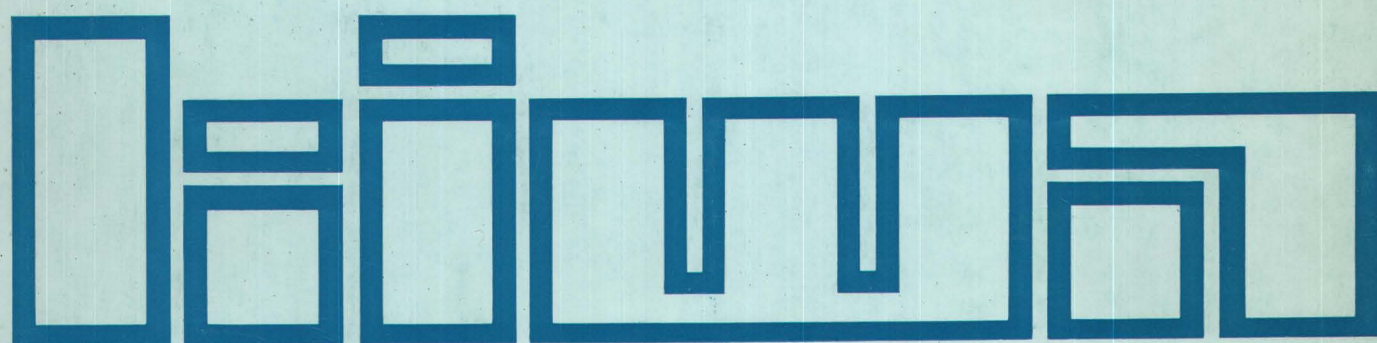


filterzand



keurings-
instituut
voor
waterleiding
artikelen
kiwa n.v.

EIGENSCHAPPEN EN KARAKTERISERING VAN

FILTERMATERIAAL

door ir. A. de Lathouder

Mededeling nr. 1 van de Commissie Snelfilters

Rijswijk (Z.H.), 1973

KEURINGSINSTITUUT VOOR WATERLEIDINGARTIKELN KIWA N.V.

De leden van de Commissie Snelfilters zijn

prof. ir. L. Huisman (voorzitter)

ing. P.J. van Winsen (secretaris)

drs. A. Boes ¹⁾

ir. A.N. van Breemen

prof.ir. P.L. Knoppert

dr. E.J.M. Kobus

ir. A. de Lathouder

drs. J.C. Sybrandi

¹⁾ is uitgetreden op 18-2-1970

I N H O U D

	<u>Pagina</u>
1. INLEIDING	3
2. ENKELE ALGEMENE EISEN EN EIGENSCHAPPEN MET BETREKKING TOT FILTERZAND	6
2.1 Hardheid, slijtvastheid	6
2.2 Vorm en vorminvloed	7
2.3 Bijproducten, gloeien	8
2.4 Dichtheid	10
2.5 Chemische bestandheid	11
2.6 Invloed op enkele karakteristieke groot- heden	11
3. KORRELGROOTTEVERDELING, ZEVEN	12
3.1 Zeefanalyse en korrelvorm	12
3.2 Standaardzeven, normalisatie van de maaswijdte	15
3.3 De zeefmethode	20
3.4 Keuring van zeven	23
4. KARAKTERISERING VAN DE KORRELGROOTTE EN -VORM EN VAN DE KORRELGROOTTEVERDELING VAN EEN ZANDMONSTER	25
4.1 Algemeen	25
4.2 Karakterisering volgens Hazen	29
4.2.1 De effectieve diameter	29
4.2.2 Karakterisering van de zeefmaat	31
4.3 Karakterisering volgens Baylis	32
4.4 Karakterisering van een natuurlijk zand	33
4.5 Karakterisering door middel van de soor- telijke diameter	36
4.6 Karakterisering van korreloppervlak en -vorm naar het hydraulische effect	40
5. KEUZE, EISEN EN SPECIFICATIE VAN HET TE BESTELLEN FILTERZAND	57
5.1 Algemene opmerkingen over de keuze van het zand	57
5.2 Leveringsmogelijkheden in Nederland	60
5.3 Algemene eisen voor een te bestellen zand	63
5.4 Specificatie van het te bestellen zand	65
6. SYMBOLEN	73
7. LITERATUUROPGAVE	76

Tabellen

Figuren

1. INLEIDING

Voor de filtratie als onderdeel van het zuiveringsproces voor de bereiding van drinkwater wordt doorgaans gebruik gemaakt van met korrelig materiaal — meestal zand — gevulde filters. Onderscheid wordt gemaakt tussen langzame zandfilters met fijn materiaal (0,2 - 0,4 mm), die bij een kleine filtratiesnelheid een groot oppervlak vereisen en de kleinere snelfilters met grover materiaal (veelal 0,5 - 2 mm), waarin hogere filtratiesnelheden worden toegepast. In het volgende zal aan het materiaal voor laatstgenoemd filtertype een nadere beschouwing worden gewijd.

Het korrelvormige filtermateriaal moet voldoen aan bepaalde eisen ten aanzien van de mechanische en chemische bestendigheid. Het moet een grote slijtvastheid bezitten om het afslijten van de korrels door de schuurwerking tijdens het spoelproces tot een minimum te beperken. Daarnaast dienen bij de keuze van het materiaal speciale eisen afhankelijk van de kwaliteit van het beschikbare ruwe water en het gewenste filtraat te worden gesteld om een gunstige filtratie te verkrijgen. De filtratie hangt echter niet alleen samen met de korrelgrootte, -vorm, -variatie en het korreloppervlak, maar ook met de porositeit en de diepte van het bed, en met de aard en de lading van het materiaal.

Aan de primaire eisen en de ten behoeve van de keuze gewenste korrelgroottevariëaties voldoet in de eerste plaats zand. Zand is niet alleen in economisch opzicht wegens de lage prijs en de ruime mate van beschikbaarheid aantrekkelijk, maar met dit materiaal

is ook een zeer uitgebreide ervaring opgedaan. Er zijn globale richtlijnen voor de toepassing en gegevens over de filtererende werking die de keuze kunnen vergemakkelijken. Voor de gebruikelijke beddiepte komt de prijs voor het normaal geselecteerde filterzand per m^2 filterbedoppervlak op ongeveer 2% van de prijs van het complete filter, eveneens gerekend per m^2 filterbedoppervlak. De omstandigheid dat het zand van natuurlijke oorsprong is en bovendien de vindplaatsen van tijd tot tijd veranderen, impliceert dat zowel de afmetingen, de vorm als de korrelgrootteverdeling van partij tot partij verschillen. Voor de aanduiding of karakterisering van het zand zijn dus enkele parameters nodig. Met de karakterisering van de korrelafmetingen hebben zich al vele jaren verscheidene onderzoekers beziggehouden. Het gevolg is dan ook dat hiervoor reeds vele methoden voorgesteld zijn en dat er op dit punt geen uniformiteit en zelfs verwarring bestaat. Daarom zal aan de korrelgrootteverdeling en aan de karakterisering van de korrel bijzondere aandacht worden besteed.

Afgezien van vorm, afmetingen en korrelgrootteverdeling zijn de chemische en fysische eigenschappen van belang. Voor zand zijn deze vrij constant maar voor andere filtermaterialen kunnen zij sterk verschillen. Wat tenslotte de soorten filterzand betreft, kan worden vermeld dat in Nederland in hoofdzaak rivierzand wordt gebruikt. Ook wordt echter duinzand en bergzand toegepast. Deze zanden hebben zowel scherpe als afgeronde korrels en bestaan in hoofdzaak uit kwarts (SiO_2).

Het rivierzand is mede door de aard van het winningsproces vrij zuiver en heeft evenals het berg- en heidezand een gemengde korrelgrootte. Bergzand bevat echter van nature vaak onzuiverheden van leem en ijzeroxide. Het duin- en zeezand bevatten meer onzuiverheden van organische aard en hebben in het algemeen een gelijkmatige fijne korrel.

2. ENKELE ALGEMENE EISEN EN EIGENSCHAPPEN MET BETREKKING TOT FILTERZAND

2.1 Hardheid, slijtvastheid

Zand is een hard en slijtvast, dus duurzaam materiaal. De hardheid kan worden uitgedrukt met behulp van een hardheidsschaal van Mohs. In deze schaal worden de volgende 10 mineralen met de daarvoor geplaatste schaalgetallen als maatstaf voor de hardheid gebruikt.

- | | |
|-------------|---------------|
| 1. Talk | 6. Orthoklaas |
| 2. Gips | 7. Kwarts |
| 3. Calciet | 8. Topaas |
| 4. Fluoriet | 9. Korund |
| 5. Apatiet | 10. Diamant |

In deze schaal wordt een mineraal gekrast door het mineraal dat een rangnummer hoger is geplaatst. Om deze methode op een korrelvormig materiaal zoals zand toe te passen, kunnen vooraf plaatjes van verschillende materialen (bijv. diverse glassoorten) volgens Mohs worden geijkt. De beoordeling van de hardheid geschiedt dan door na te gaan in hoeverre de korrels van het te onderzoeken materiaal krassen op de geijkte plaatjes kunnen veroorzaken.

Deze methode hanteert geen absolute maatstaven en komt dus neer op een relatieve beoordeling. Bovendien kunnen er nog verschillen optreden omdat de hardheid bij krassen in verschillende richtingen verschillend kan zijn en omdat de hardheid o.a. kan worden beïnvloed door de brosheid, het vochtgehalte, de korrelgrootte en -vorm en door de verontreinigingen in het materiaal. De geschetste methode is aan-

vaardbaar voor het verkrijgen van een redelijke indruk. Er zijn weliswaar nog andere methoden, maar het is twijfelachtig of deze - zo toepassing op korrelvormig materiaal mogelijk is - tot een betere beoordelingsmaatstaf leiden. Zo is er een krasmethode waarbij de relatieve hardheidswaarde wordt uitgedrukt in het gewicht dat nodig is om met een punt van diamant een kras in een bepaalde richting op een bepaald vlak te maken. Behalve deze krasmethode zijn er nog andere hardheidsbepalingen waarbij het materiaal wordt geboord, geslepen, gedrukt of verbrijzeld (lit. 1).

In het voorgaande is steeds gesproken over de hardheid van het materiaal. Hoewel een grotere hardheid kan samengaan met een hogere slijtvastheid, zij erop gewezen dat de hardheid nog geen maatstaf voor de slijtvastheid van een materiaal behoeft te zijn. De slijtvastheid van zand is zo groot dat dit bij de gebruikelijke filtratieprocessen geen probleem oplevert. Voor minder hard materiaal, zoals anthraciet moet op een grotere slijtage worden gerekend.

De hardheid van zand bedraagt volgens de schaal van Mohs $H_m = 7$. Dit is vergeleken met andere filtermaterialen - waarvoor de hardheidswaarde H_m doorgaans 3 tot 6 bedraagt - een hoge graad van hardheid.

2.2 Vorm en vorminvloed

Zand komt zowel in afgeronde, hoekige als scherpe vorm voor. Naar de herkomst kan, zoals in punt 1 reeds bleek, onderscheid worden gemaakt in diverse zandtypen zoals rivierzand, bergzand, heidezand, duinzand en zeezand. Bij de bestelling kan tot op zekere hoogte met wensen omtrent vorm en herkomst rekening worden gehouden. Door sommige leveranciers

wordt het zand zelfs speciaal gebroken om hoekiger materiaal te kunnen leveren. Naarmate het materiaal hoekiger is - dus meer afwijkt van de bolvorm - is het korreloppervlak per gewichtseenheid groter, hetgeen de filtratie ten goede kan komen. Als gevolg van de toenemende hoekigheid van de korrels komen deze echter verder uiteen te liggen, zodat het aantal korrels per volume-eenheid kleiner wordt (vergroting van het poriënvolume). De verkregen oppervlaktevergroting door gebruik van hoekiger materiaal wordt dus, gezien per volume-eenheid, weer tegengewerkt door vermindering van het aantal korrels. Hoewel het wrijvingsoppervlak per korrel groter wordt naarmate de hoekigheid toeneemt, kan de totale weerstand afnemen omdat de korrels verder uiteen liggen (groter poriënvolume) en de gemiddelde stromingssnelheid door het grotere poriënvolume lager is. Hieruit blijkt dat de korrelvorm van invloed is op de filtratie en de hydraulische eigenschappen van het filterbed.

Om te voorkomen dat er teveel platte en langwerpige deeltjes in het materiaal vóórkomen, wordt als eis gesteld dat minder dan 2% van het filtermateriaal uit langwerpig en plat of mica-achtig materiaal bestaat. Als maatstaf wordt gesteld dat een lange platte korrel niet voldoet als de lengte groter is dan driemaal de dikte.

2.3 Bijproducten, gloeien

Het zand dient nagenoeg vrij te zijn van stof, kool of koolas, klei of leem, organische stoffen en andere verontreinigingen zoals mica, veldspaat, leisteen, ijzer, mangaan en oplosbare calcium- en magnesiumverbindingen. Ten minste 98% moet uit silica bestaan.

Het rivierzand wordt tijdens het baggerproces enigszins uitgespoeld en is daardoor reeds betrekkelijk schoon. Toch wordt aanbevolen het zand vooraf te wassen, opdat de verontreinigingen zoveel mogelijk worden uitgespoeld. Daarenboven is het echter steeds gewenst het materiaal te gloeien om het verder te reinigen en bacterievrij te maken. Daarom wordt het materiaal door de leveranciers van filterzand doorgaans gegloeid. Het gloeiproces kan op de volgende wijze in een liggende roterende cilindrische trommel worden uitgevoerd. Het zand wordt aan de ene zijde van de gloeitrommel ingevoerd en getransporteerd in de richting van een vlam, die aan de andere zijde in het hart van de trommel wordt ingeblazen. Het zand komt na de invoer in ongeveer 5 minuten op gloeitemperatuur, waarna het gedurende circa 1 minuut bij deze temperatuur van 700 à 1000 °C in of in de onmiddellijke omgeving van de vlam verblijft. Daarna koelt het in ongeveer 5 minuten af en verlaat het de trommel bij een temperatuur van 100 à 150°C.

Wenst de gebruiker een nader inzicht te verkrijgen omtrent de verontreiniging, dan neemt hij controleproeven ter bepaling van het slibgehalte en het gloeiverlies. Voor het toelaatbare slibgehalte wordt in de Aanbevelingen van de VEWIN op de Nederlandse Waterleidingwet gesteld dat het uitwasbare slibvolume <1% moet zijn, een waarde die ook in de literatuur (Gandenberger) wordt vermeld, echter met name voor klei- en organische stof. Het zonder meer stellen van een grens voor het slibgehalte geeft overigens weinig houvast. Het af te scheiden slib is namelijk afhankelijk van de intensiteit van uitwassen, terwijl de aangekoekte kleideeltjes met een normaal was-

proces niet worden verwijderd. Het resultaat wordt bovendien vertekend door de fijne zandfracties, die zich in het slib bevinden. Deze methode is daarom dan ook niet aanbevelenswaardig. Een goede indruk van de organische vervuiling wordt verkregen door het gloeiproces, dat derhalve wel kan worden aanbevolen. Hiertoe wordt een monster van 50 gram in een open schaalpje bij een temperatuur van 750°C gedurende ten minste 1 uur gegloeid. Het gloeiverlies mag dan niet meer dan 0,5% bedragen.

2.4 Dichtheid

De dichtheid van het filtermateriaal wordt uitgedrukt in massa-eenheden per volume-eenheid, dus in kg/m^3 . Onderscheid wordt gemaakt tussen de dichtheid ρ van het materiaal zelf, dus van de korrel, en de dichtheid ρ_b van het gestorte materiaal met inbegrip van het poriënvolume ("stortgewicht"). De massadichtheid van het materiaal bedraagt voor filterzand meestal ca. 2650 kg/m^3 . Voor een goede kwaliteit zand wordt geëist dat de massadichtheid groter is dan 2500 kg/m^3 , terwijl niet meer dan 1% onder de 2250 kg/m^3 mag liggen. Om het zand op de aanwezigheid van lichte bestanddelen te controleren, kunnen deze worden afgescheiden door monsters van een aantal zeeffracties op te spoelen en de bovenkomende lichte deeltjes af te vangen.

De stortdichtheid ρ_b bedraagt niet meer dan 1600 kg/m^3 , hetgeen overeenkomt met een poriënvolume ϵ van 40%. (40% van het totale volume wordt ingenomen door de tussen het materiaal aanwezige poriën). Meestal is het poriënvolume nog iets groter en de dichtheid per m^3 dus lager. Het gebruikelijke enigszins afgeronde zand

heeft een poriënvolume dat doorgaans tussen de 40 en 45% ligt, maar in extreme gevallen kan zelfs een poriënvolume van 55% worden verkregen, zodat $\rho_b \sim 1200 \text{ kg/m}^3$. Verdere details over het poriënvolume worden in dit rapport niet behandeld.

2.5 Chemische bestandheid

Vooraf bij agressief water en lage pH-waarden kan het filterzand worden aangetast. Het dient bestand te zijn tegen de inwerking van zuur. Na 24 uur verblijf in geconcentreerd zoutzuur (20%) moet het gewichtsverlies minder dan 2% bedragen. Voor de gewichtsbepaling moet het zand bij 110°C tot constant gewicht worden gedroogd.

2.6 Invloed op enkele karakteristieke grootheden

Door verontreinigingen van het zand, zoals klei en humus, wordt de pH-waarde van het door het bed stromende water beïnvloed. Gloeien van het zand heeft een pH-verhogend effect.

Het kinetisch actieve potentiaalverschil van het filtermateriaal (ζ =zêta-potentiaal), dat van belang is voor de adsorptie aan het korreloppervlak, hangt af van de aard, de zuiverheid en het milieu van het filtermateriaal. Zo blijkt kwartszand een hogere negatieve ζ -potentiaal te hebben dan rivierzand. Naarmate het filtermateriaal beter gewassen is, is de negatieve ζ -potentiaal hoger. In het gebruikelijke pH-gebied neemt de negatieve ζ -waarde voor filterzand toe met de pH. Door aan het korreloppervlak geadsorbeerde stoffen (afzettingen) kan het potentiaalverschil veranderen, waardoor dus ook de filtratie-eigenschappen van het materiaal zich wijzigen.

3. KORRELGROOTTEVERDELING, ZEVEN

3.1 Zeefanalyse en korrelvorm

De korrelafmetingen van een filtermateriaal met ongelijke korrels kunnen worden vastgelegd door van een monster van dit materiaal een zeefanalyse te maken. Hiertoe is een serie zeven nodig waarvan de nominale afmetingen der doorlaatopeningen een systematische reeks vormen. Ten einde met een serie zeven een korrelgrootte-analyse te kunnen maken, dienen de zeven na het opbrengen van het materiaal gedurende een bepaalde tijd dusdanig te worden bewogen dat de gewenste graad van scheiding naar korrelafmetingen wordt verkregen. Het is gebruikelijk het resultaat van de uitzeving samen te vatten in een tabel of figuur, waarin de door de verschillende zeven passerende gewichtshoeveelheden zand cumulatief als functie van de betreffende zeefopeningen worden weergegeven (lit. 2, 3 en 4). Hierbij wordt voor elke zeefmaat de som van de gewichten van alle fracties, die deze en alle grotere zeefmaten gepasseerd zijn, bepaald. Deze som wordt uitgedrukt in procenten van het totale gewicht der fracties, zodat voor elke zeefmaat het percentage deeltjes, dat kleiner is dan deze maat, wordt verkregen. De zeefmaten worden op de horizontale as vaak volgens een logaritmische schaal uitgezet. Hiermee wordt bereikt dat voor de maaswijdte van een serie zeven, die bij benadering een meetkundige reeks vormen, vrijwel gelijke intervallen kunnen worden gekozen. De cumulatieve gewichtspercentages kunnen op de verticale as volgens een lineaire schaal worden uitgezet. Bij theoretische beschouwingen wordt echter vaak de voorkeur gegeven aan een waarschijnlijkheidsschaal, omdat dan voor natuurlijk zand een rechte lijn wordt benaderd (zie punt 4.4). Bovendien geeft de waarschijn-

lijkheidsschaal een grotere nauwkeurigheid omdat het middendeel van de kromme minder steil verloopt dan met de lineaire schaal en omdat de schaal naar de einden toe vergroot, waardoor de fijne en grove eindfracties nauwkeuriger kunnen worden aangegeven en afgelezen. In figuur 1 is een voorbeeld van een zeefkromme gegeven, waarbij de zeefmaten horizontaal op een logaritmische schaal zijn uitgezet en de gewichtspercentages op de verticale schaal zowel volgens een lineaire als een waarschijnlijkheidsverdeling zijn gegeven.

Voor de praktijk kan voor het uitzetten van zeefkrommen, bijvoorbeeld in verband met het bestellen van filterzand, het gebruik van normaal millimeterpapier worden aanbevolen. Daarmee is een ieder vertrouwd, zodat het uitzetten en aflezen snel kan geschieden met minder risico voor het maken van fouten dan bij gebruik van bijzondere schalen.

Hoewel de zeefanalyses en de daaruit verkregen korrelgrootteverdelingen een goede indruk van de korrelverdeling en hun grootte geven, is hiermee de volumieke diameter van de verschillende korrelfracties nog niet vastgelegd. De volumieke korreldiameter d_v van een aantal korrels van een zeeffractie wordt gedefinieerd als de diameter van eenzelfde aantal gelijke bolletjes met eenzelfde totaalvolume als de beschouwde korrels. De zeeffractie en dus ook deze volumieke diameter worden overigens niet alleen door de zeefmaat bepaald, maar ook door de vorm van de korrels, zoals uit het volgende blijkt.

Indien het vierkante gat van een maas van de zeef de afmeting 1×1 heeft, kan hierdoor een bol met een diameter 1 juist passeren. Doorgaans komt de vorm van de

zandkorrels echter min of meer overeen met die van een ellipsoïde.

Uit een groot aantal in de USA uitgevoerde metingen aan natuurlijk zand bleek volgens Hazen dat de 3 assen van een zandkorrel met een volumieke diameter l (= diameter van een bolletje met gelijke inhoud) gemiddeld een lengte hadden van 1,38, 1,05 en 0,69. Baylis vond nagenoeg dezelfde verhouding. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijke korrel een maas van 1×1 (diagonaal 1,41) gemakkelijk kan passeren als de langste as ongeveer verticaal op het vlak van de zeef staat. Het is dan ook gebleken dat voor afgeronde korrels van een natuurlijk zand geldt dat zij een zeef met mazen van 1×1 nog passeren als zij een volumieke diameter d_v van ongeveer 1,1 hebben:

Deze waarde kan zelfs nog hoger liggen, bijvoorbeeld door onnauwkeurigheden (te grote mazen) en afwijkende weefpatronen (twilled cloth) voor fijne zeven. Naarmate de korrels **meer de bolvorm benaderen, zoals** dit voor een kunstmatig product het geval kan zijn, zal de volumieke diameter kleiner worden. Uit een onderzoek van een aantal sterk verschillende natuurlijke zanden, waarbij op zeven van verschillende maaswijdte werd gezeefd, is echter gebleken dat de invloed van de variatie van de volumieke diameter als gevolg van variaties van de korrelvorm niet groot is en voor de praktijk van ondergeschikt belang is (lit. 5).

Uit de voorgaande beschouwing blijkt dat de grootte van de korrel die een bepaalde zeef passeert, afhankelijk is van de korrelvorm en dat de korrelgrootte dus niet ondubbelzinnig door de zeef kan worden vastgelegd. Om aan dit bezwaar tegemoet te komen heeft Hazen een analysemethode aanbevolen ("Hazen's rating"), waarbij niet de maaswijdte, maar de grootte van de nog juist door een zeef passerende korrels als maatstaf wordt gehanteerd. Weliswaar wordt

de korrelgrootte volgens de methode van Hazen beter vastgelegd dan door de maasaanduiding, maar voor verschillende zandtypen is, zoals uit het voorgaande reeds bleek, de uitkomst in principe niet gelijk. Ook is zijn volumieke diameter niet bepalend voor het korreloppervlak, dat tijdens de filtratie zo'n belangrijke rol speelt. Op Hazens zeefaanduiding door middel van de juist passerende korrelgrootte zal bij de karakterisering van het filtermateriaal volgens de methode van Hazen onder punt 4.2.2 nader worden ingegaan.

Hoewel in de praktijk ook de zeefmaten veelal als "diameters" worden aangeduid, dient men zich steeds te realiseren dat dit slechts een handig bruikbare benadering is die noch bepalend is voor de grootte noch voor het oppervlak van de korrels. Een aanduiding die in formules waarin de zandfracties tot uitdrukking worden gebracht nogal eens wordt gebruikt, is het geometrisch gemiddelde van de zeefmaten d_p en d_q , waartussen de betreffende zandfractie is gelegen, dus $d = \sqrt{d_p d_q}$.

3.2 Standaardzeven, normalisatie van de maaswijdte

Voor het uitvoeren van zeefanalyses wordt gebruik gemaakt van 2 typen zeven, nl. plaat- en draadzeven. Plaatzeven bestaan uit platen van metaal, kunststof of ander materiaal, waarin gaten zijn geponst, geboord of gefraisd. De platen hebben ronde of vierkante gaten. Voor ronde gaten ≥ 1 mm en vierkante gaten ≥ 2 mm kunnen deze plaatzeven met voldoende nauwkeurigheid worden vervaardigd zonder bijzondere bewerkingen toe te passen. Voordelen van plaatzeven zijn de matige prijs en de geringe invloed van slijtage op de zeefeigenschappen. De huidige verfijnde fabriekstechnieken hebben de mogelijkheid geopend ook voor kleinere openingen de

vereiste nauwkeurigheid te bereiken. In de praktijk worden echter voor zeven met openingen < 1 mm in het algemeen van metaaldraad geweven draadzeven gebruikt. Deze kunnen voor maten groter dan 0,1 mm met zeer grote nauwkeurigheid worden gemaakt. Onder de 100 micrometer maaswijdte neemt de nauwkeurigheid echter snel af, maar dergelijke maten zijn voor het uitzeven van filtermateriaal niet van belang. Ook voor de gebruikelijke korrelgrootten > 1 mm geven de draadzeven geen problemen. De gebruikelijke genormaliseerde controlezeven bestaan uit series waarvan de maaswijdten volgens een meetkundige reeks, dus met een bepaalde factor, toenemen. Reeds in 1867 werd voorgesteld een reden $\sqrt{2} = 1,414$ te gebruiken om, uitgaande van een standaardafmeting van 1 mm, grotere en kleinere maaswijdten te bepalen. Door de behoefte aan kleinere stappen werden later echter standaardseries met een factor $\sqrt[4]{2} = 1,189$ gekozen, die o.a. werden toegepast in de USA door Tyler en de American Society for Testing Materials (ASTM), in Groot-Brittannië door de British Standards Institution (B.S.) en in Nederland door de Hoofdcommissie voor de Normalisatie. In 1939 werd door de ISO (International Standard Organization) besloten de maaswijdten van industriële- en controlezeven te baseren op de hieronder nader beschreven zogenoemde voorkeurreksen volgens de ISO-aanbeveling ISO/R 3. Deze reksen zijn ook beschreven in het Duitse normblad DIN 323 en in het Nederlandse normblad N 3070. De keuze van deze voorkeurreksen had in 1967 het verschijnen van de ISO-aanbeveling R 565 tot gevolg. Daarin zijn voorkeurreksen voor de maaswijdten van draad- en plaatzeven vermeld.

Ter verduidelijking van het inzicht in de verscheidenheid van toegepaste zeefmazen is een toelichting op de genoemde voorkeurreksen gewenst. Voorkeurreksen

(lit. 6, 7, 8, 9 en 10) zijn benaderde meetkundige reeksen waarvan de termen door voorkeurgetallen worden gevormd. Als uitgangspunt voor deze reeksen is gekozen een gebied van 1 tot 10 dat in 5, 10, 20 of 40 gelijke stappen wordt overbrugd. De aldus gevormde hoofdreeksen worden dienovereenkomstig betiteld met R 5, R 10, R 20 en R 40. Voor de reeks R 40 bedraagt de reden of verhouding tussen twee opeenvolgende termen dus $\sqrt[40]{10}$. De theoretische waarden zijn afgerond tot op 3 cijfers en vormen aldus de voorkeurgetallen van de reeks. Naast deze reeksen wordt nog gebruik gemaakt van afgeleide reeksen, die worden gevormd door telkens slechts een 2e, 3e of verdere stap uit de hoofdreeks te kiezen en de tussenliggende waarden dus over te slaan. Deze worden aangeduid door vermelding van deze stap achter het kengetal van de hoofdreeks. Zo wordt een reeks volgens elke derde stap van de reeks R 40 aangegeven met R 40/3. Voor de normalisatie van zeven wordt in hoofdzaak gebruik gemaakt van de reeksen R 20 en R 40/3. De R 20-reeks heeft stappen die overeenkomen met de factor $\sqrt[20]{10}$ of ca. 1,12 (12%). Voor de R 40/3-reeks bedraagt de factor $(\sqrt[40]{10})^3$ of ca. 1,19 (19%). In tabel 1 zijn enkele reeksen voor het gebied van 0,1 tot 10 mm gegeven.

Voor al voor het zeven van uniform zand is het gewenst een kleine factor toe te passen en de stappen daarom niet groter te kiezen dan ten hoogste 19% (R 40/3). In de U.S.A., Groot-Brittannië en Nederland werden in 1969 nog standaardseries toegepast waarbij, behoudens enkele variaties, gebruik werd gemaakt van de factor $2^{\frac{1}{4}}$. Het waren de Tyler-Standard (1910), de ASTM-Standard (ASTM E

11-61, 1966), de British Standard (B.S. 410-1962) en de Nederlandse norm volgens N 480 van 1952. De U.S.A., Engeland en Nederland hebben inmiddels besloten voorkeurreeksen te gaan toepassen en daarbij in hoofdzaak de reeks R 40/3 te volgen. Deze aanpassing kan met betrekkelijk geringe wijzigingen geschieden, dank zij de gelukkige omstandigheid dat de factoren $10^{3/40}$ en $2^{1/4}$ ongeveer aan elkaar gelijk zijn. De ASTM- en de B.S.-norm volgens deze opzet kwamen in 1970 respectievelijk 1969 gereed. De Nederlandse norm NEN 2560 (lit. 11) is in december 1969 verschenen. ASTM heeft in het gebied van 0,1-10 mm nog een zeefmaat 6,3 mm ($\frac{1}{4}$ " toegevoegd. De Nederlandse serie, waarop in het volgende nog nader wordt ingegaan, vertoont meer afwijkingen. De Duitse standaard (DIN 4188-1969) is, evenals het Franse ontwerp (AFNOR XII-501-1968), gebaseerd op de R 20-reeks, die overeenkomt met elke tweede stap van R 40. Bijgevolg is elke derde term van de Duitse serie gelijk aan elke tweede term van de Engels-Amerikaanse serie. Tenslotte zij vermeld dat de ISO-serie volgens R 565-1967, die in hoofdzaak de reeks R 20/3 volgt, opklimt met een factor $10^{3/20}$, die nagenoeg gelijk is aan $\sqrt{2}$ en dus ca. 1,41 bedraagt. Elke stap komt dus overeen met elke tweede stap van de nieuwe Engels-Amerikaanse serie. Voor de karakterisering van filterzand worden deze stappen van 41% te groot geacht.

Hoewel het gebruik van verschillende reeksen op het eerste gezicht een enigszins verwarrende indruk geeft, blijkt er toch een zekere overeenstemming tussen de diverse series te bestaan, om-

dat nagenoeg alle waarden vóórkomen in de serie R 40 en omdat ze alle de R 20/3 (= R 40/6)-reeks bevatten. In tabel 1 zijn de onderscheidene standaardseries naast de voorkeurreeksen uitgezet, zodat een duidelijke vergelijking mogelijk is. Aangezien er nog veel zeven volgens de norm N 480 (lit. 11) in gebruik zijn, is ook deze serie zeven in de tabel opgenomen.

Ten aanzien van de Nederlandse normen kan het volgende worden opgemerkt. De norm N 480 schreef draadzeven van 0,05 tot 0,85 mm en plaatzeven met ronde gaten van 1 tot 90 mm voor. Gebruikers van zeven volgens N 480 moeten bij de grootste draadzeefmaat (vierkant 0,85 mm) dus overstappen op de kleinste plaatzeefmaat (rond 1 mm). Dit geeft bij het zeven aanleiding tot discontinuïteiten, omdat de verhouding van de maaswijdte van de draadzeef tot de diameter van de gaten in de plaatzeef, waarbij eenzelfde zeefresultaat wordt bereikt, niet constant is. Bij overgang van draadzeven op plaatzeven met ronde gaten kan genoemde verhouding, afhankelijk van de korrelvorm, variëren tussen de waarden 0,7 en 1,0 (1,0 voor de bolvorm). In de Nederlandse normen wordt een gemiddelde factor van 0,85 aangehouden (lit. 3) en dus verondersteld dat de draadzeef van 0,85 mm dezelfde zeefresultaten geeft als de plaatzeef met ronde gaten van 1 mm. Er is dus geen zeeffractie 0,85-1,00 mm en men stapt bij zeven waarop N 480 nog van toepassing is, van de draadzeef (vierkant) van 0,85 mm over op plaatzeef (rond) van 1,2 mm.

In de nieuwe Nederlandse norm NEN 2560 zijn voor draadzeven in afwijking van N 480 de maaswijdten kleiner dan 1 mm aangepast aan de voorkeurreeks R 40/3 en zijn de waarden 1, 1,4, 2, 2,4 en 2,8 mm

toegevoegd. Eén maat (2,4 mm) komt echter niet overeen met de reekswaarde (2,36 mm). Een bezwaar is dat de reeks slechts tot 1 mm is opgebouwd uit termen die een factor $2^{\frac{1}{4}}$ verschillen. Daarboven ontbreken de maten 1,18 en 1,70, zodat de stappen van 1 mm tot 2 mm volgens R 20/3, dus met een factor $2^{\frac{1}{2}}$ (= 1,41), omhoog gaan. Ook bij de plaatzeven met ronde gaten, die van 1 mm af genormaliseerd zijn, ontbreken deze maten. Een tweede bezwaar is dat 2,8 mm de grootste maat is die deze norm voor draadzeven geeft, zodat men op dit punt op plaatzeven moet overstappen. Weliswaar geeft de norm thans van 4 mm af ook vierkante gaten maar ook dan gaat de stap van 2,8 naar 4 mm met een factor 1,41 omhoog. Bovendien blijft er bij overgang van draad- op plaatzeven met vierkante gaten in principe een discontinuïteit bestaan. Het gat in een plaatzeef wordt namelijk begrensd door loodrecht op het gat staande zijanten. Bij de gewezen mazen echter worden de zijanten gevormd door metaaldraden, die bovendien niet in één vlak liggen. Verder is de hartafstand van de gaten voor draad- en plaatzeven niet gelijk, terwijl ook de draad- en plaatdikten voor eenzelfde maaswijdte verschillend zijn.

Om de mogelijkheid tot het optreden van discontinuïteiten in de zeefkrommen uit te sluiten en om maaswijdten volgens een reeks met een factor $2^{\frac{1}{4}}$ te kunnen toepassen, wordt door het KIWA gebruik gemaakt van draadzeven volgens de ASTM-serie.

3.3 De zeefmethode

De kans dat de daarvoor in aanmerking komende korrels

een bepaalde zeefmaat ook werkelijk passeren, bedraagt nimmer 100%. De zeefmethode dient deze kans echter zo goed mogelijk te benaderen door een passende hoeveelheid materiaal gedurende voldoende tijd volgens een betrouwbare methode uit te zeven. Hierbij moeten de zeeftijd zowel als de reproduceerbaarheid binnen redelijke voor de praktijk aanvaardbare normen liggen. Het zeven kan zowel door machinale zeving als handzeving geschieden. De handzeefmethode, toegepast volgens de daartoe bestaande richtlijnen (lit. 2, 12 en 13), geeft betrouwbare resultaten. De handzeefmethode wordt daarom als standaardzeving aanvaard en kan derhalve als arbitragemiddel worden gebruikt. Door de International Standard Organization is een normalisatie van de handzeefmethode in studie genomen. Voor het uitvoeren van de handzeefproef geeft Rijkswaterstaat (lit. 12) het volgende voorschrift.

Gebruik droog materiaal. Neem daarvan zoveel kg als de maximum korrelgrootte in cm bedraagt. Gebruik voor materiaal met een maximum korrelgrootte kleiner dan 3 mm zeven met een doorsnede van 200 mm en voor grover materiaal zeven met een doorsnede van 350 mm. Zeef met de hand of met een machine. Ga op de volgende wijze na, of het einde van de zeving is bereikt, nadat de onderzijde van de zeef met een borstel is afgeborsteld teneinde verstopte mazen of gaten te openen.

Houd vervolgens de zeef van 200 mm doorsnede enigszins schuin in de ene hand en sla de zeef ongeveer 125 maal per minuut tegen de andere hand. Draai de zeef telkens na 25 slagen over een hoek van 90° en klop er licht mede op een vaste ondergrond.

Houd de zeef van 350 mm doorsnede enigszins schuin in beide handen en schud haar ongeveer 125 maal per minuut heen en weer. Draai de zeef telkens na 25 maal schudden over een hoek van 90° en klop er licht mede op een vaste ondergrond.

Het einde van de zeping is bereikt, wanneer tijdens het zeven gedurende 1 minuut niet meer dan 0,1 gew. % van de totale hoeveelheid materiaal, of, indien deze hoeveelheid groter is dan 0,10 g, niet meer dan 0,10 g door de zeef gaat.

Weeg het materiaal, dat op de zeef blijft liggen en zo nodig het materiaal dat door de zeef is gegaan en bereken deze hoeveelheden in gewichtsprocenten van de totale hoeveelheid materiaal, waarmede de proef is uitgevoerd.

Indien de juistheid van de uitkomst van een mechanische zeping wordt betwist geldt de uitkomst van de zeefproef met de hand.

Door het KIWA wordt aanbevolen het kloppen op een vaste ondergrond te vervangen door het kloppen in tegengestelde richting, dus bijvoorbeeld tegen de onderkant van een tafel. Dit om te voorkomen dat de deeltjes te vast in de mazen worden geklopt. Verder wordt geadviseerd een stevige, niet al te zachte borstel te gebruiken. Beide maatregelen leiden tot een minder snelle verstopping van de zeef.

Daar de handzeefmethode zeer tijdrovend is, wordt meestal met behulp van een machine gezeefd. Om tot een verantwoorde machinale zeefmethode te komen, heeft het KIWA een uitgebreide studie van het mechanisch zeven en zeefmachines gemaakt. Als resultaat hiervan wordt thans beschikt over een zeer bevredigende machinale zeefmethode, die de gewenste uitzeving binnen 15 minuten tot

stand brengt (lit. 2).

3.4 Keuring van zeven

Voor het maken van standaard zeefanalyses dient men te beschikken over een serie genormaliseerde zeven. De nauwkeurigheid moet binnen de gestelde toleranties vallen en het is dus zaak de eisen bij de bestelling van een serie zeven nauwkeurig te omschrijven en bij aflevering goed te controleren. Uiteraard vormen de zeefopeningen het belangrijkste deel van de keuring. Daarnaast is controle nodig van de draadafmetingen, het draadmateriaal, de vlakheid van de zeef en de bevestiging in het montuur. Voor de montage van het zeefstel in de machine zijn tenslotte de diameter en de vorm van het montuur van belang. Zolang de toleranties voor de zeefmaten internationaal nog niet zijn vastgesteld dient de toegepaste nationale norm te worden geraadpleegd. Voor de keuring van zeven die voldoen aan de Nederlandse norm dienen dus de keuringseisen volgens NEN 2560 te worden gebruikt (lit. 11).

De spreiding die er momenteel in de toleranties voor de diverse genormaliseerde zevenseries bestaat, wordt voor de praktijk niet van belang geacht, mede omdat een exact gelijke uitzeving door twee zeven toch nooit te bereiken is. Het controleren van de mazen kan voor de grove zeven o.a. geschieden met tolerantiekalibers en voor de fijne zeven met behulp van optische vergroting en wel door een vergrote projectie of langs microscopische weg (lit. 2, 10, 11, 14 en 15).

Bij de controle is de volgende overweging, waarmee doorgaans weinig rekening wordt gehouden, van eminent belang. De aanwezigheid van een aantal te kleine gaten in de zeef is niet belangrijk. Zijn er in

de zeef voldoende gaten die de juiste maat hebben, dan hebben de te kleine openingen slechts een vertragende werking op de uitzeving. Zijn er echter te grote openingen, dan zullen deze te grote deeltjes doorlaten en een onjuiste uitkomst geven. Daarom moeten zowel de toelaatbare maximale afmetingen als het toegestane percentage te grote openingen altijd in het controlevoorschrift worden vastgelegd. In de eisen voor draadzeven zijn daarom in NEN 2560 in de eerste plaats de toegestane maximale individuele maaswijdte en de maximale gemiddelde maaswijdte vastgelegd. Daarenboven is bepaald dat niet meer dan 6% van het aantal gemeten maaswijdten afmetingen mag hebben groter dan het gemiddelde van beide bovengenoemde maaswijdten.

4. KARAKTERISERING VAN DE KORRELGROOTTE EN -VORM EN VAN DE KORRELGROOTTEVERDELING VAN EEN ZANDMONSTER

4.1 Algemeen

Uit het voorgaande is gebleken dat het zeven van zand geen nauwkeurige techniek is om de korrelafmetingen te bepalen. Bovendien is het bekend dat als identiek beschouwde zevensets tot verschillende resultaten kunnen leiden. De oorzaken die een goede specificatie bemoeilijken hangen samen met:

- a. het materiaal:
vorm, karakter van het oppervlak, hygroscopische eigenschappen, electrostatische lading;
- b. het zeefgaas:
afwijking t.o.v. de theoretische maasafmetingen, ongelijkvormigheid in afmetingen en vorm van de openingen;
- c. de zeefprocedure:
hoeveelheid materiaal, zeef tijd, verstopping, wijze van beweging;
- d. de uitwerking van de gegevens:
karakterisering van de korrelgrootte en -vorm, wijze waarop de korrelmaat in de zeefmaat wordt uitgedrukt.

Met het onder d. genoemde probleem hebben vele onderzoekers zich beziggehouden. In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste methoden om het filtermateriaal te karakteriseren worden behandeld.

De meest voor de hand liggende wijze om een zandmonster te specificeren is het met behulp van een aantal zeven bepalen van een zeefkromme, die de fracties van de verschillende korrelgrootten aangeeft. Het is echter,

vooral ten behoeve van de introductie van de korrelgrootte in formules, gewenst de eigenschappen van het zand aan te duiden met één of enkele karakteristieke grootheden, die op eenvoudige wijze uit een zandmonster moeten kunnen worden bepaald. Het is duidelijk dat vooral in formules waar dergelijke karakteristieke korrelgrootheden worden gebruikt, ook een definitie van deze grootheden moet worden gegeven. Zo vereist de aanduiding "d = korreldiameter" een nadere specificatie ten aanzien van de wijze waarop deze diameter is bepaald. Wordt dit achterwege gelaten, dan ontstaat er verwarring en worden de formules op onjuiste wijze gehanteerd. Welke karakterisering men ook toepast, het is om te beginnen nodig dat het verband tussen korrelgrootte en zeefmaat ondubbelzinnig wordt vastgelegd. Een zandfractie die een bepaalde zeef passeert, maar door een volgende wordt tegengehouden, kan worden aangeduid met de gepasseerde zeefmaat die, hetzij door een eigen nauwkeurige meting, hetzij door gebruik van gecalibreerde standaardzeven (manufacturer's rating) wordt vastgelegd. Deze zeefmaat kan ook worden vervangen door de volumieke korrelgrootte van nog juist door de zeef passerende korrels ("Hazen's rating", zie punt 4.2.2), of door voor twee opeenvolgende zeefmaten d_p en d_q het geometrisch gemiddelde

$$d = (d_p \cdot d_q)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

of het rekenkundig gemiddelde

$$d = (d_p + d_q) : 2 \quad (2)$$

te bepalen.

Is de zeefkromme volgens de gedefinieerde korrelgrootten vastgelegd, dan is hiermee nog niet de invloed van het filtermateriaal op het filtratieproces gekarakteriseerd. In dit verband zij opgemerkt dat de aanduiding van een zandmonster door middel van een equivalente volumieke diameter, die bepaald wordt door een aantal korrels uit het monster te vervangen door eenzelfde aantal gelijke bolletjes met hetzelfde totale volume (lit. 16 en 17), nog niet bevredigend is. Op die wijze wordt nl. geen rekening gehouden met het voor het filtratieproces zo belangrijke korreloppervlak.

Met betrekking tot de volumieke diameter kan nog worden opgemerkt dat de aanduiding van een zeeffractie met de laatste zeefmaat die door deze fractie is gepasseerd een goede benadering van de volumieke diameter van die fractie kan vormen. Dit is het geval indien opeenvolgende zeefmaten volgens een reeks met een factor $2^{\frac{1}{4}} \sim 10^{\frac{1}{10}} \sim 1,19$ worden gebruikt. De geometrisch gemiddelde maat is

$$d = \sqrt{d_p \cdot d_q} = d_p / \sqrt{1,19} = d_p / 1,091$$

Aangezien de volumieke diameter blijkens de in punt 3.1 genoemde onderzoeken veelal ca. 10% groter is dan de gepasseerde zeefmaat, mag als ruwe benadering gesteld worden

$$d_v = 1,1 d = 1,1 d_p / 1,091 \sim d_p$$

Voor zeeffracties volgens de zeefreeks " $2^{\frac{1}{4}}$ " is de gepasseerde zeefmaat dus een globale benadering van de gemiddelde volumieke diameter van de zeef-fractie.

Uitgaande van de zeefanalyse kan men een zand ka-

rakteriseren door enkele parameters, om de gewenste eigenschappen zo goed mogelijk uit te beelden (zie de punten 4.2, 4.3 en 4.4). Het is echter gewenst de volledige korrelverdeling en het oppervlak van het filtermateriaal mede hierin te betrekken, omdat deze direct verband houden met de hydraulische eigenschappen en de invloed op de filtratie van het zand (zie de punten 4.5 en 4.6).

Voor bolvormig filtermateriaal zijn diverse eigenschappen, zoals de weerstand bij doorstroming, door verscheidene onderzoekers bepaald. Voor het gebruikelijke niet bolvormige filtermateriaal kan voor afwijkingen van de bolvorm een vormfactor worden geïntroduceerd, die de invloed van de korrelvorm op de weerstand bij doorstroming tot uitdrukking brengt. Het is echter nog niet gelukt de invloed van de eigenschappen van het zand op het filtratieproces op eenvoudige wijze door parameters uit te beelden, omdat de filtratie beheerst wordt door een groot aantal mechanismen en de verhouding waarin deze werkzaam zijn niet alleen samenhangt met de aard en opbouw van het filtermateriaal maar ook met de samenstelling, temperatuur en stroomsnelheid van het te filteren medium.

Ondanks de moeilijkheden om de invloed van korrelgrootte, -verdeling, -oppervlak en -vorm vast te stellen, is het toch vaak mogelijk gebleken het filterzand zodanig te karakteriseren dat de theorie en praktijk tot redelijke overeenstemming kunnen worden gebracht.

4.2 Karakterisering volgens Hazen

4.2.1 De effectieve diameter

De formule van Darcy voor het drukverlies bij doorstroming van een korrelvormig bed luidt

$$\Delta p = vL/k \quad (3)$$

Hierin zijn v en L respectievelijk de filtratiesnelheid en de dikte van het bed.

Voor de permeabiliteitscoëfficiënt k werd door Hazen (lit. 17) in 1892 het volgende verband geïntroduceerd

$$k = C d_{10}^2 (0,7 + 0,03 t) \quad (4)$$

In deze formule, waarin Hazen de k -waarde uitdrukte in m/h, is C een weerstandscoefficiënt tussen 20 en 50 (gemiddeld 40), t de temperatuur in °C en d_{10} de effectieve diameter in mm. De effectieve diameter van een zandmonster is de korrelafmeting waarvoor geldt dat een fractie van 10 gewichtsprocenten van het monster kleiner is dan deze waarde. Om de spreiding in korrelgrootte nader te omschrijven, heeft Hazen de gelijkvormigheidcoëfficiënt C_u ingevoerd. Deze wordt vastgesteld met de effectieve diameter

$$d_e = d_{10} \quad (5)$$

en de diameter d_{60} , waarvoor geldt dat een fractie van 60 gewichtsprocenten van het monster kleiner is dan deze waarde.

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (6)$$

Voor een natuurlijk zand is $C_u = 1,5$ à $2,5$.

Volgens Hazen is de effectieve diameter voor een niet geclassificeerd natuurlijk zand maatgevend voor de hydraulische weerstand, onafhankelijk van de grootte en de groottevariatie van de korrels. Door d_{10} en d_{60} wordt een gebied van korrelafmetingen bestreken dat volgens Hazen de helft van het zand omvat. Voor een natuurlijk zand kan de zeefkromme op een bepaalde wijze uitgezet (zie punt 4.4), worden voorgesteld door een rechte lijn, die door de parameters van Hazen is bepaald. De parameters van Hazen hebben alleen betekenis in het door hem aangegeven gebied voor filterbedden zonder stratificatie met korrelgrootten van $d_{10} = 0,1$ tot 30 mm en $C_u < 5$, oorspronkelijk toegepast voor langzame filters, maar later ook voor snelfilters.

De karakterisering volgens Hazen geniet wegens zijn eenvoud nog steeds een ruime internationale toepassing. Het bezwaar is echter dat de voor de hydraulische weerstand maatgevende waarde van de diameter niet maatgevend is voor het filtratieproces. Bovendien wordt het filterzand doorgaans tussen nauwe grenzen uitgezeefd, zodat het de vraag is in hoeverre de natuurlijke frequentie van de korrelgrootte behouden blijft. Hierdoor kan het rechtlijnige verloop dat voor de korrelverdeling van een natuurlijk zand geldt (zie punt 4.4) verloren gaan, waardoor het korrelgrootteverloop niet meer door de beide parameters is vastgelegd. Met andere woorden, eenzelfde d_{10} en d_{60} kunnen verschillende zeefkrommen met verschillende filtratie-effecten representeren.

4.2.2 Karakterisering van de zeefmaat

In punt 3.1 werd er reeds op gewezen dat de grootte van de nog juist door een zeef passerende korrels door Hazen werd gehanteerd om de zeefmaat vast te leggen (Hazen's rating). Om deze "size of separation" te bepalen, worden de laatste korrels die de zeef in de slotfase van de zeefperiode passeren en waarvan het aantal tenminste 100 moet bedragen (voor fijn materiaal meer) afzonderlijk opgevangen. Uit de massadichtheid, het aantal en het totale gewicht van de korrels kan de volumieke diameter d_v worden bepaald. Hiertoe worden de nog juist passerende korrels vervangen door eenzelfde aantal bollen van gelijke diameter met eenzelfde totaalgewicht en massadichtheid als bedoelde korrels dus

$$d_v = \left(\frac{6}{\pi} \cdot \frac{W}{n\rho} \right)^{1/3} \quad (7)$$

waarin d_v = volumieke diameter volgens Hazen

W = totale gewicht van de nog juist door een zeef passerende korrels

n = totale aantal van de nog juist door een zeef passerende korrels

ρ = massadichtheid van het zand.

Om tot goede resultaten te komen wordt aanbevolen tenminste drie zevingen te verrichten voor verschillende soorten zand. De volumieke diameter volgens "Hazen's rating" is, zoals ook reeds in punt 3.1 bleek ongeveer 10% groter dan de zo genoemde "manufacturer's rating", waarbij de zeefmaat geijkt wordt door directe meting van een representatief aantal zeefopeningen.

De bovengeschetste, ook door Feben (lit. 18) aanbevolen werkwijze, die een direct verband tussen zeefopening en korrelgrootte legt, wordt nog steeds als een juiste calibrering beschouwd. Een bezwaar van de geschetste wijze van calibreren op korrelgrootte is echter dat hij zeer tijdrovend is. De methode is vooral van betekenis indien met niet vooraf gec calibreerde zeven wordt gewerkt. Ter wille van de eenvoud en mede omdat tegenwoordig meestal nog slechts met nauwkeurig vervaardigde standaardzeven overeenkomstig de bekende normen wordt gezeefd, is het algemeen gebruikelijk bij het maken van zeefanalyses de zeefmaat als maatstaf te gebruiken in plaats van een op de een of andere wijze gedefinieerde diameter.

4.3 Karakterisering volgens Baylis

Ook Baylis (lit. 19) maakt voor de karakterisering van het filtermateriaal gebruik van een effectieve diameter en een uniformiteitscoëfficiënt. De methode is echter gecompliceerder dan die van Hazen, omdat de effectieve diameter moet worden berekend uit de diameters van een aantal zeeffracties waarbij - afhankelijk van de dikte van het bed en de waarde van C_u - bovendien nog correcties moeten worden aangebracht. De uniformiteitscoëfficiënt wordt door Baylis uit de korrelgrootteverdeling bepaald, afhankelijk van de diameter corresponderende met de 1% korrelfractie (1% diameter).

De effectieve korreldiameters volgens Hazen en Baylis houden geen verband met elkaar; de eerste karakteriseert een hydraulische weerstand, de

tweede heeft betrekking op de filterlooptijd. In de praktijk blijkt de Baylis diameter doorgaans 5 à 10% kleiner te zijn dan die volgens Hazen.

Een bezwaar van de methode van Baylis is dat deze karakterisering vrij bewerkelijk is en bijgevolg dan ook weinig wordt toegepast. Een nadere bespreking van Baylis' karakterisering wordt hier daarom dan ook achterwege gelaten.

4.4 Karakterisering van een natuurlijk zand

Het in de natuur voorkomende zand heeft doorgaans een nagenoeg geometrisch normale frequentieverdeling (vergelijk de in het volgende beschreven vergelijkingen 8 en 9 met toelichting). In tegenstelling tot de symmetrische arithmetisch normale frequentieverdeling geeft deze verdeling op lineaire korrelgrootteschaal uitgezet een asymmetrisch beeld te zien (zie fig. 2a). Wordt de verdeling uitgezet op een logaritmische schaal voor de korrelgrootte (of de zeefmaat), dan is de verdelingskromme symmetrisch. Voor een geometrisch normale korrelgrootteverdeling geldt dus dat de variatie in korrelafmetingen normaal (symmetrisch) is als de afmetingen worden vervangen door de logarithmen van deze afmetingen (fig. 2b). Worden de gewichtspercentages voor de verschillende korrelafmetingen (zeefmaten) cumulatief uitgezet, dan wordt de bekende zeefkromme verkregen, zoals die in fig. 2c is uitgezet. Tenslotte kan voor de vertikale as de zogeheten waarschijnlijkheidsschaal worden gebezigd, waarbij krommen voor zuiver normale frequentieverdelingen overgaan in rechte lijnen. Voor een natuurlijk zand zal

dan ook bij gebruik van deze schaal voor de gewichtspercentages en een logaritmische schaal voor de korrelgrootte nagenoeg een rechte lijn worden verkregen (fig. 2d).

De vergelijking voor de frequentie of het aantal waarnemingen y van de grootte x bij een normale verdeling (normale waarschijnlijkheidskromme van Gauss) luidt:

$$y = \frac{n}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-M}{\sigma} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

Hierin is n het totale aantal waarnemingen. σ en M zijn respectievelijk de standaardafwijking en het rekenkundig gemiddelde van de waarnemingen. $e = 2,71828$ is het grondtal van de natuurlijke logaritmen. Hieruit kan voor het verband tussen het gewichtspercentage en de deeltjesgrootte van een zand met geometrisch normale verdeling worden afgeleid (lit. 20).

$$p_w = \frac{1}{(\log \sigma_g) \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log d - \log M_g}{\log \sigma_g} \right)^2 \right]} \quad (9)$$

Hierin is p_w = gewichtsfractie voor een bepaalde deeltjesgrootte
 d = deeltjesgrootte
 σ_g = geometrische standaardafwijking van de korrelgrootteverdeling
 M_g = geometrisch gemiddelde afmeting

$$\text{met } \log \sigma_g = \frac{\sqrt{\sum (\log d - \log M_g)^2}}{n-1}$$

$$\text{en } \log M_g = \frac{\sum \log d}{n}$$

Uit vergelijking 9 blijkt dat het gewichtsperscentage voor elke zandkorrelgrootte door de beide parameters σ_g en M_g is bepaald. De waarde van deze parameters kan worden vastgesteld uit de zeefkromme met cumulatieve gewichtsperscentages door hieruit de 15,87% en de 50% waarde voor de korrelgrootte af te lezen. De parameters volgen dan uit

$$\sigma_g = d_{50}/d_{15,87} \quad (10a)$$

$$M_g = d_{50} \quad (10b)$$

Van deze grootheden wordt o.a. door Fair (lit. 20) en Ward (lit. 21) gebruik gemaakt om zeefanalyses aan te duiden. Strikt genomen gelden deze parameters slechts voor het veronderstelde rechtlijnige verloop bij geometrisch normale verdeling. Het is duidelijk dat een dergelijke rechte lijn ook door 2 andere punten, met name door Hazen's parameters C_u en d_e kan worden beschreven (lit. 18) en dat er dus een verband moet bestaan tussen deze grootheden en die uit de formules 10. Dit verband wordt gegeven door de volgende formules (lit. 20)

$$C_u = d_{60}/d_{10} = \sigma_g^{1,535} \quad (11a)$$

$$d_e = d_{10} = M_g \cdot \sigma_g^{-1,282} \quad (11b)$$

De mathematische karakterisering schept, zoals uit het voorgaande blijkt, de mogelijkheid de gewichtsfracties van de zeefkromme in de korrelgrootte uit te drukken met behulp van 2 parameters (vergelijking 9), die op hun beurt weer kunnen worden uitgedrukt in Hazen's parameters (vergelijkingen 11). Dit leidt, zoals in punt 4.6 nader zal worden uiteengezet, tot een eenvoudige relatie tussen de effectieve korrelgrootte voor homogene of gelaagde filterbedden en 2 parameters van de zeefkromme (vergelijkingen 41 en 43). Aangezien het tegenwoordige filterzand doorgaans door uitzeving geselecteerd is, zullen de zeefkrommen in de praktijk enigszins van het rechtlijnige verloop afwijken. Zij zullen derhalve ook niet on-dubbelzinnig door de mathematische of Hazen's parameters kunnen worden vastgelegd. Uit de controle van normale filterzanden is echter gebleken dat de afwijkingen van het rechtlijnige verloop veelal slechts tot kleine, voor de praktijk aanvaardbare verschillen leidt. Omdat Hazen's aanduiding het hydraulische effect karakteriseert, wordt deze bij de beoordeling van dergelijke effecten vaak toegepast. De mathematische karakterisering kan bij wiskundige bewerkingen voordeel bieden.

4.5 Karakterisering door middel van de soortelijke diameter

Een korrelgrootteaanduiding die rekening houdt met de korrelafmetingen en omvang van de verschillende fracties en maatgevend is voor het totale korreloppervlak van het filtermateriaal is de soortelijke korreldiameter

$$d_s \text{ in mm} = 10/U \quad (12)$$

Deze karakterisering is in de Nederlandse normen vastgelegd (lit. 3 en 22).

Hierin is het getal U het soortelijk oppervlak van het beoordeelde zandmonster. Daaronder wordt verstaan de verhouding tussen het gezamenlijke oppervlak van alle korrels van het monster en het gezamenlijke oppervlak van eenzelfde gewichtshoeveelheid W bolvormige korrels van dezelfde stof, met een middellijn van 1 cm, dus

$$U = \frac{\text{korrelopp. van een monster met gew. } W}{\text{korrelopp. voor korrels van } 10 \text{ mm } \varnothing \text{ met gew. } W} \quad (13)$$

De verhouding kan als volgt in een aantal fracties van een zandmonster worden uitgedrukt.

$$U = \frac{U_1 W_1 + U_2 W_2 + \dots + U_n W_n}{W_1 + W_2 + \dots + W_n} = \frac{\sum (U_i W_i)}{\sum W_i} \quad (14)$$

Hierin zijn $W_1, \dots, W_n$ en $U_1, \dots, U_n$ de gewichten resp. de U-getallen van de fracties. Voor elke fractie tussen de grenzen van twee zeefmaten d_p en d_q , die niet verder uiteenlopen dan de verhouding $1 : 2^{\frac{1}{2}}$ geldt volgens Zunker (lit. 23) voor bolvormige korrels:

$$U_i = \frac{4,343}{\log d_q - \log d_p} \cdot \left(\frac{1}{d_p} - \frac{1}{d_q} \right) \quad (15)$$

De zeefmaten d_p en d_q worden uitgedrukt in mm. Daar het U-getal van de fractie uitsluitend afhangt van de begrenzende zeefmaten, liggen de U-getallen voor een gegeven serie zeven vast. Ter besparing van de berekening volgens formule 15 zijn in tabel 2 de

U-getallen voor series zeven met zeefmaten opklimmend volgens de verhouding $2^{\frac{1}{4}}$ en $2^{\frac{1}{2}}$ gegeven. De tabel geldt voor draadzeven. Worden plaatzeven met ronde gaten toegepast, dan dienen de waarden van de daarmee overeenkomende draadzeven (met eenzelfde zeefeffect) te worden genomen. Wordt hiervoor de in punt 3.2 gegeven factor 0,85 gebruikt, dan moeten plaatzeven met ronde gaten van bijvoorbeeld 1 en 2 mm eerst vervangen gedacht worden door draadzeven van 0,85 respectievelijk 1,7 mm, met welke laatste waarden de tabel kan worden toegepast.

Aan de hand van het voorgaande kan voor de omschrijving van d_s tenslotte de volgende eenvoudige formule worden afgeleid. Uit de vergelijkingen 12 en 14 volgt

$$\frac{1}{d_s} = \frac{\sum (U_i W_i)}{10 \sum W_i} \quad (16)$$

Worden de gewichten W der fracties vervangen door de gewichtsfracties p_w ten opzichte van het totale gewicht en U als functie van de zeefmaten d_p en d_q geschreven, dan is

$$\frac{1}{d_s} = \sum \frac{p_{wi}}{f(d_p d_q)_i} \quad (17)$$

waarin

$$f(d_p d_q)_i = 10/U_i \quad (18)$$

Met formule 17 verloopt de berekening van de soortelijke diameter zeer eenvoudig. Voor de bepaling van d_s behoeven namelijk slechts de verschillende gewichtsfracties van een zandmonster te worden bepaald.

Door deze te vermenigvuldigen met de bijbehorende U-getallen volgens tabel 2 en vervolgens te sommeren en door 10 te delen wordt de reciprokewaarde van de soortelijke diameter verkregen.

De karakterisering van de diameter met behulp van het U-getal vertoont veel overeenkomst met de diameterbepaling volgens Tessendorff (lit. 24) en anderen, die eveneens gelden voor fracties bolvormig materiaal van verschillende korrelgrootte. Deze bepalingen zijn echter in zoverre eenvoudiger dat het soortelijk oppervlak van een fractie omgekeerd evenredig gesteld wordt met de diameter van die fractie in plaats van met de door formule 15 voorgestelde functie van d . Vergelijking 17 wordt hierdoor vereenvoudigd tot

$$\frac{1}{d_e} = \sum \frac{p_{wi}}{d_i} \quad (19)$$

waarin d_e en d_i een maatgevende effectieve diameter respectievelijk de korreldiameter van de subfractie i voorstellen. In punt 4.6 wordt hierop nader ingegaan.

Weliswaar kan de in het voorgaande beschreven soortelijke diameter niet op eenvoudige wijze uit de zeefkromme worden afgelezen, maar de berekening biedt het voordeel dat rekening wordt gehouden met het gewicht en oppervlak van alle fracties, waardoor een redelijk goede maatstaf voor de korrelgrootte wordt verkregen. Het bezwaar van de beschreven methode is echter dat met de vorm van het materiaal geen rekening wordt gehouden. In de eerste

plaats geldt vergelijking 15 slechts voor bolvormig korrelmateriaal, dus voor een bepaalde verhouding tussen oppervlak en volume. Naarmate het oppervlak echter meer van de bolvorm afwijkt neemt het oppervlak, dat bij de filtratie zo'n belangrijke rol speelt, in verhouding tot het volume toe. Daarom zou een correctie voor de vorm als afzonderlijke factor moeten worden geïntroduceerd (zie punt 4.6). In de tweede plaats houden de zeefmaten geen rekening met de onrondheid, dat wil zeggen dat eenzelfde zeefmaat grover materiaal doorlaat naarmate onrondheid groter is. Het laatste bezwaar geldt echter eveneens indien de korrelafmeting van een fractie als geometrisch of rekenkundig gemiddelde van de begrenzende zeefmaten wordt uitgedrukt (zie vergelijkingen 1 en 2).

4.6 Karakterisering van korreloppervlak en -vorm naar het hydraulische effect

In het gecompliceerde mechanisme van de filtratie speelt het filtermateriaal een zo belangrijke rol, dat het gewenst is behalve het zo nauw met de filtratie verbonden poriënvolume en het korreloppervlak ook de korrelvorm in de karakterisering van het materiaal tot uitdrukking te brengen. Immers zullen de grootte en de vorm van de korrels bepalend zijn voor de grootte en vorm van de poriën. Zij zijn dus van invloed op de mechanische zeefwerking (straining), de sedimentatie en de hydraulische effecten. Zij hangen met het korreloppervlak nauw samen met het mechanisme van de adsorptie, waarbij effecten van zwaartekracht, traagheid,

diffusie, turbulentie en hydrodynamische krachten een rol spelen, te zamen met de massa aantrekkingskrachten (van der Waals) en de electro-statische krachten (Coulomb) die in de onmiddellijke omgeving van de korrel tot 1 μ m afstand van het oppervlak werkzaam zijn. Ook op de berging van de opgevangen deeltjes zijn oppervlak, vorm en grootte van de korrels van invloed. De variatie in korrelgrootte kan vooral bij grote spreiding van belang zijn, omdat de poriën tussen grote korrels dan door kleine korrels opgevuld kunnen worden, waardoor het poriënvolume verkleind wordt. Bovendien is het van belang of het filterbed van boven tot onder eenzelfde korrelverdeling heeft, dus homogeen is, of dat er ten gevolge van het spoelen een ge-laagd bed (stratificatie) ontstaan is.

Het zal duidelijk zijn dat de door Hazen gebruikte effectieve afmeting ($d_e = d_{10}$), die wordt voorgesteld door een bepaald punt van de zeefkromme, voor de karakterisering van de bovenomschreven factoren ontoereikend is. De door Baylis gekozen effectieve diameter verschilt hiervan in principe slechts in zoverre, dat de diameter afhankelijk is van de diameters van een aantal zeeffracties, dus van een deel van de zeefkromme. De soortelijke diameter gaat al een stap verder door de verschillende zeef-fracties en hun korreloppervlak tot uitdrukking te brengen. En, zoals reeds werd opgemerkt, speelt het korreloppervlak een belangrijke rol in het filtra-tie proces. In tegenstelling tot de diameters van Hazen (weerstand) en Baylis (looptijd) wordt de

soortelijke diameter echter niet als zijnde representatief voor een bepaald gebeuren in het filtratieproces, bijvoorbeeld in samenhang met een bepaalde formule, geïntroduceerd.

Het ligt voor de hand te trachten de karakteriserende grootheden van het filtermateriaal, zoals korrelgrootte, oppervlak, vorm en poriënvolume, bij de mathematische beschrijvingen van het filtratieproces te betrekken door deze in de theoretisch en experimenteel afgeleide formules in te voegen. Hieraan is reeds door diverse auteurs aandacht besteed en wel in het bijzonder met betrekking tot de drukval, die bij de doorstroming van korrelvormig materiaal optreedt. In deze formules, die rekening houden met het oppervlak en het poriënvolume van het materiaal, wordt naast de grootte en de diameter van de fracties een vormfactor geïntroduceerd, terwijl toepassing zowel voor een homogeen als een gelaagd bed mogelijk is. Op welke wijze de karakterisering van het filtermateriaal in mathematische formuleringen tot uitdrukking kan worden gebracht, zal dan ook aan de hand van enkele formules voor de weerstand bij doorstroming van korrelvormig materiaal worden gedemonstreerd. Niet alleen dat theorie en experiment op dit gebied tot een aantal in principe overeenkomende formuleringen hebben geleid, maar de vergelijking tussen wel en niet bolvormig materiaal bood ook de mogelijkheid om de invloed van de vorm op de hydraulische weerstand vast te stellen. Er zijn namelijk vele experimenten uitgevoerd om de weerstandscoefficiënt bij doorstroming van filterbedden van wel en niet

bolvormig materiaal te bepalen. Verder kan met de hierbij toegepaste karakterisering van de korreldiameter een effectieve vervangingsdiameter voor de hydraulische eigenschappen van een homogeen of een gestratificeerd bed worden vastgesteld die - althans zolang geen betere methode bekend is - ook voor andere facetten van het filtratieproces zou kunnen worden gebruikt. De bekende vergelijking van Darcy-Weisbach voor het drukverlies Δp bij de stroming door een buis met een diameter D , een lengte L en een stroomsnelheid v luidt

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (20)$$

Hierin zijn f en ρ respectievelijk een wrijvingscoëfficiënt en de massadichtheid.

Uit deze vergelijking kan voor laminaire stroming, zoals die doorgaans in filterbedden optreedt, de volgende vergelijking worden afgeleid (zie o.a. lit. 25, 26, 27 en 28)

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\nu \rho v_o}{k} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot S_o^2 \quad (21)$$

Hierin is:

- Δp = drukverlies bij doorstroming van het filterbed
- L = dikte van het filterbed
- k = weerstandscoefficiënt
- ν = kinematische viscositeit
- ρ = massadichtheid
- v_o = aanstroomsnelheid betrokken op de filterdoorsnede
- ϵ = poriëngehalte
- S_o = A/V = specifiek korreloppervlak

A = korreloppervlak van het filtermateriaal

V = korrelvolume van het filtermateriaal

Vergelijking 21, bekend als de vergelijking van Kozeny, kan ook worden afgeleid uit de formule van Poiseuille voor de laminaire stroming door capillaire buizen (lit. 25, 28 en 29). De vergelijking leent zich bijzonder goed om te demonstren op welke wijze een voor het filtermateriaal representatieve effectieve korrelgrootte in de formule kan worden geïntroduceerd door het specifieke korreloppervlak uit te drukken in de verschillende zeeffracties van het filtermateriaal. Wordt hiertoe voor het specifieke korreloppervlak

$$S_o = A/V \quad (22)$$

in de vergelijking gesubstitueerd, dan is de vorm zonder meer nog niet geschikt om een gegeven zand, dat vastgelegd is door een zeefkromme en de korrelvorm, uit te beelden omdat het korreloppervlak A niet bekend is. Het is dus gewenst de gegevens van de zeefkromme op een voor de praktijk hanteerbare wijze in de vergelijking te introduceren en daarbij tevens de korrelvorm op de een of andere wijze te karakteriseren (lit. 20, 25, 29, 30, 31 en 32). Uitgaande van de bolvorm kan hiertoe de volgende procedure worden gevolgd.

Voor n bolvormige korrels met gelijke diameter d geldt

$$S_s = \frac{A_s}{V_s} = \frac{n\pi d^2}{n\pi d^3:6} = \frac{6}{d} \quad (23)$$

Zijn de korrels niet bolvormig maar wel gelijk van vorm dan bestaat er een bepaalde relatie tussen oppervlak en volume, die kan worden vastgelegd door de introductie van een vormfactor Ψ , zodat voor een fractie i met materiaal van eenzelfde korrelgrootte geldt

$$S_i = \frac{A_i}{V_i} = \frac{6}{\Psi d_i} \quad (24)$$

Hierin is d_i een karakteristieke korrelafmeting die, zoals zal blijken, als functie van de zeefmaat kan worden bepaald. Daar de boldiameter d in vergelijking 23 vervangen is door het product van de vormfactor Ψ en de korrelafmeting d_i in formule 24, kan $1/\Psi$ worden gedefinieerd als de verhouding tussen een met de zeefmaat samenhangende korrelgrootte en de diameter van een bol met hetzelfde hydraulische effect, dus

$$1/\Psi = d_i/d \quad (25)$$

De hier geïntroduceerde vormfactor geeft de tot nu toe meest gebruikte wijze van karakterisering, die o.a. reeds in 1933 door Fair en Hatch (lit. 29) en in 1937 door Carman (lit. 32) werd toegepast. Voor de verdere procedure dient onderscheid te worden gemaakt tussen een homogeen en een gelaagd bed. In een homogeen bed is de korrelgrootteverdeling voor elk deel van het bed gelijk. In een gelaagd bed is het zandpakket opgebouwd uit lagen van verschillende korrelgrootte.

a. Het specifiek korreloppervlak voor een homogeen bed

Voor een homogeen bed met korrels van verschillende grootte heeft het zand in alle lagen van het bed dezelfde samenstelling (zelfde zeefkromme). Daarom geldt voor elk deel van het bed en uiteraard ook voor het gehele bed

$$S_o = \frac{A}{V} = \frac{\Sigma A_1 \dots A_i \dots A_n}{\Sigma V_1 \dots V_i \dots V_n} \quad (26)$$

Hierin zijn $A_1 \dots A_n$ en $V_1 \dots V_n$ de korreloppervlakken respectievelijk -volumina van de fracties van eenzelfde grootte, hetgeen in de praktijk neerkomt op de tussen twee opeenvolgende zeefmaten gelegen zeeffracties. Verondersteld wordt nu dat de bestanddelen van het zand eenzelfde herkomst hebben waardoor ze een grote overeenkomst in vorm vertonen en de vormfactor Ψ als statistisch gemiddelde een constante waarde heeft. Worden de oppervlakken van de fracties met behulp van vergelijking 24 uitgedrukt in de bijbehorende korrelgrootte en - onder aanname van een gelijke massadichtheid voor alle deeltjes - de volumina vervangen door de gewichten W , dan gaat vergelijking 26 over in

$$S_o = \frac{6}{\Psi} \frac{\sum \frac{W_1}{d_1} + \dots \dots \dots \frac{W_n}{d_n}}{W} \quad (27)$$

Wordt tenslotte het gewicht van de fracties uitgedrukt in verhouding tot het totale gewicht met $p_{wi} = W_i/W$ dan is

$$S_o = \frac{6}{\psi} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_{wi}}{d_i} \quad (28)$$

Het is gebruikelijk hierin d_i overeenkomstig vergelijking 1 vast te leggen met het geometrisch gemiddelde van de begrenzende zeefmaten d_p en d_q

$$d_i = (d_p \cdot d_q)^{\frac{1}{2}}$$

Met betrekking tot het specifiek oppervlak in formule 21 dient dus bij toepassing op een homogeen bed de volgende vergelijking te worden gebruikt.

$$S_o^2 = \frac{36}{\psi^2} \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_{wi}}{d_i} \right)^2 \quad (\text{homogeen bed}) \quad (29)$$

b. Het specifiek korreloppervlak voor een gelaagd bed

Een gelaagd bed komt tot stand door het bed te laten expanderen (terugspoelen), waardoor een selectie (stratificatie) naar korrelgrootte plaatsvindt met van boven naar onder toenemende korrelgrootte. Uitgaande van constante waarden voor de massadichtheid en de weerstandscoefficiënt en van een constant poriënvolume, geldt volgens vergelijking 21 voor het drukverlies in een dergelijk bed

$$\Delta p = \int_0^{\Delta p} d(\Delta p) = \text{const.} \int_0^L S_o^2 dL \quad (30)$$

Hierin is S_o het specifiek oppervlak voor de korrels met grootte d in het elementaire laagje dL . Wordt nu de laagdikte dL vervangen door de elementaire gewichtsfractie van dit laagje

$$dL = L dp_w \quad (31)$$

en het specifiek oppervlak van de korrels uit het laagje volgens vergelijking 24 uitgedrukt in de bijbehorende korrelgrootte, dan gaat vergelijking 30 over in

$$\Delta p = \text{const.} \frac{36L}{\psi^2} \int_0^1 \frac{dp_w}{d^2} \quad (32)$$

Gaat men van elementaire laagjes over naar lagen die overeenkomen met tussen opeenvolgende zeefmaten gelegen zeeffracties, dan volgt uit vergelijking 32

$$\Delta p = \text{const.} \frac{36L}{\psi^2} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_{wi}}{d_i^2} \quad (33)$$

Hieruit blijkt dus dat voor een gelaagd bed in formule 21 moet worden ingevuld

$$S_o^2 = \frac{36}{\Psi^2} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_{wi}}{d_i^2} \quad (\text{gelaagd bed}) \quad (34)$$

Wordt tenslotte op analoge wijze als dit in vergelijking 24 is geschied voor de fracties het specifieke oppervlak voor het gehele zand uitgedrukt in een effectieve vervangingsdiameter d_e , dus

$$S_o = \frac{A}{V} = \frac{6}{\Psi d_e} \quad (35)$$

dan kan de vergelijking van Kozeny voor het drukverlies die in formule 21 is gegeven, in de volgende vorm worden geschreven

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\nu \rho v_o}{k} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{36}{\Psi^2} \frac{1}{d_e^2} \quad (36)$$

Hierin kan voor d_e worden ingevuld d_{eh} voor een homogeen bed, dus overeenkomstig formule 29

$$\frac{1}{d_{eh}^2} = \left(\sum \frac{P_{wi}}{d_i} \right)^2 \quad (37)$$

of d_{es} voor een gelaagd bed, dus overeenkomstig formule 34

$$\frac{1}{d_{es}^2} = \sum \frac{p_{wi}}{d_i^2} \quad (38)$$

Hierin zijn p_{wi} en d_i respectievelijk de gewichtsfractie en de geometrisch gemiddelde zeefmaat van de zeeffractie i .

De in het voorgaande gegeven berekeningswijze voor de bepaling van de vervangingsdiameter d_e uit de zeeffracties van een zandmonster biedt de mogelijkheid de vormfactor Ψ voor dat monster met behulp van vergelijking 36 te berekenen. Hiertoe moet het drukverlies Δp bij doorstroming van het gegeven zand worden gemeten en moeten de bijbehorende snelheid v_o , het poriënvolume ε , alsmede ρ , ν en L worden bepaald. Voor een samenhangend systeem van eenheden mag voor de weerstandscoefficiënt in vergelijking 36 $k = 0,2$ worden ingevoerd. De vormfactor Ψ die op deze wijze wordt verkregen, wordt niet alleen bepaald door de korrelvorm maar is mede afhankelijk van de wijze waarop de zeeffracties in de zeefmaten zijn uitgedrukt. Voor de waarde van Ψ in de formule van Kozeny volgens de in vergelijking 36 gegeven vorm, met een k -waarde van $0,2$ en een korrelfractiediameter bepaald als geometrisch gemiddelde van de begrenzende zeefmaten (zie vergelijking 1), werden door Fair en Hatch (lit. 29) en door Carman (lit. 32) reeds in 1933 respectievelijk 1937 cijfers gepubliceerd voor verschillende zandtypen. Later werden door Fair (lit. 31) voor enkele zandsoorten hogere waarden vermeld, doch de k -waarde bedroeg in het door hem beschouwde ge-

val slechts ca. 0,16, waardoor de hogere Ψ -waarden weer gecompenseerd werden. Overigens blijkt ook uit andere literatuuropgaven dat de vermelde Ψ -waarden nogal uiteenlopen. Afgezien van de niet exact bekende waarde van k die wellicht door de oppervlakteruwheid en door de korrelvorm — bepalend voor de nog juist door een maas passerende korrelgrootte — wordt beïnvloed, hebben we steeds te maken met onnauwkeurigheden bij de meting van weerstand en poriënvolume, met verschillen in zeefconstructie en wijze van zeven en met de subjectieve aanduiding van de korrelvorm zoals afgerond, scherp en hoekig. In het handboek van Fair, Geyer en Okun (lit. 20) worden de in de volgende tabel gegeven waarden vermeld.

Ψ -waarden volgens formule 36 met $k = 0,2$ en de diameter d_e als geometrisch gemiddelde van de zeefmaten die de zeeffracties begrenzen.						
korrel- vorm →	bol- vormig	afge- rond	ver- weerd	scherp	hoe- kig	gebro- ken
Ψ →	1	0,98	0,94	0,81	0,78	0,70

Als gemiddelde benaderingswaarde voor zand kan een waarde $\Psi = 0,8$, die ook door Yves (lit. 30) wordt vermeld, worden toegepast.

Er zij nogmaals op gewezen dat de hier vermelde Ψ -waarden gelden voor een korrelgrootte d_e die bepaald is uit de geometrische gemiddelden van de zeefmaten die de zeeffracties begrenzen. Zou zijn uitgegaan van de in de punten 3.1 en 4.2 genoemde volumieke diameter d_v (separation size)

volgens "Hazen's rating" in plaats van de zeefmaten, dan zouden kleinere waarden voor Ψ verkregen zijn. Immers is de volumieke diameter, zoals reeds werd vermeld, voor een natuurlijk zand meestal ca. 10% groter dan de zeefmaat, dus

$$d_v \sim 1,1 d_e \quad (39)$$

Wordt nu in vergelijking 35 d_e vervangen door d_v , dan moet Ψ met een factor 1,1 worden verkleind.

De wijze waarop de effectieve diameter berekend wordt, is in tabel 3 aangegeven. Ter vereenvoudiging van de schrijfwijze zijn de indices i in deze tabel weggelaten. Voor de gegevens van deze berekening is uitgegaan van de in figuur 3 gegeven zeefkromme. Het verloop van deze kromme is ontleend aan een type filterzand dat in dit gebied van korrelgrootten in Nederland wel wordt toegepast. Uit de berekening volgt dat de effectieve diameter, volgens de vergelijkingen 37 en 38 berekend uit de zeeffracties van het beschouwde zand, bedraagt

bij homogene opbouw van het filterbed

$$d_{eh} = 1,124 \text{ mm} \sim 1,12 \text{ mm}$$

bij gelaagde opbouw van het filterbed

$$d_{es} = 1,109 \text{ mm} \sim 1,11 \text{ mm}$$

Het gelaagde bed heeft in dit geval dus een iets kleinere effectieve diameter en bijgevolg een grotere weerstand dan een homogeen bed. Het ver-

schil is evenwel van geen betekenis. Uit figuur 3 blijkt dat deze effectieve diameters groter zijn dan de effectieve diameter d_{10} volgens Hazen, welke 0,93 bedraagt.

Voor een zand dat bij benadering een geometrisch normale verdeling heeft, kunnen de in vergelijking 37 en 38 gegeven sommeringen worden geïntegreerd met behulp van vergelijking 9 en worden uitgedrukt in de geometrische standaardafwijking σ_g en het geometrisch gemiddelde M_g . De integratie leidt voor een homogeen bed tot de volgende vergelijking

$$\frac{1}{d_{eh}} = \int_0^1 \frac{dp_w}{d} = M_g^{-1} \cdot \sigma_g^{0,5 \ln \sigma_g} \quad (40)$$

of met

$$\sigma_g^{-0,5 \ln \sigma_g} = f(\sigma_g)_h$$

$$d_{eh} = M_g f(\sigma_g)_h \quad (41)$$

Voor een gelaagd bed luidt de uitkomst

$$\left(\frac{1}{d_{es}}\right)^2 = \int_0^1 \frac{dp_w}{d^2} = M_g^{-2} \sigma_g^{2 \ln \sigma_g} \quad (42)$$

of met

$$\sigma_g^{-\ln \sigma_g} = f(\sigma_g)_s$$

$$d_{es} = M_g f(\sigma_g)_s \quad (43)$$

Met de formules 11 kan hieruit worden afgeleid

$$d_{eh} = d_{10} C_u^{0,835-0,487 \log C_u} \quad (44)$$

$$d_{es} = d_{10} C_u^{0,835-0,975 \log C_u} \quad (45)$$

Uit de vergelijkingen 41, 43 en 44, 45 blijkt dat de effectieve diameter voor een homogeen en een gelaagd bed in 2 karakteristieke grootheden van de zeefkromme kan worden uitgedrukt en wel in de wiskundige grootheden M_g en σ_g of in de veel gebruikte karakteriserende grootheden van Hazen d_{10} en C_u . Het werken met laatstgenoemde grootheden verdient de voorkeur wegens hun bekendheid in de praktijk. Als voorbeeld van de berekening van de effectieve diameter uit de zeefkromme met behulp van d_{10} en C_u is wederom de in figuur 3 gegeven korrelgrootteverdeling gekozen. Uit de in figuur 3 gegeven zeefkromme kunnen d_{10} en C_u worden bepaald. Hieruit volgt $d_{10} = 0,93$ en $C_u = 1,27$. Worden deze waarden in de formules 44 en 45 ingevuld, dan wordt na uitwerking verkregen

$$d_{eh} = 1,122 \text{ mm} \sim 1,12 \text{ mm (homogeen bed)}$$

$$d_{es} = 1,108 \text{ mm} \sim 1,11 \text{ mm (gelaagd bed)}$$

Deze waarden zijn gelijk aan de uit de zeeffracties berekende waarden, omdat de zeefanalyse het rechtlijnige verloop redelijk benadert en dus weinig afwijkt van een natuurlijk zand met een geometrisch normale frequentie. Ook voor enkele andere gecontroleerde normale zeefkrommen bleken

de effectieve diameters berekend uit de fracties goed overeen te stemmen met de uit d_{10} en C_u berekende waarden. Enige afbuiging aan boven- en onderzijde van de kromme is doorgaans van weinig invloed, omdat deze afwijkingen steeds betrekking hebben op de kleinste fracties. Wel is het van belang dat de punten die bepalend zijn voor de kromme, dus d_{50} en $d_{15,87}$ voor het vaststellen van M_g en σ_g in de vergelijkingen 40 en 42 (zie ook vergelijking 10) en d_{10} en d_{60} (C_u) voor de vergelijkingen 44 en 45 niet op het afbuigende deel van de kromme liggen.

Uit voorgaande beschouwing blijkt dus dat voor zeefkrommen die, uitgezet op waarschijnlijkheids-schaal met logaritmische basis, een redelijke benadering van een rechte lijn geven, de effectieve korreldiameter uit de nog steeds vaak toegepaste karakteriserende grootheden van Hazen kan worden berekend. Dit kan op zeer eenvoudige wijze geschieden door de in de formules 44 en 45 gegeven gecompliceerde machten van de gelijkvormigheidscoëfficiënt als functie van C_u vast te leggen. Daartoe zijn de functies

$$f(C_u)_h = C_u^{0,835-0,487 \log C_u} \quad (46)$$

en

$$f(C_u)_s = C_u^{0,835-0,975 \log C_u} \quad (47)$$

voor C_u -waarden tussen 1 en 2 berekend en in tabel 4 opgenomen. Met deze functies gaan de vergelijkingen 44 en 45 over in

$$d_{eh} = d_{10} f(C_u)_h \quad (48)$$

$$d_{es} = d_{10} f(C_u)_s \quad (49)$$

Met behulp van tabel 4 kunnen de functies in de vergelijkingen 48 en 49 — eventueel door interpolatie — nu gemakkelijk worden bepaald. Op deze wijze kan de effectieve vervangingsdiameter d_e dus als een simpele vermenigvuldiging van 2 getallen worden verkregen uit de effectieve diameter d_{10} en de gelijkvormigheidscoëfficiënt C_u volgens Hazen.

5. KEUZE, EISEN EN SPECIFICATIE VAN HET TE BESTELLEN FILTERZAND

5.1 Algemene opmerkingen over de keuze van het zand

De keuze van het filterzand geschiedt bij voorkeur proefondervindelijk en wel door één of meer zandafmetingen in een proefinstallatie te onderzoeken. Een eerste voorwaarde voor de keuze is uiteraard dat het filtraat aan de gestelde kwaliteitseisen voldoet. Direct hiermee samenhangend is een reeks van factoren bepalend voor de keuze van het zand, zoals de kwaliteit van het ruwe water (o.a. de troebelheid) en de voorbehandeling, de filtratiesnelheid, de looptijd en de weerstand. Maar indirect kunnen ook factoren van constructieve aard een rol spelen, zoals de hoogte van de goot boven het bed en de spleten in de spoelkoppen. Tenslotte kunnen ook economische factoren van belang zijn, bijvoorbeeld met betrekking tot het spoelschema. Afweging van alle factoren leidt tenslotte tot een compromis op grond waarvan de optimale zandsamenstelling wordt vastgesteld. Is het niet mogelijk of nodig een proeffilter voor de keuze van het zand in te schakelen, dan wordt het te bestellen zand gekozen op grond van de opgedane ervaring. Op welke wijze men ook tot de keuze komt, in beide gevallen zal rekening moeten worden gehouden met het leveringsprogramma van de zandleverancier. Naarmate men hierop beter kan afstemmen, levert de bestelling minder moeilijkheden op en is men meestal goedkoper uit.

Bezien uit het oogpunt van filtratietechniek kan in het algemeen worden gesteld dat naar een zand-

bed met grote uniformiteit in korrelafmetingen moet worden gestreefd. Dit geldt uiteraard niet als de opbouw van het bed gericht is op neer- of opwaartse filtratie in de richting van afnemende korrelgrootte. In dat geval wordt er juist gestreefd naar een korrelgroottevariatie van grof naar fijn. Bij de gebruikelijke filtratiemethode door een zandpakket van normaal uitgezeefd zand echter wordt om de volgende redenen naar een grote gelijkvormigheid van het materiaal gestreefd. Naarmate het zand minder uniform is, zal de weerstand groter zijn, terwijl een extra verhoogde weerstand optreedt indien fijnere deeltjes in de poriën van het grove zand geraken. Bovendien zullen de fijnere zandfracties zich bij een expandierend bed doorgaans in de bovenste laag van het filterbed bevinden, waardoor deze eerder dichtslibt. Dit heeft een kortere looptijd en een kleinere vuilberging ten gevolge. De dieper gelegen delen van het bed worden daardoor minder werkzaam, terwijl de grovere onderlagen veelal geen deel meer hebben aan het filtratieproces. Voorts kan een grote variatie in korrelafmetingen de reiniging van het bed bemoeilijken, indien de spoelsnelheid die nodig is om de bovenste lagen schoon te spoelen, te gering is om de rest van het bed met grover materiaal in beweging te brengen.

Bij het nastreven van een grote uniformiteit dient rekening te worden gehouden met de mogelijkheden die de leverancier in dit opzicht heeft. Daardoor wordt nl. de grens (minimale Cu-waarde) bepaald. Grote uniformiteit wordt verkregen door toepassing van een steil verloopende korrelverdelingskromme met een nauwe be-

grenzing van de maximale en minimale korrelafmeting. Daarbij is het vermijden van fijn materiaal belangrijker dan van grof materiaal, omdat zoals gezegd door het fijne materiaal ontijdig dichtslaan van de bovenlaag wordt bevorderd. Dit betekent echter allerm minst dat hoge percentages extra grof materiaal in de zeefkromme kunnen worden geaccepteerd. Een niet of weinig werkzame grove onderlaag geeft namelijk een onnodige verdikking van het filterbed, hetgeen oneconomisch is. Overigens kan men de overmaat aan grof materiaal bij het uitzeven zonder bijzondere maatregelen vrij goed beperken.

Hoever men met het streven naar een gelijkvormig zand moet gaan, staat echter niet vast. Om dit te bepalen zouden systematische filtratieproeven met zanden van verschillende uniformiteit voor verschillende watertypen moeten worden uitgevoerd. Er zijn namelijk geen gegevens voorhanden omtrent de mate van verbetering, die wordt verkregen door verscherping van de eisen voor een zand dat reeds een redelijke gelijkvormigheid met bijvoorbeeld een uniformiteitscoëfficiënt $C_u = 1,25 \text{ à } 1,3$ bezit. Enkele praktijkonderzoekingen waarbij aandacht aan dit punt is besteed gaven geen aanwijzingen tot verbetering bij verdere verlaging van de C_u -waarde in dit gebied. Het heeft dan ook geen zin in dit opzicht extreme eisen te stellen, die wellicht slechts de leverantie bemoeilijken en de prijs opjagen.

5.2 Leveringsmogelijkheden in Nederland

De Nederlandse zandleveranciers leveren doorgaans gebaggerd rivierzand in vrijwel alle voor de waterleidingbedrijven gewenste maten. De korrelgrootteverdeling en vorm zijn afhankelijk van de plaats van herkomst en kunnen derhalve voor verschillende partijen enige variatie vertonen. De vorm varieert van enigszins afgerond tot hoekig en scherp. Gebruik van hoekig materiaal kan de filtratie soms ten goede komen. Dit materiaal heeft naar verhouding tot het korrelvolume een groter oppervlak en een groter poriënvolume (zie punt 2.2) waardoor zowel de filtrerende werking als de filtratieweerstand wordt beïnvloed. Behalve het normale rivierzand wordt ook wel bergzand en zogenaamd kwartszand geleverd, het eerste vaak fijn en scherp, het tweede meestal hoekig.

Het zand wordt door de leverancier gewassen, gegloeid en van stof bevrijd. Op bestelling kan het zand worden gebroken, waardoor het een hoekiger vorm verkrijgt. De prijs komt als gevolg van deze speciale bewerking en het daarbij als gruis verloren gegane materiaal vanzelfsprekend hoger te liggen. Het bestellen van gebroken zand is dan ook slechts zinvol indien hierdoor een verbetering van het filtratieproces wordt verkregen. Bovendien moet men er rekening mee houden dat in die gevallen waar aangroeiing van het filtermateriaal plaatsvindt, de korrels in de loop der tijd steeds meer worden afgerond. Het bergzand kost meer dan het normale rivierzand, het kwartszand is zelfs belangrijk duur-

der. Bepaalde zandsamenstellingen kunnen worden verkregen door extra uitzeven, door mengen en door het uitspoelen van fijn zand. Verder wordt de samenstelling beïnvloed door de zeeftijd en de belasting van de zeef, in het bijzonder voor wat betreft de ondermaat aan fijn materiaal die bij het uitzeven op de fijnste zeef achterblijft. Speciale eisen kunnen doorgaans wel worden ingewilligd, maar uiteraard zullen deze een meerprijs met zich meebrengen. Overigens behoeft men voor een hogere zandprijs niet al te zeer terug te schrikken, omdat de zandkosten slechts enkele procenten van de totale bouwkosten van de filterinstallatie uitmaken.

Bij de normale werkwijze wordt het zand door de leverancier gezeefd op zeven die zoveel mogelijk de door de besteller gewenste korrelgrootteverdeling bewerkstelligen. Gezien deze werkwijze ligt het voor de hand dat de klant zijn bestelling niet in ingewikkelde diameterformuleringen moet uitdrukken, maar dat hij de zeefmaten of direct daarop betrekking hebbende grootheden gebruikt. Bij voorkeur moet hij de begrenzing van het zand vastleggen met de maten van genormaliseerde zeven, omdat de leverancier ook zeven gebruikt. Deze kiest op grond van zijn ervaring de op de bestelling afgestemde zeven.

Bij het bestellen van zand tussen nauwe grenzen dient met het volgende rekening te worden gehouden. De zeef voor de grootste korrel laat door onvolkomenheden en afwijkingen ten opzichte van de normaalzeef altijd een percentage te grote korrels (bovenmaat) door, dat groter is naarmate langer gezeefd wordt. Daarentegen houdt de zeef voor

de kleinste korrel een zeker percentage te kleine korrels (ondermaat) tegen en wel minder naarmate langer wordt gezeefd en de zeef minder is belast, d.w.z. een kleinere hoeveelheid materiaal te verwerken heeft. Hieruit blijkt dat het zeer scherp "afsnijden" van de eindfracties, vooral bij een reeds steil verloop van de kromme, moeilijkheden voor de leverancier kan opleveren. Om de percentages boven- en ondermaat te beperken, moet de leverancier de mogelijkheid hebben tussen nauwere grenzen dan de gevraagde te zeven. Beschikt hij voor maten onder 1 mm over zeven oplopend met 0,1 mm, dan kan voor een gevraagd zand van bijvoorbeeld 0,5-1,0 mm tussen nauwere grenzen worden uitgezeefd door gebruik te maken van zeven van 0,6 en 0,9 mm. Voor grover zand gaan de zeefmaten van de leveranciers meestal met grotere stappen omhoog. Zo zou men om de ondermaat voor een zand met een onderbegrenzing van 1,75 mm te beperken een 2 mm zeef kunnen toepassen. Dit is voordeliger dan het toepassen van een lagere belasting, een herzeving of een langere zeef tijd, die voor de kleinere zeefmaat nodig zou zijn om het percentage ondermaat te verlagen. Het is door vernauwing van de zeefgrenzen mogelijk de percentages onder- en bovenmaat van bijvoorbeeld 10% terug te brengen tot enkele procenten. Naast de helling of de zijdelingse begrenzing van de kromme (C_u) dient ook de mogelijke beperking van boven- en ondermaat een punt van overleg met de leverancier uit te maken.

Uit het voorgaande blijkt dat de leverancier aan redelijke wensen ten aanzien van de steilheid en

de begrenzing van de zeefkromme tegemoet kan komen. De verdeling van de zandfracties die het midden-gedeelte van de kromme bepalen, heeft hij echter minder in de hand. Voor het vergroten of verkleinen van tussengelegen fracties zal men namelijk al gauw tussenzevingen of bijmenging moeten toepassen, hetgeen kostenverhogend werkt. Gelet op enerzijds de zeeftechnieken waarover de Nederlandse leveranciers tegenwoordig beschikken en anderzijds de wens zand van uniforme korrelgrootte toe te passen, kan worden geadviseerd de uniformiteitscoëfficiënt kleiner te kiezen dan $C_u = 1,35$ en te streven naar $C_u = 1,25$.

5.3 Algemene eisen voor een te bestellen zand

Behalve de eisen ten aanzien van de korrelgrootte die in het volgende punt worden behandeld, worden bij de gebruikelijke bestellingen van een zand meestal enkele nadere omschrijvingen en voorwaarden opgegeven. In punt 2 werd reeds uitvoerig op de eigenschappen en de aan het zand te stellen eisen ingegaan. Onder verwijzing naar de desbetreffende punten worden de hoofdzaken, die bij het kopen van filterzand van belang zijn, hier in het kort samengevat. Voor normale doeleinden wordt een gewassen, gegloeid en gezeefd zand (punt 2.3) gevraagd, bestaande uit harde, duurzame, slijtvaste korrels (punt 2.1) met een gemiddelde massadichtheid $>2500 \text{ kg/m}^3$. Om het percentage lichte korrels te beperken, wordt deze eis aangevuld door te stellen dat ten hoogste 1% van het zand een massadichtheid $<2250 \text{ kg/m}^3$ mag hebben (punt 2.4).

Speciale eisen omtrent het zandtype en de vorm dienen nader te worden geformuleerd. Desgewenst

worden nadere aanduidingen omtrent herkomst en vorm (punt 2.2) gegeven, zoals "scherp bergzand", "hoekig kwartszand", "afgerond rivierzand" of "gebroken zand". Extreme vormen worden geweerd door ten hoogste twee procent langwerpig, plat of mica-achtig materiaal toe te laten.

Aangezien het zand ook na wassen en gloeien nog weleens geringe hoeveelheden verontreinigingen bevat, dient de eis te worden gesteld dat het geleverde materiaal geen verontreinigingen bevat zoals kool, koolas, stof, klei, leem, organische stof, ijzer en mangaan. Een controle op de organische vervuiling wordt verkregen door het gloei-proces. Volgens de in punt 2.3 beschreven gloei-proef mag het gloeiverlies na 1 uur gloeien bij 750°C niet meer dan 0,5% bedragen.

De chemische bestendigheid wordt, in het bijzonder voor agressief water, gecontroleerd met de in punt 2.5 gegeven proef op de zuurbestendigheid, waarbij het gewichtsverlies na 24 uur verblijf in een 20% HCl-oplossing kleiner moet zijn dan 2%.

Voor het vervoer, dat meestal per vrachtauto of per schip geschiedt, moeten ten aanzien van de verpakking bepaalde eisen worden gesteld. Gebruikelijk is vervoer in papieren, jute of plastic zakken van bijvoorbeeld 50 kg, maar ook geschiedt het transport wel onverpakt (bulk). Er worden voorschriften op hygiënische gronden gegeven, waarbij het gebruik van gereinigde zakken, nieuwe zakken of gereinigde laadruimten wordt vereist.

Het is gewenst bij de offerte een zandmonster van 2 kg aan te vragen, opdat een beoordeling, in het bijzonder van de korrelgrootteverdeling, kan plaatsvinden alvorens te bestellen. Bij de feitelijke levering wordt bijvoorbeeld een monster per productiedag, of 1 of 2 monsters per geleverde lading of partij aan een controle onderworpen. Er moet rekening mee worden gehouden dat de spreiding in korrelgrootten van een grote soms in verschillende partijen geleverde hoeveelheid zand iets groter is (grotere C_u) dan die welke in een tijdens de productie getrokken monster voorkomt. De samenstelling van het monster wordt namelijk beïnvloed door kleine variaties, die in het voor de productie aangevoerde materiaal vóórkomen en kleine wisselingen, die zich kunnen voordoen in zeef tijd, belasting en de verstopping van de zeven. De monsters getrokken op verschillende productietijdstippen zijn daardoor nooit precies gelijk.

Met betrekking tot de aflevering moet terdege rekening worden gehouden met het productievermogen van de leverancier. Men vergewisse zich er daarom van of op lange levertijden dient te worden gerekend. In dit verband kan het, in het bijzonder bij grote leveranties, aanbeveling verdienen de aflevering volgens een langgerekt patroon met een bepaald tonnage per dag of week te doen plaatsvinden.

5.4 Specificatie van het te bestellen zand

De specificatie van het te bestellen zand wordt ontleend aan het zand dat — bij voorkeur proefondervindelijk — voor de filters in kwestie gekozen is. Dit geschiedt door van een monster van het

filtermateriaal een zeefanalyse te maken. De wijze waarop de korrelverdeling van het zand voor de bestelling wordt vastgelegd, is echter verre van uniform. Alvorens hieromtrent een aanbeveling te doen, is het gewenst met de belangrijkste wijzen van specificatie kennis te maken. Hoewel er vele variaties zijn, kunnen de verschillende methoden meestal in een van de volgende drie groepen worden ingedeeld.

a. De zeefkromme of daarop gebaseerde kenmerkende grootheden

In dit geval wordt de korrelverdeling aangeduid door een zeefkromme die het verband geeft tussen de zandfractie die een bepaalde zeefmaat d passeert (gewichtsperscentage $< d$) en deze zeefmaat. De besteller vraagt de leverancier in dit geval een zand dat de gegeven kromme zo dicht mogelijk benadert. In figuur 4 is een dergelijke kromme geschetst met inbegrip van de fijnste en grofste eindfracties. Uiteraard kan de kromme ook in cijfers worden uitgedrukt door de tussen de zeefmaten gelegen fracties of de passerende fracties op te geven overeenkomstig de volgende tabel.

Aanduiding van de korrelgrootteverdeling met fracties op de zeven achterblijvend of door de zeven passerend (zie figuur 4).			
draadzeefmaten ASTM in mm	zeeffracties in %	draadzeefmaten ASTM in mm	passerende fracties in %
>1,68	0,3	1,68	99,7
1,68 -1,41	0,7	1,41	99,0
1,41 -1,19	10,0	1,19	89,0
1,19 -1,00	51,0	1,00	38,0
1,00 -0,841	29,0	0,841	9,0
0,841-0,707	8,0	0,707	1,0
0,707-0,595	0,9	0,595	0,1
<0,595	0,1		
	100		

Aanduidingen met enkele diameters of andere kenmerkende grootheden, zoals de "werkzame" diameter d_{10} , de "gemiddelde" diameter d_{60} (of $C_u = d_{60}/d_{10}$) en d_{90} , komen hiermee in principe overeen. Opdat de kromme op deze wijze echter niet te vaag wordt omschreven is het gewenst deze door 4 of 5 punten te precisieren en in het hier beschouwde geval bijvoorbeeld op te geven: $d_{99} = 1,41$ mm; $d_{90} = 1,21$ mm; $d_{10} = 0,85$ mm; $d_1 = 0,71$ mm; $C_u = 1,27$, waarmee een goede benadering van de in de figuur gegeven kromme is verkregen.

Op de hier beschreven aanduidingen voor een zeefkromme zijn uiteraard nog diverse variaties mogelijk. Zo wordt in de AWWA Specifications for Filtering Material (lit. 5) onder andere een specificatiemethode vermeld, waarin ook de onder- en bovengrens van het zand afhankelijk worden gesteld van de 10 procentdiameter en wel door te stellen dat d_1 en d_{99} niet kleiner respectievelijk groter mogen zijn dan een bepaald aantal malen d_{10} . In feite is dit een voorwaarde voor de helling van het onder- en bovendeeel van de zeefkromme.

De hier besproken wijze van aanduiding door middel van een enkele kromme of enkele punten daarvan wordt nogal eens gebruikt, doch heeft voor de leverancier het bezwaar dat er geen band of strook gegeven is, die hem de noodzakelijke speling geeft. Hij moet weten in hoeverre hij van de gegeven kromme mag afwijken. Uiteraard kan men hieraan tegemoet komen door op de gegeven diameters een tolerantie van bijvoorbeeld +3% en -3% toe te staan, zodat ter weerszijden van de zeefkromme een begrenzingskromme

ontstaat. Daarmee komt men op de onder b besproken methode, waarbij in principe wordt uitgegaan van 2 begrenzingskrommen.

b. Begrenzingskrommen voor de korrelverdeling

Volgens deze methode wordt het gewenste gebied in principe begrensd door het vaststellen van een maximaal en minimaal percentage voor de passerende fracties per zeefmaat, ofwel van een maximale en minimale zeefmaat voor de passerende fracties. De laatste wijze van aanduiding zal buiten beschouwing worden gelaten, omdat bij de specificatie door middel van een maximaal en minimaal door de zeven passerend gewichtsperscentage gemakkelijker met de afgeronde of genormaliseerde waarden van de zeefmaten kan worden gewerkt. In de onderstaande tabel is de methode door begrenzing van het gewichtsperscentage door een voorbeeld geïllustreerd. In figuur 5 zijn deze begrenzende fracties uitgezet en door begrenzingslijnen verbonden.

Begrenzing van de zeefkromme door een maximaal en minimaal gewichtsperscentage van de passerende fracties (zie figuur 5)		
passerend gewicht in %		zeefmaat in mm (ASTM-draadzeven)
minimum	maximum	
99,0	100	1,68
95,0		1,41
85,0		1,19
27,5		1,00
		0,841
		0,707
		0,595
	42,5	
	12,0	
	2,5	
	0,5	

De in het voorbeeld ingetekende zeefkromme is dezelfde als die welke in figuur 4 is gegeven. De geko-

zen begrenzing is gebaseerd op aan de praktijk ontleende gegevens, die representatief zijn voor de aan een goed geselecteerd zand te stellen eisen. Uit de figuur blijkt dat de begrenzing van het middendeel van de kromme neerkomt op een totale tolerantie voor de korrelafmeting van ongeveer 5%. Er is bij de huidige kennis van zaken geen aanleiding nauwere begrenzingen aan te bevelen. Naarmate de optimale korrelgrootte minder nauwkeurig is vastgelegd, mag de tolerantie uiteraard ook minder scherp worden gesteld. Wel dient bij een minder nauwe begrenzing er voor te worden zorggedragen dat het streven naar een goede uniformiteit van het zand gehandhaafd blijft door de begrenzingslijnen iets steiler te laten verlopen.

De geschetste methode is aantrekkelijk, omdat de besteller zijn wensen nauwkeurig in figuur of tabel kan omschrijven en de leverancier weet wat er van hem wordt verlangd. Het blijft uiteraard gewenst omtrent de eisen enerzijds en de mogelijkheden anderzijds vooraf overleg te plegen.

c. Bovenste en onderste korrelgroottegrens met boven- en ondermaat

Een eenvoudige wijze van specificeren is die waarbij het zand door een bovenste en onderste zeefmaat wordt begrensd, met dien verstande dat er buiten deze zeefmaten een bepaald percentage bovenmaat en ondermaat is toegestaan. Deze methode heeft het voordeel dat op simpele wijze, namelijk door twee punten, enerzijds de minimale helling van het middendeel wordt vastgelegd en anderzijds de grove en fijne fracties tot een bepaald percentage beperkt worden. En dit zijn

in feite de twee belangrijke factoren die de uniformiteit van het zand bepalen. Een nadeel is dat de kromme door 2 punten slechts vaag wordt beschreven en men al gauw de neiging krijgt nadere specificaties (meer punten) te geven, waardoor men toch weer in de richting van methode b. gaat. Een en ander wordt geïllustreerd door het voorbeeld in figuur 6, waarin door de punten A en B de specificatie volgens onderstaande tabel is aangegeven.

Begrenzing van de zeefkromme door enkele zeefmaten met voorgeschreven doorlaatpercentages (zie figuur 6)	
bovenbegrenzing A (grof)	onderbegrenzing B (fijn)
minimum doorlaat op draadzeef 1,19 mm 85%	maximum doorlaat op draadzeef 0,841 mm 12%

Ook in dit geval is de zeefkromme van figuur 4 ingetekend. Hoewel de punten A en B de uniformiteit van het middendeel redelijk goed vastleggen, geven zij voor de eindfracties een te grote vrijheid. Een nadere specificatie, bijvoorbeeld overeenkomstig de punten C (>95% passerend door 1,41 mm) en D (<2,5% passerend door 0,707 mm), ware hier gewenst. Bovendien laten de begrenzingen A en B nog een ruime spelning voor de gemiddelde korrelafmeting open, waardoor deze zowel tussen 0,841 en 1,00 mm als tussen 1,00 en 1,19 mm kan liggen. Door de beperkte aanduiding is deze methode slechts bruikbaar voor een globale omschrijving van de zeefkromme en wordt daarom voor het bestellen van zand niet aanbevolen.

Samenvattende kunnen de volgende richtlijnen met betrekking tot de specificatie van het te bestellen zand worden aanbevolen.

1. Er dient te worden gestreefd naar een gelijkvormig zand (kleine C_u -waarde) met een beperkt percentage bovenmaat (grof) en in het bijzonder een gering percentage ondermaat (fijn).
2. De specificatie voor het te bestellen zand moet de eisen voor het gewenste zand duidelijk en eenvoudig weergeven. Deze eisen moeten zoveel mogelijk binnen de normale leveringsmogelijkheden van de leverancier liggen.
3. Het is gewenst bij de bestelling van zand de onder b. besproken methode te gebruiken, dus in de specificatie een zekere marge of tolerantie toe te laten door het aangeven van een band waarbinnen de zeefkromme moet liggen (zie figuur 5).
4. De onder a. en c. beschreven methoden worden niet aanbevolen voor het bestellen van zand, omdat deze geen tolerantie respectievelijk te grote variatiemogelijkheid geven.
5. De specificatie voor een te bestellen zand kan worden aangegeven in getallenwaarden zowel als in een grafiek.
6. De specificatie kan desgewenst worden aangevuld met extra eisen ten aanzien van kenmerkende grootheden zoals d_{10} en C_u .

In tabel 5 is een voorbeeld gegeven van de algemene eisen en de specificatie van de korrelverdeling ten behoeve van het bestellen van filterzand.

Gezien de mogelijke variaties in wensen en eisen ten aanzien van het te gebruiken filterzand kan vanzelfsprekend geen vast algemeen geldend voorschrift voor de bestelling van zand worden gegeven. Voor normale leveranties kan echter worden aanbevolen de bestellingen overeenkomstig het in tabel 5 gegeven voorbeeld uit te voeren.

6. SYMBOLEN

A	= korreloppervlak van het filtermateriaal (index s voor bolvormig materiaal)
C	= weerstandcoëfficiënt
C_u	= gelijkvormigheidscoëfficiënt
D	= diameter van cirkelvormige buis
d	= korrelafmeting, korreldiameter
d_e, d_s, d_v	= effectieve resp. soortelijke en volumieke diameter
d_{10}	= korreldiameter van een zandmonster waarvoor geldt dat onder deze maat 10 gewichtsprocenten fijner materiaal aanwezig zijn, = 10% diameter
d_{eh}, d_{es}	= effectieve korreldiameter voor homogeen resp. gelaagd bed
d_p, d_q	= zeefmaten voor twee opeenvolgende zeven
f	= wrijvingsfactor
H_m	= hardheid volgens schaal van Mohs
k	= weerstandsfactor, permeabiliteitscoëfficiënt

L	= dikte van een zandpakket, lengte
M_g	= geometrisch gemiddelde afmeting
n	= aantal
Δp	= drukverlies
p_w	= gewichtsfractie
S_o	= specifiek korreloppervlak = A/V (index s voor bolvormig materiaal)
t	= temperatuur
U	= specifiek korreloppervlak ($10/d_s$)
V	= korrelvolume van het filtermateriaal (index s voor bolvormig materiaal)
v	= stromingssnelheid
v_o	= aanstroomsnelheid, filtratiesnelheid betrokken op volle doorsnede
W	= gewicht van het filtermateriaal
x, y	= grootheden
ϵ	= poriëngehalte
ζ	= zêta-potentiaal

- ν = kinematische viscositeit
- ρ = massadichtheid of volumieke massa
- ρ_b = massadichtheid van gestort materiaal
(stortdichtheid)
- σ_g = geometrische standaardafwijking
- ψ = vormfactor
- 1..i..n = indices voor aanduiding van de zeef-
fracties

7. LITERATUUROPGAVE

1. B.G. Escher - Algemene Mineralogie en Kristallografie - Uitg. Noorduyt, Gorinchem, 1954, p. 509-511.
2. A. de Lathouder en M. Sollman - Beschouwing over enkele onderwerpen met betrekking tot het maken van korrelgrootte-analyses van filtermaterialen - Water 47 (1963), p. 175.
3. NNI-Normen - N 209, 210 en 213 (1939), Indeling en benaming van grondmonsters.
4. DIN-Norm 18123 (Vornorm Juni 1971) - Baugrund. Untersuchung von Bodenproben. Korngrössenverteilung.
DIN-Normen 66144/5/6 (Entwurf Januar 1970) - Darstellung von Korn - oder Teilchengrössenverteilungen.
5. Standard Specifications for Filtering Material - American Waterworks Association - AWWA B 100-53, Revised June 2, 1953.
6. NNI-Norm - N 3070 (1954), Voorkeurreeksen.
7. ISO Recommendation R 565 (1967), Woven wire cloth and perforated plates in test sieves.
8. E.F. Haver - Normung von Siebböden - Aufbereitungs-Technik 9 (1968) p. 265.

9. E.F. Haver - Prüfsieb - Vergleichstabelle 1969 - Aufbereitungs-Technik 10 (1969) p. 362.
10. D. Thoenes - Laboratoriumzeven - Normalisatie 36 (1960) p. 133.
11. NNI-Normen - NEN 2560 (1969), Controlezeven, Draadzeven en plaatzeven met ronde en vierkante gaten; N 480 (1952), Controlezeven, (Normblad geldig tot 1969, voor zeven volgens oude norm).
12. Eisen door de Rijkswaterstaat gesteld aan bouwstoffen voor de wegenbouw 1967- Staatsdrukkerij en uitgeversbedrijf/'s-Gravenhage.
13. P. Frison - Comment utiliser les sables naturelles pour la filtration rapide - L'eau 36 (1949), p. 7, p. 25.
14. Standard Specifications for Sieves - ASA nr. Z.23.1 - 1939 (ASTM nr. E 11-58 T).
15. Specification for test sieves - British Standard Institution - B.S. 410: 1969.
16. P. Kroupa - Beitrag zur Berechnung von Schnellfiltern - Wasserwirtschaft-Wassertechnik 10 (1960), p. 310.
17. A. Hazen - Annual report of the Massachusetts State Board of Health 1892.

18. D. Feben - Theory of flow in filter media - JAWWA 52 (1960), p. 940.
19. J.R. Baylis - A study of filtering materials for rapid sandfilters - Waterworks and Sewage 81 (1934), p. 127, p. 162, p. 352.
20. G.M. Fair, J.C. Geyer and D.A. Okun - Water and wastewater engineering; J. Wiley and Sons, New York London Sydney; Vol. I 1966, Vol. II 1968.
21. J.C. Ward - Turbulent flow in porous media - J. of the Hydr. Division, Proc. of the Am. Soc. of Civ. Eng. 1964, Paper 4019, HY 5.
22. Toelichting bij de normaalbladen N 209, 210 en 213; indeling en benaming van grondsoorten.
23. J. Kozeny en F. Zunker - Die Durchlässigkeit des Bodens - Kulturtechniker 1932-'33.
24. H. Tessendorf - Untersuchungen zum Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen - Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Berlin, Mitteilung Nr. 57 (1962).
25. T.F. Craft - Review of rapid sand filtration theory - JAWWA 58 (1966), p. 428.
26. S. Ergun - Fluid flow through packed columns - Chem. Eng. Progr. 48 (1952), p. 89.

27. R. Jeschar - Druckverlust in Mehrkornschüttungen aus Kugeln - Archiv für das Eisenhüttenwesen 35 (1964), p. 91.
28. P.L. Knoppert - Snelfiltratie in de praktijk - Water 52 (1968), nr. 6, p. 359; nr. 7, p. 431; nr. 8, p. 491.
29. G.M. Fair and L.P. Hatch - Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand - JAWWA 25 (1933), p. 1551.
30. K.J. Ives - Filtration, Fact and Fiction - Effluent and Water treatment Convention at Seymour Hall London W 1, 1963.
31. G.M. Fair - The hydraulics of rapid sand filters - J. of the Inst. of Water Eng. 5 (1951), p. 171.
32. P.C. Carman - Fluid flow through granular beds - Transactions of the Institution of Chemical Engineers 15 (1937), p. 150.

Tabel 1a - Overzicht van enkele series standaard-draadzeven voor zeefopeningen van 100-1000 micrometer

Voorkeurreeksen N 3070-1954 ISO R 3-1959 DIN 323-1957			Maaswijdten voor controleseries draadzeven														Factor voor zeefmaat interval $2\frac{1}{2} \sim 10^{3/40}$ (ca 1,19)
hoofd- reeks R 20	hoofd- reeks R 40	afgel. reeks R 40/3	ISO	Duitsland	Groot-Brittannië		U.S.A.		U.S.A.		Nederland						
			R 565 1967 R 20/3	DIN 4188 1969 R 20 1)	Brit. St. 410 1962 interval $2\frac{1}{2}$ 2)	Brit. St. 410 1969 R 40/3	ASTM E 11-61 1966 interval $2\frac{1}{2}$	ASTM E 11 1970 R 40/3	Tyler Standaard 1910 interval $2\frac{1}{2}$	N480 1952 inter- val $2\frac{1}{2}$ 3)	NEN 2560 1969 R 40/3						
(μ m)	(μ m)	(μ m)	μ m	μ m	μ m	mesh of inch	μ m	mesh	μ m	nr.	μ m	nr.	inch	mesh	μ m	μ m	
100	100 106	106		100													
112	112 118			112													
125	125 125	125	125	125	125	120	125	120	125	120	125	120	0,0041	150	105	106	
140	132 140 150	150		140													
160	160 170			160													
180	180 180	180	180	180	180	85	180	85	177	80	180	80	0,0049	115	125	125	
200	190 200 212	212		200													
224	224 236			224													
250	250 250	250	250	250	250	60	250	60	250	60	250	60	0,0058	100	150	150	
280	265 280 300	300		280													
315	315 335			315													
355	355 355	355	355	355	355	44	355	44	354	45	355	45	0,0069	80	175	180	
400	375 400 425	425		400													
450	450 475			450													
500	500 530	500	500	500	500	30	500	30	500	35	500	35	0,0082	65	210	212	
560	560 600	600		560													
630	630 670			630													
710	710 710	710	710	710	710	22	710	22	707	25	710	25	0,0097	60	250	250	
800	750 800 850	850		800													
900	900 950			900													
1000	1000 1000	1000	1000	1000	1000	16	1000	16	1000	18	1000	18	0,0116	48	300	300	

1) Frankrijk AFNOR, normblad ontwerp XII-501, 1968, volgt evenals DIN 4188 (1969) de R 20 reeks ²⁾ met aanvullende waarden voor 1/32" - 790 μ m

3) wegens de veelvuldige toepassing van zeven volgens de thans vervallen norm N 480 is deze serie ter vergelijking nog opgenomen

Tabel 1b - Overzicht van enkele series standaard-draadzeven voor zeefopeningen van 1-10 millimeter

Voorkeurreeksen N 3070-1954 ISO R 3-1959 DIN 323-1957			Maaswijdten voor controleseries draadzeven													Factor voor zeefmaat interval $2\frac{1}{2} \sim 10\frac{3}{40}$ (ca.1,19)	
hoofd- reeks R 20	hoofd- reeks R 40	afgel. reeks R 40/3	ISO	Duitsland	Groot-Brittannië		U.S.A.				U.S.A.		Nederland				
			R 565 1967 R 20/3 4)	DIN 4188 1969 R 20	Brit. St. 410 1962 interval 2 $\frac{1}{2}$ 5)	Brit. St. 410 1969 R 40/3	ASTM E 11-61 1966 interval 2 $\frac{1}{2}$ 6)	ASTM E 11 1970 R 40/3	Tyler Standaard 1910 interval 2 $\frac{1}{2}$	N480 1952 interval 2 $\frac{1}{2}$	NEN 2560 1969 R 20/3 7)						
(mm)	(mm)	(mm)	mm	mm	mm	mesh of inch	mm	mesh	mm	nr. of inch	mm	nr. of inch	inch	mesh		mm	
1,00	1,00	1,00	1	1	1,00	16	1	16	1,00	16	1	16	0,039	16		1	
1,12	1,06 1,12 1,18	1,18		1,12	1,2	14	1,18	14	1,19	16	1,18	16	0,046	14			
1,25	1,25 1,32			1,25													
1,40	1,40	1,40	1,4	1,4	1,4	12	1,4	12	1,41	14	1,4	14	0,055	12		1,4	
1,60	1,50 1,60 1,70	1,70		1,6	1,59 1,68	1/16" 10	1,7	10	1,68	12	1,7	12	0,065	10			
1,90	1,80 1,90			1,8													
2,00	2,00	2,00	2	2	2,00	8	2	8	2,00	10	2	10	0,078	9		2	
2,24	2,12 2,24 2,36	2,36		2,24	2,40	7	2,36	7	2,38	8	2,36	8	0,093	8	NIET GENORMALISEERD	2,4	
2,50	2,50 2,65			2,5													
2,80	2,80	2,80	2,8	2,8	2,80	6	2,8	6	2,83	7	2,8	7	0,110	7			2,8
3,15	3,00 3,15 3,35	3,35		3,15	3,18 3,35	1/8" 5	3,35	5	3,36	6	3,35	6	0,131	6			
3,55	3,55 3,75			3,55													
4,00	4,00	4,00	4	4	4,00	4	4	4	4,00	5	4	5	0,156	5			
4,50	4,25 4,50 4,75	4,75		4,5	4,76	3/16"	4,75		4,76	4	4,75	4	0,185	4			
5,00	5,00 5,30			5													
5,60	5,60	5,60	5,6	5,6	5,66		5,6		5,66	3,5	5,6	3 $\frac{1}{2}$	0,221	3 $\frac{1}{2}$			
6,30	6,00 6,30 6,70	6,70	6,3	6,3	6,35	$\frac{1}{4}$ "	6,7		6,35 6,73	$\frac{1}{4}$ " 0,265"	6,3 6,7	$\frac{1}{4}$ " 0,265"	0,263	3			
7,10	7,10 7,50			7,1													
8,00	8,00	8,00	8	8			8		8,00	5/16"	8	5/16"	0,312	2 $\frac{1}{2}$			
9,00	8,50 9,00 9,50	9,50		9	9,53	3/8"	9,5		9,51	3/8"	9,5	3/8"	0,371				
10,00	10,00		10	10													

4) met enkele aanvullende waarden (6,3 en 10) uit R 40

6) toegevoegd 1/4" - 6,35

5) met weglating van 5,66, 6,73 en 8, toegevoegd 1/16" - 1,59, 1/8" - 3,18 en $\frac{1}{4}$ " - 6,35

7) toegevoegd 2,4; groter dan 2,8 niet genormaliseerd

TABEL 2

Soortelijke korrelgrootten d_s en U-getallen voor filterzand gelegen tussen
2 maten van draadzeven met onderlinge verhouding $2^{\frac{1}{4}}$ en $2^{\frac{1}{2}}$.

Zeefopening mm	d_s mm	U
0,105-0,125	0,114	87,7
0,105-0,150	0,126	79,4
0,125-0,150	0,137	73,0
0,125-0,175	0,147	68,5
0,150-0,175	0,162	61,7
0,150-0,210	0,176	56,8
0,175-0,210	0,191	52,4
0,175-0,250	0,208	48,1
0,210-0,250	0,229	43,7
0,210-0,300	0,249	40,2
0,250-0,300	0,273	36,6
0,250-0,350	0,294	34,0
0,300-0,350	0,323	31,0
0,300-0,420	0,352	28,4
0,350-0,420	0,382	26,2
0,350-0,500	0,415	24,1
0,420-0,500	0,457	21,9
0,420-0,600	0,498	20,1
0,500-0,600	0,547	18,3
0,500-0,710	0,592	16,9
0,600-0,710	0,651	15,4
0,600-0,850	0,709	14,1
0,710-0,850	0,775	12,9
0,710-1,0	0,826	12,1
0,850-1,0	0,920	10,9
0,850-1,2	1,00	10,0

Zeefopening mm	d_s mm	U
1,0-1,2	1,09	9,2
1,0-1,4	1,17	8,5
1,2-1,4	1,29	7,8
1,2-1,7	1,42	7,05
1,4-1,7	1,54	6,5
1,4-2,0	1,66	6,0
1,7-2,0	1,84	5,45
1,7-2,4	2,00	5,0
2,0-2,4	2,19	4,6
2,0-2,8	2,35	4,3
2,4-2,8	2,59	3,9
2,4-3,4	2,84	3,5
2,8-3,4	3,08	3,25
2,8-4,0	3,32	3,0
3,4-4,0	3,68	2,7
3,4-4,8	4,01	2,5
4,0-4,8	4,37	2,3
4,0-5,6	4,70	2,1
4,8-5,6	5,17	1,95
4,8-6,8	5,67	1,8
5,6-6,8	6,16	1,65
5,6-8,0	6,64	1,5
6,8-8,0	7,36	1,35
6,8-9,6	8,04	1,25
8,0-9,6	8,74	1,15
8,0-11,2	9,39	1,05

TABEL 3

Berekening van de effectieve korreldiameter voor een filterzand overeenkomstig figuur 3.

Zeeffmaten in mm $d_p \quad d_q$		geometr. gemidd. $d = \sqrt{d_p \cdot d_q}$	$d^2 = d_p \cdot d_q$	cumulat. gewichts- verdeling %	gewichts- fracties p_w	$\frac{p_w}{d}$	$\frac{p_w}{d^2}$
0,60	0,71	0,652	0,426	0,3	0,003	0,005	0,007
0,71	0,84	0,772	0,596	2,3	0,020	0,026	0,034
0,84	1,00	0,917	0,840	20,6	0,183	0,200	0,218
1,00	1,19	1,091	1,190	62,0	0,414	0,379	0,348
1,19	1,41	1,294	1,678	90,5	0,285	0,220	0,170
1,41	1,68	1,539	2,369	98,2	0,077	0,050	0,032
1,68	2,00	1,833	3,360	99,4	0,012	0,007	0,004
2,00	2,38	2,182	4,760	100	0,006	0,003	0,001
					1,000	$\Sigma = 0,890$	$\Sigma = 0,814$
Effectieve korreldiameter berekend uit de zeeffracties van een zandmonster volgens vergelijkingen 37 en 38. $\frac{1}{d_{eh}} = \Sigma \frac{p_w}{d} = 0,890 \quad d_{eh} = 1,124 \text{ mm} \sim 1,12 \text{ mm}$ $\frac{1}{d_{es}} = \left(\Sigma \frac{p_w}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} = (0,814)^{\frac{1}{2}} = 0,902 \quad d_{es} = 1,109 \text{ mm} \sim 1,11 \text{ mm}$							
Effectieve korreldiameter berekend uit de effectieve diameter d_{10} volgens de zeeffmaat en de gelijkvormigheidscoëfficiënt van de zeeffkromme volgens vergelijkingen 44 en 45. $d_{10} = 0,93 \quad C_u = 1,27$ $d_{eh} = d_{10} C_u^{0,835-0,487 \log C_u} \quad d_{eh} = 1,122 \text{ mm} \sim 1,12 \text{ mm}$ $d_{es} = d_{10} C_u^{0,835-0,975 \log C_u} \quad d_{es} = 1,108 \text{ mm} \sim 1,11 \text{ mm}$							

TABEL 4

Waarden voor $f(C_u)_h$ en $f(C_u)_s$ als functie van de uniformiteitscoëfficiënt
volgens de vergelijkingen 46 en 47.

C_u	$f(C_u)_h$	$f(C_u)_s$
1,00	1,000	1,000
1,05	1,041	1,041
1,10	1,081	1,079
1,15	1,119	1,115
1,20	1,156	1,148
1,25	1,192	1,180
1,30	1,227	1,209
1,35	1,261	1,237
1,40	1,294	1,262
1,45	1,324	1,287
1,50	1,355	1,309

C_u	$f(C_u)_h$	$f(C_u)_s$
1,50	1,355	1,309
1,55	1,385	1,329
1,60	1,413	1,348
1,65	1,441	1,367
1,70	1,468	1,383
1,75	1,493	1,397
1,80	1,518	1,411
1,85	1,543	1,424
1,90	1,567	1,436
1,95	1,591	1,446
2,00	1,611	1,455

$$f(C_u)_h = C_u^{0,835-0,487 \log C_u}$$

$$f(C_u)_s = C_u^{0,835-0,975 \log C_u}$$

TABEL 5

Aanbevelingen voor algemene eisen en de specificatie van de korrelgrootteverdeling voor de levering van filterzand.

1. Materiaaleisen

a. Zandtype en korrelvorm

Voor normale omstandigheden het gebruikelijke enigszins hoekige rivierzand. Voor speciale gevallen o.a. kwartszand, bergzand of duinzand. Eventueel een meer afgeronde korrel of een zeer hoekig of scherp zand of zelfs een puntig gebroken zand. Het zand mag ten hoogste 2% langwerpig en plat materiaal bevatten.

b. Kwaliteit

Hard, duurzaam en slijtvast materiaal.

c. Bewerking

Gewassen, gegloeid en gezeefd materiaal.

d. Zuiverheid

Vrij van verontreinigingen. Het gloeiverlies mag na 1 uur bij 750°C ten hoogste 0,5% bedragen.

e. Dichtheid (gewicht)

Massadichtheid van het materiaal $> 2500 \text{ kg/m}^3$. Ten hoogste 1% van het materiaal mag een dichtheid $< 2250 \text{ kg/m}^3$ hebben.

f. Chemische bestendigheid

Het gewichtsverlies na 24 uur in 20% HCl mag ten hoogste 2% bedragen.

2. Korrelgroottespecificatie

Passerende min. en max. gewichtsfracties in %		Toegepaste zeven		
minimaal	maximaal	zeefopening in mm	norm voor de zeef	type plaatzeef of draadzeef
...	...	...	} ASTM E11 1970	...
...	...	...		...
1) 65	85	1,00		draadzeef
...	...	...		...

1) voorbeeld, zie ook punt 5.4 onder b, aantal in te vullen regels afhankelijk van aantal zeefmaten.

De specificatie volgens de tabel eventueel aan te vullen met:

- verwijzing naar een bij te voegen diagram met begrenzingskromme;
- speciale (aanvullende) specificatie zoals $C_u (=d_{60}/d_{10}) < \dots$

3. Overige aanbevelingen

a. Monsters

Bij de offerte een monster van 2 kg aan te vragen. Tijdens de productie een monster per productiedag of voor elke afzonderlijk gezeefde of afgeleverde partij te onderzoeken.

b. Vervoersvoorschriften

Omschrijving van de vereiste verpakking, de verpakkingseenheden en eventuele hygiënische voorschriften.

c. Aflevering

Opgave van de vereiste leveringstermijn en voor grotere hoeveelheden eventueel een afleveringsschema over een bepaalde periode vast te stellen.

FIG. 1 KORRELGROOTTE-ANALYSE MET CUMULATIEVE GEWICHTSPERCENTAGES VOLGENS LINEAIRE EN WAARSCHIJNLIJKHEIDSSCHAAL

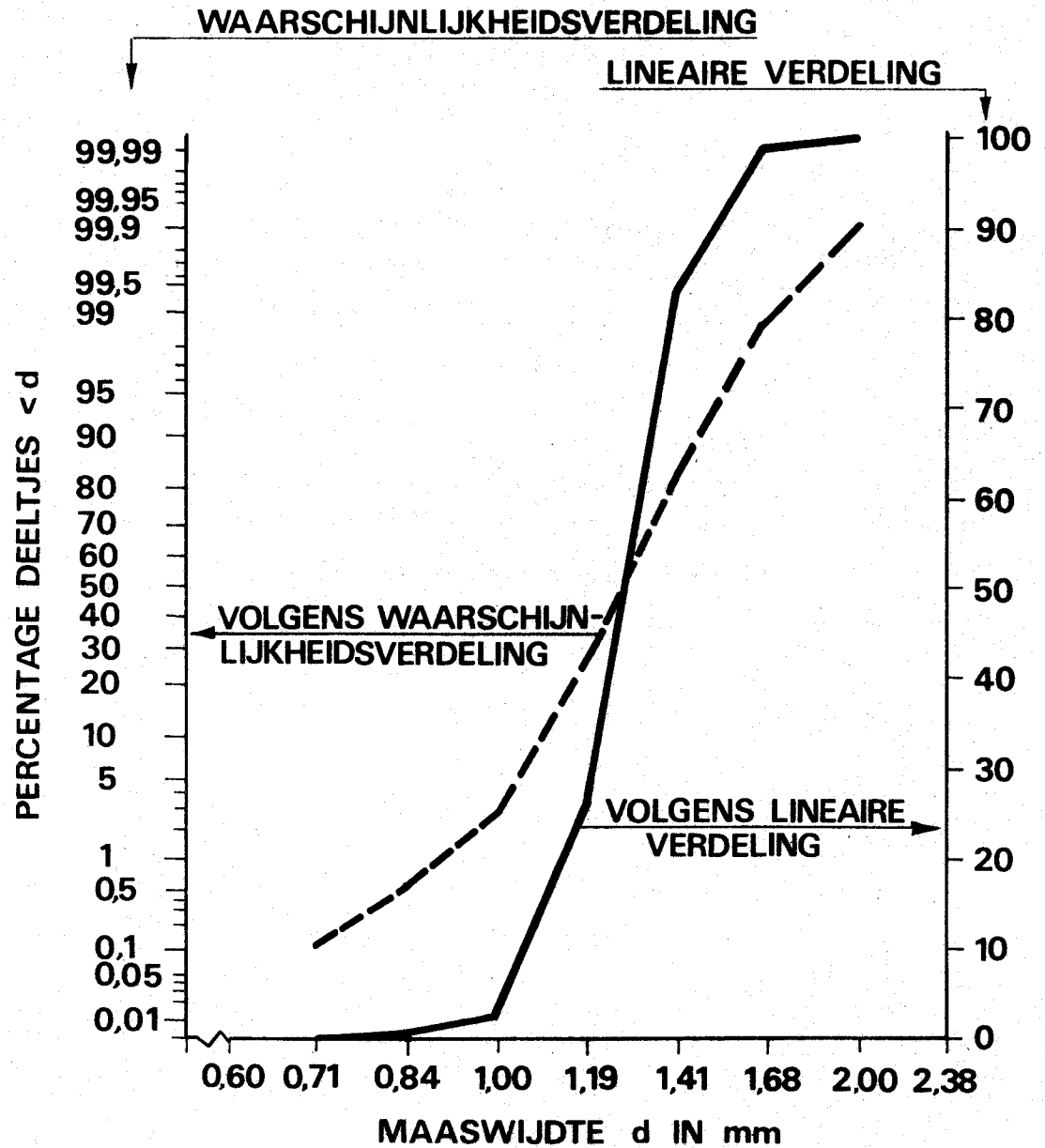


FIG. 2 KORRELVERDELINGSDIAGRAMMEN VOOR EEN NATUURLIJK ZAND (GEOMETRISCH NORMALE FREQUENTIE-VERDELING)

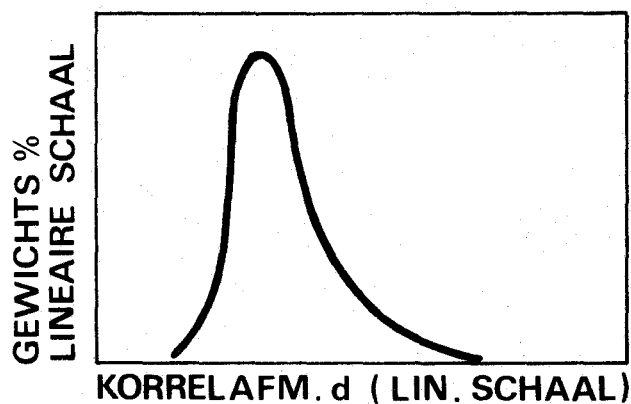


FIG. 2a

ASYMMETRISCHE FREQUENTIE-VERDELING OP LINEAIRE SCHAAL VOOR d

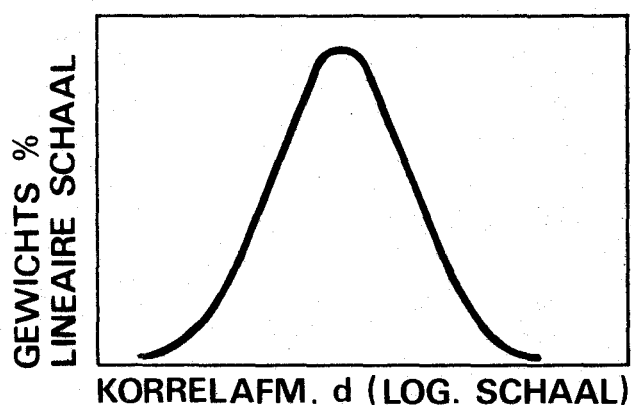


FIG. 2b

SYMMETRISCHE FREQUENTIE-VERDELING OP LOGARITHMISCHE SCHAAL VOOR d

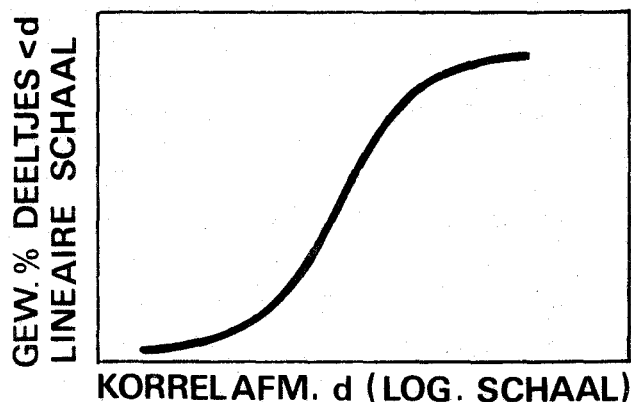


FIG. 2c

CUMULATIEVE FREQUENTIE-VERDELING OP LINEAIRE % SCHAAL EN LOGARITHMISCHE SCHAAL VOOR d

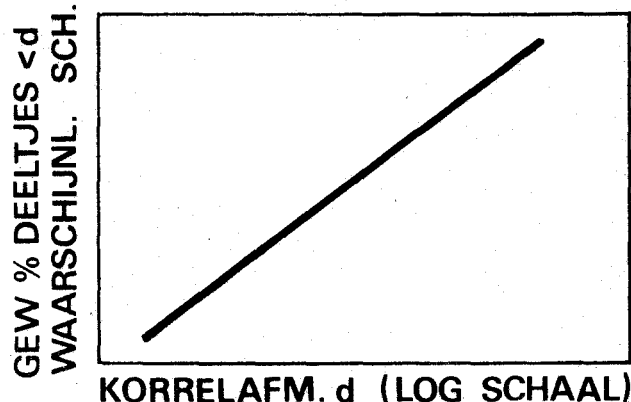


FIG. 2d

CUMULATIEVE FREQUENTIE-VERDELING OP WAARSCHIJNL. % SCHAAL EN LOGARITHMISCHE SCHAAL VOOR d

FIG.3 KORRELGROOTTEVERDELING VOOR EEN FILTERZAND
VAN NORMALE SAMENSTELLING

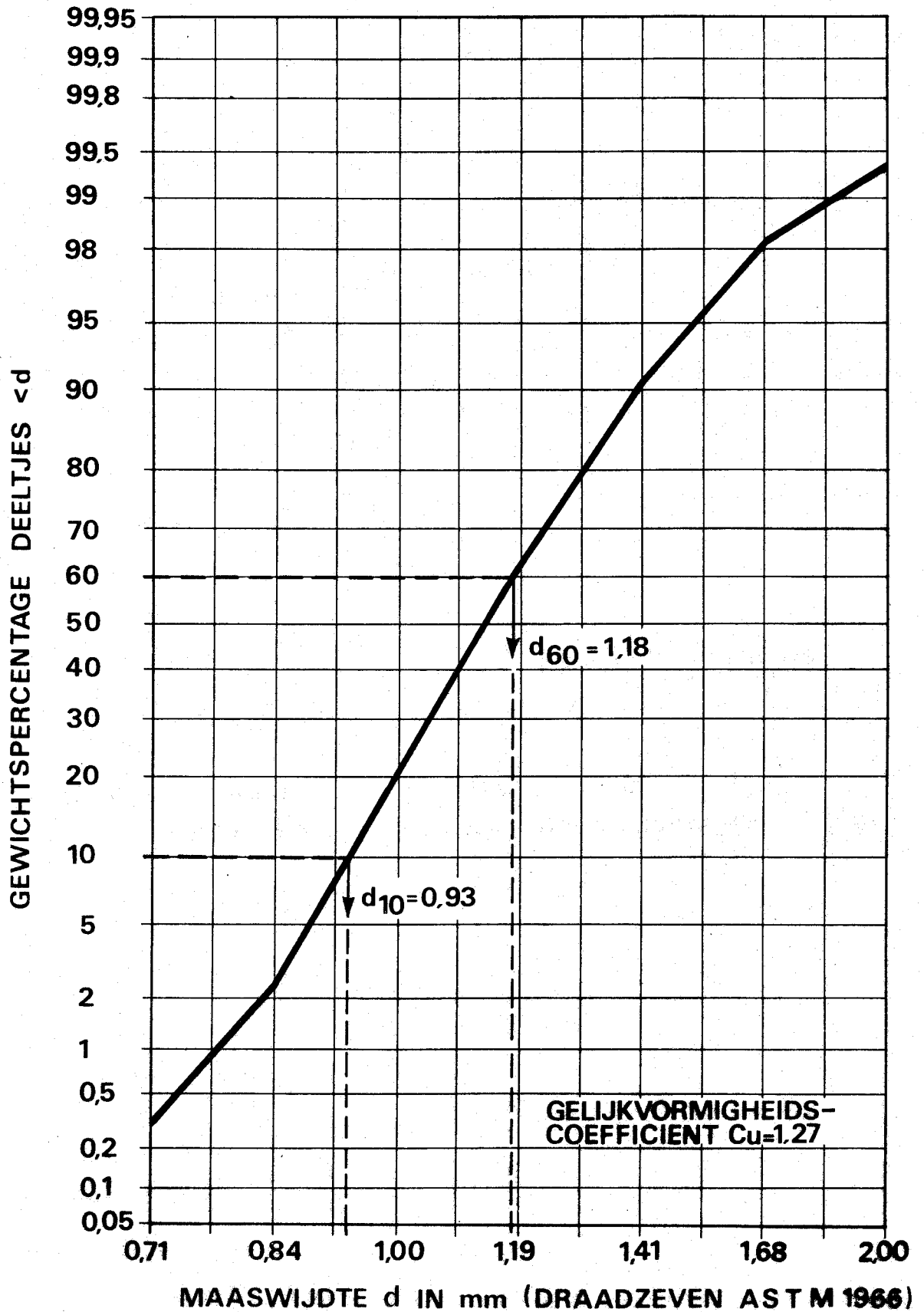


FIG.4 ZEEFKROMME VOOR EEN TE BESTELLEN ZAND

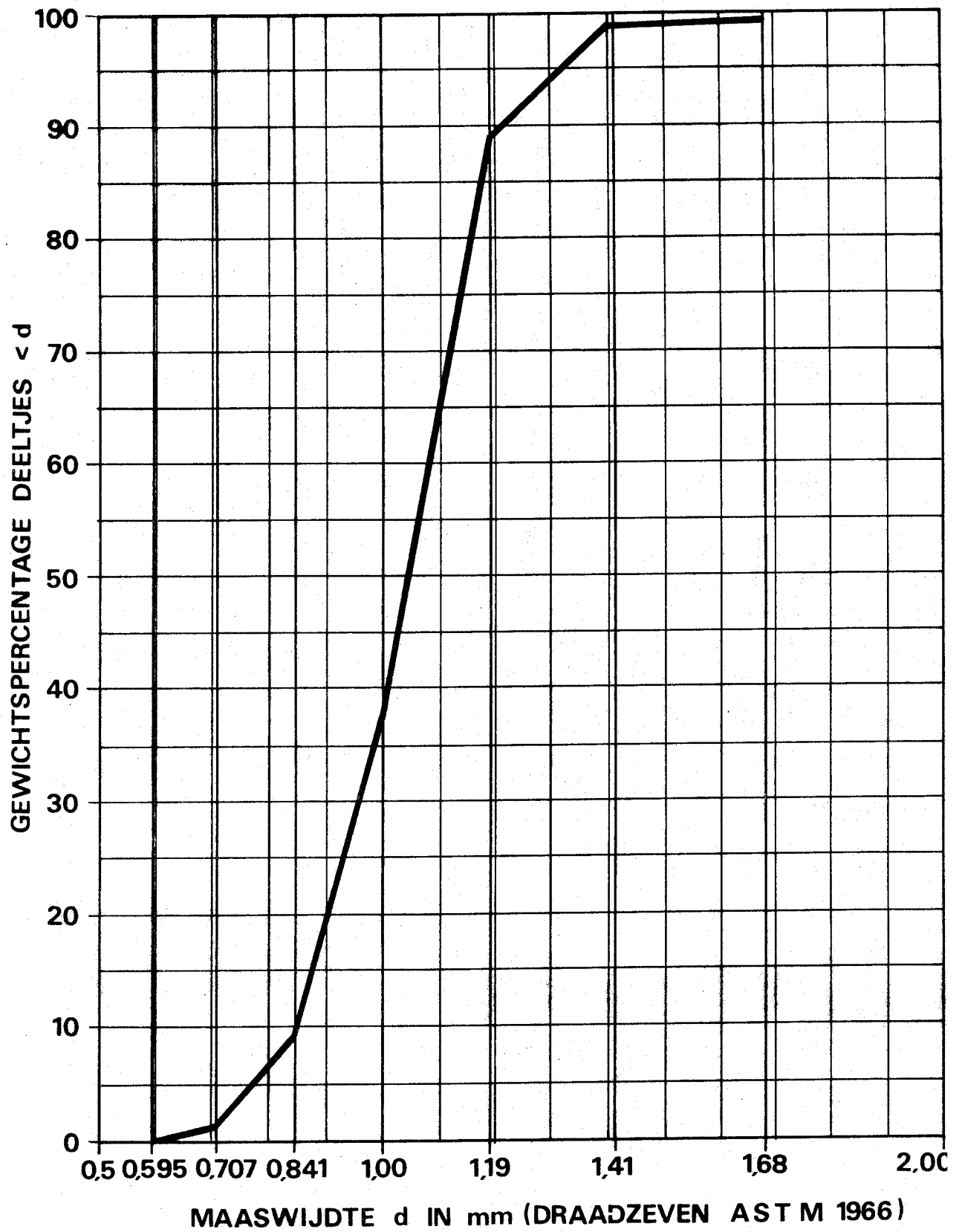


FIG. 5

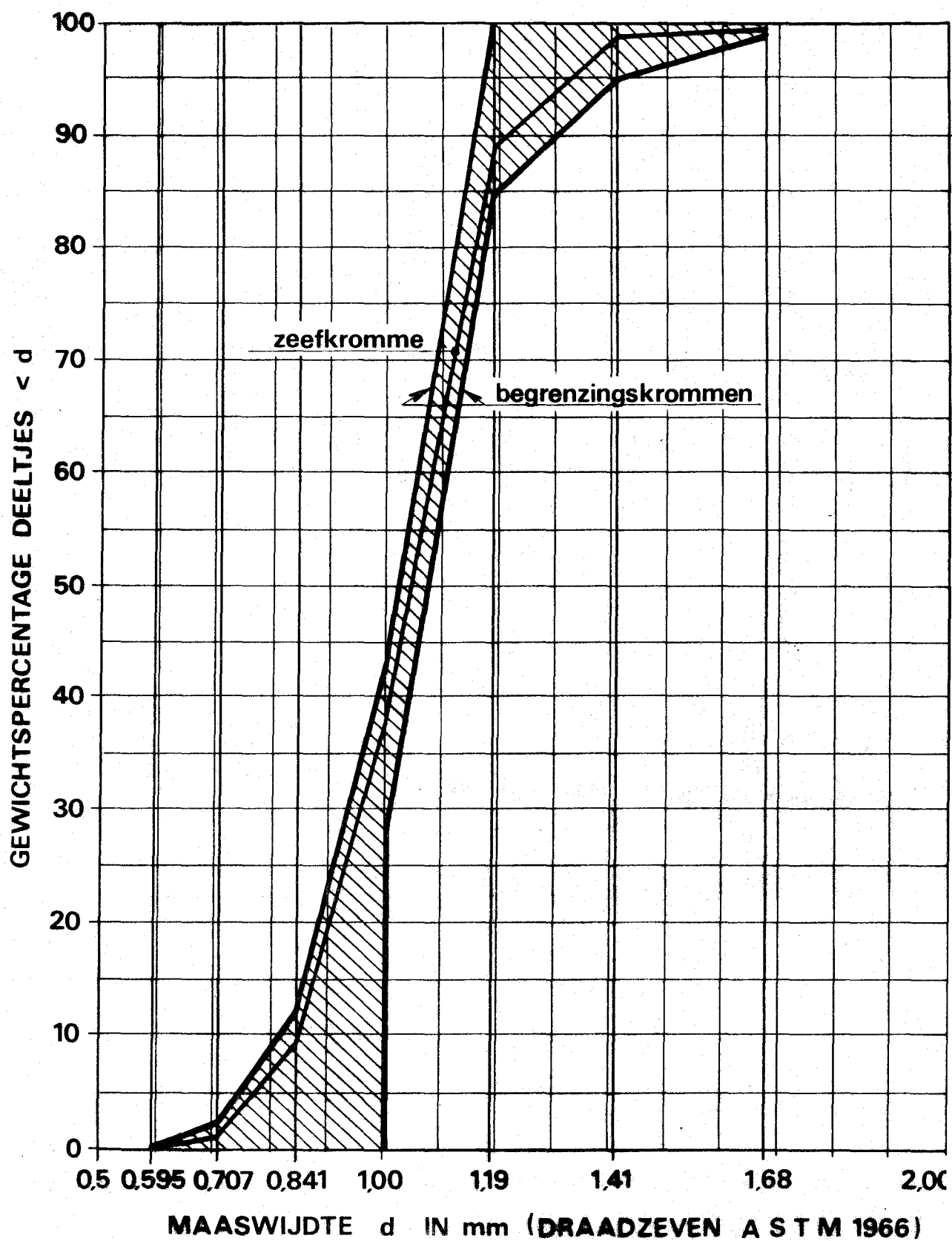
BEGRENZINGSKROMMEN VOOR EEN
TE BESTELLEN ZAND

FIG. 6 BEGRENZING VAN DE ZEEFKROMME VAN EEN TE
BESTELLEN ZAND DOOR ENKELE MARKANTE PUNTEN

