, die bij cementonderzoek gebruikelijk is) ons zeker aanvechtbaar lijkt (zie ook Hoofdstuk II, § 6) en wij ons evenmin kunnen vereenigen met de wijze, waarop de totale hoeveelheid bitumen in het mengsel gesplitst wordt in een deel, dat de vulstof en een deel, dat het zand omhult, meenen wij, dat de gedachtengang, die aan deze onderzoekingsmethode ten grondslag ligt, juist is. Ook WILHELMI (96) volgt een dergelijke redeneering.

Bij de groote gevoeligheid van de waarde van den initiaalweerstand voor variaties in de waarde van den FB-factor lijkt het ons noodzakelijk bij het samenstellen van wegdek-mengsels het grove aggregaat op te vullen met een mortel van vulstof en bitumen, waarvan de FB-factor een dusdanige waarde heeft, dat de beoogde weerstand tegen plaatselijke deformatie verzekerd is.

De gang van zaken wordt dus de volgende. Op grond van de belasting, waaraan het wegdek zal worden onderworpen, dient in verband met de waarde van de aequivalente deeltjesgrootte D de waarde van den FB-factor bepaald te worden, waarbij een wegdek-mengsel met de beoogde eigenschappen verkregen wordt. Men vult vervolgens de holle ruimte van het grove aggregaat met zooveel van deze mortel, dat nog eenige vol. % holle ruimte in het mengsel overblijft.

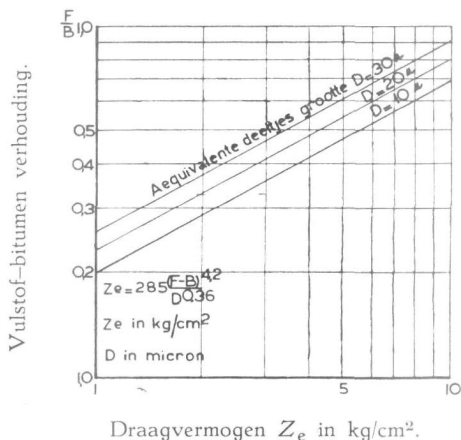
Het verdient overweging niet te rekenen met den FB-factor, doch als grootheid de verhouding volume vulstof tot volume bitumen — welke verhouding wij de „Vulstof-bitumen verhouding” (F/B-verhouding) noemen — in te voeren.

Formule (99) is nu in de grafiek XX uitgewerkt op een zooda-

nige wijze, dat langs de abscis de waarde van het draagvermogen Z_e (in kg/cm^2) is uitgezet, en langs de ordinaat de F/B-verhou-

GRAFIEK XX.

Verband tusschen draagvermogen, aequivalente deeltjesgrootte D en vulstof-bitumen verhouding F/B voor asphaltmortelmengsels.



ding. In de grafiek zijn lijnen getrokken, die het verband van genoemde grootheden voor verschillende waarden van de aequivalente deeltjesgrootte D (in microns) aangeven.

In deze grafiek kan onmiddellijk worden afgelezen, welke F/B-verhouding noodig is, om bij een bepaalde waarde van D een mengsel met het gewenschte draagvermogen te verkrijgen.

Bezit het grove aggregaat een niet te verwaarloozen haakweerstand, welke volgens Tabel XL op eenvoudige wijze uit de concentratie van het hoekige aggregaat berekend kan worden, dan kan op de volgende wijze van grafiek XX gebruik gemaakt worden.

Men kan dit draagvermogen splitsen in een deel Z_h , dat van den haakweerstand afhankelijk is, en dat berekend kan worden uit $Z_h = 20,7 \times \tau_h$ en een restbedrag, dat van den bitumineuzen initiaalweerstand afhankelijk is. Voor dit laatste deel kan weer grafiek XX benut worden om de gewenschte F/B-verhouding te bepalen.

Daarbij zal men vaak uit stabiliteitsoogpunt kunnen volstaan met een zeer geringe vulstoftoevoeging.

In de praktijk zal, om redenen welke buiten het bestek van deze studie liggen (economie, comprimeerbaarheid van het wegdek) een grotere hoeveelheid vulstof worden toegevoegd.

Wij wijzen er ten slotte op, dat volgens Hoofdstuk X, § 4, sub γ , de op bovengenoemde wijze samengestelde wegdekken een overbelasting van 100 % zonder praktisch bezwaar gedurende langere tijd kunnen verdragen. Hiermede kan bij de bepaling van het draagvermogen rekening worden gehouden, zoodat men veelal kan volstaan met een waarde van Z_e , gelijk aan de grootste bandspanning, welke bij het verkeer ter plaatse voorkomt.

Wij meenen goed te doen er op te wijzen, dat de op bovenstaande wijze bepaalde hoeveelheid vulstof aangeeft, hetgeen noodig is om een wegdek van voldoende stabiliteit te verkrijgen. De beperkingen, die uit anderen hoofde (b.v. omhulling, comprimeerbaarheid) aan het vulstofgehalte moeten worden opgelegd, blijven hier buiten bespreking.

§ 4. *Toepassing bij het onderzoek van bitumen-mineraalaggregaatmengsels.*

In de vorige § werd uitgegaan van de idee, dat de aequivalente deeltjesgrootte D van de vulstof bekend was, b.v. door berekening uit de resultaten eener blaasanalyse.

Indien dergelijke gegevens ontbreken, kan men toch op eenvoudige wijze bepalen, welke waarde de F/B-verhouding van een bitumen-mineraalaggregaat-mengsel dient te bezitten, wil het materiaal voldoende weerstand tegen plaatselijke deformatie bezitten.

Hiertoe kan men als volgt te werk gaan. Men stelt een mengsel samen met een bekende, doch verder willekeurige waarde van de F/B-verhouding, daarbij zorg dragende, dat in het gecompriëerde materiaal nog eenige vol. % holle ruimte aanwezig is, en bepaalt de conuswaarde bij $+50^\circ \text{C}$.

In grafiek XX zijn dan de waarden van Z_e en van de F/B-verhouding bekend, zoodat door extrapolatie tusschen de in de grafiek aangegeven lijnen voor $D = 10 \mu$, resp. 20μ , resp. 30μ , de aequi-

valente deeltjesgrootte D van de verwerkte vulstof geschat kan worden.

De bepaling van de voor een bepaald draagvermogen benodigde waarde van de F/B -verhouding levert dan geen moeilijkheden meer op.

Bij deze onderzoekingsmethode dient men zorg te dragen, dat de haakweerstand een zeer lage waarde bezit, daar anders een foutief resultaat zou worden verkregen.

HOOFDSTUK XII.

Conclusies.

I. Bitumen-mineraalaggregaat-mengsels moeten worden opgevat als een uit drie fasen opgebouwd systeem en wel uit:

1. de aggregaatfase (een vaste korrelvormige stof);
2. de vloeistofphase (bitumen, een hoog viskeuze vloeistof);
3. de gasphase, welke de holle ruimte in het mengsel vult.

II. Bij deformatie gedraagt het materiaal zich als een plastisch deformeerbare stof, waarvan de deformaties bij overschrijding der zwichtspanning plastisch-viskeus verlopen.

III. De waarde van de zwichtspanning wordt door den spanningstoestand van het materiaal beïnvloed en neemt lineair met de normaalspanning toe.

Zij kan daarnaast een van deze spanning onafhankelijk deel bevatten.

IV. De snelheidsafhankelijkheid van den weerstand tegen deformatie kan in een constante differentieele viscositeit worden uitgedrukt.

V. De weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels wordt omschreven door drie fysische grootheden en wel:

1. den *hoek van inwendige wrijving*, φ_e , door welchen het lineaire verband tusschen de zwichtspanning en de normaalspanning tot uitdrukking wordt gebracht;

2. den *initiaalweerstand*, τ_e , welke het van de normaalspanning onafhankelijke deel van de zwichtspanning vormt;

3. de *viscositeit der massa* η_m , welchen naam wij aan de differentieele viscositeit gaven.

VI. De grootte-orden dezer grootheden zijn:

$$\varphi_e = \text{ca. } 30^\circ \text{ (wrijvingscoëfficiënt } \xi = \text{tg}\varphi_e = \text{ca. } 0.60);$$

$$\tau_e = 0 - 4 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\eta_m = 10^{10} - 10^{11} \text{ poises, bij kamertemperatuur.}$$

VII. Indien de afmetingen van het proeflichaam voldoende groot worden gekozen ten opzichte van de afmetingen der aggregaatdeelen, kan het materiaal als homogeen-isotroop worden opgevat.

VIII. De waarde van den *hoek van inwendige wrijving* is grooter bij beweging dan in den evenwichtstoestand, doch wordt door de deformatiesnelheid niet beïnvloed. Zij is onafhankelijk van de grootte der spanning.

IX. Indien overmaat bitumen, berekend op de holle ruimte van het aggregaat in gecomprimeerden toestand aanwezig is, treedt in de vloeistofphase een hydrostatische druk op ten gevolge waarvan de weerstand tegen deformatie sterk daalt en een schijnbare daling in de waarde van den hoek van inwendige wrijving wordt gevonden.

X. Bij deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels treedt dilatatie op. De invloed van dit verschijnsel op de getalwaarden der physische grootheden is van ondergeschikt belang.

XI. De wrijving tusschen de aggregaatdeelen is voornamelijk contactwrijving. Hoekig aggregaat geeft een hoogere waarde van den hoek van inwendige wrijving dan rond aggregaat. De hardheid van het bindmiddel en de herkomst er van hebben weinig invloed op deze waarden.

XII. De *initiaalweerstand* is samengesteld uit een *haakweerstand* en een *bitumineuzen initiaalweerstand*.

De waarde van den laatste wordt beïnvloed door de hardheid van het bindmiddel bij proeftemperatuur en neemt met toenemende hardheid toe, indien het bindmiddel harder is dan een bepaalde grenswaarde, doch is onafhankelijk van de hardheid van het uitgangsbisumen.

XIII. De temperatuur, waarbij de bitumineuze initiaalweerstand met toenemende hardheid van het bindmiddel en dus met dalende temperatuur begint toe te nemen, vormt een karakteristiek van het materiaal en wordt door ons de *initiaalverstarringstemperatuur* genoemd. De waarde er van is afhankelijk van de hardheid van het verwerkte uitgangsbisumen.

XIV. Voor de gebruikelijke wegebouwsmengsels is de initiaalverstarringstemperatuur lager dan de hoogste in het wegdek optredende temperatuur.

XV. De herkomst van het gebruikte bitumen beïnvloedt de waarde van den bitumineuzen initiaalweerstand bij temperaturen boven de initiaalverstarringstemperatuur slechts in zeer geringe mate.

XVI. De waarde van de initiaalverstarringstemperatuur wordt door de eigenschappen en de samenstelling van het aggregaat niet beïnvloed.

XVII. De hooge waarden, welke de bitumineuze initiaalweerstand kan bereiken, leiden tot de gevolgtrekking, dat bestanddeelen uit het bitumen op het aggregaatooppervlak worden geadsorbeerd. Deze adsorptie is zoo sterk, dat wij van gebonden bitumen spreken, om het verschil in eigenschappen van het geadsorbeerde bitumen en het normale vrije bitumen tot uitdrukking te brengen.

XVIII. De *viscositeit der massa* neemt toe met toenemende hardheid van het bindmiddel bij proeftemperatuur, doch is onafhankelijk van de hardheid van het uitgangsbitemen. De waarden van de viscositeit der massa varieeren minder dan op grond van een evenredigheid met die van het vrije bitumen bij proeftemperatuur verwacht zou kunnen worden, hetgeen de adsorptietheorie ondersteunt.

XIX. De hardheid van het uitgangsbitemen beïnvloedt de waarde van de viscositeit der massa bij verschillende temperaturen. Een zachter bitumen geeft mengsels met lagere waarden van de viscositeit der massa.

XX. Bij hoogere temperaturen zijn de wijzigingen in de waarde van de viscositeit der massa gering, doch voor elk mengsel is een gebied van lage temperaturen aan te wijzen, waarin deze wijzigingen zeer groot zijn.

XXI. De reciproke waarde van de viscositeit der massa neemt lineair met dalende temperatuur af.

XXII. Hierdoor kunnen de wijzigingen in de waarde van de viscositeit der massa met de temperatuur worden vastgelegd. Wij hebben hiervoor gekozen het temperatuurtraject, waarover de reciproke waarde van de viscositeit der massa een bepaald, arbitrair vastgesteld, bedrag varieert, en dit de *temperatuurindex van de viscositeit der massa* genoemd.

XXIII. De waarde van den temperatuurindex van de viscositeit der massa is onafhankelijk van de hardheid van het verwerkte uitgangsbitumen, doch wordt sterk beïnvloed door de samenstelling van het mineraalaggregaat. De herkomst van het bitumen is van minder belang.

XXIV. De door extrapolatie verkregen waarde van de temperatuur, bij welke de lijn, die het verband tusschen de reciproke waarde van de viscositeit der massa en de temperatuur aangeeft, de temperatuur-as snijdt, wordt door ons de *viskeuze verstaringsstemperatuur* genoemd. Haar waarde is hoger naarmate een harder bitumen in het mengsel is verwerkt. Door de samenstelling van het aggregaat wordt zij niet beïnvloed, evenmin als door de herkomst van het bitumen.

XXV. Daar de weerstand tegen plastische deformatie van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels in belangrijke mate wordt beïnvloed door de eigenschappen van het geadsorbeerde bitumen, zetelt deze weerstand om en nabij de contactpunten der minerale bestanddeelen, en is dientengevolge afhankelijk van het aantal contactpunten per eenheid van doorsnede.

XXVI. Hierbij is het mogelijk betrekkelijk eenvoudige betrekkingen af te leiden tusschen de waarden van den bitumineuzen initiaalweerstand en de viscositeit der massa eenerzijds en

- I. de holle ruimte van het mengsel,
 - II. de verhouding vulstof-bitumen (in volume-eenheden),
 - III. de deeltjesgrootte van de vulstof,
- anderzijds.

XXVII. De invloed van de holle ruimte op de waarden van bitumineuzen initiaalweerstand en viscositeit der massa wordt uitgedrukt door den *holle-ruimte-factor* (HR-factor), met welken zij evenredig zijn.

XXVIII. De invloed van de verhouding vulstof-bitumen wordt uitgedrukt door den *vulstof-bitumen-factor* (FB-factor = $\left(\frac{F}{F+B}\right)^{2/3}$), met welken de waarde van de viscositeit der massa evenredig is, terwijl het verband van den bitumineuzen initiaalweerstand met deze grootte door een machtsfunctie (met een exponent = 4.2) wordt voorgesteld.

XXIX. De waarden van bitumineuzen initiaalweerstand en viscositeit der massa zijn van de deeltjesgrootte van de vulstof afhankelijk volgens een machtsfunctie, waarvan de exponent voor beide -0.36 bedraagt.

XXX. Van dit laatste wordt gebruik gemaakt om de fijnheid van een vulstof, welke uit verschillende fracties bestaat, uit te drukken in de aequivalente deeltjesgrootte D , welke aangeeft de grootte van de vulstofdeeltjes, die aan het mengsel denzelfden weerstand tegen plastische deformatie zouden verlenen als de gebruikte, uit verschillende fracties bestaande, vulstof.

XXXI. De gevonden betrekkingen worden benut om de waarden van den bitumineuzen initiaalweerstand en van de viscositeit der massa te herstellen tot die van mengsels met een HR-factor = 1.—, een FB-factor = 0.50, en $D = D_0 = 10 \mu$.

XXXII. Vergelijkt men de op deze wijze herleide waarden van bitumineuzen initiaalweerstand en viscositeit der massa, dan blijkt, dat het chemisch-physisch karakter van de vulstof deze eigenschappen van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels niet beïnvloedt.

XXXIII. De afwijkingen der aggregaatdeelen van den vorm van een bol hebben een belangrijken invloed op den weerstand tegen plastische deformatie van met dit aggregaat bereide bitumen-mineraalaggregaat-mengsels.

XXXIV. Het is daarbij niet van primair belang of het aggregaat hoekig dan wel afgerond van vorm is.

XXXV. De afmetingen van het grove aggregaat hebben weinig invloed op dezen weerstand.

XXXVI. De hoeveelheid grof aggregaat beïnvloedt in sterke mate de waarden van den initiaalweerstand en de viscositeit der massa, terwijl de variaties in de waarden van den hoek van inwendige wrijving gering zijn.

XXXVII. Bij lage concentratie van het grof aggregaat neemt de waarde van de viscositeit der massa toe met toenemende hoeveelheid grof, waarbij de disperse phase bestaat uit de mortel, waarin het grind (resp. split) is ingebed.

Bij hogere concentratie van het grind (resp. split) ($C = > 0.15$) gaat dit systeem over in een systeem, bestaande uit grind (resp. split) + zand tezamen als gedispergeerde phase en een vulstof-bitumen-mengsel als disperse phase.

XXXVIII. De *haakweerstand* ontstaat ten gevolge van den weerstand tegen rotatie, welke een aggregaatdeeltje van de omliggende massa ondervindt. Een gedeelte van den haakweerstand (de zgn. *echte haakweerstand*) vindt zijn oorzaak in plaatselijke afwijkingen van de homogene spanningsverdeling, het restbedrag (de *bitumineuze haakweerstand*) is een gevolg van den weerstand tegen rotatie, die door het omliggende vulstof-bitumenmengsel wordt ontwikkeld.

XXXIX. De waarde van den haakweerstand is onafhankelijk van de afmetingen van het aggregaat, en wordt sterker beïnvloed door de afwijkingen van den vorm van het aggregaat van den bolvorm dan door den hoekigen vorm van het aggregaat.

XL. De concentratie van het grove aggregaat beïnvloedt de waarde van den haakweerstand in sterkere mate.

XLI. De door PRANDTL afgeleide formule voor het evenwichts-draagvermogen van lineair-plastische materialen voor het tweedimensionale probleem wordt door het experimenteele onderzoek aan bitumen-mineraalaggregaat-mengsels met behulp van de conus voor het drie-dimensionale geval bevestigd en kan gebruikt worden om uit de resultaten der celproeven het evenwichtsdragvermogen te berekenen.

XLII. Het is mogelijk voor mengsels, welke geen overmaat bitumen bevatten, een verband af te leiden tusschen het draagvermogen en de holle ruimte, de volumeverhouding vulstof-bitumen en de aequivalente deeltjesgrootte van de vulstof in het mengsel. Dit verband kan op eenvoudige wijze grafisch worden weergegeven en stelt ons in staat de onder verschillende omstandigheden voor het verkrijgen van een voldoende draagvermogen benodigde vulstof-bitumen verhouding aan te geven.

XLIII. Het gevaar van beschadiging van een wegdek ten gevolge van door het verkeer uitgeoefende horizontale krachten, is voor mengsels, welke geen overmaat bitumen bevatten, gering.

XLIV. De conusproef vormt een geschikt hulpmiddel bij het onderzoek naar de meest geschikte samenstelling van bitumineuze wegdekmenngsels.

XLV. Het weerstandsvermogen van bitumen-mineraalaggregaatmenngsels wordt sterk geschaad door de aanwezigheid van overmaat bindmiddel.

Ook de vulstof-bitumen-verhouding heeft een grooten invloed op de stabiliteit van wegdekmenngsels, in het bijzonder van die, welke slechts rond aggregaat bevatten.

Bevat het aggregaat voldoende hoekig materiaal, dan kunnen dienaangaande de eischen worden verlicht.

De waarde van de aequivalente deeltjesgrootte van de vulstof en het holle ruimte percentage hebben slechts een geringen invloed op de stabiliteit.

LITERATUURLIJST.

1. H. ABRAHAM, Asphalt and Allied Substances. Van Nostrand Cy, New York (1937).
2. W. G. ADAM and D. G. MURDOCH, Some Facts involved in the Mechanical Testing of Bituminous Mixtures. Public Works, Roads and Transport Congress (1933).
3. R. G. C. BATSON, Laboratory Tests and their Correlation with Full-Scale Road Experiments. Public Works, Roads and Transport Congress (1933).
4. W. J. M. BOGAERS, Het onderzoek van asphaltstijtlagen. Ned. Ind. Wegenvereniging Publ. 2, 5 (1934).
5. R. D. BRADBURY, Evaluation of Wheel load distribution for the purpose of computing stresses in concrete pavements. Proc. Highw. Res. Bd. Wash. Part I, 225—254 (1935).
6. W. BIERHALTER, Untersuchungen über Gussasphalt und seine Beurteilung durch mechanische Prüfungen. Asph. Teer 30, 942 (1930).
7. P. W. BRIDGMANN, Reflections on Rupture. J. Appl. Physics 9, 517 (1938).
8. D. C. BROOME and A. R. THOMAS, Determination of the Viscosity of Tar, Pitch and similar opaque substances. J. Soc. Chem. Ind. 50, 425—428 T (1931).
9. D. C. BROOME and A. R. THOMAS, Mechanical Tests and the Modern Highway. Public Works, Roads and Transport Congress (1933).
10. Bull. Amer. Soc. Test. Mat. D5—25 (1936).
11. Zie J. M. BURGERS, R. N. J. SAAL en C. B. BIEZENO, Grondslagen voor een nomenclatuur der deformaties. Verhandelingen der Nederlandsche Academie van Wetenschappen. Afdeling Natuurkunde. Eerste Sectie, Deel XVIII, No. 7 (1941). Noord-Hollandsche Uitgevers Mij, Amsterdam.
12. C. A. CARPENTER, A laboratory test for bituminous surfacing mixtures. Proc. Ass. Pav. Tech. 54—62 (1933 Wash.).
13. Dansk Vejlaboratorium (Vejkomiteen) Publ. 13 (1935).
14. Deutscher Strassenbauverband. Denkschrift I—X über die Versuchstrasse des Deutschen Strassenbauverbandes bei Braunschweig (1929—31), Teil VIII, 64, resp. Teil VI en VII.
15. D. I. N. 1996 (1935).
16. W. DRESCHLER, Die Eigenschaften verschiedener Steinmehle und ihre Eignung als Füllstoffe in Teerfeinbetonmassen. Asph. Teer 32, 403 (1932).
17. H. EILERS, Die Viskosität von Emulsionen hochviskoser Stoffe als Funktion der Konzentration. Koll. Ztsch. 97, 313—321 (1941).

18. W. J. EMMONS and B. A. ANDERTON, A stability test for bituminous paving mixtures. *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* **25**, Part II, 346—355 (1925).
19. W. J. EMMONS, Stability experiments on asphaltic paving mixtures. *Publ. Rds* **14**, 197—211 (1933—34).
20. K. ENDELL, W. LOOS, H. MEISCHEIDER und V. BERG, Über Zusammenhänge zwischen Wasserhaushalt der Tonminerale und bodenphysikalische Eigenschaften bindiger Böden. *Veröff.*: Degebo, Berlin, Heft 5 (1938).
21. N. EWERS, Die Konstruktionsgrundlagen der hochwertigen bituminösen Strassendecken. *Asph. Teer* **35**, 384, 452, 514—515, 449—450 (1935).
22. N. EWERS und F. SCHIEL, Einfluss der Kornform des Sandes beim Asphaltbeton. *Bitumen*, 42—47 (1940).
23. E. FALZ, *Grundzüge der Schmieretechnik 1—4* (1926). Julius Springer, Berlin.
24. First Report on Viscosity and Plasticity. *Proc. Roy. Acad. of Science, Amsterdam XV 95* (1935). Noord-Hollandsche Uitgevers Mij, Amsterdam.
25. A. FÖPPL, *Vorlesungen über Technische Mechanik, Band III*, 13—19, en *Band V*, 19—29 (1920). Teubner, Leipzig.
26. W. GEISSLER und N. EWERS, Die physikalischen Eigenschaften des Füllers. *Bitumen* 11—15 en 41—43 (1934).
27. A. T. GOLDBECK, Tests for the Traffic durability of Bituminous Pavements. *Proc. Ass. Asph. Pav. Tech.* 44—74 (1936 Cleveland).
28. H. W. GONELL, Gesteinmehle als Füller in Bitumenstrassenbau. *Bitumen* 66—69 en 93—98 (1934).
29. O. GRAF, Untersuchungen zur Bestimmung des Verschleisswiderstandes nicht-metallischer Baumaterialien. *Strassenbau* **18**, 563 (1927).
30. J. GREUTERT, The recovery of asphaltic bitumens from solutions as far as possible without altering their properties. *J. Inst. Petr. Tech.* **18**, 846—849 (1932).
31. R. GRÜN, *Der Beton, Herstellung, Gefüge und Widerstandsfähigkeit gegen physikalische und chemische Einwirkungen 7* (1926). Julius Springer, Berlin.
32. *Handbuch der Physik, Band VI*, 463—470 (1928). Julius Springer, Berlin.
33. P. L. E. HAPPÉ, Nieuwe inzichten inzake de werking en de constructie van wegdekken. *De Ingenieur in Ned. Indië I*, 110—132 (1939).
34. G. E. HAWTHORN, A Method of designing non-rigid highway surfaces. University of Washington Seattle (1935).
35. P. HERRMANN, Veröffentlichungen des Hauptausschusses der Zentralstelle für Asphalt und Teerforschung (1937). *Allg. Ind. Verlag*, Berlin, 139.
36. C. A. HOGENTGLER, Essential Features of Triaxial Shear Tests. *Publ. Rds* **20**, 133—144 en 153—154 (1939).
37. H. T. HORSFIELD, The strength of asphalt mixtures. *J. Soc. Chem. Ind.* **53**, 107—115T (1934).

38. H. L. HOWE and H. W. HUGHES, Laboratory Compression of Asphalt Paving Mixtures. Double Plunjer Method. Proc. Ass. Pav. Techn., 106—109 (1932 New-Orleans).
39. P. HUBBARD and F. C. FIELD, A practical method of determining the relative stability of fine-aggregate asphalt paving mixtures. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. **25**, Part II, 335—345 (1925).
40. E. JOHANNSEN, Bituminöse Dauerdecken. Städtebau und Strassenbau (1933). Heymanns Verlag, Berlin.
41. E. F. KELLY, Application of the result of research to the structural design of concrete pavements. Publ. Rds **20**, 83—126 (1936).
42. Keuringsvoorschriften voor Bitumineuze Bouwstoffen (KVBB) (1940) (N 1013).
43. A. S. KEVERLING BUISMAN, Proefondervindelijke bepaling van de grens van inwendig evenwicht van een grondmassa. De Ingenieur **26**, B 83—88 (1934).
44. ———, De weerstand van paalpunten in zand. De Ingenieur **14**, B 25—28 en **18**, B 31—35 (1935).
45. ———, Grondmechanica. (Als Deel IV van J. KLOPPER, Leerboek der Toegepaste Mechanica) (1940). Waltman, Delft.
46. E. KLAPPER, Die Prüfung von Asphaltgestein und bituminösen Konglomeraten. Asph. Teer **35**, 26 (1935).
47. J. KLOPPER, Leerboek der Toegepaste Mechanica, Deel III, 30—31 (1919). Waltman, Delft.
48. ———, Deel II (1919). Waltman, Delft.
49. H. F. KRIEGE and L. C. GILBERT, Some factors affecting the resistance of bituminous mixtures to deformation and moving wheel loads. Proc. Ass. Pav. Techn., 73—84 (1933 Wash.).
50. A. R. LEE and A. H. D. MARKWICK, The mechanical properties of bituminous surfacing materials under constant stress. J. Soc. Chem. Ind. **56**, 146—156T (1937).
51. T. LONSDALE, The mechanical testing of bituminous road materials. Special Report No. 1. Dept. of Scientific and Industrial Research and Ministry of Transport (1939).
52. W. MAASS-HARBURG, Betrachtungen über die Methoden zur Gruppenaufteilung von Bitumen und Asphalten. Asph. Teer **42**, 43—46, 64—68, 83—86 (1942).
53. A. H. D. MARKWICK, The shape of road aggregate and its measurements. Dept. of Scientific and Industrial Research and Ministry of Transport. Road Bulletin No. 2 (1936).
54. O. MARTIN, Über Untersuchungen und Messung der Bindekraft bituminöser Stoffe. Mitt. der Strassenbauforschungsstelle Ostpreussen an der T. H. Dantzig, Heft 7, 23—31 (1936).
55. F. J. MEISTER, Die Bestimmung der vertikalen elastischen Beanspruchungen einer Strasse durch Lastkraftwagen aus den gemessenen Erschütterungen. Strassenbau **27**, 110—115, 124—127 (1936).

56. K. MOLL, Bindestoffe und Fahrbahnbeläge im bituminösen Strassenbau (1941). Allg. Industrie Verlag, Berlin.
57. J. S. MILLER en R. W. TRAXLER, Some of the fundamental physical characteristics of mineral filler intended for asphaltic paving mixtures. *Ass. Asph. Pav. Tech.* 53—63 (1932 Detroit).
58. F. J. NELLENSTEYN en R. LOMAN, Asphaltbitumen en Teer (1932). Centen's Uitgevers Mij, Amsterdam, 214, 56, 58, 56—57, 61—71, 80.
59. F. J. NELLENSTEYN, Dissertatie. Delft (1923).
60. ———, Vulstof voor grof asphaltbeton. *Wegen* 16, 41—43 (1940).
61. E. NEUMANN, Die mechanische Prüfung von bildsamen Massen, die unter Verwendung von Bitumen hergestellt sind. *Bitumen*, 1—5 en 35—41 (1939).
62. ———, Die Prüfung bituminöser Massen im Rahmen der Materialprüfung. *Bitumen*, 17—21 (1941).
63. ———, The critical examination of Bitumen Road Materials. *Public Works Roads and Transport Congress* (1933).
64. J. OBERBACH, *Teer und Asphaltstrassenbau* (1939). Allg. Industrie Verlag, Berlin.
65. J. T. PAULS, A machine for moulding laboratory specimens of bituminous paving mixtures. *Publ. Rds.* 10, 28—32 (1929—30).
66. J. PH. PFEIFFER, Observations on the Mechanical Testing of Bituminous Road Materials. *J. Soc. Chem. Ind.* 57, 213—225 (1938).
67. J. PH. PFEIFFER and P. M. VAN DOORMAAL, Betrachtungen über die rheologischen Eigenschaften von Asphaltbitumen und Arbeitshypothesen über die innere Struktur dieser Produkte. *Koll. Ztsch.* 761, 95—111 (1936).
68. F. PÖPEL, *Der moderne Asphaltstrassenbau* (1929). Martin Boemer, Halle.
69. L. PRANDTL, Über die Härte plastischer Körper. *Nach. Kön. Ges. Wiss. Göttingen. Math. Phys. Kl.* 74—85 (1920).
70. L. F. RADER, Investigation of the physical properties of bituminous mixtures at low temperatures. *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* 35, 559—580 (1935).
71. ———, Correlation of low temperature tests with resistance to cracking of sheet asphalt pavements. *Proc. Ass. Asph. Pav. Tech.*, 29—43 (1936, Cleveland).
72. A. RAMSPECK, *Dynamische Untersuchungen auf Betonfahrdecken. Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen* (1937). Volk und Reich Verlag, Berlin.
73. F. L. RASHIG and P. C. DOYLE, Some recent research on asphalt pavements. *Proc. Ass. Pav. Tech.*, 228—259 (1937 New-Orleans).
74. Report of the Road Research Board for the Year ended 31th March 1938 (Dept. of Scientific and Industrial Research and Ministry of Transport), 166—161, 155, 58—60.
75. Report of the Road Research Board for the Year ended 31th March 1935 (Dept. of Scientific and Industrial Research and Ministry of Transport).

76. Report of the Road Research Board for the Year ended 31th March 1936 (Dept. of Scientific and Industrial Research and Ministry of Transport), 120—124, 118—119, 50—52.
77. Report of the Road Research Board for the year ended 31th March 1937 (Dept. of Scientific and Industrial Research and Ministry of Transport), 37 resp. 28.
78. CL. RICHARDSON, *The modern Asphalt Pavement*. John Wiley Sons New York (1913), 313—374, 87—97, 332—336.
79. G. ROTHFUCHS, *Umrechnung der Lochweite von Rundloch- und Maschen-sieben*. Zement, 670 (1934).
80. R. N. J. SAAL en N. P. G. BUWALDA, *Metingen betreffende de stroefheid van wegdekken van verschillende constructie*. Wegen 16, 325—331 (1940).
81. R. N. J. SAAL en G. KOENS, *Investigations into the plastic properties of asphaltic bitumen*. J. Inst. Petr. Tech. 19, 176—212 (1933).
82. SCHENCK, *Untersuchung eines Asphaltbetonbelages auf der Versuchsbahn des Forschungsinstituts für Strassenbau an der T. H. Berlin*. Bitumen 145—152 (1936).
83. H. W. SKIDMORE, *Practical application of the shear test to bituminous mixtures*. Rds and Streets 69, 5—6 (1929).
84. A. STELLWAAG, *Der Kornaufbau von Schwarzstrassen* (1936). Allg. Ind. Verlag, Berlin, 68.
85. T. H. STANTON and F. N. HVEEM, *Role of the Laboratory in the preliminary investigation and control of materials for low cost bituminous pavements*. Proc. Fourteenth Ann. Meet. Highw. Res. Bd. Part II (1935), 35—36 resp. 50.
86. C. R. STOKES and J. ZAPATA, *Devising a test for the stability of bituminous mixtures*. Proc. Ass. Pav. Tech., 105—109 (1932 Detroit).
87. E. L. TARWATER, *A roller-testing machine for measuring the stability of bituminous mixtures*. Publ. Rds. 16, 134—141 (1935—36).
88. N. H. TAYLOR, *The design and testing of asphalt mixtures*. J. Soc. Chem. Ind. 51, 415—433T (1932).
89. K. VON TERZAGHI, *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage* (1925). F. Deuticke, Leipzig und Wien.
90. ———, *Simple tests determine hydrostatic uplift* Eng. News Rec. 116, 872—875 (1936).
91. S. TUTTLE, *Loads and Roads for War and Peace*. Eng. News Rec. 124, 86—89 (1939).
92. R. VOKAC, *Compression testing of Asphalt paving mixtures*. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 36, 552—567 (1936).
93. ———, *Studies on the proportioning of low cost bituminous mixtures of the dense graded aggregate type*. Proc. Ass. Asph. Pav. Tech., 99 (1932 New Orleans).
94. ———, *An impact test for studying characteristics of asphalt paving mixtures*. Proc. Ass. Asph. Pav. Tech., 40—48 (1935 Chicago).

95. R. VOKAC, Some factors affecting the thermal susceptibility of asphalt paving mixtures. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. **39**, Part II, 1155—1156 (1939).
96. R. WILHELMI, Neue Wege für den Aufbau von Asphalt- und Teerdecken. 15. Allg. Ind. Verlag, Berlin.
97. D. M. WILSON, The Mechanical Testing of Asphalt Public Works, Roads and Transport Congress (1933).
98. C. ZIEGS und H. NÜSSEL, Über Korn-Zusammensetzung und Oberfläche mineralischer Füllstoffe. Bitumen, 134—139, 156—158, 179—189 (1932).

STELLINGEN

I.

De door EILERS-VAN DIJCK voorgestelde formule voor de relatieve viscositeit van disperse systemen verdient de voorkeur boven de door BREDÉE en DE BOOYS en de door HOUWINK en KLAASSENS ontwikkelde formules.

H. EILERS, Koll. Ztsch. 97, 313 (1941).

H. L. BREDÉE en J. DE BOOYS, Koll. Ztsch. 79, 31 en 43 (1937).

R. HOUWINK en K. H. KLAASSENS, Koll. Ztsch. 79, 138 (1937).

H. L. BREDÉE en J. DE BOOYS, Koll. Ztsch. 91, 39 (1940).

II.

De door HÖPPLER ontwikkelde HÖPPLER Konsistometer is voor fundamenteele onderzoeken minder geschikt dan de concentrische rotatie-viscosimeter.

F. HÖPPLER, Koll. Ztsch. 97, 61 (1941) en
Oel und Kohle 37, 995 (1941).

III.

De toepassing van hoogwaardig wapeningsmateriaal in gewapend beton levert alleen voordeel op, indien maatregelen worden getroffen om scheurvorming van het beton tegen te gaan.

E. FREYSSINET, Une révolution dans les techniques du béton (1936).

A. BIJLS, Pol. Wkbl. 34, 158 (1940).

F. VON EMPERGER, Ingenieur Bt 11 (1938).

IV.

Het door SAAL besproken verband tusschen de stijfheidseigenschappen van plakmiddel en geplakt materiaal verdient nadere uitwerking.

R. N. J. SAAL, Chem. Wkbl. 39, 92 (1942).

V.

De door HOUSEL gegeven beschouwing omtrent het draagvermogen van bodemmaterialen is onjuist.

W. S. HOUSEL, Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 35, Part II, 485 (1935).

VI.

Door ROEDIGER en KLINGER wordt terecht gewezen op de noodzakelijkheid de wateradsorptie van met bitumen gestabiliseerd bodemmateriaal aan ongedroogde proeflichamen te bepalen.

Zij passen evenwel ten onrechte een gedeeltelijke onderdompeling dezer proeflichamen onmiddellijk na comprimeering toe.

J. C. ROEDIGER en E. W. KLINGER, Proc. Ass. Asph. Pav. Tech. 8 (1939, Chicago).

VII.

De indeeling der verschillende bodemstabilisatiemethoden dient naar fysieke grondslagen te geschieden.

VIII.

HUBBARD en COLLOMB overschatten den invloed van de hardheid van het bindmiddel op de scheurvorming van bitumineuze wegdekken.

P. HUBBARD en H. COLLOMB, Proc. Ass. Asph. Pav. Tech., 165 (1937, Memphis).

IX.

De door STELLWAAG gegeven verklaring omtrent den invloed van kleine verschillen in het bitumengehalte op de holle ruimte van wegdekken van verschillende granulometrische samenstelling is onjuist.

A. STELLWAAG, Der Kornaufbau von Schwarzstrassen, 32—33. Allg. Ind. Verlag Berlin (1936).

X.

De door HARTLEB ontwikkelde methode voor de bepaling van den omhullingsgraad van bitumen-mineraalaggregaat-mengsels is geschikt om de in de practijk toelaatbare hoogste vulstof-bitumen verhouding te bepalen.

W. HARTLEB, *Strassenbau* 32, 5—8, 20—22, 35—37 (1941).

XI.

Door PRANDTL wordt ten onrechte aangenomen, dat bij plastische deformatie van een materiaal, dat over een gedeelte van zijn oppervlak met een gelijkmatige spanning wordt belast, een onder dit vlak gevormd lichaam in zijn geheel wordt verplaatst.

PRANDTL, *Nach. Kon. Ges. Wiss. Göttingen. Math. Phys. Kl.* 74—85 (1920).

XII.

De vermindering van den weerstand tegen plaatselijke deformatie, welke optreedt bij aanwezigheid van overmaat bitumen in bitumineuze wegdekmenngsels, wordt ten onrechte veelal toegeschreven aan smering der aggregaatdeelen door het bindmiddel.

N. EWERS, *Asph. Teer* 35, 384 (1935).

P. HERRMANN, *Veröffentlichungen des Hauptausschusses der Zentralstelle für Asphalt- und Teerforschung*, 139. *Allg. Ind. Verlag Berlin* (1937).

XIII.

De eischen, die het verkeer aan een bitumineus wegdek stelt, kunnen bij toepassing der door HERRMANN ontwikkelde „filmdikte-theorie” slechts onvoldoende tot uitdrukking worden gebracht.

P. HERRMANN, *Veröffentlichungen des Hauptausschusses der Zentralstelle für Asphalt- und Teerforschung*, 140. *Allg. Ind. Verlag Berlin* (1937).

XIV.

De door WILHELMI ontwikkelde „morteltheorie” stelt den wegebouwer niet in staat een verband af te leiden tusschen de samenstelling van een bitumineus wegdekmenngsel en den weerstand tegen plastische deformatie er van.

R. WILHELMI, Neue Wege für den Aufbau von Asphalt- und Teerdecken, 36. Allg. Ind. Verlag Berlin.

XV.

Bij den bouw van wegdekken aan de hand van de „minimum holle ruimte theorie” van HERRMANN wordt alleen bij uiterst nauwkeurige doseering van het bindmiddel een stabiel wegdek verkregen.

P. HERRMANN, Veröffentlichungen des Hauptausschusses der Zentralstelle für Asphalt- und Teerforschung, 489—490. Allg. Ind. Verlag Berlin (1937).

XVI.

EWERS onderschat het aandeel van den wrijvingsweerstand in den totalen weerstand tegen plastische deformatie van bitumineuze wegdekmaterialen.

N. EWERS, Asph. Teer 35, 574 (1935).