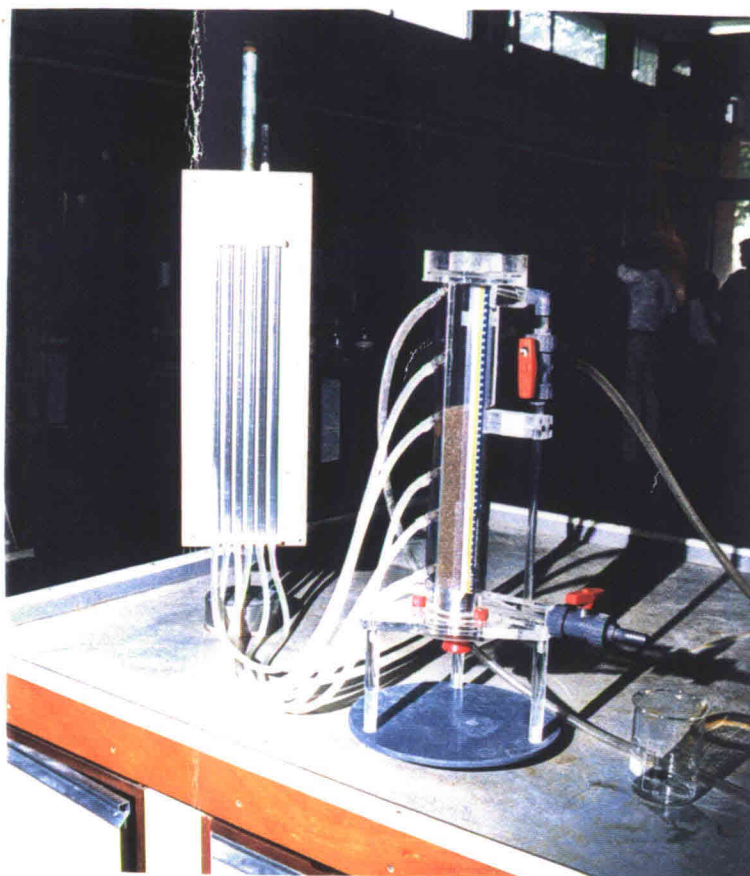


Relatie korreldiameter en K-waarde voor sterk gegradeerde mengsels

Juli 1998

S.E.M. Slager



Relatie korreldiameter en K-waarde voor sterk gegradeerde mengsels

belangrijke opmerkingen
 → pag. 10 C-waarde bepaling
 pag 17+52 definitie U
 pag 20 bepaling S in literatuur
 pag 25/26 weergave tabel
 + grafiek
 → pag 30 we wesen
 monitor
 + effect stapelen / atmen
 pag 35+70 Variatie in rook
 pag 40 word vorm analyse
 met gedaan
 → pag 41/42/43 ho probleem
 +46. Curren is te verspreiden!
 pag 47 Conclusie

Begeleiders :

Prof. dr. ir. A. Verruijt
 Prof. ir. K. d'Angremond
 Ir. G.L.M. v.d. Schrieck

Delft, juli 1998

S.E.M. Slager

Inhoudsopgave

Voorwoord		3
Samenvatting		4
Inleiding		5
Hoofdstuk 1	Theorie en empirie : een overzicht	6
1.1	Wet van Darcy	6
1.1.1	Experiment van Darcy	6
1.1.2	Begrip doorlatendheid	7
1.1.3	Gebruiksgebied	7
1.2	Theorie doorlatendheid	8
1.2.1	Theoretische modellen	8
1.2.1.1	Capillair model	8
1.2.1.2	Kozeny-Carman	9
1.2.1.2.1	Kozeny-Carman konstante	10
1.2.1.2.2	Kritiek theorie Kozeny	11
1.2.1.3	Elektrische geleiding	11
1.2.1.4	Andere modellen	12
1.2.2	Conclusie	13
1.3	Empirische correlaties	13
1.3.1	Empirische formules	13
1.3.2	Correlatie doorlatendheid en korrelgrootte	14
1.3.3	Correlatie doorlatendheid en porositeit	15
1.3.4	Correlatie porositeit en korrelgrootte	16
1.3.5	Conclusie	16
1.4	Vergelijking theorie en empirie	17
1.4.1	Vergelijking formules	17
1.4.2	Vergelijking metingen met theorie	18
1.5	Conclusie	20
Hoofdstuk 2	Bepaling specifiek oppervlak zandmonster	22
2.1	Inleiding	22
2.2	Specifiek oppervlak fractie i	22
2.2.1	Oppervlak fractie i	23
2.2.2	Volume fractie i	23
2.3	Specifiek oppervlak zandmonster	24
2.4	Voorbeeld berekening specifiek oppervlak	25
2.5	Invloed korreldiameter op specifiek oppervlak	26

Hoofdstuk 3	Onderzoek	28
	3.1 Doel	28
	3.2 Proefopstelling	28
	3.2.1 Doel	28
	3.2.2 Beschrijving proefopstelling	28
	3.3 Samenstellen zandmonsters	28
	3.4 Klaarmaken proefopstelling	31
	3.5 Uitvoering proef	32
	3.6 Aandachtspunten	33
Hoofdstuk 4	Resultaten	35
	4.1 Resultaten per proef	35
	4.2 Samenvatting belangrijkste gegevens en resultaten	39
Hoofdstuk 5	Uitwerking resultaten	40
	5.1 Bepaling konstante k_0	40
	5.2 Relatie K en $F(n,S)$	41
	5.3 Herschrijven formules	41
	5.4 Vergelijking formules met proefresultaten	44
	5.4.1 Variatiecoëfficiënt formules	45
	5.4.2 Chi-kwadraattoets	45
	5.5 Conclusie	46
Hoofdstuk 6	Conclusies	47
	6.1 Conclusies	47
	6.2 Praktische waarde	47
Symbolenlijst		48
Literatuurlijst		49
Bijlage I	Bepaling granulaire samenstelling	51
Bijlage II	Resultaten doorlatendheidsproeven	53
Bijlage III	Variatiecoëfficiënten en Chi-kwadraattoets	66
Bijlage IV	Bepaling k_0 fracties	70

Voorwoord

Voor U ligt het verslag van het afstudeerwerk getiteld 'Relatie korreldiameter en K-waarde voor sterk gegradeerde mengsels'. Dit afstudeerwerk is verricht ter afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de T.U. Delft.

Het verslag bevat een literatuurstudie over de doorlatendheid van zand, een methode voor de bepaling van het specifiek oppervlak van zandmonsters, en een onderzoek naar de juistheid hiervan, aangevuld met talloze doorlatendheidsproeven. Deze proeven zijn uitgevoerd bij de sectie Geotechniek van Civiele Techniek. In dit verband wil ik alle werknemers van de sectie Geotechniek bedanken voor de altijd aanwezige vrolijke stemming, en de bereidwilligheid altijd hulp te verlenen bij problemen.

Mijn grootste dank gaat uit naar mijn begeleiders, voor de tijd en moeite die ze genomen hebben om dit afstudeerwerk te begeleiden, met name prof. dr. ir. A. Verruijt. Dankzij hen is dit voor mij een zeer leerzame ervaring geworden.

Samenvatting

De doorlatendheid van zand kunnen bepalen met één gegeven, de bepalende korreldiameter, is wegens het gemak in gebruik lange tijd een streven geweest, en is het nog steeds. De relatie tussen korreldiameter (d) en doorlatendheid (K-waarde) is door velen aangetoond, maar twijfel is er of deze relatie ook aanwezig is voor sterk gegradeerde zandmengsels.

Uit een literatuurstudie volgt de kwadratische invloed van de korreldiameter op de K-waarde. Ook valt de dominantie van de formule van Kozeny-Carman over andere, vooral empirisch vastgestelde formules, op.

De formule van Kozeny-Carman bevat een parameter S , het specifiek oppervlak. Deze parameter is gedefinieerd als de verhouding tussen het oppervlak en het volume van het zandmonster, gelijk aan een d^{-1} . Volgens Kozeny-Carman is de invloed van deze parameter S op de K-waarde omgekeerd kwadratisch, wat neerkomt op een kwadratische invloed van de korreldiameter. Door het specifiek oppervlak van het gehele monster te bepalen, wordt de invloed van elke korrel in het monster in rekening gebracht. Verschillende doorlatendheidsproeven zijn uitgevoerd met sterk gegradeerde mengsels, en de resultaten vergeleken met de voorspelling van Kozeny-Carman. Er kan geconcludeerd worden dat voor sterk gegradeerde mengsels de relatie tussen korreldiameter en K-waarde aanwezig is, en kwadratisch van aard. De enige manier om de invloed van verschillende korreldiameters in een monster weer te geven is :

"beste"

$$S = 6 \cdot \sum_{i=1}^p \frac{\Delta F_i}{d_i}$$

waarin het monster bestaat uit p fracties met ieder een gewichtspercentage van ΔF_i en korreldiameter d_i .

"K-waarde evenredig met $\frac{1}{S^2}$ " "licht beter"

Inleiding

" opbrengen van ^{water} onderdrukten spanningen "

Voor veel baggerprocessen is de doorlatendheid van zand één van de belangrijkste factoren die baggerbaarheid, produktie, en prijs bepalen. Het belang van de waterdoorlatendheid is het grootst bij zand. Met betrekking tot het zuig- en snijproces hiervan heeft de waterdoorlatendheid grote invloed op:

- De snelheid van afstromen van zand van taluds
- De evenwichtshelling van eroderende taluds
- Het bereiken van cavitatie tijdens het snijden van grond
- De erosie bestendigheid tegen waterstralen
- De mogelijkheden tot fluidisering van grond.

De doorlatendheid wordt weergegeven door een K-waarde, de *doorlatendheidscoëfficiënt*.

Vaak wordt op grond van een zeefkromme, die ter plaatse is gemaakt, de doorlatendheid bepaald. Er zijn hiervoor verschillende theoretische en empirische formules beschikbaar, die allen een verschillende herkomst hebben. Als overeenkomst delen ze de relatie tussen korreldiameter en K-waarde. Wanneer er sprake is van een sterk gegradeerd mengsel is er twijfel over de geldigheid van deze relatie.

Doelstelling : het onderzoeken van de geldigheid van de relatie tussen korreldiameter en K-waarde voor sterk gegradeerde mengsels

van dit onderzoek

In dit verslag wordt gekeken naar zandmengsels bestaande uit korrelgroottes tussen de 0,1 en 1,0 mm. In hoofdstuk 1 komt een literatuurstudie aan de orde, waarin een overzicht van de theoretische en empirische formules voor de doorlatendheid van zand worden beschreven. Hier blijkt dat de formule van Kozeny-Carman de beste resultaten levert, alleen is de bepaling van het specifiek oppervlak (invloed van de korreldiameter) een probleem voor niet-uniforme zandmonsters. In hoofdstuk 2 wordt een methode afgeleid om dit specifiek oppervlak te bepalen met de gegevens uit een zeefkromme. De opzet van de doorlatendheidsproeven wordt behandeld in hoofdstuk 3, gevolgd door de resultaten in hoofdstuk 4. De uitwerking van de gevonden resultaten zijn weergegeven in hoofdstuk 5, en de conclusies naar aanleiding van het onderzoek in hoofdstuk 6.

Hoofdstuk 1 Theorie en empirie : een overzicht

1.1 Wet van Darcy

1.1.1 Experiment van Darcy

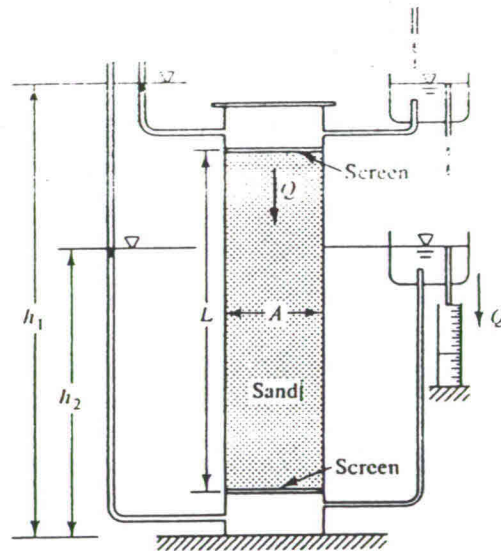
Darcy heeft in 1856 de verticale stroming van water in homogeen zand onderzocht in verband met de watervoorziening van de stad Dijon, in Frankrijk. Figuur 1.1 toont de proefopstelling die hij gebruikte om het debiet Q dat door het zandmonster stroomt te meten, welke ontstaat door een verschil in stijghoogte tussen de beide uiteinden. Uit zijn experimenten concludeert Darcy dat de hoeveelheid doorstroomd water in t seconden, Q , *? "per seconde"*

"debiet"

- a) evenredig is aan de dwarsdoorsnede A van het monster
- b) evenredig is aan het stijghoogte verschil ($h_1 - h_2$)
- c) omgekeerd evenredig is met de lengte L van het monster

Deze conclusies leiden tot het empirische macroscopische verband, dat de wet van Darcy wordt genoemd:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{(h_1 - h_2)}{L}$$



Figuur 1.1

Er zijn verschillende onderverdelingen in zand. In onderstaande tabel is de onderverdeling van de grondsoorten verkort weergegeven, gebaseerd op de PIANC-uitgave 'Classification of soils and rocks to be dredged' (1984).



Gronsoort		Korrelgrootte
Blokken		> 200 mm
Keien		200 - 60 mm
Grind	grof	60 - 20 mm
	middel	20 - 6 mm
	fijn	6 - 2 mm
Zand	grof	2 - 0,6 mm
	middel	0,6 - 0,2 mm
	fijn	0,2 - 0,06 mm
Silt	grof	0,06 - 0,02 mm
	middel	0,02 - 0,006 mm
	fijn	0,006 - 0,002 mm
Klei		< 0,002 mm

$q = k \cdot i$
 ? hoe hoger de weerstanden hoe lager de k ?
 → evenredigheidsconstante.

1.1.2 Begrip doorlatendheid

De factor K (eenheid m/s) is een evenredigheidsfactor die de 'doorlatendheidscoëfficiënt' wordt genoemd. De waarde is een sommatie van alle verliezen door weerstand die het water ondervindt tijdens de stroming door de poriën. De factor K is hiermee afhankelijk van de eigenschappen van het medium en de vloeistofeigenschappen. Als vloeistofeigenschappen worden genoemd het volume gewicht γ_w en de dynamische viscositeit η (kg/ms). Als eigenschap van het medium wordt genoemd de porositeit n ($= V_p / V_G$). Deze eigenschappen worden tot uitdrukking gebracht in de formule

$$K = k \frac{(\gamma_w \cdot n)}{\eta}$$

→ waarom staat γ_w in de teller?

waarin k (de intrinsieke doorlatendheid met eenheid m^2) de kenmerken van de geometrie van het korrelskelet weergeeft, onafhankelijk van de vloeistof.

Het zou mogelijk zijn om de stroming door het zandmonster met de wetten van de vloeistofmechanica te beschrijven als de geometrie van het korrelskelet en dus de poriën te bepalen is. Dit is echter niet mogelijk doordat deze eigenschappen nooit op exacte wijze kunnen worden vastgesteld. Om deze reden kan de microscopische benadering niet voltooid worden.

vorm van.

1.1.3 Gebruiksgebied

De hoeveelheid water Q die per tijdseenheid door een bepaalde doorsnede stroomt ten gevolge van het potentiaalverschil, gedeeld door het oppervlak A_G van die doorsnede, wordt het specifiek debiet q genoemd (eenheid m/s). Het specifiek debiet wordt ook wel de filtersnelheid genoemd. A is het oppervlak van de volledige doorstroomde doorsnede.

? de 'aard'

Uit visuele observaties van kleurstoffen in water leidde Reynolds af dat de geregelde van de stroming afhankelijk is van de snelheid (1883). Bij lage snelheden is de stroming in lagen, laminair. Bij toenemende snelheid vindt menging van de kleurstof met het water plaats, en is het stromingspatroon onregelmatig, turbulent.

Binnen de grenzen van de laminaire stroming vindt Reynolds een lineair verband tussen de hydraulische gradiënt en de stroomsnelheid, in overeenstemming met de wet van Darcy. Veelvuldig onderzoek heeft aangetoond dat de wet van Darcy voor lage snelheden (in het laminaire gebied) een representatief beeld geeft van de stroming door een poreus medium. Het Reynolds getal

$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\eta}$ moet dan tussen 1 en 10 zitten, waaraan bijna altijd wordt voldaan.

→ waarom zo heel laag? Volgt uit metingen!
 bij kruislandige is de grens $Re = 2300$?
 accord!

1.2 Theorie doorlatendheid

Velen hebben geprobeerd correlaties af te leiden tussen verschillende eigenschappen van het poreuze medium. De theoretische modellen zijn gebaseerd op een analyse van de stroming op microscopische schaal. De veronderstelling is dat de stroming zal plaats vinden door 'stroomkanalen', de verbonden poriënruimtes. Een direct verband tussen de porositeit en de doorlatendheid is dan voor de hand liggend.

Het water in het monster stroomt alleen door de poriën, waarvan de gezamenlijke oppervlakte kleiner is dan A_G . De werkelijke snelheid (v) van het water is dan groter dan q , te weten q/n , waarin n de porositeit is. Hier moet men realiseren dat v een gemiddelde snelheid is daar de snelheid afhankelijk is van de poriën, en deze variëren in alle richtingen.

1.2.1 Theoretische modellen

1.2.1.1 Capillair model

Het capillair model bestaat uit een poreus medium met rechte capillaire stroomkanalen, die parallel lopen. De kanalen hebben een straal r . Zie onderstaand figuur 1.2 voor het model.

Volgens de formule van Hagen-Poiseuille is het debiet Q door één stroomkanaal

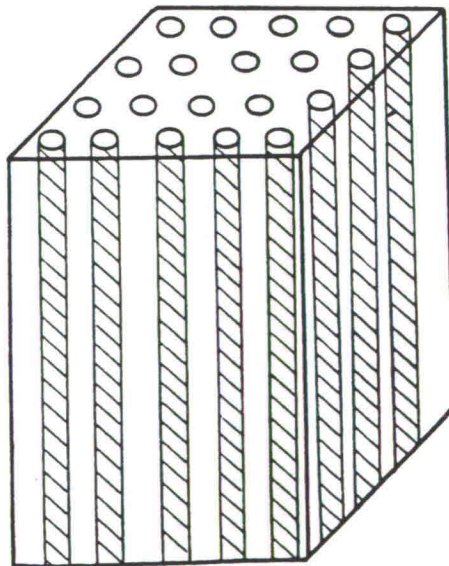
$$Q = \frac{\rho_w \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot \pi \cdot r^4 \cdot \frac{dh}{dz},$$

waarin η de viscositeit is en dh/dz het stijghoogteverschil over het kanaal. Indien er m stroomkanalen per oppervlakte eenheid zijn, is de filtersnelheid $q = \frac{\rho_w \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot m \cdot \pi \cdot r^4 \cdot \frac{dh}{dz}$. Omdat hier ook de wet

van Darcy geldt, kan de filtersnelheid ook geschreven worden als $q = K \cdot \frac{dh}{dz}$. Hieruit volgt dat

$K = \frac{\rho_w \cdot g}{8} \cdot m \cdot \pi \cdot r^4$. De porositeit $n = m \cdot \pi \cdot r^2$. De factor m geëlimineerd uit K levert

$$\left[K = \frac{\rho_w \cdot g \cdot n \cdot r^2}{8} \right]$$



Figuur 1.2

waar? remtakt i profiel? (X)

Met de diameter $D=2 \cdot r$ is de waarde D is een soort 'gemiddelde' porie-diameter. Uit proeven is gebleken dat deze formule de correlatie tussen de doorlatendheid en de porositeit van het medium niet goed weergeeft. Als belangrijkste redenen worden genoemd dat in de formule de korrelvorm (en dus de vorm van de poriën) niet meegenomen wordt en dat de 'stroomlengte' van het water langer is dan de lengte van het monster. Deze factoren worden wel meegenomen in het model van Kozeny-Carman.

1.2.1.2 Model van Kozeny-Carman

De meest bekende en geaccepteerde theoretische beschrijving van de correlatie tussen de doorlatendheid en de geometrische kenmerken van het poreuze medium, is de formule van Kozeny (1927), die later verder is uitgewerkt door Carman (1956).

De theorie begint met het buismodel, dat overgaat in het korrelmodel. Het begin van de afleiding is vrijwel gelijk aan het capillair model.

Buismodel

- Aannames :
- blokje met lengte L , met in langsricting rechte kanaaltjes met een ronde doorsnede (straal r)
 - oppervlakte bovenkant blokje is O
 - er zijn mO buisjes (m per eenheid van oppervlakte)

$O = m^2$
 $m = \text{tuisjes/m}^2$
 (met in sym bolle lijst!)

De porositeit
$$n = \frac{m \cdot O \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L}{V} = \pi \cdot m \cdot r^2$$

Het debiet per eenheid van oppervlakte, de debietsnelheid v , wordt voor dit model gegeven door de empirische formule van Hagen-Poiseuille. Voor de stroming van een onsamendrukbare vloeistof door een buis met een cirkelvormige doorsnede geldt :

$$v = \frac{\rho_w \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot \pi \cdot m \cdot r^4 \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Samen met de wet van Darcy $v_z = K \cdot \frac{dh}{dz}$ volgt hieruit dat $K = \frac{\rho_w \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot \pi \cdot m \cdot r^4$ (1.2)

Voor de overgang van buismodel naar korrelmodel wordt het begrip specifieke oppervlakte S geïntroduceerd, als

$$S = \frac{O_s}{V_s} = \frac{O_s}{V(1-n)} = \frac{m \cdot O \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L}{V \cdot (1-n)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot r}{(1-n)}$$

← Voor het gaad in de rechte buisjes levert dit :

Wanneer (1.1) wordt gesubstitueerd in (1.3) levert dit $S = \frac{2 \cdot n}{(1-n) \cdot r}$ waaruit volgt dat

$$r = \frac{2 \cdot n}{(1-n) \cdot S}$$
 (1.4)

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dr}$$

$$\frac{N}{m^2} = [\eta] \cdot \frac{m/s}{m}$$

$$[\eta] = \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m}{m/s} = \frac{N \cdot s}{m^2} \rightarrow [\eta] = \frac{\frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$[N] = \frac{kg \cdot m}{s^2}$$



Dit is niet direct logisch:

waarde 2 volgt uit beschouwing met rechte buisjes, waarom geldt dat dan nu eens van bolletjes??

Hoe is C gedefinieerd?

dan het is zij zag vro??



Door vergelijking (1.1) in de uitdrukking (1.2) te substitueren verkrijgt men voor $K = \frac{\rho_w \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot n \cdot r^2$

Tenslotte kan hierin de uitdrukking (1.4) worden ingevuld om tot de volgende uitdrukking voor K te komen :

$$K = \frac{\rho_w \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot n \cdot \frac{4 \cdot n^2}{(1-n)^2 \cdot S^2} = \frac{\rho_w \cdot g}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2 \cdot S^2}$$

Handwritten notes: $\frac{4 \cdot n^2}{m \cdot s} \cdot \frac{n^3}{1/n^2} = \frac{m}{s}$

Bij de overgang van het buis- naar het korrelmodel dient rekening gehouden te worden met de langere stromingsweg, waardoor $L_e > L$. Dit verschijnsel wordt uitgedrukt in de *hydraulische kronkeligheid* τ :

$$\tau = \frac{L_e}{L} \geq 1$$

Deze factor treedt zowel op in het drukverval ($\frac{\Delta h}{L_e}$ in plaats van $\frac{\Delta h}{L}$) als in de debietsnelheid ($v \cdot \tau$

in plaats van v), zodat er een kwadratische invloed ontstaat. Tenslotte wordt de factor 2 vervangen door de vormfactor C, waarbij C de waarde 2 heeft voor bolvormige gladde korrels. Al deze aanpassingen leiden tot de formule van *Kozeny-Carman* :

$$\left[K = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{C \cdot \tau^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2 \cdot S^2} \right] \quad (1.5)$$

Handwritten note: van 2 op K.

Uit deze formule blijkt duidelijk dat de hydraulische doorlatendheid van zowel vloeistof- als vaste-stof eigenschappen afhankelijk is. De invloed van het medium op de doorlatendheid wordt bepaald door een vormfactor, de porositeit, kronkeligheid en het specifiek oppervlak S. Deze grootte heeft de dimensie $[m^{-1}]$, waarmee duidelijk de afmetingen van de korrels worden aangeduid. Uit de formule van Kozeny-Carman volgt dan dat de doorlatendheid rechtevenredig is met het kwadraat van de korreldiameter. De moeilijkheid bestaat echter in het vaststellen van de te gebruiken korreldiameter.

Handwritten note: dit blijkt niet direct uit 1.3. toelichten van bolletjes? \rightarrow opp. = πd^2 ; \rightarrow wil = πd^3 ; $\rightarrow \frac{1}{d}$

1.2.1.2.1 De Kozeny-Carman konstante

Veel onderzoek is er gedaan naar de bepaling van de waarde voor de Kozeny-Carman konstante $k_0 = C \cdot \tau^2$. De manier waarop de konstante wordt bepaald is door het specifiek oppervlak van de korrels te bepalen, gevolgd door de porositeit van het monster. Men doet daarna een doorlatendheidsproef waaruit de konstante k_0 als enige onbekende overblijft. Volgens de proeven van Carman is de gemiddelde waarde van de vormfactor $C \approx 2,5$ en de gemiddelde waarde van de kronkeligheid $\tau \approx 2^{1/2}$ (1956), waardoor de waarde van k_0 gemiddeld gelijk aan 5. Na talloze proeven gedaan te hebben met verschillende soorten poreuze media kwam Carman voor de waarde van k_0 uit op 4,5 tot 5,5.

Uit de resultaten van het onderzoek van Coulson blijkt de waarde k_0 te variëren tussen 3 en 6. De proeven werden uitgevoerd met deeltjes die zeer verschillende vormen hadden.

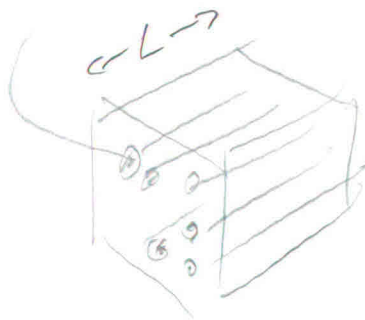
Sullivan en Hertel hebben het verband onderzocht tussen de orientatie van de cilindervormige deeltjes en de stromingsrichting. Een waarde van $k_0=3$ werd gevonden bij stroming evenwijdig aan de as van de deeltjes terwijl een stromingsrichting loodrecht daarop een waarde oplevert van $k_0=6$. Sullivan en Hertel concluderen dat de variatie in k_0 geheel is toe te schrijven aan de invloed van de kronkeligheid, daar bij alle proeven de vormfactor C gelijk is aan 3.

In onderstaande tabel is een aantal experimenteel gevonden waarden voor k_0 gegeven.

Handwritten note: die volgt toch uit de doorlatendheidsproef?

$$V = I \cdot R \rightarrow R = \frac{V}{I}$$
$$R = \frac{L}{GPP} + \Omega$$

n.O.



n	k ₀	τ ²	C	Onderzoeker
0,36	5,0	1,74	2,87	P. Carman
0,38	4,83	2,08	2,32	Wyllie en Gregory
0,39	4,5	1,70	2,65	Sullivan and Hertel
0,40	4,9	1,69	2,90	J. Coulson
0,43	4,5	1,66	2,72	A. Morcom

hoe bepaald? ←

k bedoelt dat de waarde van C τ² met constant is?

1.2.1.2.2 Kritiek theorie Kozeny-Carman

Bij het toetsen van de formule van Kozeny-Carman komen vele onderzoekers tot de conclusie dat de formule in poreuze media grote afwijkingen oplevert tussen verschillende proeven die onder dezelfde omstandigheden zijn uitgevoerd, waarbij sommige onderzoekers elkaars nauwkeurigheid van uitvoering van de proef betwijfelen. Ook blijkt de formule niet te voldoen voor zeer poreuze media. De meeste kritiek is weer terug te voeren tot de aanpassingen van de Kozeny theorie, te weten de factoren C en τ. De factor C is voor geometrisch bekende deeltjes vrij goed te bepalen, maar bij een samenstelling van onbekende gronddeeltjes met grillige structuur is dit niet eenvoudig.

Een groter vraagteken is bij velen de juistheid van de hydraulische kronkeligheid τ, wat overigens een fysisch niet eenduidige betekenis heeft. Het is zeer moeilijk te bepalen, en indien het te meten is (d.m.v. elektrische geleiding) is het nog de vraag of het juist is die meting te gebruiken voor de vloeistofstroming. Omdat de methode van elektrische geleiding nog steeds de meeste houvast biedt voor de bepaling van τ zal dit nu worden toegelicht.

1.2.1.3 Elektrische geleiding

Bij de geleiding van stroom in een homogeen, volledig met water verzadigd materiaal zal de stroomdoorgang voornamelijk bepaald worden door de eigenschappen van de poriënvloeistof. De vaste materie heeft alleen een invloed indien het geleidend is. Voor klei evenals slibhoudende zanden is dit een factor om rekening mee te houden, voor zuiver zand is deze factor te verwaarlozen. De geleiding van elektrische stroom wordt weergegeven door de soortelijke weerstand Ω met dimensie (Ohm·m). De verhouding tussen de soortelijke weerstand van de samenstelling van het medium Ω_s en de soortelijke weerstand van de poriënhoud Ω_w wordt weergegeven door de formatiefactor F :

$$F = \frac{\Omega_s}{\Omega_w} \quad (1.6)$$

De formatiefactor moet gezien worden als een afspiegeling van het doolhof van poriënkanaaltjes, wat afhangt van de vorm én de stapeling van de korrels. De formatiefactor F is kenmerkend voor de structuur van het medium.

Als men uitgaat van een isolerend rechthoekig blokje met afmetingen O·L dat in de lengterichting wordt doorsneden met rechte geleidende kanalen met gezamenlijke afmeting n·O·L, kan de elektrische weerstand van beiden gegeven worden door :

$$R_s = \frac{\Omega_s \cdot L}{O} \quad \text{en} \quad R_w = \frac{\Omega_w \cdot L}{n \cdot O}, \quad \text{waaruit volgt :}$$

$$R_s = R_w \quad \rightarrow \quad \Omega_s = \frac{\Omega_w}{n} \quad \Rightarrow \quad F = n^{-1} \quad (1.7)$$

In een natuurlijke grondsamenstelling zal de stroom zich niet via rechte kanaaltjes voortbewegen, maar kronkelend en vertakkend. De afgelegde weg zal dan langer zijn dan de lengte van het monster. We komen hier weer op het begrip kronkeligheid,

$$\tau = \frac{L_c}{L} \geq 1$$

De formatiefactor uit (1.7) veranderd dan in $F = \tau/n$ (1.8)

Het praktische probleem dat zich hier voordoet is dat door middel van deze vergelijking wel de kronkeligheid uit te rekenen is, maar andersom is de formule niet toe te passen. Dit is omdat er geen onafhankelijke methode bestaat om τ te bepalen.

Naar het verband tussen de formatiefactor F en de porositeit n is veel onderzoek gedaan. Archie kwam na een aardig aantal proeven tot de empirische relatie

$$F = n^{-m} \quad \text{waarbij } m > 1.0 \quad (1.9)$$

De algemene formule wordt gegeven met de eis dat $F = 1$ wanneer $n = 1$:

$$F = a \cdot n^{-m} \quad (1.10)$$

Voor een mooie stapeling van gelijke korrels is de porositeit te bepalen, en daarmee de formatiefactor. Pirson heeft dit gedaan voor ronde korrels en Acerboni voor meer variabele vormen. Voor een regelmatige rangschikking komt de waarde voor m uit op 1,3. Dit blijkt de minimumgrens te zijn. Naarmate het grondmonster bestaat uit een grotere variatie korrelgroottes en vorm, wordt bij dezelfde porositeit een grotere waarde voor de exponent gevonden.

De gevonden formules kunnen verder uitgewerkt worden. Vergelijking (1.8) kan ook als volgt worden geschreven :

$$\tau = n \cdot F \quad (1.11)$$

Substitutie van vergelijking (1.9) geeft dan :

$$\tau = n^{-m+1} \quad (1.12)$$

Door de hydraulische kronkeligheid gelijk te stellen aan de elektrische kronkeligheid kan deze onbekende beter onderzocht worden. Beide hebben ze betrekking op hetzelfde monster, en gezien beide stromingen zich afspelen in het poriënstelsel zal er zeker een hoge mate van overeenkomst bestaan. Wanneer vergelijking (1.11) wordt gesubstitueerd in de formule van Kozeny-Carman volgt :

$$K = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{C \cdot F^2} \cdot \frac{n}{(1-n)^2 \cdot S^2} \quad (1.13)$$

Deze samenhang is zowel door Wyllie als Gregory onderzocht voor samenstellingen van monsters met uiteenlopende korrelvormen. Zij concludeerden dat er een duidelijke correlatie is tussen de doorlatendheid en de formatiefactor. Deze methode is echter alleen toe te passen in een laboratorium en is praktisch niet interessant.

1.2.1.4 Andere modellen

Er zijn nog vele andere modellen opgesteld die een ander uitgangspunt hebben. Het vermelden waard zijn de statistische modellen.

Bij alle voorgaande modellen is er verondersteld dat het medium en de vloeistofstroming geometrisch geordend is. In de praktijk is een zandmonster in het algemeen echter niet geordend. Om de chaotische 'situatie' te beschrijven worden statistische rekenmethodes toegepast. Echter, door de vele ingewikkelde rekenmethodes wordt het inzicht in de bepaling van de relatie tussen de korreldiameter en de doorlatendheid niet groter. De modellen zullen dan ook niet behandeld worden.

1.2.2 Conclusie

Het model van Kozeny-Carman is de meest geaccepteerde theoretische beschrijving van de correlatie tussen de doorlatendheid en de geometrische kenmerken van het poreuze medium. Over de factor $k_0 = C \cdot \tau^2$ heerst nog onzekerheid. De waarde voor de korrelfactor C ligt tussen 2,5 en 3,0. De hydraulische kronkeligheid τ is vrij goed te bepalen met behulp van elektrische geleiding, maar dit is alleen weggelegd voor onderzoek in een laboratorium. De bepaling van het specifiek oppervlak S is eenvoudig voor uniforme mosters bestaande uit kogelvormige korrels, voor zandmonsters bestaande uit verschillende fracties wordt de kenmerkende of maatgevende korreldiameter gebruikt. Deze aanpak is onnauwkeurig.

dit neem je nu pas voor het eerst?!

1.3 Empirische correlaties

1.3.1 Empirische formules

De behoefte aan oriënterende getallenwaarden heeft tot een uitgebreid assortiment van empirische formules geleid. Ze worden in deze paragraaf besproken.

De bekende formule van Hazen (1892) vindt zijn oorsprong in de filtreertechniek :

$$K = 1000 \cdot (d_{10})^2 \quad \text{met } K \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{d}} \text{ en de } d_{10} \text{ in mm.}$$

? meters/dag.?

Als kenmerkende korrelgrootte wordt de d_{10} genomen. Als beperking voor de toepassing van de formule geldt de 'ongelijkheidsfactor' $d_{60} / d_{10} < 5$, en dat de formule geldig is bij een temperatuur van 10 °C. De vermenigvuldigingsfactor kan dan nog schommelen tussen 1300 en 520 (van Riel). Bij meer compacte monsters valt de vermenigvuldigingsfactor lager uit, te weten tussen 400 en 800. Als praktijkformule is het zeer bruikbaar voor een eerste schatting.

Slichter (1899) introduceerde de invloed van de porositeit n , voor hydrodynamische doeleinden:

$$K = \frac{771 \cdot d^2}{c} \quad \text{met } K \text{ in } \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

kenmerkende

De formule is gerelateerd aan bolvormige korrels met diameter d (in mm). Hij bepaalde de relatie tussen de parameter c en porositeit n , waarvan enkele waarden in onderstaande tabel zijn weergegeven.

n	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,46
c	84,3	65,9	52,5	34,7	24,1	17,3	12,8

Als kenmerkende korrelgrootte ^{*d*} geldt hier 'de doorsnede voor een stapeling van uniforme bolletjes die dezelfde hydraulische weerstand vertoont als de natuurlijke stapeling'. Als praktijk formule is dit niet bruikbaar.

Rose kwam tot de volgende empirische relatie voor bolvormige korrels :

$$K = \frac{g \cdot d^2}{1000 \cdot \eta} \cdot \frac{1}{f(n)}$$

waarin $f(n)$ een functie is die de relatieve weerstand weergeeft van porositeit Rose gebruikte hiervoor de porositeit n , terwijl Rapiet en Duffield dit resultaat verder uitwerkte tot het empirische resultaat :

$$f(n) = 1,115 \cdot (1 - n) \cdot \frac{[(1 - n)^2 + 0,018]}{n^{1,5}}$$

(in verband met de keuze)

De keuze voor de diameter d is vooral een kwestie van ervaring.

De afleiding van Terzaghi (1925) is klassiek. In zijn empirische formule komt de variabele n voor de porositeit direct voor :

$$K = \frac{C}{\eta_o} \cdot \frac{\eta_o}{\eta_t} \cdot \frac{(n - 0,13)^2}{(1 - n)^{2/3}} \cdot d^2 \quad , \text{ waarin}$$

- K de doorlatendheid in m/dag
- η_o de viscositeit van water bij 10 °C is,
- η_t de viscositeit van water bij temperatuur t °C is,
- C een materiaalafhankelijke constante
- d korreldiameter in mm

Uitgewerkt geeft dit voor de maatgevende korreldiameter d_{10} bij 20 °C : $K = 5450 \cdot \frac{(n - 0,13)^2}{(1 - n)^{2/3}} \cdot d_{10}^2$

Bij een porositeit van $n = 0,40$ levert dit $K = 560 \cdot d_{10}^2$

Bedinger (1961) kwam na onderzoek met alluviale zanden in Arkansas tot de betrekking $K = 100 \cdot d_{50}^2$. Deze relatie is ook door Jaky gevonden en blijkt een zeer goede eerste schatting te geven. Ook deze formule is zeer makkelijk toepasbaar.

1.3.2 Correlatie doorlatendheid en korrelgrootte

Stakman (1966) onderzocht de bijdrage van de korreldoorsnede en kwam tot de conclusie dat de exponent blijkt te variëren tussen 1,93 en 2,04. De afwijking van het kwadratische verband werd toegeschreven aan afwijkingen van de zuivere bolvorm en ongelijkmatige verdelingen van de zeefklassen.

Eerder is al de moeilijkheid vermeld om een verband tussen de doorlatendheid van zandmonsters en de korrelgrootte-analyse te vormen. Een groot aantal oplossingen is hiervoor gevonden.

Vele onderzoekers benaderen de korrelverdeling door een kromme van Gauss, waarbij ze gebruik maken van de gemiddelde waarde (de mediaan, d_{50}), standaardafwijking en een eventuele 'scheefheidsfactor'. Deze benadering leidt tot zeer ingewikkelde formules, die meestal worden verwerkt tot empirische nomogrammen (Masch, Denny 1966). Door de korrelverdeling als een statistische verdeling op te vatten kunnen afwijkingen vrij groot zijn. Dit blijkt in de praktijk ook zo te zijn (denk bijvoorbeeld aan een tweetoppige sortering).

Meer algemeen is het gebruik van een oplossing die een middenweg is tussen het voorschrift van Hazen en de definitie van Slichter. Het betreft de toepassing van de sommatiekromme voor het vinden van een karakteristieke doorsnede. Kozeny leidde de kenmerkende korreldoorsnede af uit de sommatiekromme voor $1/d$ (harmonische middeling), hetgeen een verwijzing is naar het specifieke oppervlakte S .

Tot dezelfde voorkeur kwam Schmidt (1971) na voor ongeveer 40 monsters de samenhang tussen de doorlatendheid, porositeit en korrelverdeling onderzocht te hebben. Hij maakte gebruik van het harmonisch gemiddelde tussen de zeefklassen, waarbij hij per zeefklasse uitging van het algebraïsche gemiddelde.

In het laboratorium van TNO is hier ook onderzoek naar gedaan met zanden van uiteenlopende herkomst. Zowel per fractie als tussen de fracties werd dezelfde wijze van middelen gebruikt en onderling vergeleken. Hieruit concludeerde men dat het meetkundig gemiddelde de meest nauwkeurige uitkomst gaf. Een zeer belangrijke factor blijkt het bepalen van de natuurgetrouwe vorm van de sommatiekromme, welke verbeterd kan worden door meer zeven per fractie te gebruiken.

welke zijn dat?

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{i} ?$$

Een geheel andere aanpak werd gevolgd door Zunker (zie bijlage I: Bepaling granulaire samenstelling). Hij kwam tot het resultaat :

$$U = \frac{1}{d_s} = \frac{4.343}{(\log d_2 - \log d_1)} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)$$

Samen met de getallenwaarden $\eta = 0,013$ Poise, $1/C \cdot \tau^2 = 0,2$ en de formule van Kozeny leidt dit tot

$$K = 3620 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{U^2} \quad \text{met } U \text{ in } 1/\text{mm}$$

u = 5 ?

Voor zee- en rivierzanden kwam Fahmy (1961) aan vermenigvuldigingsfactoren van respectievelijk 2470 en 2600. Als vergelijking met andere formules kan deze vergelijking voor $n = 0,40$ gereduceerd worden tot $K = 645 \cdot d^2$. Met de empirische constanten van Fahmy komt de vermenigvuldigingsfactor op respectievelijk 440 en 460.

1.3.3 Correlatie doorlatendheid en porositeit

Bij vergelijking van de aanwezige formules ontstaat veel verwarring door het 'begrip doorlatendheid'. Vooral de termen ρ , g en η staan dan wel, dan niet vermeld in de formule. Indien niet vermeld, zijn deze gegevens 'verwerkt' in de constante van die formules. De dimensies waarmee gerekend moet worden en waarmee het uiteindelijke antwoord wordt verkregen zorgen daardoor voor de nodige verwarring, alsmede de temperatuur waarbij de eigenschappen van het water gelden.

Uit alle formules blijkt dat de doorlatendheid afhankelijk is van de grootte van de korrels, alsmede van een aantal andere factoren. Eén daarvan is de porositeit n . In vooral oudere formules (Hazen) is deze factor niet aanwezig, maar in latere empirische vergelijkingen is de porositeit wel vertegenwoordigd.

Genoemd worden de factor van Zunker $\left(\frac{n}{1-n} \right)^2$, die proeven als toetsing heeft uitgevoerd met

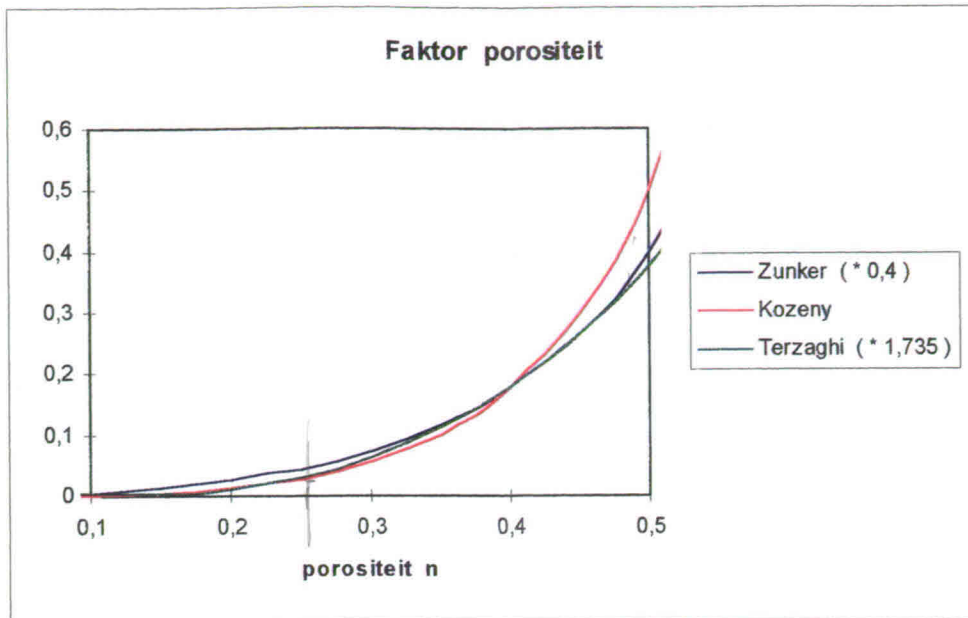
zware klei, de eerder genoemde factor van Terzaghi $\frac{(n-0,13)^2}{(1-n)^{2/3}}$, en de factor van Kozeny $\frac{n^3}{(1-n)^2}$.

Alle drie de factoren zijn in onderstaand figuur 1.3 weergegeven, betrokken op een gemeenschappelijke waarde voor de porositeit van $n=0,4$.

Zoals uit de figuur blijkt zijn er correctiefactoren ingevoerd voor de factoren van Zunker en Terzaghi om ze te kunnen vergelijken met de factor van Kozeny. De benaderingen verschillen niet wezenlijk. Uitvoerig onderzoek is gedaan naar de verschillende gedaantes waarin de invloed van de porositeit op de doorlatendheid wordt beschreven, en de resultaten wijzen de factor van Kozeny aan als meest bevredigend (onderzoeken van Carman, Loudon, Hooghoudt, Fahmy, Scheidegger en vele anderen).

die factor gaat a.h.w. in de wereld etc.!

*hangt er van af naar welke n-waarde je kijkt!
bij $n=0,25$ heb je factor 2!*



Figuur 1.3

1.3.4 Correlatie porositeit en korrelgrootte

Wanneer men de granulaire samenstelling van een zandmonster bekijkt en de invloed daarvan op de porositeit, kan men stellen dat de invloed (indien aanwezig) klein zal zijn. Stel er zijn een x aantal ronde korrels met straal r in een mooie stapeling, bijvoorbeeld in een kubus. Het volume van de ronde korrels is dan $\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot x \cdot r^3$ en het totale volume $8 \cdot x \cdot r^3$. De porositeit is dan :



$$n = \frac{8 \cdot x \cdot r^3 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot x \cdot r^3}{8 \cdot x \cdot r^3} = 1 - \frac{\pi}{6}$$

de porositeit

In deze uitdrukking komt de korrelgrootte niet voor en is dus onafhankelijk van de korreldiameter. Echter, de porositeit blijkt wel degelijk een correlatie te hebben met de doorlatendheid, zo ook met de korrelgrootte.

Naar de vorm van de korrels en poriën is veel onderzoek gedaan. De factor $1/C \cdot \tau^2$ in de formule van Kozeny-Carman kan, zoals eerder vermeld, worden berekend indien wordt uitgegaan van synthetische bolvormige korrels. Het specifieke oppervlak is dan bekend, terwijl de porositeit n en de doorlatendheid K worden gemeten. Carman (1938) concludeerde dat met $C \approx 2,5$ en $\tau \approx 2^{1/2}$ een waarde van $0,2$ (1956) met grote nauwkeurigheid voldoet (afwijking 3 - 4%). Het uitgangspunt van pure bolvorm is praktisch niet zo interessant.

Coulson (1949) vond een iets grotere variatie met als gemiddelde een waarde van $0,22$.

1.3.5 Conclusie

Het kwadratische verband met een korreldiameter in de uitdrukking voor de doorlatendheid is redelijk zeker. Welke diameter hiervoor genomen moet worden is verschillend per formule en soms afhankelijk van het monster. Ook de methode voor de bepaling van de effectieve korreldoorsnede is erg gevoelig voor het eindresultaat.

Invloed van de vorm van de korrels en de poriën is wel aangetoond, maar niet éénduidig weer te geven. De samenhang tussen de porositeit en de doorlatendheid is ook redelijk zeker. Deze samenhang wordt

? je bedoelt de diameter? bij veel fracties wordt het oppervlak van de poriën wettelijk opperveld!!!

waarde voor wat?

door een aantal uitdrukkingen beschreven (Kozeny, Terzaghi, Zunker), die elkaar niet veel ontlopen. De voorkeur wordt gegeven aan de uitdrukking van Kozeny, die de bijdrage het beste tot uiting brengt. De formules van Hazen en Bedinger zijn zeer makkelijk toe te passen in de praktijk, waardoor ze veelvuldig worden gebruikt. Terzaghi's uitdrukking is te zien als een uitgebreide formule van Hazen, door toevoeging van een porositeits-term.

1.4 Vergelijking theorie en empirie

1.4.1 Vergelijking formules

Alle formules bevatten een factor waarmee de complete granulaire samenstelling wordt gekenmerkt door één parameter. Deze parameter is of een zorgvuldig gekozen representatieve korreldiameter, of een meting van het totale oppervlak van de korrels. Met de representatieve korreldiameter wordt de gemiddelde, dan wel de maatgevende korreldiameter aangegeven. Hoe men tot de keuze van de korreldiameter is gekomen wordt vaak niet aangegeven.

Het korreloppervlak wordt ook op verschillende manieren weergegeven. Eén manier is door het U-cijfer (Zunker, Hooghoudt), of door het specifieke oppervlak S (Carman). Al deze parameters zijn makkelijk in elkaar om te zetten.

Bij de bepaling of afleiding van alle formules wordt uitgegaan van bol-vormige korrels, met soms een correctie faktor voor het niet geheel rond zijn. Bij de vergelijking van de formules kan men dus uitgaan van bol-vormige korrels. Hierbij is de representatieve korreldiameter omgekeerd evenredig met het specifiek oppervlak, wat weer om te rekenen is in een U-cijfer. De doorlatendheid is dan omgekeerd evenredig met het U-cijfer in het kwadraat, zoals al eerder is weergegeven.

Hooghoudt en Fahmy hebben beiden onderzoek gedaan naar de geldigheid van de formules, en deze aangevuld met eigen proeven. De meest waarschijnlijke formule die het verband aangeeft tussen de korrelgrootte van het zand en de doorlatendheid is volgens hun de volgende :

$$K = \mu \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{U^2}$$

waarin de korrelgrootte wordt uitgedrukt in het U-cijfer. De empirisch vast te stellen coëfficiënt μ is door Hooghoudt bepaald voor homogene subfracties.

Fahmy bepaalde de coëfficiënt μ voor zanden met gemengde samenstelling, en kwam tot zijn verbazing op ongeveer dezelfde waarde, te weten : $\mu = 26 \cdot E04 \quad [m^{-1}t^{-1}]$

De proeven zijn uitgevoerd met homogeen Nederlands zee- en rivierzand, vrij van klei en lucht.

Loudon vond na langdurig proeven doen dat de variatie in korrelvorm geen grote effecten heeft op de doorlatendheid, berekend volgens de formule van Hazen. Hij gebruikte daarbij monsters met zeer hoekige korrelvorm en monsters met bijna bolvormige korrels. Bij een gegeven relatieve dichtheid werden twee monsters samengesteld met dezelfde d_{10} maar met verschillende ongelijkheidsfactor (d_{60}/d_{10}), respectievelijk 1,5 en 5,0. De doorlatendheid tussen beide monsters vertoonde een verschil van een kleine 30 procent in hun meest losse pakking. De relatieve dichtheid wordt gegeven door :

$$D_r = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}}$$

waarin n_{\max} = porositeit van het bezonken zand na piping
 n_{\min} = minimum porositeit verkregen na lang trillen

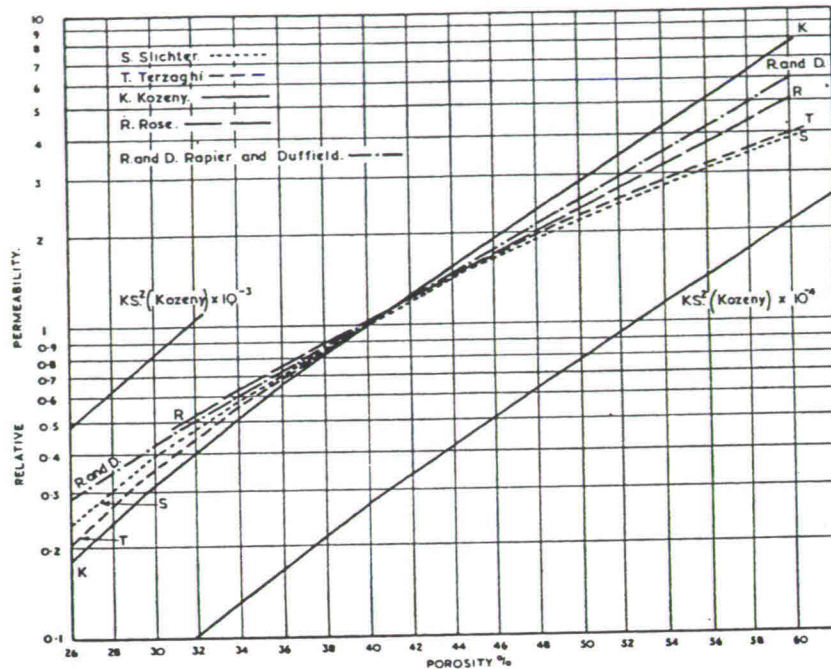
hoe gedefinieerd?

?
5⁻¹

— wat is dat?

In onderstaand figuur is de doorlatendheid volgens de formules van Slichter, Terzaghi, Kozeny, Rapier en Duffield, en Rose weergegeven tegen de porositeit. Dit voor een gemeenschappelijke waarde voor $n = 0,4$. De doorlatendheid is uitgezet op logaritmische schaal.

Zoals blijkt uit figuur 1.4 is het verband tussen $\log(K)$ en de porositeit vrijwel lineair, en is de helling het grootst voor de formule van Kozeny. De beide lijnen met markering KS^2 komen in het volgend deel aan de orde.



Relative Permeability/Porosity for different formulae in text

Figuur 1.4

1.4.2 Vergelijking metingen met theorie

De formule van Hazen blijkt toch zeer bruikbaar te zijn voor een eerste schatting van de doorlatendheid van een zandmonster, ook al wordt de porositeit, de vorm en korrelgrootte verdeling niet meegenomen. In het laboratorium meten vele onderzoekers een factor 3 verschil in de doorlatendheid voor maximale en minimale porositeit. In de natuur zullen dergelijke extreme variaties niet voorkomen, waardoor de afwijking van Hazen nog altijd een factor 2 kan zijn.

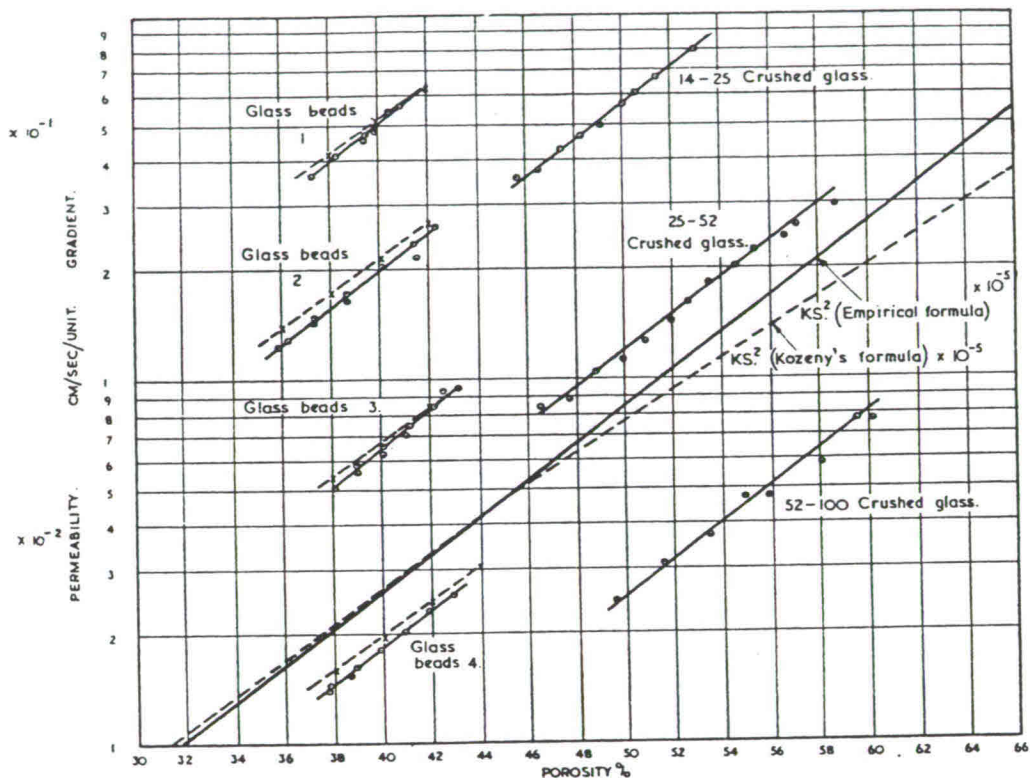
Als eerste wordt van een representatief onderzoek de resultaten beknopt weergegeven om de berekende waarden voor de doorlatendheid van ronde korrels met de experimentele waarden te vergelijken. Het betreft het gebruik van glaskorrels. In de onderstaande tabel zijn de gegevens weergegeven voor de doorlatendheid in cm^2/s bij een porositeit van $n=0,40$. Voor de constante van Terzaghi is de waarde 800 gebruikt, die hij zelf voorstelt bij ronde korrels.

monster	6/S mm	d_{10} mm	Slichter	Terzaghi	Kozeny	Rose	Gemeten waarde
1	0,831	0,68	0,258	0,379	0,512	0,517	0,510
2	0,541	0,44	0,109	0,159	0,217	0,219	0,205
3	0,303	0,27	0,0342	0,0596	0,0680	0,0686	0,0660
4	0,164	0,12	0,0100	0,0118	0,0199	0,0201	0,0190

Met als monster :	1	1,1 - 0,6	mm
	2	0,7 - 0,4	mm
	3	0,4 - 0,25	mm
	4	0,25 - 0,12	mm

De formules van Rose en Kozeny geven de beste benadering voor de gemeten doorlatendheid. Wanneer gekeken wordt naar de helling van de lijnen die de doorlatendheid tegen de porositeit weergeven blijkt de formule van Kozeny als beste uit de bus te komen. Onderzoeken van Carman, Coulson, Hooghoudt, Scheidegger en anderen bevestigen dit.

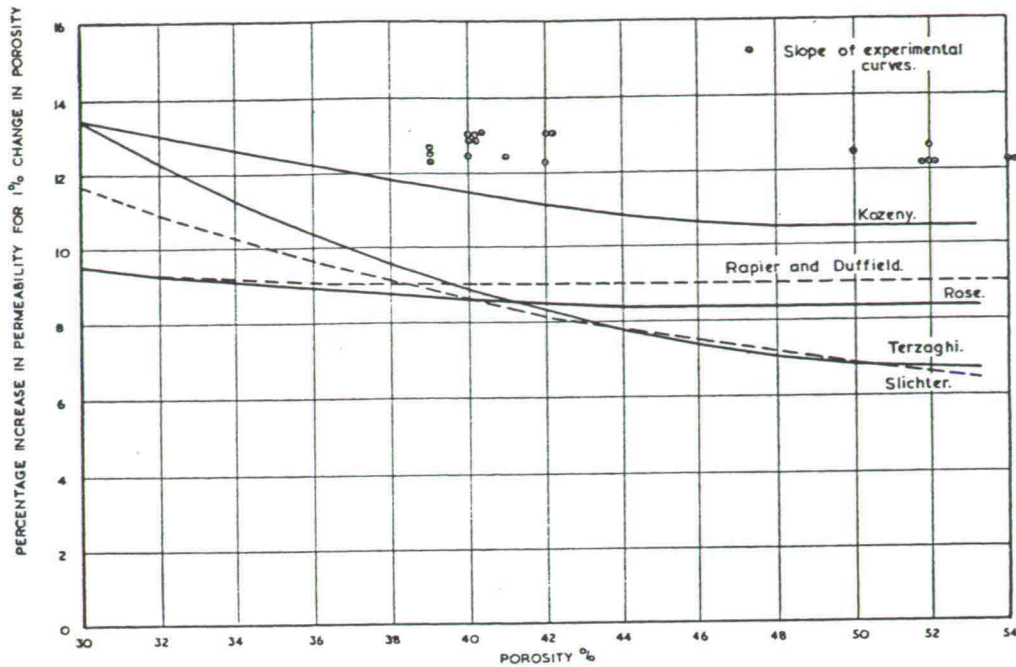
In onderstaand figuur 1.5 zijn de waarden voor de doorlatendheid, berekend volgens de formule van Kozeny, aangegeven door middel van onderbroken lijnen naast de experimentele gegevens. Deze lijnen blijken bijna dezelfde helling te hebben als de doorgetrokken lijnen. De andere formules geven een kleinere helling aan (zie figuur 1.4).



Figuur 1.5

De volgende stap, glaskorrels vervangen door zandkorrels, brengt meer onbekenden met zich mee. Er is geen makkelijke methode om het specifiek oppervlak van zand te bepalen, waardoor er vaak gewerkt wordt met een *effectieve korreldiameter*. Kwantitatieve vergelijking van de waarden verkregen door experimenten en theorie is dan beperkt tot het vergelijken van de hellingen van de lijnen. Figuren zoals figuur 1.5 kunnen dan opgemaakt en vergeleken worden met figuur 1.4. Een meer gedetailleerde vergelijking is hier echter gewenst.

Loudon verzamelde alle verkrijgbare waarden van doorlatendheid met gegeven porositeit, en bekeek het maximale bereik van de porositeit. Per eenheid toename in porositeit werd de toename in de doorlatendheid berekend. Deze gegevens zijn grafisch vergeleken met de theoretische waarden van de formules van Slichter, Rose, Rapiet en Duffield, Terzaghi, en Kozeny. Zie onderstaand figuur 1.6.



Percentage increase in Permeability for 1 per cent change in Porosity

Figuur 1.6

Uit bovenstaande figuur valt af te leiden dat de experimentele waarden het best overeenkomen met de formule van Kozeny, maar dat elke experimentele waarde ook groter is dan de theoretische waarde.

Als conclusie leidt Loudon een zeer simpele empirische formule af, te weten :

$$\left[\log_{10}(K \cdot S^2) = a + b \cdot n \right] \quad \text{waarin } a = 1,365$$

$$b = 5,15$$

Deze formule is afgeleid voor een porositeit van $n=0.40$ en komt overeen met de formule van Kozeny. In het gebied van $n=0,30$ tot $n=0,45$ is deze formule nog steeds goed bruikbaar. De waarde $(K \cdot S^2)$ is in figuur 1.4 uitgezet tegen de porositeit. De afname van de helling van de experimentele waarden geeft aan dat het effectieve specifieke oppervlak lichtjes afneemt bij een toename in de porositeit. Beide formules zijn vrij nauwkeurig voor zandmonsters, de laatste is echter gebruiksvriendelijker. Er blijft echter het probleem van de bepaling van het specifiek oppervlak.

Samengevat :

- a) Kozeny's formule $K \cdot S^2 = 15 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2}$
- b) empirische formule $\log_{10}(K \cdot S^2) = 1,365 + 5,15 \cdot n$

*hoe hebben ze S^2 bepaald? **

waarin K wordt gegeven in cm^2/s .

1.5 Conclusie

In alle formules is de relatie tussen een korreldiameter en de K-waarde aanwezig. De beste benadering voor de doorlatendheid van zandmonsters blijkt uit eerdere onderzoeken de theoretische formule van Kozeny-Carman te zijn. Er is echter geen makkelijke methode om het specifiek oppervlak van

zandmonsters bestaande uit meerdere fracties te bepalen, evenals een eenduidige waarde voor de factor k_0 te geven. In het specifiek oppervlak zit de invloed van de korreldiameter.

Als vuistregel winnen de formules van Hazen en Bedinger het in gebruiksgemak, bestaande uit een factor maal een korreldiameter in het kwadraat. Daar komt bij dat ze een redelijke eerste benadering van de doorlatendheidscoëfficiënt geven. Een bijna optimale situatie, ware het niet dat de betrouwbaarheid van deze formules onzeker is.

De afleiding van Terzaghi is ook een veelgebruikte formule, waar een porositeitsterm in zit. Meer invloeden van plaatselijke factoren wordt met deze formule meegenomen dan de vorige twee.

Kozeny-Carman	:	$K = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{k_0} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{S^2}$
Hazen	:	$1000 \cdot d_{10}^2$
Bedinger	:	$100 \cdot d_{50}^2$
Terzaghi	:	$5450 \cdot \frac{(n - 0,13)^2}{(1 - n)^{2/3}} \cdot d_{10}^2$

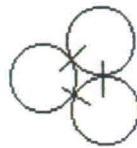
In het volgende hoofdstuk zal een methode worden afgeleid voor de bepaling van het specifiek oppervlak S van een zandmonster.

Hoofdstuk 2 Bepaling specifiek oppervlak zandmonster

2.1 Inleiding

Het potentiaalverlies bij grondwaterstroming wordt veroorzaakt door de wrijving die het water ondervindt langs de wanden van de zandkorrels. Hieruit volgt het belang van het inwendige oppervlak van het zandpakket. Echter, alleen het oppervlak dat in contact is met de stromende vloeistof levert een bijdrage aan het potentiaalverlies.

Dit oppervlak is per definitie niet gelijk aan het totale oppervlak van de zandkorrels. Indien de zandkorrels de vorm van een kubus of een platte schijf hebben, is bij bepaalde stapelingen maar een deel van het totale oppervlak in contact met de stromende vloeistof (Wyllie en Gregory). Wanneer de zandkorrels een (nagenoeg) ronde vorm hebben liggen ze op elkaar via 'kontaktpunten', bij elke stapeling (zie figuur 2.1). Er mag dan worden aangenomen dat het gehele oppervlak van de zandkorrels in contact staat met de vloeistof.



Figuur 2.1

2.2 Specifiek oppervlak fractie i

Het specifiek oppervlak S is gedefinieerd als het inwendig oppervlak per eenheid van korrelvolume:

$$S = \frac{N \cdot \pi \cdot d^2}{N \cdot \pi \cdot \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3} = \frac{6}{d} \quad [\text{m}^{-1}],$$

waarbij N het aantal zuiver bolvormige korrels is met diameter d . Uit deze betrekking is het volgende te concluderen : het specifiek oppervlak S

- is onafhankelijk van het aantal korrels N
- wordt bepaald door de diameter d van de zandkorrels

Als zeefkromme van een zandmengsel nemen we de zeefkromme in figuur 2.2.

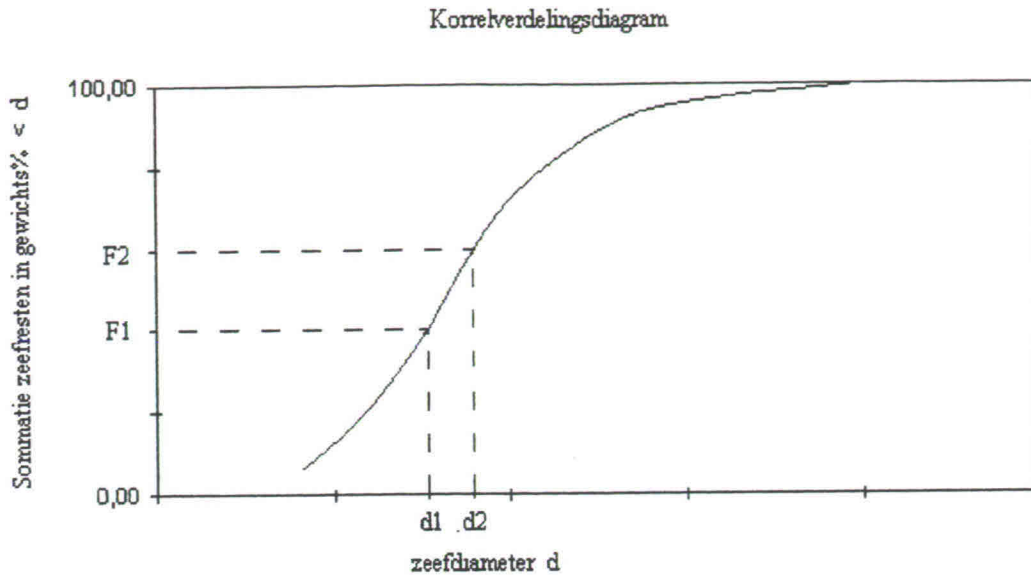
Het gewichtspercentage aan korreldiameters tussen d_1 en d_2 is $\Delta F_i = (F_2 - F_1)$. Het gewicht van deze fractie i (G_i) is gelijk aan het gewichtspercentage maal het totale gewicht G_{tot} : $G_i = \Delta F_i \cdot G_{tot}$.

Stel dat alle korrels bollen zijn met diameter d_i , aantal N_i . Het gewicht van fractie i is dan :

$$G_i = \Delta F_i \cdot G_{tot} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_i^3 \cdot N_i \cdot \gamma_k$$

Hieruit volgt voor N_i :

$$N_i = \frac{6 \cdot \Delta F_i \cdot G_{tot}}{\pi \cdot d_i^3 \cdot \gamma_k} \quad 2.1$$



Figuur 2.2

2.2.1 Oppervlak fractie i

Het totale oppervlak van fractie i is : $A_i = N_i \cdot \pi \cdot d_i^2$

$$A_i = \frac{6 \cdot \Delta F_i \cdot G_{tot}}{\pi \cdot d_i^3 \cdot \gamma_k} \cdot \pi \cdot d_i^2 \quad 2.2$$

Het totale gewicht kunnen we ook schrijven als $G_{tot} = (1 - n) \cdot V_{tot} \cdot \gamma_k$ 2.3

Door vergelijking 2.3 in 2.2 te substitueren krijgt men voor A_i :

$$\left[A_i = \frac{6}{d_i} \cdot (1 - n) \cdot \Delta F_i \cdot V_{tot} \right]$$

2.2.2 Volume fractie i

Voor het volume van de korrels voor fractie i kunnen we schrijven : $V_i = N_i \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_i^3$

$$V_i = \frac{6 \cdot \Delta F_i \cdot G_{totaal}}{\pi \cdot d_i^3 \cdot \gamma_k} \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_i^3$$

Het totale gewicht kunnen we schrijven als $G_{tot} = (1 - n) \cdot V_{tot} \cdot \gamma_k$, waarmee bovenstaande uitdrukking wordt gereduceerd tot

$$[V_i = \Delta F_i \cdot (1 - n) \cdot V_{tot}]$$

Het specifiek oppervlak van fractie i wordt hiermee

$$S_i = \frac{A_i}{V_i} = \frac{6}{d_i}$$

*dit is wel een
erg lange answer
om dit hetzelfde
te vertalen te kunnen
als p blz. 22*

2.3 Specifiek oppervlak zandmonster

Voor het gehele monster geldt dat het specifiek oppervlak gelijk is aan de sommatie van het specifiek oppervlak van de fracties waaruit het monster is samengesteld. Voor de gehele zeefkromme geldt dan :

$$S = \frac{\text{totaalOppervlak}}{\text{totaalVolume}} = \frac{\sum A_i}{\sum V_i}$$

Verondersteld dat er p fracties in het monster aanwezig zijn volgt voor bovenstaande vergelijking :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^p A_i}{\sum_{i=1}^p V_i} = \frac{6 \cdot (1-n) \cdot V_{tot} \cdot \left[\sum_{i=1}^p \frac{\Delta F_i}{d_i} \right]}{(1-n) \cdot V_{tot} \cdot \left[\sum_{i=1}^p \Delta F_i \right]} \quad \text{en} \quad \sum_{i=1}^p \Delta F_i = 1$$

Dit levert uiteindelijk de volgende uitdrukking :

$$S = 6 \cdot \sum_{i=1}^p \frac{\Delta F_i}{d_i}$$

Het gewichtspercentage aan korreldiameters tussen d_i en d_{i+1} (ΔF_i) is voor elke fractie te bepalen, evenals de korreldiameter d_i . Deze wordt gedefinieerd als het gemiddelde van de zeefdiameter waar de fractie wordt opgevangen en de zeefdiameter waar de fractie als laatste door heen gaat :

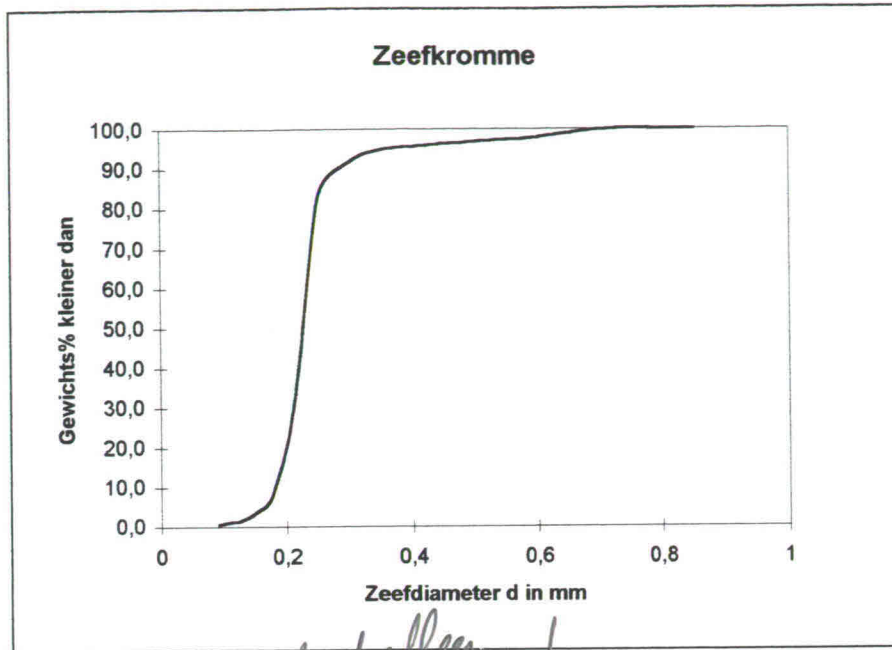
$$\frac{1}{d_i} = \left(\frac{2}{d_1 + d_2} \right)$$

Het specifiek oppervlak S van het gehele monster is nu met behulp van de zeefkromme te bepalen.

is $\frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2} \neq \sum d_i$??

2.4 Voorbeeld berekening specifiek oppervlak

Als voorbeeld wordt het specifiek oppervlak berekend van de zeefkromme in figuur 2.3, met gegeven gewicht per fractie.



Figuur 2.3

*er staat alleen zeefdiam. !
andri delijt in welke fractie !*

Fractie in mm	Gewicht (gr)	Gewichtspercentage (ΔF)	$\frac{1}{d_i}$ in mm^{-1}	$\frac{\Delta F_i}{d_i}$ in m^{-1}
0,85-0,71	0	0,0	-	-
0,71-0,60	20,1	2,1	1,28	26,3
0,60-0,50	10,0	1,0	1,53	15,7
0,50	10,0	1,0	1,82	18,6
0,42	10,0	1,0	2,17	22,3
0,35	30,1	3,1	2,60	79,9
0,30	80,3	8,2	3,08	252,5
0,25	521,9	53,3	3,64	1939,4
0,21	220,8	22,6	4,35	981,0
0,175	40,1	4,1	5,19	213,1
0,15	20,1	2,1	6,15	126,2
0,125	5,0	0,5	7,27	37,3
0,106	5,0	0,5	8,66	44,4
0,09	5,0	0,5	10,20	52,3
Totaal	978,6		Totaal	3809

We berekenen hier het specifiek oppervlak van het gehele monster naar voorbeeld van de fractie 0,42 - 0,50 mm. Uit de tabel is af te lezen dat het gewicht uit deze fractie gelijk is aan 10,0 gram. Dit is gelijk aan een gewichtspercentage van $\frac{10\text{gr}}{978,6\text{gr}} * 100 = 1,0\%$, oftewel een ΔF_i van 0,01.

De kenmerkende diameter d_i wordt bepaald als het gemiddelde van de onder- en bovengrens van deze fractie. In dit geval geldt $\frac{1}{d_i} = \frac{2}{0,42 + 0,50} = 2,17$. Door het gewichtspercentage van deze fractie te delen door de kenmerkende korreldiameter wordt het tussenprodukt $\frac{\Delta F_i}{d_i}$ verkregen, in dit geval gelijk aan $22,3 \text{ m}^{-1}$.

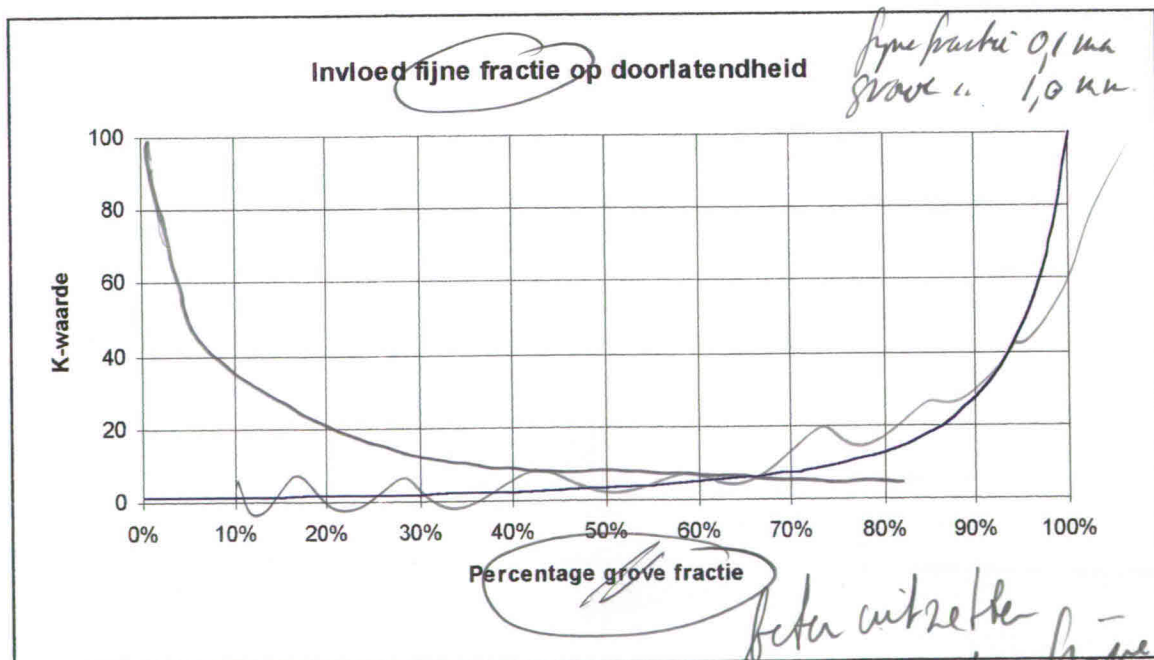
Deze procedure wordt voor elke fractie uitgevoerd, en tenslotte worden de tussenprodukten van alle p fracties bij elkaar opgeteld: $\sum_{i=1}^p \frac{\Delta F_i}{d_i}$. Deze som vermenigvuldigd met 6 levert het specifiek oppervlak voor het gehele monster. Voor dit monster wordt dat:

$$S = 6 \cdot \sum_{i=1}^p \frac{\Delta F_i}{d_i} = 6 \cdot (3809 \text{ m}^{-1}) = 22854 \text{ m}^{-1}.$$

2.5 Invloed korreldiameter op specifiek oppervlak

Zoals hiervoor afgeleid is het specifiek oppervlak (S) van een zandmonster gelijk aan zes maal de sommatie van de termen $\frac{\Delta F_i}{d_i}$ voor elke fractie; $S = 6 \cdot \sum_{i=1}^p \frac{\Delta F_i}{d_i}$. Het is niet moeilijk in te zien dat een fractie bestaande uit een kleine diameter een veel grotere invloed heeft op het totale specifiek oppervlak dan een grotere diameter; de diameter is immers omgekeerd evenredig met S . Het specifiek oppervlak is omgekeerd kwadratisch aanwezig in de formule van Kozeny-Carman, wat een kwadratische invloed van de korreldiameter op de K -waarde oplevert. De invloed van de korreldiameter van elke fractie zand op de K -waarde wordt met deze methode meegenomen.

Om de invloed van een fijne fractie in een zandmonster weer te geven is in onderstaande grafiek de doorlatendheidscoëfficiënt K uitgezet tegen het gewichtsandaeel grove fractie in procenten.



Figuur 2.4

Het betreft zandmonsters bestaande uit een willekeurige verhouding van twee fracties, te weten een grove van 1,0 mm en een fijne van 0,1 mm. De enige factor die varieert in de formule van Kozeny-Carman is S; de andere parameters zijn constant.

Wat opvalt is de grote invloed die een kleine fractie fijn zand heeft op de K-waarde. De eerste 5 gewichtsprocent fijn zand leidt al tot een reductie van factor twee (!) in de doorlatendheid. Een gewichtsprocent van 15 leidt tot een reductie van factor vijf. Deze uitkomst maakt de korreldiameter waarmee gewerkt wordt in de formule van Hazen ($1000 \cdot d_{10}^2$) en Terzaghi begrijpelijk.

Hoofdstuk 3 Onderzoek

3.1 Doel

Nu er een makkelijke methode is gevonden om het specifiek oppervlak van een zandmonster te bepalen, is het de vraag of de bepaling van deze factor S de formule van Kozeny-Carman meer betrouwbaar maakt.

De simpelste manier om hier achter te komen is om een aantal doorlatendheidsproeven te verrichten met monsters die zeer uiteenlopend van samenstelling zijn, en deze resultaten te vergelijken met de uitkomsten volgens de formule van Kozeny-Carman. Om de betrouwbaarheid van de formule van Kozeny-Carman weer te geven, zal deze formule ook vergeleken worden met de drie empirische formules van Hazen, Bedinger en Terzaghi. De keuze voor deze drie empirische relaties is al besproken in paragraaf 1.5.

3.2 Proefopstelling

3.2.1 Doel

De doorlatendheidsproeven hebben als doel het bepalen van de doorlatendheidscoëfficiënt K van zandmonsters met uiteenlopende zeefkrommes.

3.2.2 Beschrijving van proefopstelling

De proefopstelling bestaat uit een verticale doorzichtige cylinder, waarin het te onderzoeken zandmonster zit, zie figuur 3.1. Aan de bovenkant is de cylinder open en omringd door een stortbak, onderaan wordt de cylinder afgesloten door een bodemstuk met geïntegreerd filter. Dit filter laat alleen water door.

Bovenin de cylinder stroomt het water naar binnen, waarvan een deel over de bovenrand stroomt en het overgrote deel door het zandmonster heen stroomt. De bovenrand met stortbak zorgt voor een constant hoogteverschil over het monster.

Op verschillende hoogten in de cylinderwand zijn stijgbuisjes aangesloten, waarvan de stijghoogte kan worden afgelezen. De afmetingen zijn weergegeven in de figuur.

3.3 Samenstellen zandmonster

Het zand dat voor de proeven wordt gebruikt zit tussen de 1,0 en 0,1 mm. Om elke zeefkromme zo nauwkeurig mogelijk te bepalen worden de volgende zeefdiameters gebruikt :

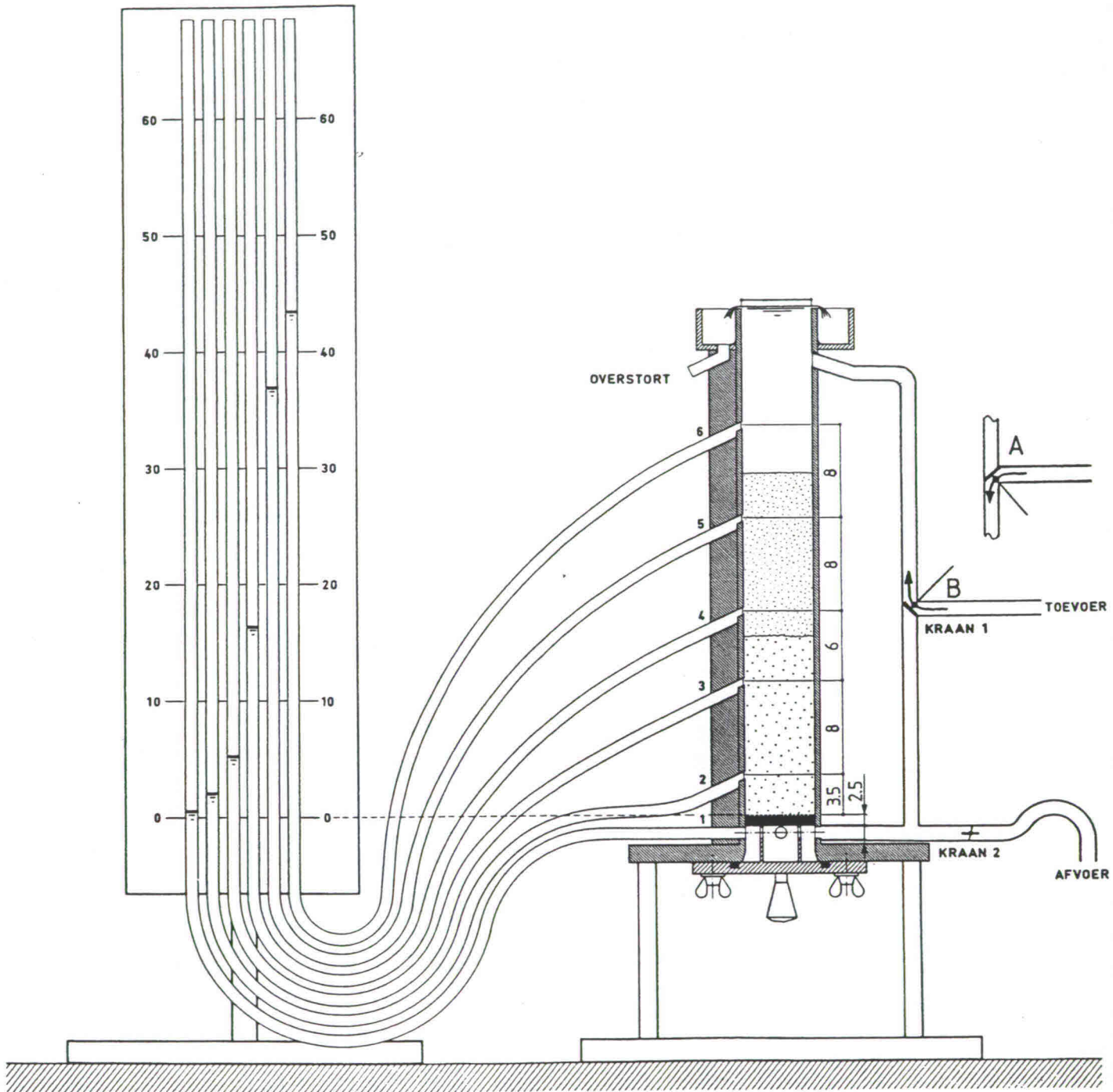
1,0 mm - 0,85 mm - 0,71 mm - 0,60 mm - 0,50 mm - 0,42 mm - 0,35 mm - 0,30 mm - 0,25 mm - 0,21 mm - 0,175 mm - 0,15 mm - 0,125 mm - 0,106 mm - 0,09 mm

Er worden zes nauwkeurige proeven gedaan op monsters met verschillende zeefkrommes. De vorm van de zeefkrommes is gebaseerd op :

- het aandeel van fijne fracties
- de helling van de zeefkromme
- het aandeel van grove fracties

Door de extreme varianten te kiezen zijn vijf monsters samengesteld met zeer uiteenlopende zeefkrommes, inclusief een tweetoppige zeefkromme, monster 6. De zeefkrommes voor de verschillende monsters zijn weergegeven in figuur 3.2, en de verdelingen in figuur 3.3.

DOORLATENDHEIDSAPPARAAT

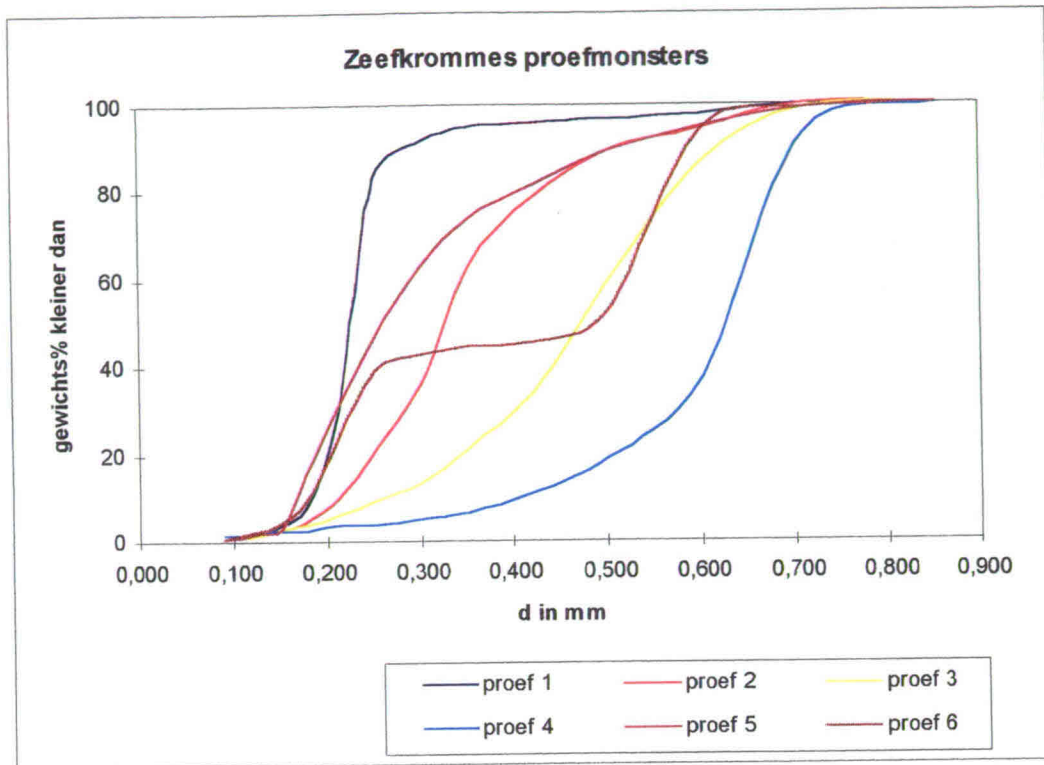


maten in cm.

Figuur 3.1

De monsternummers komen overeen met de proefnummers. De zeefkrommes zijn voor ieder monster apart weergegeven in bijlage II, evenals hun samenstelling in tabelvorm.

Van het te beproeven zandmonster worden de afzonderlijke benodigde zandfracties afgewogen. Deze fracties worden samengevoegd en gemengd. Dit mengen van het zand brengt de nodige problemen met zich mee.



Wat zijn nu de overwegingen nu juist deze 6 krommen? Aan te maken?

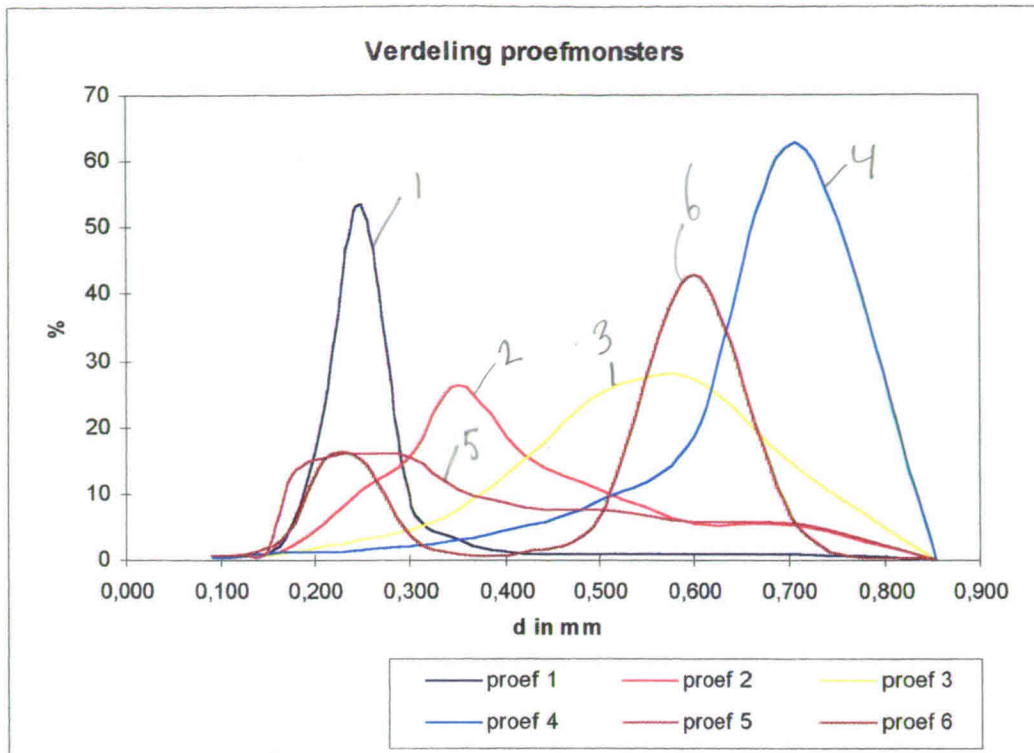
Figuur 3.2

Wanneer een zandfractie bestaat uit twee korreldiameters die onderling een factor tien in diameter verschillen, is het niet moeilijk voor te stellen dat de veel kleinere korrels tussen de grotere korrels heen bewegen tijdens het mengen. Het resultaat is een monster waarbij de kleinere zandkorrels grotendeels onderaan liggen en de grotere er bovenop; een niet-homogeen mengsel. Afhankelijk van de gradatie van het te samenstellen monster en de onderlinge verhouding in korreldiameters trad dit verschijnsel ook op tijdens het mengen van de hier gebruikte monsters.

Vele manieren zijn geprobeerd om de zandfracties tot een homogeen monster te krijgen, waarbij de controle achteraf vrij moeilijk is. Van het gebruikte zand hebben de kleinere zandfracties een veel lichtere kleur dan de grotere, zodat visuele controle een goed beeld geeft van de homogeniteit. Daar komt bij dat de maximale verhouding tussen de gebruikte korreldiameters is een factor tien is, wat goed te onderscheiden is bij een maximale korreldiameter van 1,0 mm.

De meest bevredigende oplossing is in dit geval gebleken het mengen van kleine hoeveelheden per keer, deze samen te voegen en hieruit weer kleine hoeveelheden halen om te mengen. Het mengen vindt plaats door een hoeveelheid zand in een cylinder te doen en deze rustig over een horizontaal vlak te laten rollen.

Effectief uitmengen? Je krijgt dus a.h.w. verschillende "zand pakketjes" in de cilinder weerstaand in 2 fracties (gestuipeld) apart behandelde als die in een mengmonster? S is gelijk!



Figuur 3.3

3.4 Klaarmaken proefopstelling

Na het mengen van de fracties tot een homogeen monster, moet het monster in de cylinder geplaatst worden. Hierbij moet gezorgd worden dat het monster homogeen, en de porositeit gelijk blijft. Ook moet er voor gezorgd worden dat er geen lucht in het mengsel zit. Behalve lucht in het mengsel, moet ook alle lucht uit de proefopstelling verwijderd worden. Als dit eenmaal gedaan is, kan het monster in het apparaat worden geplaatst.

Het vullen van de cylinder met het zandmonster vraagt ook de nodige aandacht wat betreft de homogeniteit. Wanneer het zandmonster door een trechter 20 centimeter naar beneden valt, is het monster grotendeels ontmengd. Ook wanneer de valhoogte 10 centimeter is treedt dit verschijnsel op. De grotere korrels liggen aan de 'buitenkant', de kleinere aan de binnenkant. In water treedt een ander verschijnsel op.

Volgens Stokes is de valsnelheid w van een korrel met diameter D gelijk aan :

$$w = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot D^2}{\rho \cdot \nu} \quad , \text{waarin}$$

- w = valsnelheid van korrel (m/s)
- ρ_s = volumieke massa van korrel (kg/m³)
- ρ = volumieke massa van vloeistof (kg/m³)
- D = korreldiameter (μm)
- ν = kinematische viscositeit (m²/s)

zelfde?

ander?
valsnelheid anders!

hoe doe je dat?

Hieruit valt af te leiden dat tussen twee korrels met een verschil in diameter van factor 10, een snelheidsverschil zit van factor 100! De grotere korrels liggen dan onderaan, en de kleinere bovenaan. Er is veel geëxperimenteerd met het vullen van de cylinder, waarvan de meest bevredigende en gebruikte methode hieronder wordt beschreven.

Wanneer de zandfracties tot een homogeen monster zijn gemengd, wordt het monster van onder af vochtig gemaakt, maar niet nat. De reden dat het monster van onder af wordt bevochtigd is om de ingesloten lucht er uit te drijven. Doordat het monster vochtig wordt gemaakt vertoont het nu licht cohesief gedrag.

Na het bevochtigen wordt met behulp van een 'scepje' het monster in de cylinder geplaatst. Het scepje heeft ongeveer een inhoud van 8 cm^3 . De inhoud wordt van het scepje gehoven, vanaf een constante hoogte boven het monster. Er is namelijk een valhoogte nodig om eventueel ingesloten lucht nog te laten ontsnappen. Er is een hoogte waarbij dit kan zonder de gevolgen van ontmenging. Dit is ook afhankelijk van de hoeveelheid zand in het scepje. Tijdens het vullen is er in de cylinder een zwakke opwaartse stroom aanwezig, die voor de afvoer zorgt van het eventueel ingesloten lucht.

Na het vullen wordt de stroomrichting in de cylinder omgekeerd, waarbij ervoor gezorgd moet worden dat er zeer weinig water over de bovenrand stroomt. Door middel van het tikken met een rubber hamer tegen de cylinderwand kan nu de gewenste verdichting worden bereikt.

Er is enige tijd nodig voordat er een stationaire toestand is ingetreden. Dit is afhankelijk van de doorlatendheid van het monster, en is goed te volgen door de standen op de stijgbuisjes.

Wat betreft de homogeniteit van het monster is er achteraf nog een controlemiddel, dankzij de aflezingen van de stijgbuisjes. De veronderstelling dat het monster homogeen is heeft als uitkomst een lineair verband tussen het verloop van de stijghoogte en de plaatshoogte (zie bijlage II).

3.5 Uitvoering proef

Wanneer een stationaire toestand is ingetreden kan de hoogte van het monster in de cylinder worden gemeten, en de stijghoogten in de stijgbuisjes worden afgelezen. Voordat het debiet wordt gemeten wordt eerst de temperatuur gemeten van het water dat de cylinder binnenkomt, en van het water dat door het zandmonster naar buiten komt. Het zand ligt in een open ruimte opgeslagen en zal een iets hogere temperatuur hebben dan het gebruikte water. Het water dat door het zandmonster heen stroomt zal het zand afkoelen totdat het water en zand dezelfde temperatuur hebben. Op deze manier worden invloeden van viscositeitsverschillen vermeden.

Nadat de temperatuur van het instromend water dezelfde waarde aanwijst als het uitstromend water kan begonnen worden met het meten van het debiet.

Voor elk monster wordt zes keer een meting van het debiet verricht, met tussenpozen van tien minuten. Op deze manier kan makkelijk achterhaald worden of er wel sprake is van een stationaire toestand. Het debiet wordt gemeten door het tijdsinterval te meten dat nodig is om een maatbeker van 500 ml te vullen.

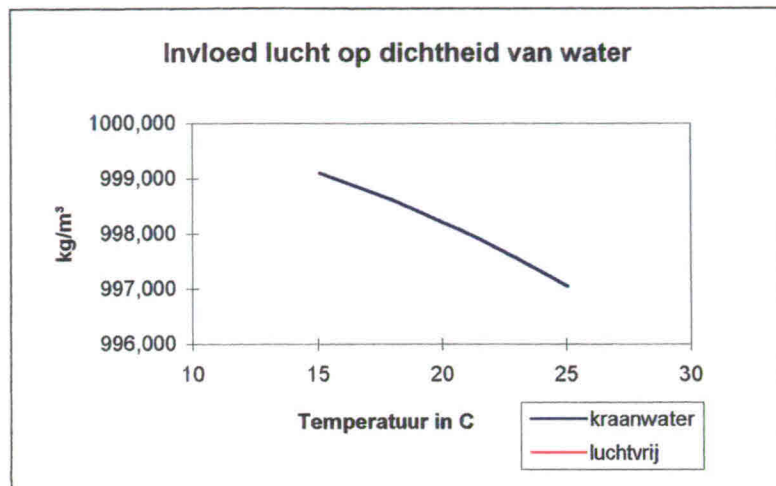
Na het voltooien van de proef worden weer de stijghoogten afgelezen, om verandering van de homogeniteit van het zandmonster tijdens de proef te controleren.

3.6 Aandachtspunten

De volgende belangrijke aandachtspunten zullen kort behandeld worden:

I Invloed lucht op dichtheid water

De invloed van lucht in water op de dichtheid is in onderstaande grafiek weergegeven.

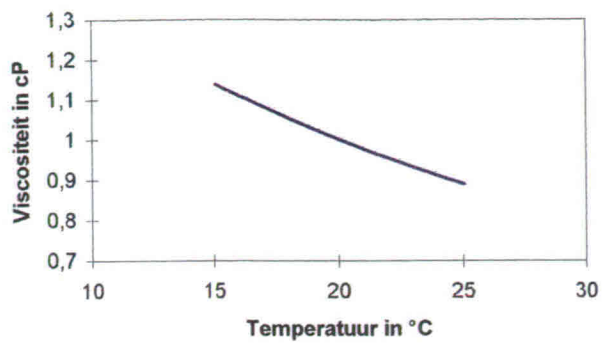


opgeloste
de De beide lijnen liggen precies op elkaar. Hieruit is duidelijk op te maken dat het ingesloten lucht in kraanwater geen invloed heeft op de dichtheid vergeleken met lucht-vrij water. Toch wordt tijdens de proeven gewerkt met 'lucht-arm' water. De reden hiervoor is dat *de* het ingesloten lucht in kraanwater vrijkomt in het zand-monster tijdens het vullen van de cylinder. Het lucht wordt ingesloten door het zand en kan niet meer vrijkomen, waardoor de volle doorsnede van het monster niet meer meewerkt, en het debiet zal afwijken. Het 'lucht-arm' water komt uit een watertank die eerst vacuum wordt getrokken om zoveel mogelijk lucht uit het water te halen.

II Invloed temperatuur op viscositeit

verbreedt
De invloed van de temperatuur van het water op de viscositeit is in onderstaande grafiek weergegeven. Hieruit blijkt dat met de temperaturen waarmee gewerkt wordt (varierend van 19°C tot 22°C) een verschil in viscositeit zit van 10%. De viscositeits-term komt voor in de formule van Kozeny-Carman. Om deze reden zal de temperatuur bij elke proef gemeten worden en de daarbij behorende viscositeit gebruikt worden. Deze waarden worden uit chemische informatieboeken gehaald.

Invloed temperatuur op viscositeit



Hoofdstuk 4 Resultaten

Ik mis de meetpunten in deze papieren.



4.1 Resultaten per proef

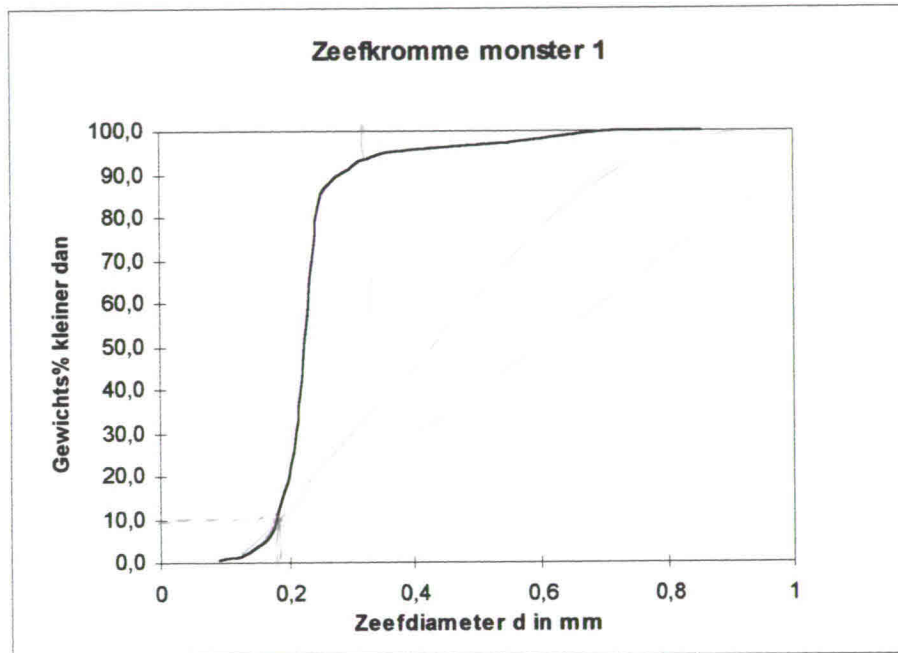
Met elk in hoofdstuk 3 vermeld monster is een nauwkeurige doorlatendheidsproef uitgevoerd. In dit hoofdstuk zal per monster een beschrijving van de samenstelling gegeven worden, de zeefkromme en de gemeten doorlatendheidscoëfficiënt K . De resultaten en uitwerkingen per monster zijn weergegeven in bijlage II.

Waarom is de porositeit niet gemiddeld? die zit vermoedelijk ook in τ !



Proef 1 - Monster 1

Beschrijving : Monster 1 is een zandmonster waarbij de samenstelling vooral bestaat uit de fracties 0,21 - 0,30 mm, vanwaar de zeer steile helling in dat gebied. Het aandeel van de grove fracties evenals de zeer fijne is relatief gering.

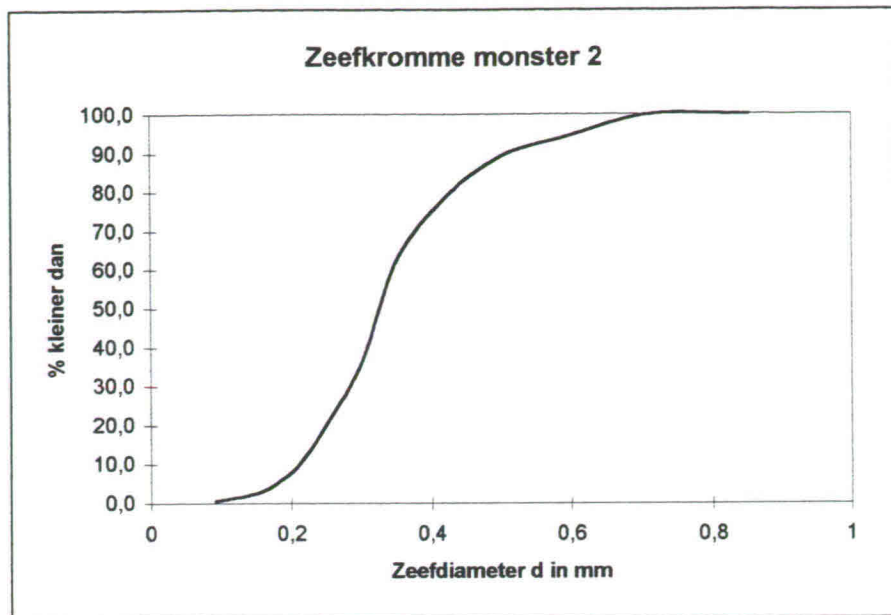


Gemeten doorlatendheidscoëfficiënt $K = 0,0278 \text{ cm/s}$

Variatie in de 5 waarnemingen!

Proef 2 - Monster 2

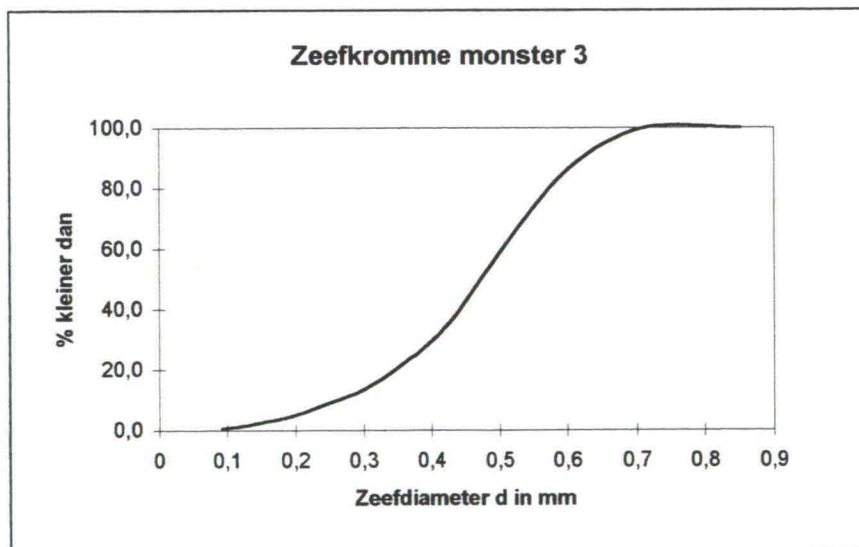
Beschrijving : De samenstelling van monster 2 bestaat vooral uit de fracties 0,25 - 0,50 mm. Deze grenzen liggen verder uit elkaar zodat de helling minder steil is dan die bij monster 1. Het aandeel van de grove fracties evenals de zeer fijne is ook bij dit monster relatief gering.



Gemeten doorlatendheidscoëfficiënt $K = 0,0830 \frac{cm}{s}$

Proef 3 - Monster 3

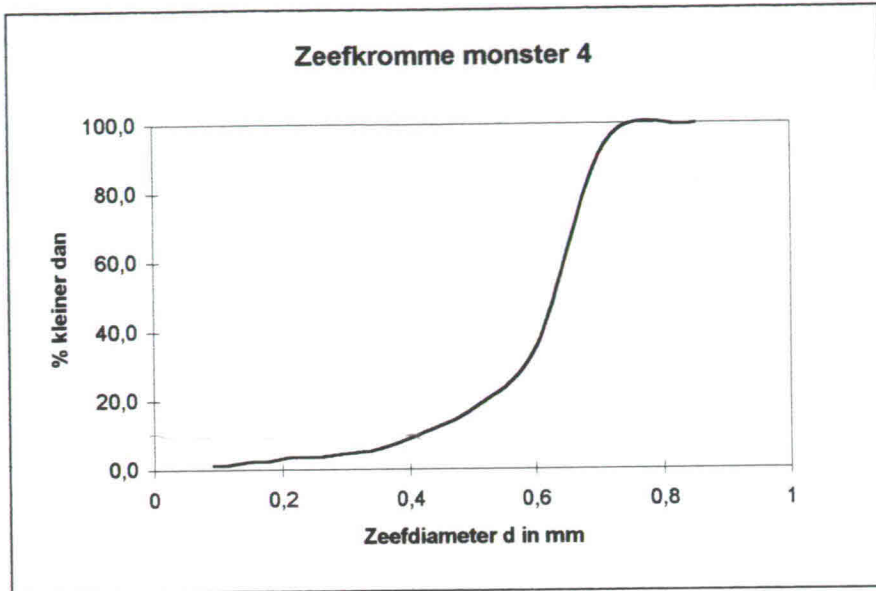
Beschrijving : Monster 3 is voornamelijk samengesteld uit de fracties 0,35 - 0,85 mm. Deze grenzen liggen weer verder uit elkaar wat leidt tot een flauwe helling. Het gewichts-aandeel van de fijne fracties is relatief gering.



Gemeten doorlatendheidscoëfficiënt $K = 0,1236 \frac{cm}{s}$

Proef 4 - Monster 4

Beschrijving : De samenstelling van monster 4 bestaat vooral uit de fracties 0,60 - 0,85 mm. De zeefkromme begint daardoor zeer flauw en klimt aan het eind steil omhoog. Het verschil met monster 1 is dat het begin- en eindvorm zijn verwisseld



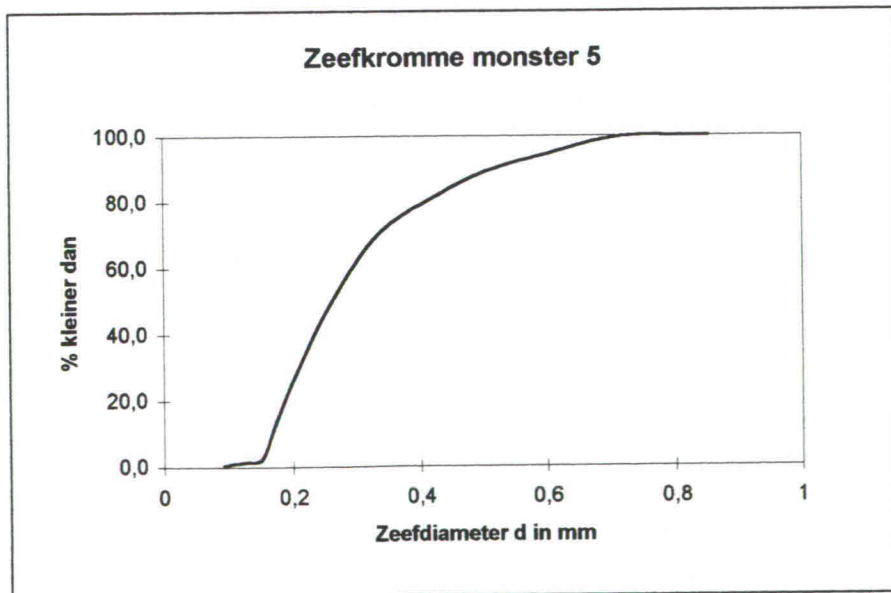
Gemeten doorlatendheidscoëfficiënt $K = 0,1957 \text{ cm/s}$

Proef 5 - Monster 5

Beschrijving : Monster 5 is een monster met weinig zeer fijne fracties, daarna met toenemende korrel diameter een toenemend gewichtspercentage, daarna afnemend. Dit verklaart de 'bolle' vorm van de zeefkromme.

? afnemend.

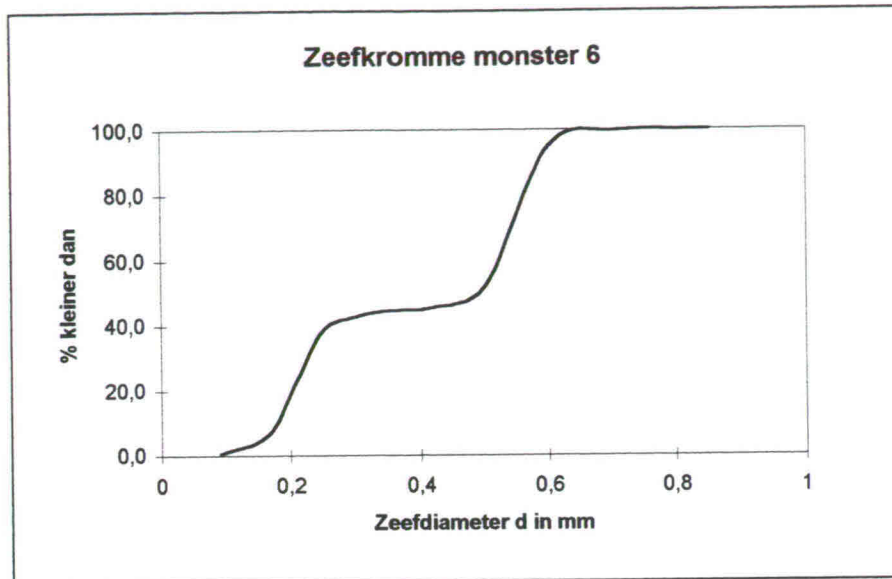
leidt tot



Gemeten doorlatendheidscoëfficiënt $K = 0,0528 \text{ cm/s}$

Proef 6 - Monster 6

Beschrijving : Monster 6 is het tweetoppige monster. Dit monster bestaat eigenlijk uit twee normaal verdeelde zandmonsters (zie figuur 3.3) die samengevoegd zijn. Het voornaamste gewichtsaandeel zit tussen de fracties 0,175 - 0,30 mm en 0,50 - 0,71 mm.



Gemeten doorlatendheidscoëfficiënt $K = 0,0651 \text{ cm/s}$

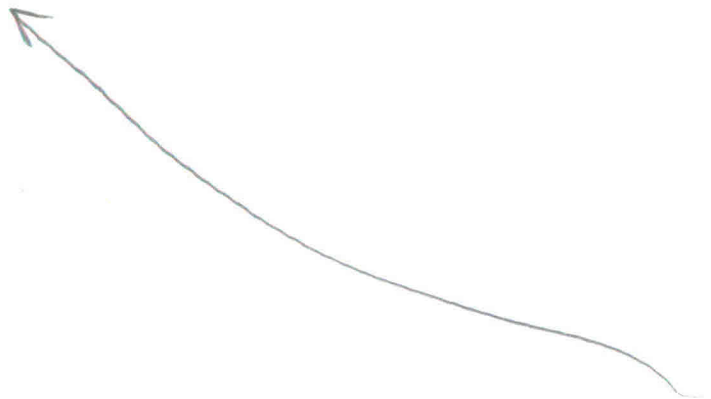
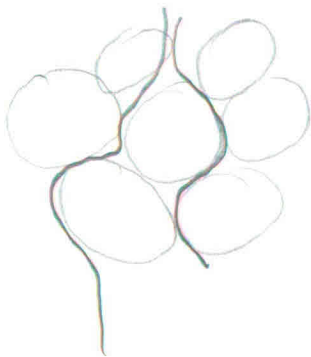
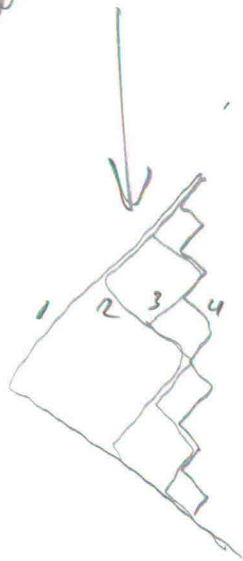
4.2 Samenvatting belangrijkste gegevens en resultaten

De belangrijkste resultaten en gegevens die nodig zijn voor de verdere uitwerking en vergelijking van de verschillende formules zijn in onderstaande tabel weergegeven per proefmonster. Het betreft de gemeten doorlatendheidscoëfficiënt, het berekende specifiek oppervlak S voor elk monster, de porositeit n en de kenmerkende korreldiameters (d_{10} en d_{50}). Ook hier geldt weer dat het proefnummer overeenkomt met het monsternummer.

De uitwerking van deze waarden en verdere gegevens zijn te vinden in bijlage II.

proef	Gemeten waarde K in cm^2/s	S in m^{-1}	n	d_{10} (mm)	d_{50} (mm)
1	0,02778	22855	0,35	0,179	0,255
2	0,08295	16737	0,39	0,210	0,326
3	0,12362	12797	0,38	0,260	0,471
4	0,19572	10016	0,38	0,400	0,622
5	0,05282	20181	0,39	0,164	0,259
6	0,06514	16720	0,37	0,178	0,472

allemaal dezelfde weg bryte !!



Hoofdstuk 5 Uitwerking resultaten

5.1 Bepaling konstante k_o

Voordat de resultaten vergeleken kunnen worden moet eerst nog de factor k_o in de formule van Kozeny-Carman bepaald worden. Het betreft hier een factor die zeer nauw luistert, daar het omgekeerd evenredig is met de doorlatendheidscoëfficiënt :

$$K = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{k_o} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{S^2}$$

deelt nederlands!

Eerder is al vermeld dat voor $k_o = C \cdot \tau^2$ de vormfactor een gemiddelde waarde van 2,5 aanneemt en de hydraulische kronkeligheid τ een waarde van $\sqrt{2}$. De constante k_o is hiermee gelijk aan 5. Deze waarde is echter afgeleid voor kogelvormige korrels, wat niet representatief is voor zandmonsters. Meerdere onderzoeken zijn gedaan naar de Kozeny-Carman constante k_o , met resultaten variërend tussen 3 en 7. Dit is meer dan een factor 2 verschil, reden om deze konstante nauwlettend te bepalen.

Een aantal doorlatendheidsproeven zijn uitgevoerd met monsters bestaande uit één fractie. De doorlatendheidscoëfficiënt is voor deze proeven bepaald, evenals het specifiek oppervlak en de porositeit (zie bijlage 4). Door middel van terugrekenen met de formule van Kozeny-Carman is de constante k_o bepaald. Voor de beproefde fracties is in onderstaande tabel de gemiddelde waarde voor k_o gegeven.

Fractie	Gemiddelde waarde k_o
0,71 - 0,85	6,08
0,60 - 0,71	5,76
0,50 - 0,60	5,34

moet onder microscoop bekeken?

Al het gebruikte zand is rivierzand, gewonnen op dezelfde plek. Er wordt daarom aangenomen dat de korrelvorm voor alle fracties gelijk is. Het verschil moet dan zitten in de hydraulische kronkeligheidsfactor τ . Dan volgt uit bovenstaande tabel dat hoe fijner de fractie, hoe kleiner de waarde voor τ ; de vormfactor C is immers constant.

Deze getallen zijn echter niet direkt met elkaar te vergelijken daar de porositeit voor de uitgevoerde proeven niet gelijk is; een fijne fractie met hoge porositeit kan een grotere doorlatendheid vertonen dan een grove fractie met lage porositeit.

Het is dan ook begrijpelijk dat het gemiddelde van deze waarden voor k_o niet gebruikt kan worden voor de beproefde zandmonsters, daar de k_o waarde afhankelijk is van de samenstelling van het monster. De beproefde zandmonsters bestaan uit meerdere fracties zodat het water waarschijnlijk een grotere weg moet afleggen om dezelfde hoogte te overwinnen. Deze gedachte wordt bevestigd door de dezelfde procedure uit te voeren als hierboven is beschreven.

De doorlatendheidscoëfficiënt is voor de proeven met de zes zandmonsters bepaald, evenals het specifiek oppervlak en de porositeit (zie bijlage 2). Door middel van terugrekenen met de formule van Kozeny-Carman wordt de constante k_o voor elke proef bepaald. De gemiddelde waarde voor k_o van deze proeven komt uit 7,09. Met een constante vormfactor C betekent dit inderdaad een groter afgelegde afstand dan bij de fracties alleen.

op

Het probleem is dus blij laar
dat je hier $h_0 \approx 7$ hebt te weten
de literatuur 3-7 geeft en de
proeve op de afzonderlijke fracties
ook 5-7 !!!

Zie blz. 70 grafische $h_0 - n$.
het lijkt erop dat een vastgesteld
rand de $h_0 \approx 6$ is...?

Uniform

Deze waarde voor k_o wordt dan ook gebruikt voor de berekeningen met de formule van Kozeny-Carman;

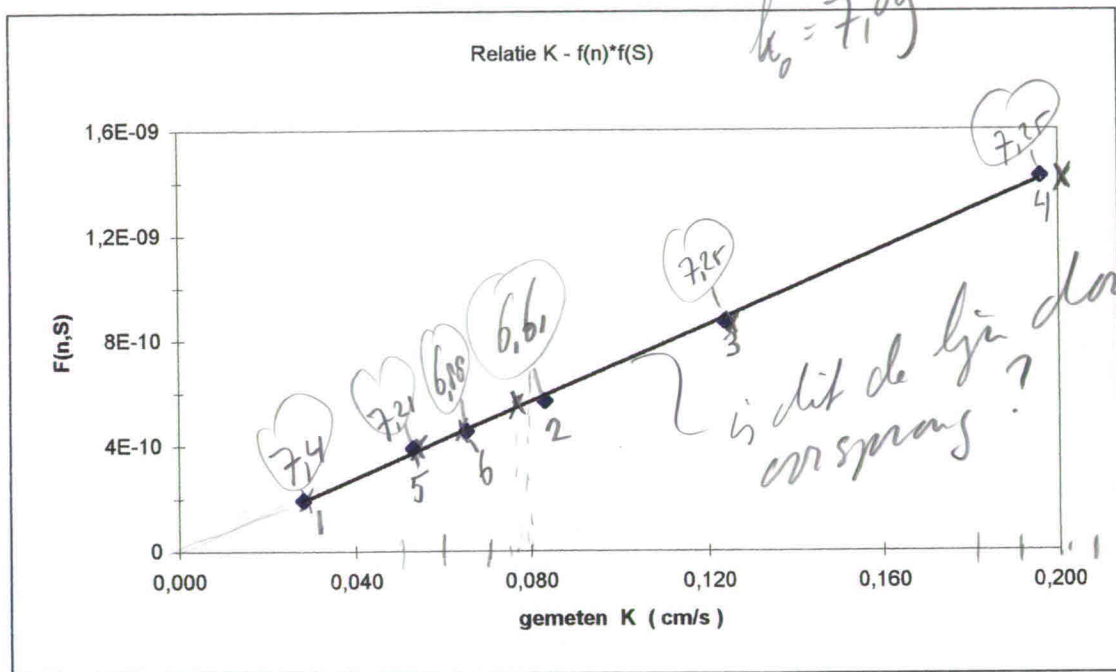
$$k_o^* = 7,09$$

5.2 Relatie K en F(n,S)

Volgens de formule van Kozeny-Carman is de relatie tussen de doorlatendheidscoëfficiënt K en de porositeit- maal de specifiek oppervlakfunctie lineair:

$$K = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{k_o} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{S^2} \Rightarrow K: \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{S^2} = F(n,S)$$

Voor de zes uitgevoerde proeven is in figuur 5.1 de rechter term uitgezet tegen de gemeten doorlatendheid. Hieruit volgt dat de termen voor de porositeit en het specifiek oppervlak goed worden weergegeven. \rightarrow en tevens dat de term $\frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{k_o}$ blijft een constant !!!
has ...!



Figuur 5.1

5.3 Herschrijven formules

Om de resultaten te kunnen vergelijken is het handig iedere formule te schrijven als een konstante. Voor de vier te bekijken formules wordt deze uitwerking inclusief berekende waarden voor de proeven hier gegeven :

Kozeny-Carman :
$$K = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{k_o^*} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{S^2}$$

$$K \cdot S^2 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \eta = C_{\text{Kozeny}}$$

en

$$C_{\text{Kozeny}} = \frac{\rho_w \cdot g}{k_o^*}$$

Proef	$K \cdot S^2 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \eta$	C_{Kozeny}
1	1325	1383
2	1484	1383
3	1336	1383
4	1288	1383
5	1295	1383
6	1409	1383

met
eerlijk!
in
het proces
vergevoerd!
 $k_o = 5$
i.p.v. 7,09

Hazen :

$$K = 1000 \cdot d_{10}^2$$

$$\frac{K}{d_{10}^2} = C_{\text{Hazen}}$$

en

$$C_{\text{Hazen}} = 1000$$

Proef	$\frac{K}{d_{10}^2}$	C_{Hazen}
1	749	1000
2	1625	1000
3	1580	1000
4	1057	1000
5	1697	1000
6	1784	1000

Bedinger :

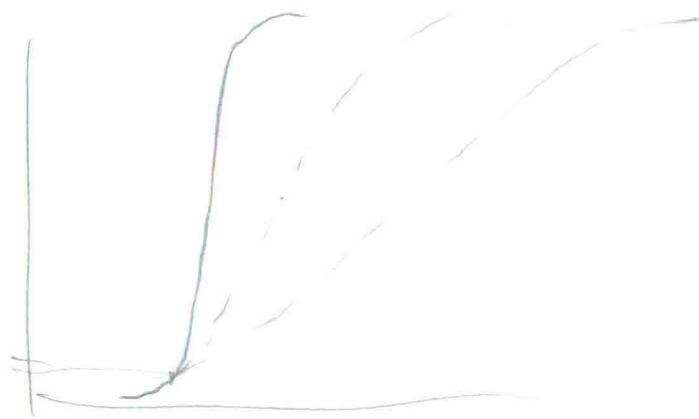
$$K = 100 \cdot d_{50}^2$$

$$\frac{K}{d_{50}^2} = C_{\text{Bedinger}}$$

en

$$C_{\text{Bedinger}} = 100$$

Proef	$\frac{K}{d_{50}^2}$	C_{Bedinger}
1	475	100
2	675	100
3	482	100
4	438	100
5	681	100
6	253	100



Terzaghi :

$$K = 5450 \cdot \frac{(n - 0,13)^2}{(1 - n)^{2/3}} \cdot d_{10}^2$$

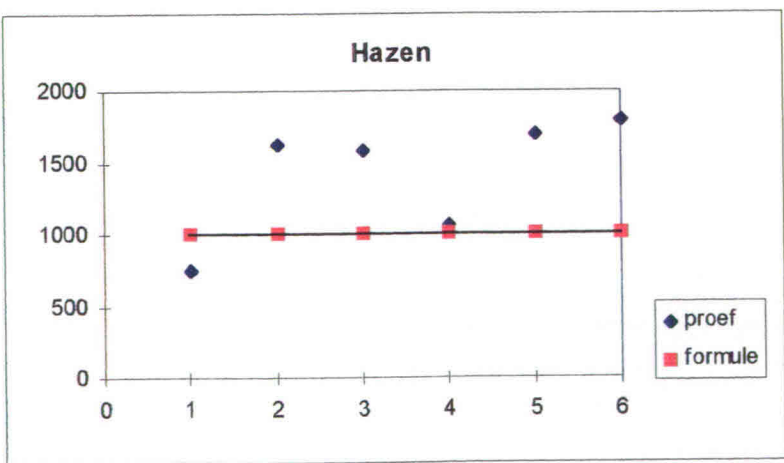
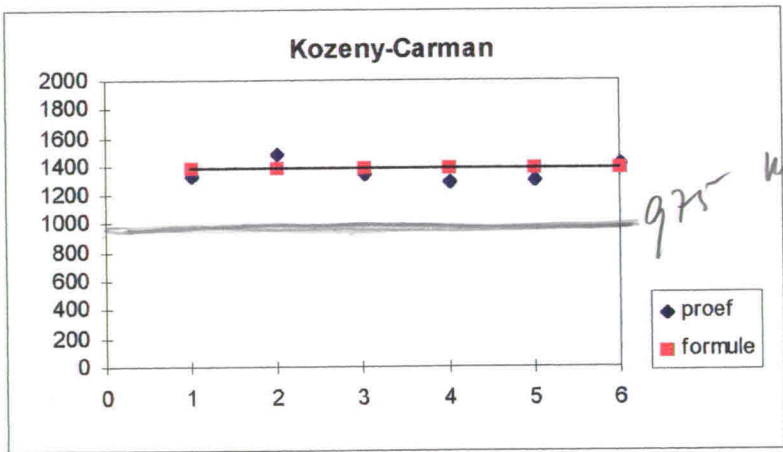
$$\frac{K}{d_{10}^2} \cdot \frac{(1 - n)^{2/3}}{(n - 0,13)^2} = C_{Terzaghi}$$

en

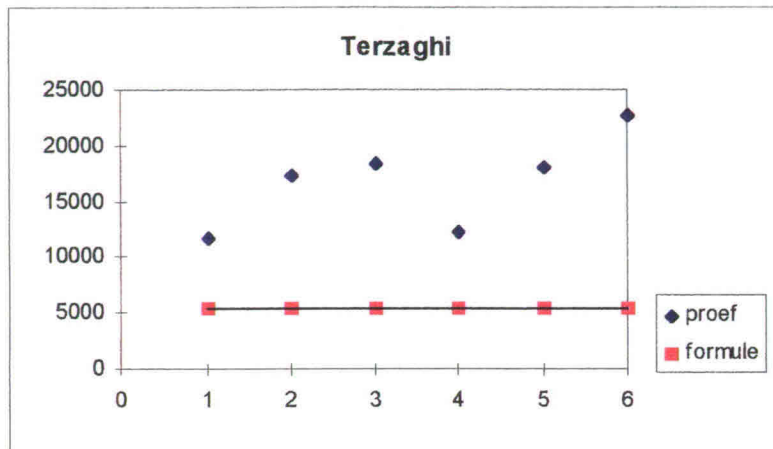
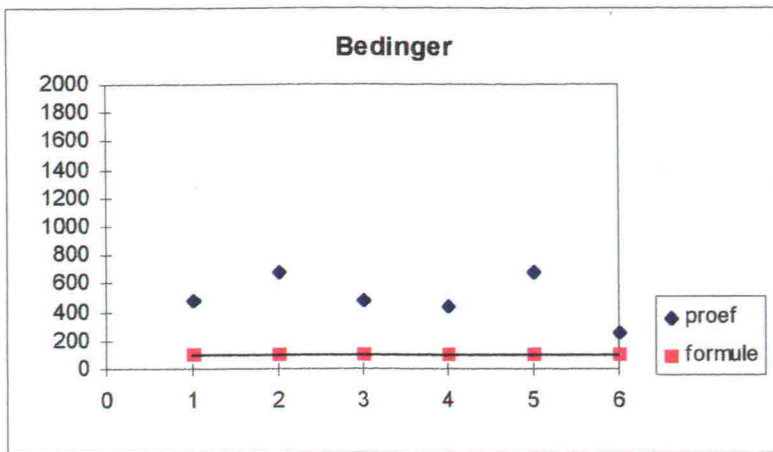
$$C_{Terzaghi} = 5450$$

Proef	$\frac{K}{d_{10}^2} \cdot \frac{(1 - n)^{2/3}}{(n - 0,13)^2}$	$C_{Terzaghi}$
1	11615	5450
2	17292	5450
3	18381	5450
4	12296	5450
5	18053	5450
6	22663	5450

Voor elke formule is onderstaand de gemeten constante (proef) uitgezet tegen de verwachte waarde (formule) in een diagram. Het verbinden van de verwachte waardes heeft geen betekenis en dient alleen om de afwijkingen beter zichtbaar te maken.



Handwritten notes:
 Afgeleid van de
 Kozeny-Carman
 formule
 met h₀ = 5
 is een goede
 formule!



5.4 Vergelijking formules met proefresultaten

Om de spreiding van een groep uitkomsten uit te drukken in een getal met dezelfde eenheid als deze uitkomsten wordt de *standaarddeviatie* (σ) berekend. Wanneer de waargenomen doorlatendheidscoëfficiënt in cm/s is uitgedrukt, is de standaarddeviatie ook een getal met die eenheid. Meer gewenst is het om de spreidingsmaat van de eenheid uit te drukken in een grootte die onafhankelijk is van de eenheid waarin de uitkomsten zijn gemeten. Dit wordt de *variatiecoëfficiënt* (v) genoemd. Deze is gedefinieerd als het quotient van de standaarddeviatie en het rekenkundig gemiddelde van de uitkomsten (X_g):

$$v = \frac{\sigma}{X_g}$$

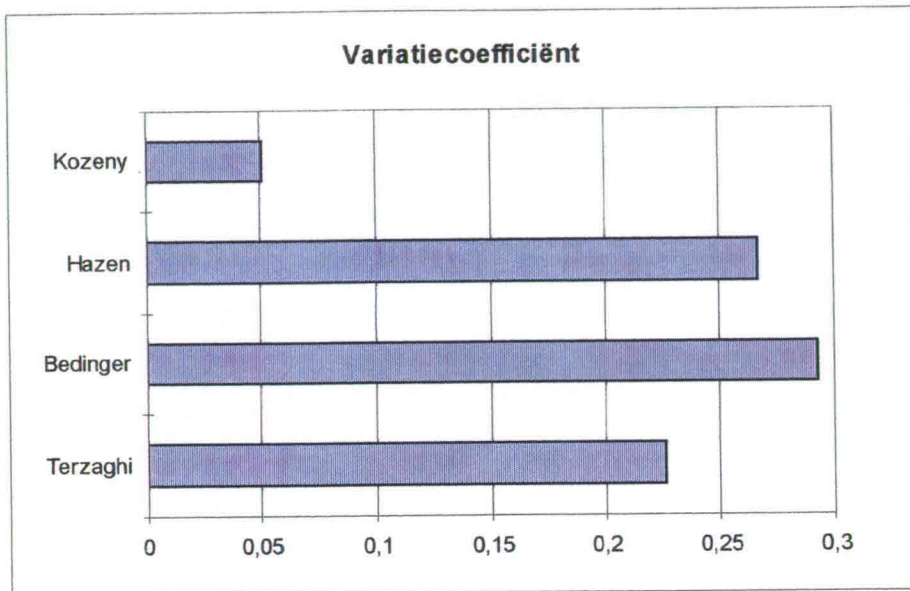
Eerst zal de variatiecoëfficiënt voor de verschillende formules worden bepaald, daarna wordt nagegaan of de waargenomen frequenties significant verschillen van die welke zouden worden verwacht op grond van de theoretische waarde.

↳ ?

5.4.1 Variatiecoëfficiënt formules

De berekeningsmethode voor de variatiecoëfficiënt en de resultaten zijn weergegeven in bijlage III. Samengevat geldt voor de verschillende formules :

Formule	Variatiecoëfficiënt
Kozeny-Carman	0,051
Hazen	0,267
Bedinger	0,293
Terzaghi	0,226



Uit bovenstaand diagram volgt een duidelijk onderscheid tussen de formule van Kozeny enerzijds, en de formules van Hazen, Bedinger en Terzaghi anderzijds. Tussen beide groepen zit gemiddeld een factor 5 verschil, wat aangeeft dat de spreiding van de resultaten met de formule van Kozeny-Carman aanzienlijk lager ligt dan de rest.

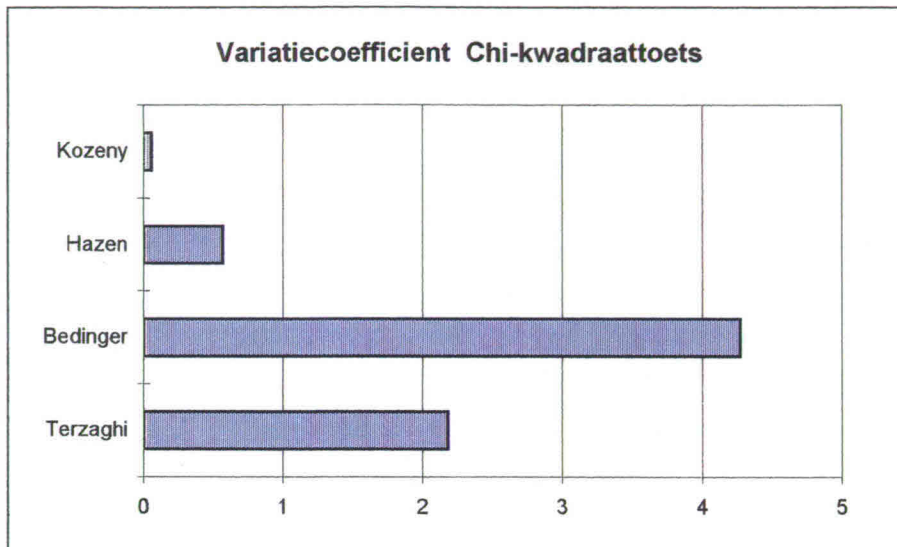
5.4.2 De chi-kwadraattoets

In deze paragraaf wordt nagegaan of de waargenomen frequenties significant verschillen van die welke zouden worden verwacht op grond van de theoretische / empirisch vastgestelde waarde. De berekeningsmethode voor de chi-kwadraattoets verschilt met die voor de variatiecoëfficiënt in één opzicht, te weten dat voor X_g niet het rekenkundig gemiddelde van de uitkomsten wordt genomen, maar de te verwachten theoretische of empirisch vastgestelde waarde. Voor de verschillende formules geldt :

Formule	X_g
Kozeny-Carman	$C_{Kozeny} = 1383$
Hazen	$C_{Hazen} = 1000$
Bedinger	$C_{Bedinger} = 100$
Terzaghi	$C_{Terzaghi} = 5450$

De resultaten zijn weergegeven in bijlage III. Samengevat geldt voor de verschillende formules :

Formule	Variatiecoëfficiënt Chi-kwadraattoets
Kozeny-Carman	0,054
Hazen	0,562
Bedinger	4,267
Terzaghi	2,181



Uit bovenstaand diagram blijkt dat de variatiecoëfficiënt van de formules onderling nogal verschillen. De formule van Bedinger geeft de grootste spreiding voor de proefresultaten ten opzichte van de verwachte waarde, de formule van Kozeny-Carman de kleinste: een verschil tussen beide van factor 80! De spreiding volgens Terzaghi en Hazen liggen er tussen in, waarvan Hazen de laagste spreiding vertoont. Het verschil met Kozeny-Carman is echter nog steeds ruim een factor 10.

5.5 Conclusie

Wat opvalt bij de vergelijking tussen beide diagrammen is dat de variatiecoëfficiënt voor Kozeny-Carman vrijwel gelijk is. Dit betekent dat de spreiding van de resultaten ten opzichte van het rekenkundig gemiddelde van de uitkomsten vrijwel gelijk is aan de spreiding van de resultaten t.o.v. van de verwachte waarde. Dit volgt ook uit de constante van Kozeny $C_{\text{kozeny}} = 1383$ en het rekenkundig gemiddelde van de resultaten = 1356 (2% verschil!).

De formule van Bedinger komt als slechtste uit de bus; de spreiding is in beide gevallen zeer groot. Wat betreft de uitdrukkingen van Hazen en Terzaghi kan gezegd worden dat de voorkeur in dit geval zeer zeker uitgaat naar die van Hazen; deze uitslag wordt gegeven naar aanleiding van de variatiecoëfficiënt voor de Chi-kwadraattoets. Deze coëfficiënt van Hazen is nog altijd ruim factor 10 groter vergeleken met Kozeny-Carman.

dit is "inkeelt"
 $C_{\text{kozeny}} = 1383$ is uit de resultaten berekend!
hier had dus eigenlijk 0% uit moeten komen!

Hoofdstuk 6 Conclusies

6.1 Conclusies

Er is al veel onderzoek gedaan naar de geldigheid van de relatie tussen korreldiameter en K-waarde. De kwadratische invloed van de korreldiameter op de K-waarde is door velen aangetoond, alleen de te gebruiken waarde voor de korreldiameter is onzeker.

Uit alle onderzoeken volgt dat de formule van Kozeny-Carman de relatie tussen korreldiameter en K-waarde het beste weergeeft. Er kan na het hier uitgevoerde onderzoek met sterk gegradeerde mengsels geconcludeerd worden dat deze relatie ook hier geldig is. Met behulp van de in hoofdstuk 2 uitgewerkte methode voor het bepalen van het specifiek oppervlak is de betrouwbaarheid van de formule van Kozeny-Carman aanzienlijk te vergroten. De voorspellingen verschillen dan nauwelijks met de gemeten waarden. De reden hiervoor is dat de invloed van de korreldiameter van elke fractie wordt meegerekend, in plaats van een kenmerkende of bepalende korreldiameter, zoals de d_{10} of d_{50} .

De formules van Hazen, Bedinger en Terzaghi zijn ontstaan op basis van opgedane ervaring en kennis in de praktijk, en hebben dus een subjectief karakter. Ze genieten een beperkte geldigheid daar ze betrekking hebben op lokale omstandigheden. Om deze reden zijn er amper universeel toepasbare regels uit af te leiden. Dit is zeer zeker waar voor Bedinger, die de grootste afwijkingen vertoont, maar minder voor Hazen. De formule van Hazen geeft redelijke voorspellingen en is als eerste schattingsformule redelijk goed, gezien de simpliciteit van de formule. Dit volgt ook uit andere onderzoeken. De formule van Terzaghi geeft evenals Bedinger geen betrouwbare resultaten.

De enige niet-vooraf te bepalen parameter is de k_0 -waarde. In dit onderzoek is deze constante bepaald als gemiddelde van de waarden die volgens de formule van Kozeny-Carman nodig zijn om de uitkomst overeen te laten komen met de meetgegevens. De afwijking van deze waarden onderling is overigens klein. Meer onderzoek naar deze constante is nodig voor een optimale toepassing van de formule.

6.2 Praktische waarde

Om de formule van Kozeny-Carman met succes in de praktijk te gebruiken zijn meerdere gegevens nodig dan voor andere formules. Een zeefkromme wordt altijd bepaald, waaruit op makkelijke wijze het specifiek oppervlak kan worden berekend. Een belangrijk punt is hier dat het zeven vaak nat gebeurt en dat het fijne zand onderhevig is aan uitspoeling. Zoals eerder al is gebleken is dit fijne zand een bepalende factor voor de doorlatendheid.

De dichtheid en viscositeit van het water zijn makkelijk te bepalen. Meer problemen levert de bepaling van de porositeit op, welke met redelijke grenzen te bepalen is. De geldigheid van deze waarde over een groot gebied is echter onzeker. De moeilijkste parameter om te bepalen is de Kozeny-Carman konstante k_0 . Het uitvoeren van meerdere doorlatendheidsproeven met een verschillende porositeit levert naar mijn mening een goede schatting voor deze konstante. Dit volgt ook uit het onderzoek.

Resultaten van laboratoriumproeven vertonen doorgaans grote spreidingen en zijn slecht reproduceerbaar. De resultaten worden dan ook meestal beschouwd als slecht bruikbaar bij baggertechnische waardering van grond in situ. Mijns inziens is de formule van Kozeny-Carman goed bruikbaar in de praktijk indien er zorgvuldig grondonderzoek wordt gedaan. Hoe preciezer de parameters worden bepaald, hoe nauwkeuriger de doorlatendheidscoëfficiënt.

toch wel
 $k=5$
7,09...
40%

die is toch theoretisch gebaseerd op 5?

?

?

wan dan?
zie blz 70 hier pag.
welk soort onderzoek bedoel je hier dan, als de lab. proeve niet bruikbaar zijn?

Symbolenlijst

Volgende alfabetisch
m?

Symbool	Eenheid	Betekenis
η	$\frac{kg}{m \cdot s}$	dynamische viscositeit
K	$\frac{m}{s}$	doorlatendheidscoëfficiënt / hydraulische doorlatendheid
γ	$\frac{kg}{m^3}$	volumegewicht
n	-	porositeit
k	m^2	intrinsieke doorlatendheid
k_o	-	Kozeny-Carman constante
τ	-	hydraulische kronkeligheid / tortuosity factor
g	$\frac{m}{s^2}$	zwaartekrachtsversnelling
V_G	m^3	volume grond
V_p	m^3	volume poriën
Q	$\frac{m^3}{s}$	debiet
q	$\frac{m}{s}$	specifiek debiet / filtersnelheid
v	$\frac{m}{s}$	debietsnelheid
S	m^{-1}	specifiek oppervlakte
U	m^{-1}	soortelijk oppervlakte
F	-	formatiefactor
d	mm	korreldiameter
d_{10}	mm	maatgevende korreldiameter
d_{50}	mm	mediaan
d_{60}	mm	gemiddelde korreldiameter

Literatuurlijst

- Archie, G The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics; 1942
- Bedinger, M Relation between median grain size and permeability in the Arkansas river valley, Arkansas; 1961
- Carman, P Flow of gasses through porous media; London, 1956
- Carman, P The determination of the specific surface of powders; 1938
- Coulson, J The flow of fluids through granular beds: the effect of particle shape and voids in streamline flow; 1949
- Darcy, H Les fontaines publiques de ville de Dyon; Paris, 1856
- Fahmy, M The influence of clay particles on the hydraulic conductivity of sandy soils; Wageningen, 1961
- Gibson, R An analysis of system flexibility and its effect on time lag in pore water pressure measurements; Geotechniques, 1963
- Harr, M Mechanics of particulate media; 1977
- Hazen, A Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration; 1892
- Hazen, A The filtration of public water-supplies; London, 1913
- Hooghoudt, S Bepaling van het uitwendig oppervlak van het minerale gronddeeltjescomplex; 1935
- Hooghoudt, S Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van den grond; 1934
- Jaky, J Fundamental notions on Soil Mechanics and their application in Engineering with particular regards to Hydraulic Construction; 1903
- Kozeny, J Über kapillare Leitung des Wassers im Boden; Wien, 1927
- Loudon, A Computation of permeability from simple soil tests; Geotechniques, 1952
- Masch, F and Denny, K Grain size distribution and its effects on the permeability of unconsolidated sands ; 1966
- Morcom, A Fluid flow through granular materials; 1946
- Riel, W. J. van Doorlatendheid-formatiefactorporositeit voor enkele theoretische modellen; Delft, 1972
- Riel, W. J. van De ondoorgrondelijke doorlatendheid, Cursus porositeit en permeabiliteit; 1975
- Rose, H Fluid flow through beds of granular material : some aspects of fluid flow; 1950
- Scheidegger, A The physics of flow through porous media; Toronto, 1957
- Schmidt, J Beitrag zur Bestimmung der Durchlässigkeit nach Darcy für schluffige Sandfraktionen mit Hilfe von Kenngrößen des Kornhaufwerkes; 1971
- Slichter, C Theoretical investigation of the motion of ground waters; 1899
- Soudijn, B en Kock, R Geo-tubomechanica: Deel I Grondmechanica; 1972
- Stakman, W The relation between particle sizes, pore size and hydraulic conductivity of sand separates; Wageningen, 1966
- Sullivan, R and Hertel, K Advances in colloid science; New York, 1942
- Taylor, D Fundamentals of soil mechanics; London, 1948
- Terzaghi, K Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage; Wien, 1925
- Uffink, G De bepaling van de doorlatendheid aan de hand van de granulaire samenstelling van grondmonsters; RID-mededeling, 1983
- Wyllie, M and Gregory, A Fluid flow through unconsolidated porous aggregates; 1955

Zunker, F Beziehung zwischen Bodenbeschaffenheit und Entfernung der Sauger von
Dränungen; 1921
Zunker, F Die Durchlässigkeit des Bodens; 1932

Bijlage I Bepaling granulaire samenstelling

Voor het bepalen van de granulaire samenstelling van de grond moeten de korrelgrootten en de korrelverdeling bekend zijn. Om deze te bepalen, zijn twee methoden mogelijk, die het meest worden toegepast, te weten :

- a) zeven
- b) bezinken

De methode van bezinken wordt alleen toegepast voor het monstergedeelte met korrels kleiner dan 50μ . Daar er alleen wordt gekeken naar het gebied tussen 1000μ en 100μ , zal alleen de eerste methode worden behandeld.

De meest makkelijke manier om de korrel-grootte verdeling te bepalen is door het te zeven. Een representatief monster van het materiaal wordt gedroogd en boven in een zeefstel gebracht, bestaande uit zeven met naar beneden afnemende maaswijdte, en getrild. De zeven zijn genormaliseerd volgens N480. Na het trillen van het zeefstel blijft op iedere zeef een deel van het grondmonster liggen. De hoeveelheid materiaal, die op elke zeef blijft liggen wordt gewogen, en gewichtsfracties (meestal als percentage van het totale gewicht van het monster) worden bepaald. Nu is de in het grondmonster aanwezige hoeveelheid korrels van bepaalde diameters bekend.

De granulaire samenstelling van het grondmonster wordt nu weergegeven door die hoeveelheden op een bepaalde wijze uit te zetten. Op de horizontale as van een korrelverdelingsdiagram wordt de grootte van de zeefopening weergegeven. Dit wordt vaak op logaritmische schaal gedaan om de meestal geringe hoeveelheid kleine korrels beter weer te geven. Op de verticale as aan de linkerkant is aangegeven de hoeveelheid korrels, die kleiner is dan een bepaalde zeefopening. De hoeveelheden worden dan als gewichtspercentage van het totale monster cumulatief uitgezet.

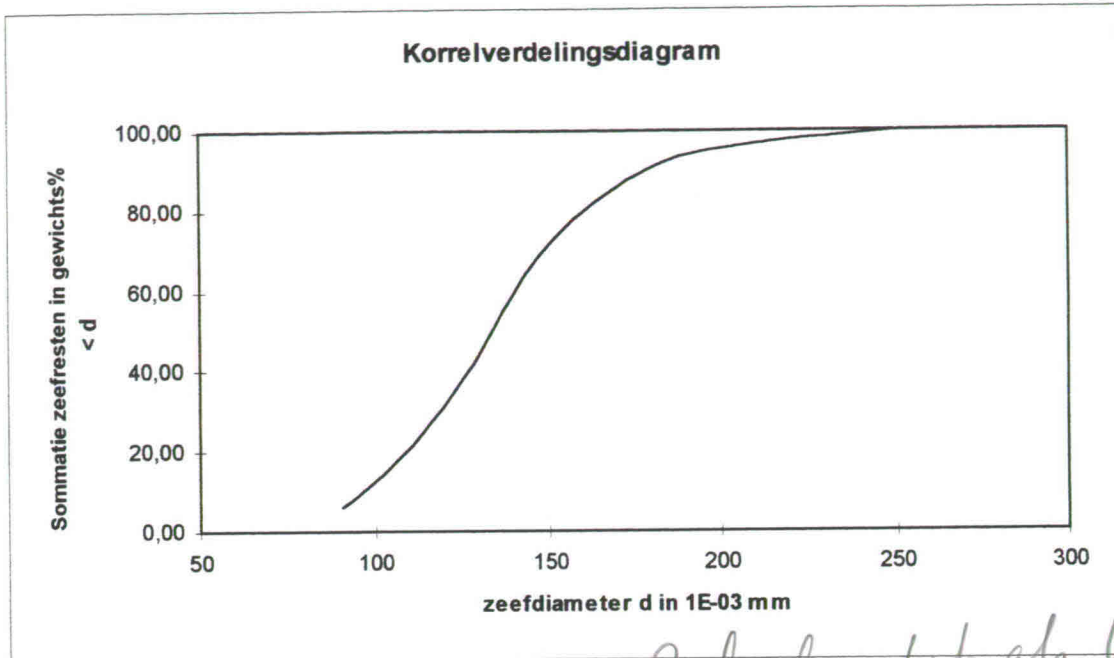
Als voorbeeld is de onderstaande tabel, waarin de zeefresultaten voor een zandmonster zijn weergegeven, in een korrelverdelingsdiagram weergegeven. Zie figuur I.1. De zeefopeningen zijn hier lineair uitgezet.

Zeefmaat in μm	Gewicht (gr)	Gewichts %	Sommatie gewichts %
250	0,24	2,85	100,00
212	0,51	6,06	97,15
180	1,62	19,24	91,09
150	2,85	33,85	71,85
125	1,71	20,31	38,00
106	0,98	11,64	17,69
90	0,38	4,51	6,05
	0,13	1,54	1,54
Totaal	8,42	100	

Uit het korrelverdelingsdiagram kunnen verschillende gegevens worden bepaald. De belangrijkste zijn :

- de gemiddelde korreldiameter d_{60} = de diameter ten opzichte waarvan 60 gewichtsprocent van het monster kleiner is.
- de maatgevende korreldiameter d_{10} = de diameter ten opzichte waarvan 10 gewichtsprocent van het monster kleiner is.
- de mediaan d_{50} = de diameter ten opzichte waarvan 50 gewichtsprocent van het monster kleiner is.

- de gelijkmatigheidsfactor $d_{60}/d_{10} =$ de verhouding tussen de gemiddelde en de maatgevende korreldiameter.



Figuur I.1

hoe kan dat als U de mensie loos is volgens deze

Een ander veelgebruikt gegeven dat uit het korrelverdelingsdiagram kan worden bepaald is het U-cijfer, dat de fijnheid van het materiaal kenmerkt. Het U-cijfer is de verhouding van het gezamenlijk oppervlak van een bepaald gewicht aan bolvormig gedachte korrels tot het gezamenlijk oppervlak van een zelfde hoeveelheid bolletjes van dezelfde materie, met als diameter 1 cm. Naarmate zandkorrels kleiner zijn neemt het totale oppervlakte toe, waardoor het U-cijfer toeneemt, en de doorlatendheid kleiner wordt. Het U-cijfer (soortelijk oppervlak) is dus groter naarmate het materiaal fijner is.

De factor $1/U$ kan hier gezien worden als de soortelijke diameter (d^*), een denkbeeldige korrelgrootte van het monster. Het bepalen van het U-cijfer uit het korrelverdelingsdiagram is overigens een intensieve rekenpartij, waarbij de formule van Zunker (1921) voor het berekenen van het soortelijk oppervlak wordt gebruikt.

Bij de afleiding is door Zunker verondersteld dat het gedeelte tussen d_1 en d_2 van een korrelverdelingsdiagram een rechte lijn is (met logaritmische schaal voor de horizontale as). Met toepassing van de integratiemethode op de rechte lijn is het resultaat :

$$U = \frac{1}{d^*} = \frac{4.343}{(\log d_2 - \log d_1)} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad \text{met } d^* \text{ in cm}$$

waarin d_1 = middellijn van de kleinste korrels van de subfractie
 d_2 = middellijn van de grootste korrels van de subfractie

Deze uitdrukking is niet een empirisch resultaat maar een rekenroutine. Een nadeel van deze methode is dat het gebruik van semi-logaritmisch papier een zekere vertekening oplevert. De waarde U geeft het soortelijk oppervlakte en niet het specifieke oppervlakte aan, maar hangt ermee samen door $S=6 \cdot U=6/d^*$.

Bijlage II Resultaten doorlatendheidsproeven

De proefresultaten zijn weergegeven per proef, waarbij eerst de samenstelling van het zandmonster zowel in tabelvorm als grafisch is weergegeven. Hierna volgen de gemeten waarden tijdens de proef en de daaruit volgende doorlatendheidscoëfficiënt K . Ook de doorlatendheidscoëfficiënt volgens Kozeny-Carman wordt hier berekend, omdat de gegevens die hier voor nodig zijn snel uit de gemeten waarden volgen.

In onderstaande tabel is de (dynamische) viscositeit η van het water gegeven voor de temperatuur. Voor een tussenliggende temperatuur wordt lineair geïnterpoleerd.

Temperatuur in °C	Viscositeit η in cP
18	1,053
19	1,027
20	1,002
21	0,9779
22	0,9548

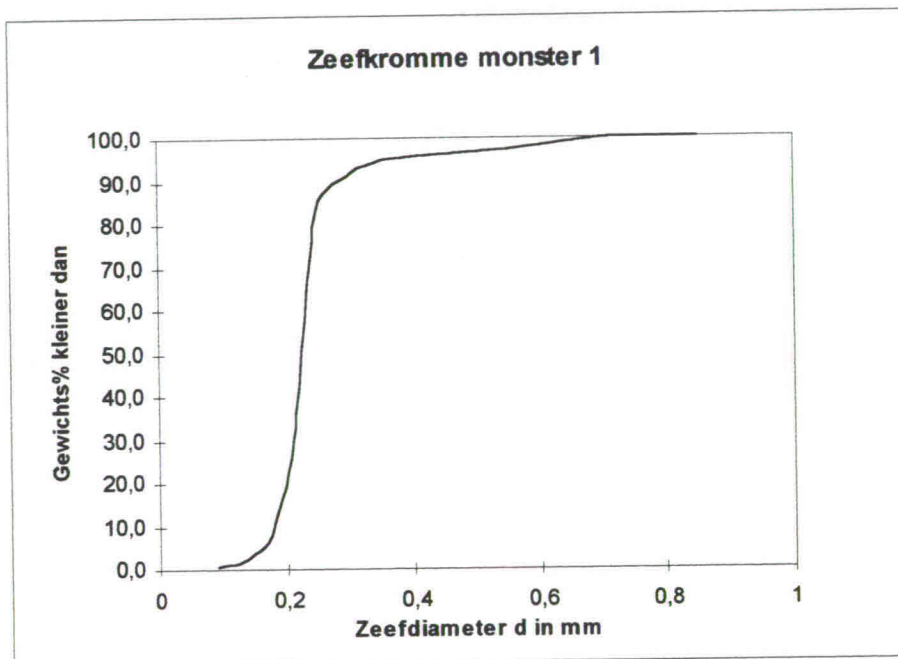
De dichtheid van het zand is voor elke fractie bepaald met behulp van een pyknometer en bedraagt $2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

In de onderstaande tabel zijn de in deze bijlage berekende waarden voor de doorlatendheidscoëfficiënt samengevat.

Proef / Monster	K volgens proef in cm/s	K volgens Kozeny-Carman in cm/s
1	0,02778	0,02900
2	0,08295	0,07732
3	0,12362	0,12638
4	0,19572	0,20016
5	0,05282	0,05373
6	0,06514	0,06318

Proef 1

Fractie	Gewicht (gr)	Gewichts- percentage (ΔF)	Percentage kleiner dan (%)
0,85	0	0,0	100
0,71	33	2,1	100
0,60	16,5	1,0	97,9
0,50	16,5	1,0	96,9
0,42	16,5	1,0	95,9
0,35	49,5	3,1	94,9
0,30	132	8,2	91,8
0,25	858	53,3	83,6
0,21	363	22,6	30,3
0,175	66	4,1	7,7
0,15	33	2,1	3,6
0,125	8,25	0,5	1,5
0,106	8,25	0,5	1,0
0,09	8,25	0,5	0,5
Totaal	1608,75		



Metingen

Debietmeting en stijghoogtes :

Meting	Volume in cm ³	Tijd t in s	Temperatuur in °C	Stijgbuis nr.	Plaathoogte in cm	Stijghoogte in cm
1	500	299,15	21	1	0	0
2	500	302,40	21	2	4,5	8,75
3	500	299,67	21	3	12,5	28,1
4	500	300,54	21	4	18,4	40,3
5	500	301,16	21	5	26,3	53,4
6	500	299,53	21	6	34,3	53,4

L_{monster}	=	21,3	cm
Gewicht zand	=	978,60	gram

Resultaten

Met de afmetingen van de cylinder en de gemeten waarden kunnen de volgende gegevens berekend worden :

V_{korrels}	=	369,3	cm ³
V_{monster}	=	572,2	cm ³
V_{porien}	=	202,9	cm ³
n	=	0,35	
dH	=	47,5	cm
i	=	2,23	
k_o	=	7,40	
k_o^*	=	7,09	
S	=	22855	m ⁻¹
t_{gem}	=	300,4	s
Q	=	1,66	cm ³ /s
d_{10}	=	0,179	mm
d_{50}	=	0,255	mm

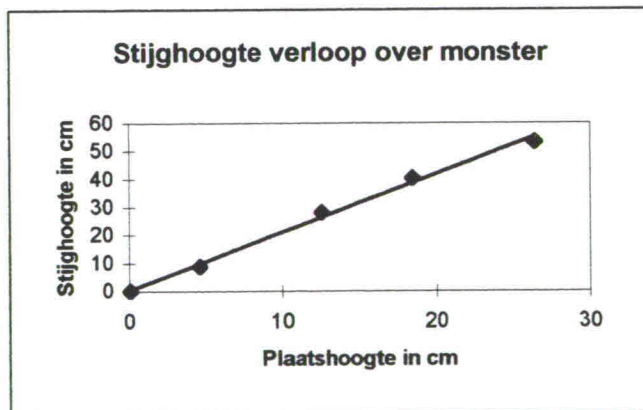
met $k_o = 7,09$?

Uit de meetgegevens is met behulp van de formule $Q = K \cdot A \cdot \frac{dH}{dL}$ de doorlatendheidscoëfficiënt K te bepalen

$$K = 0,0278 \text{ cm/s}$$

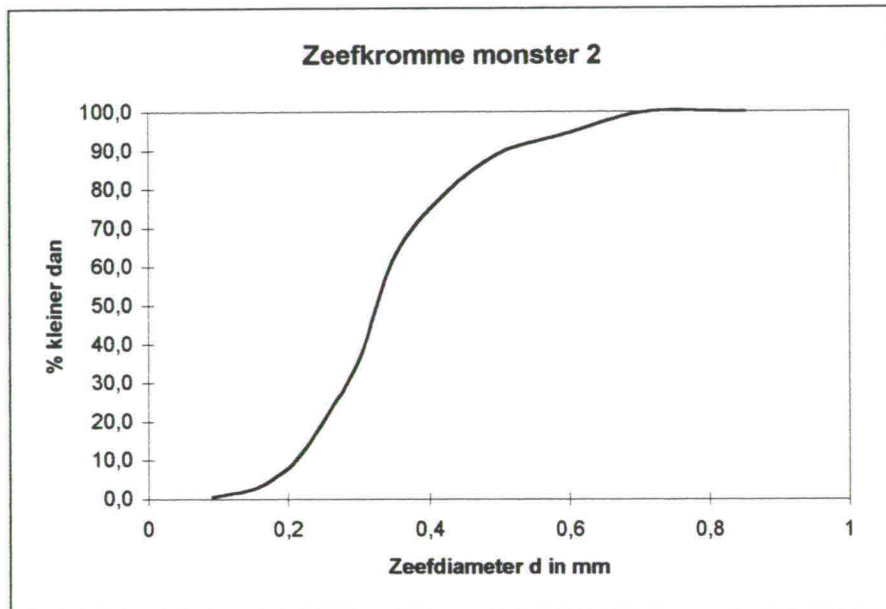
Gebruik makend van de formule van Kozeny-Carman wordt voor de doorlatendheidscoëfficiënt K een waarde berekend van : $K = 0,0290 \text{ cm/s}$

De veronderstelling dat het monster homogeen is heeft als uitkomst een lineair verband tussen het verloop van de stijghoogte en de plaatshoogte. De gemeten waarden zijn in onderstaande grafiek weergegeven.



Proef 2

Fractie	Gewicht (gr)	Gewichts- percentage (ΔF)	Percentage kleiner dan (%)
0,85	0	0,0	100
0,71	52	5,3	100
0,60	52	5,3	94,7
0,50	104	10,6	89,4
0,42	155	15,8	78,8
0,35	259	26,4	62,9
0,30	155	15,8	36,5
0,25	104	10,6	20,7
0,21	52	5,3	10,1
0,175	21	2,1	4,8
0,15	10	1,0	2,6
0,125	5,2	0,5	1,6
0,106	5,2	0,5	1,1
0,09	5,2	0,5	0,5
Totaal	979,6		



Metingen

Debietmeting en stijghoogtes :

Meting	Volume in cm^3	Tijd t in s	Temperatuur in $^{\circ}\text{C}$	Stijgbuis nr.	Plaathoogte in cm	Stijghoogte in cm
1	500	105,93	21	1	0	0
2	500	105,88	21	2	4,5	10,25
3	500	105,29	21	3	12,5	27,0
4	500	105,96	21	4	18,4	38,5
5	500	105,89	21	5	26,3	50,0
6	500	105,91	21	6	34,3	50,0

$L_{\text{monster}} = 22,4 \text{ cm}$
 $\text{Gewicht zand} = 979,60 \text{ gram}$

Resultaten

Met de afmetingen van de cylinder en de gemeten waarden kunnen de volgende gegevens berekend worden :

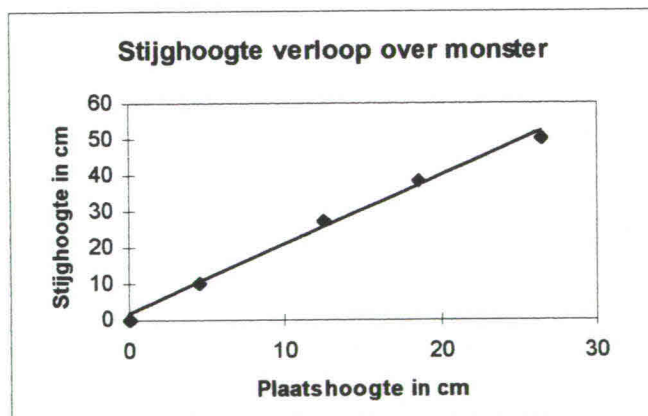
$V_{\text{korrels}} = 369,3 \text{ cm}^3$
 $V_{\text{monster}} = 601,8 \text{ cm}^3$
 $V_{\text{porien}} = 232,5 \text{ cm}^3$
 $n = 0,39$
 $dH = 47,5 \text{ cm}$
 $i = 2,12$
 $k_o = 6,61$
 $k_o^* = 7,09$
 $S = 16737 \text{ m}^{-1}$
 $t_{\text{gem}} = 105,8 \text{ s}$
 $Q = 4,73 \text{ cm}^3/\text{s}$
 $d_{10} = 0,210 \text{ mm}$
 $d_{50} = 0,326 \text{ mm}$

Uit de meetgegevens is met behulp van de formule $Q = K \cdot A \cdot \frac{dH}{dL}$ de doorlatendheidscoëfficiënt K te bepalen

: $K = 0,0830 \text{ cm}^3/\text{s}$

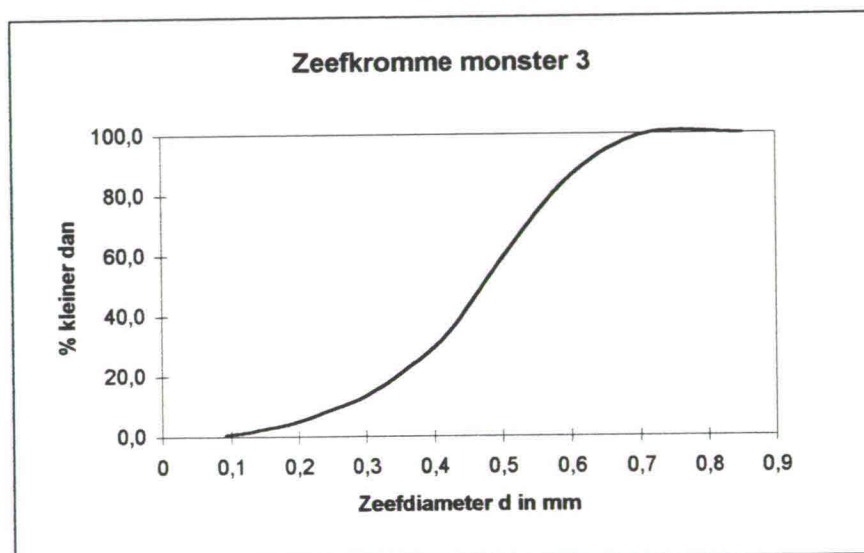
Gebruik makend van de formule van Kozeny-Carman wordt voor de doorlatendheidscoëfficiënt K een waarde berekend van : $K = 0,0773 \text{ cm}^3/\text{s}$

De veronderstelling dat het monster homogeen is heeft als uitkomst een lineair verband tussen het verloop van de stijghoogte en de plaatshoogte. De gemeten waarden zijn in onderstaande grafiek weergegeven.



Proef 3

Fractie	Gewicht (gr)	Gewichts- percentage (ΔF)	Percentage kleiner dan (%)
0,85	0	0,0	100
0,71	133,0	13,6	100
0,60	266,0	27,2	86,4
0,50	245,0	25,0	59,2
0,42	128,0	13,1	34,2
0,35	74,0	7,6	21,1
0,30	43,0	4,4	13,6
0,25	32,0	3,3	9,2
0,21	21,0	2,1	5,9
0,175	11,0	1,1	3,8
0,15	11,0	1,1	2,7
0,125	5,0	0,5	1,5
0,106	5,0	0,5	1,0
0,09	5,0	0,5	0,5
Totaal	979,0		



Metingen

Debietmeting en stijghoogtes :

Meting	Volume in cm^3	Tijd t in s	Temperatuur in $^{\circ}\text{C}$	Stijgbuis nr.	Plaathoogte in cm	Stijghoogte in cm
1	500	70,41	20,5	1	0	0
2	500	70,82	20,5	2	4,5	10,15
3	500	71,17	20,5	3	12,5	25,15
4	500	70,74	20,5	4	18,4	37,0
5	500	70,41	20,5	5	26,3	48,5
6	500	70,55	20,5	6	34,3	48,5

L_{monster}	=	22,3	cm
Gewicht zand	=	979,0	gram

Resultaten

Met de afmetingen van de cylinder en de gemeten waarden kunnen de volgende gegevens berekend worden :

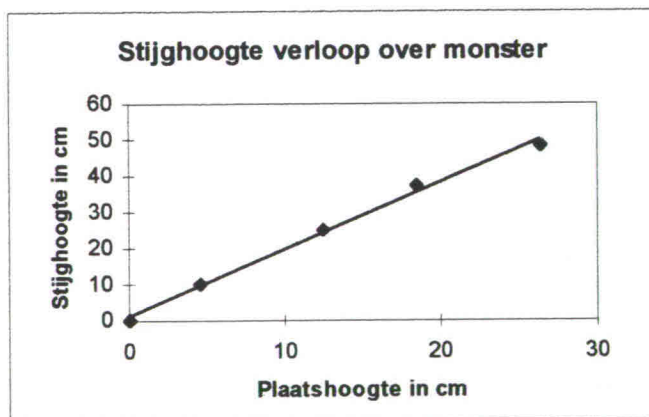
V_{korrels}	=	369,4	cm^3
V_{monster}	=	599,1	cm^3
V_{porien}	=	229,6	cm^3
n	=	0,38	
dH	=	47,5	cm
i	=	2,13	
k_o	=	7,25	
k_o^*	=	7,09	
S	=	12797	m^{-1}
t_{gem}	=	70,7	s
Q	=	7,07	cm^3/s
d_{10}	=	0,260	mm
d_{50}	=	0,471	mm

Uit de meetgegevens is met behulp van de formule $Q = K \cdot A \cdot \frac{dH}{dL}$ de doorlatendheidscoëfficiënt K te bepalen

: $K = 0,1236 \text{ cm}^2/\text{s}$

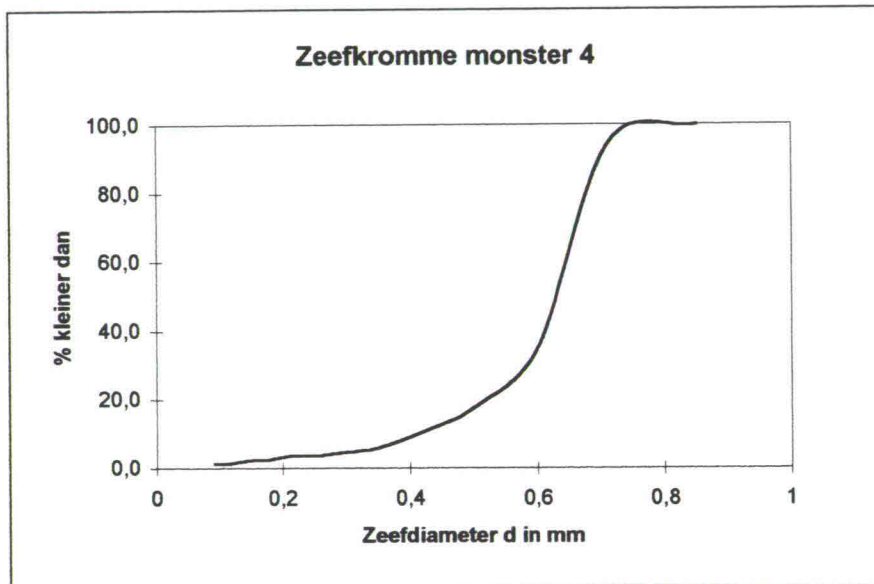
Gebruik makend van de formule van Kozeny-Carman wordt voor de doorlatendheidscoëfficiënt K een waarde berekend van : $K = 0,1264 \text{ cm}^2/\text{s}$

De veronderstelling dat het monster homogeen is heeft als uitkomst een lineair verband tussen het verloop van de stijghoogte en de plaatshoogte. De gemeten waarden zijn in onderstaande grafiek weergegeven.



Proef 4

Fractie	Gewicht (gr)	Gewichts- percentage (ΔF)	Percentage kleiner dan (%)
0,85	0	0,0	100
0,71	625,0	62,5	100
0,60	187,5	18,8	37,5
0,50	75,0	7,5	18,8
0,42	50,0	5,0	11,3
0,35	12,5	1,3	6,3
0,30	12,5	1,3	5
0,25	0,0	0,0	3,8
0,21	12,5	1,3	3,8
0,175	0,0	0,0	2,5
0,15	6,3	0,6	2,5
0,125	6,3	0,6	1,9
0,106	0,0	0,0	1,3
0,09	12,5	1,3	1,3
Totaal	1000,0		



Metingen

Debietmeting en stijghoogtes :

Meting	Volume in cm^3	Tijd t in s	Temperatuur in $^{\circ}\text{C}$	Stijgbuis nr.	Plaatshoogte in cm	Stijghoogte in cm
1	500	45,82	19	1	0	0
2	500	45,65	19	2	4,5	9,5
3	500	45,27	19	3	12,5	26,0
4	500	45,79	19	4	18,4	37,5
5	500	45,53	19	5	26,3	49,0
6	500	45,81	19	6	34,3	49,0

$L_{\text{monster}} = 22,8 \text{ cm}$
 Gewicht zand = 1000,0 gram

Resultaten

Met de afmetingen van de cilinder en de gemeten waarden kunnen de volgende gegevens berekend worden :

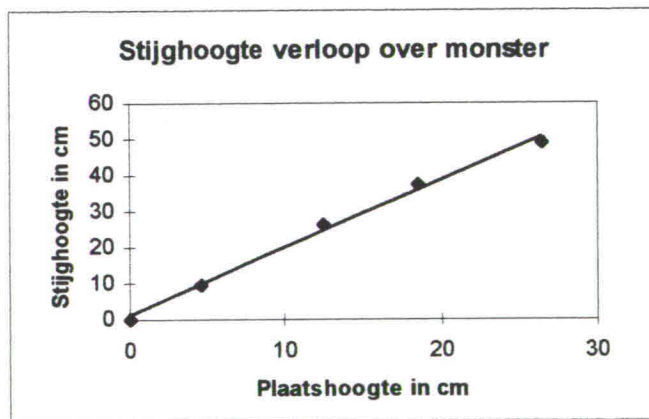
$V_{\text{korrels}} = 377,4 \text{ cm}^3$
 $V_{\text{monster}} = 612,5 \text{ cm}^3$
 $V_{\text{porien}} = 235,2 \text{ cm}^3$
 $n = 0,38$
 $dH = 47,5 \text{ cm}$
 $i = 2,08$
 $k_o = 7,25$
 $k_o^* = 7,09$
 $S = 10016 \text{ m}^{-1}$
 $t_{\text{gem}} = 45,7 \text{ s}$
 $Q = 10,95 \text{ cm}^3/\text{s}$
 $d_{10} = 0,400 \text{ mm}$
 $d_{50} = 0,622 \text{ mm}$

Uit de meetgegevens is met behulp van de formule $Q = K \cdot A \cdot \frac{dH}{dL}$ de doorlatendheidscoëfficiënt K te bepalen

: $K = 0,1957 \text{ cm}^2/\text{s}$

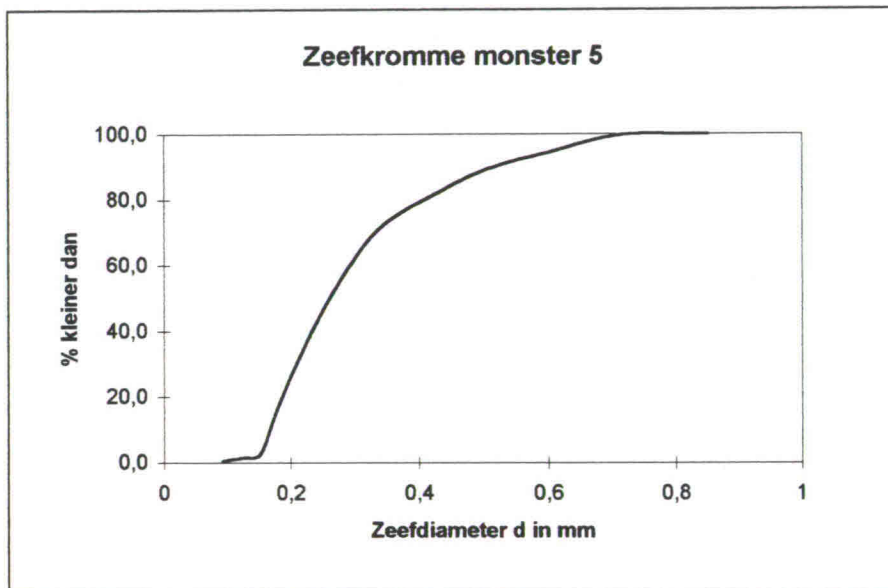
Gebruik makend van de formule van Kozeny-Carman wordt voor de doorlatendheidscoëfficiënt K een waarde berekend van : $K = 0,2002 \text{ cm}^2/\text{s}$

De veronderstelling dat het monster homogeen is heeft als uitkomst een lineair verband tussen het verloop van de stijghoogte en de plaatshoogte. De gemeten waarden zijn in onderstaande grafiek weergegeven.



Proef 5

Fractie	Gewicht (gr)	Gewichts- percentage (ΔF)	Percentage kleiner dan (%)
0,85	0	0,0	100
0,71	52,9	5,3	100
0,60	52,9	5,3	94,7
0,50	79,3	7,9	89,4
0,42	79,3	7,9	81,5
0,35	105,7	10,6	73,6
0,30	158,6	15,9	63,0
0,25	158,6	15,9	47,1
0,21	158,6	15,9	31,3
0,175	126,8	12,7	15,4
0,15	10,6	1,1	2,8
0,125	6,4	0,6	1,7
0,106	5,3	0,5	1,1
0,09	5,3	0,5	0,5
Totaal	1000,3		



Metingen

Debietmeting en stijghoogtes :

Meting	Volume in cm ³	Tijd t in s	Temperatuur in °C	Stijgbuis nr.	Plaatshoogte in cm	Stijghoogte in cm
1	500	172,20	20	1	0	0
2	500	171,04	20	2	4,5	9,8
3	500	171,86	20	3	12,5	25,9
4	500	171,01	20	4	18,4	38,5
5	500	169,66	20	5	26,3	49,75
6	500	172,40	20	6	34,3	49,75

$L_{\text{monster}} = 23,1 \text{ cm}$
 $\text{Gewicht zand} = 1000,3 \text{ gram}$

Resultaten

Met de afmetingen van de cylinder en de gemeten waarden kunnen de volgende gegevens berekend worden :

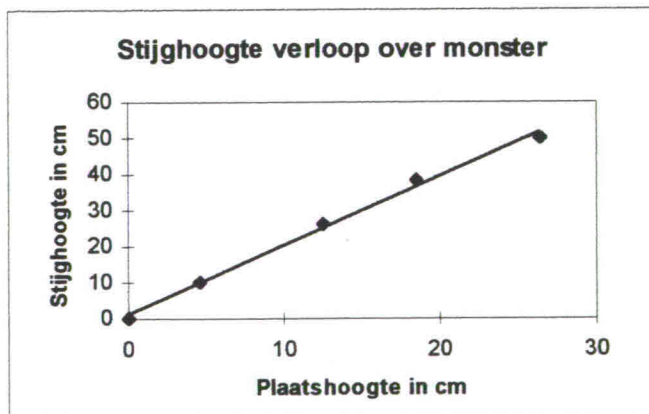
$V_{\text{korrels}} = 377,5 \text{ cm}^3$
 $V_{\text{monster}} = 620,6 \text{ cm}^3$
 $V_{\text{porien}} = 243,1 \text{ cm}^3$
 $n = 0,39$
 $dH = 47,5 \text{ cm}$
 $i = 2,06$
 $k_{o^*} = 7,21$
 $k_o = 7,09$
 $S = 20181 \text{ m}^{-1}$
 $t_{\text{gem}} = 171,4 \text{ s}$
 $Q = 2,92 \text{ cm}^3/\text{s}$
 $d_{10} = 0,164 \text{ mm}$
 $d_{50} = 0,259 \text{ mm}$

Uit de meetgegevens is met behulp van de formule $Q = K \cdot A \cdot \frac{dH}{dL}$ de doorlatendheidscoëfficiënt K te bepalen

: $K = 0,0528 \text{ cm}^2/\text{s}$

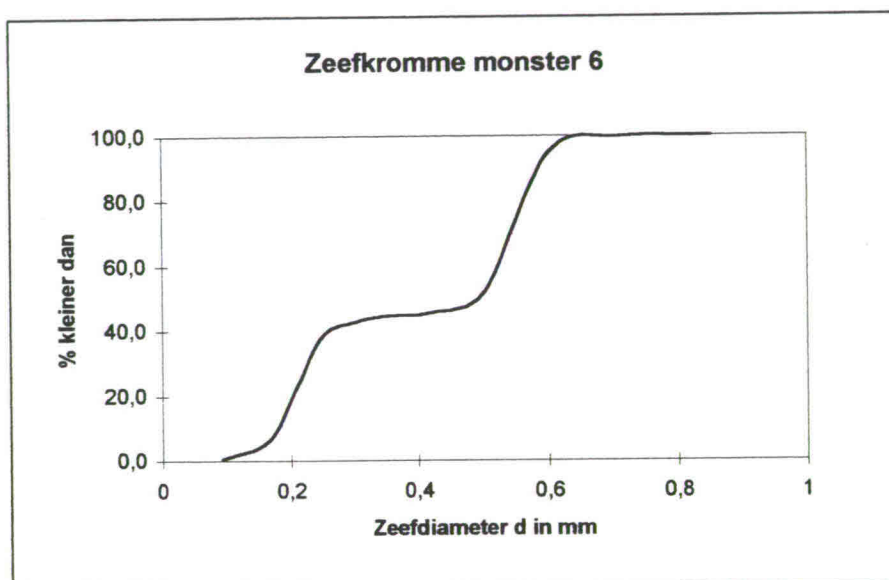
Gebruik makend van de formule van Kozeny-Carman wordt voor de doorlatendheidscoëfficiënt K een waarde berekend van : $K = 0,0537 \text{ cm}^2/\text{s}$

De veronderstelling dat het monster homogeen is heeft als uitkomst een lineair verband tussen het verloop van de stijghoogte en de plaatshoogte. De gemeten waarden zijn in onderstaande grafiek weergegeven.



Proef 6

Fractie	Gewicht (gr)	Gewichts- percentage (ΔF)	Percentage kleiner dan (%)
0,85	0	0,0	100
0,71	47,0	4,7	100
0,60	430,0	42,9	95,3
0,50	66,0	6,6	52,5
0,42	9,5	0,9	45,9
0,35	19,0	1,9	44,9
0,30	40,0	4,0	43,0
0,25	150,0	15,0	39,0
0,21	150,0	15,0	24,0
0,175	47,0	4,7	9,0
0,15	19,0	1,9	4,3
0,125	9,5	0,9	2,4
0,106	9,5	0,9	1,5
0,09	5,0	0,5	0,5
Totaal	1000		



Metingen

Debietmeting en stijghoogtes :

Meting	Volume in cm^3	Tijd t in s	Temperatuur in $^{\circ}\text{C}$	Stijgbuis nr.	Plaatshoogte in cm	Stijghoogte in cm
1	500	134,20	20,5	1	0	0
2	500	132,75	20,5	2	4,5	9,0
3	500	134,84	20,5	3	12,5	27,0
4	500	136,30	20,5	4	18,4	38,0
5	500	132,25	20,5	5	26,3	50,5
6	500	134,53	20,5	6	34,3	50,5

L_{monster}	=	22,3	cm
Gewicht zand	=	1001,5	gram

Resultaten

Met de afmetingen van de cylinder en de gemeten waarden kunnen de volgende gegevens berekend worden :

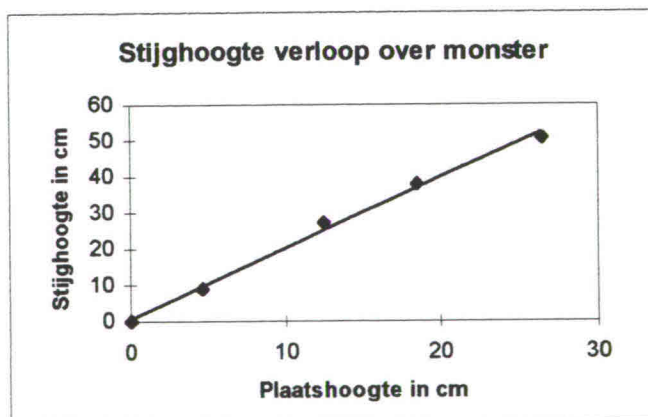
V_{korrels}	=	377,9	cm^3
V_{monster}	=	599,1	cm^3
V_{porien}	=	221,2	cm^3
n	=	0,37	
dH	=	47,5	cm
i	=	2,13	
k_o	=	6,88	
k_o^*	=	7,09	
S	=	16720	m^{-1}
t_{gem}	=	134,2	s
Q	=	3,73	cm^3/s
d_{10}	=	0,178	mm
d_{50}	=	0,472	mm

Uit de meetgegevens is met behulp van de formule $Q = K \cdot A \cdot \frac{dH}{dL}$ de doorlatendheidscoëfficiënt K te bepalen

: $K = 0,0651 \text{ cm}^2/\text{s}$

Gebruik makend van de formule van Kozeny-Carman wordt voor de doorlatendheidscoëfficiënt K een waarde berekend van : $K = 0,0632 \text{ cm}^2/\text{s}$

De veronderstelling dat het monster homogeen is heeft als uitkomst een lineair verband tussen het verloop van de stijghoogte en de plaatshoogte. De gemeten waarden zijn in onderstaande grafiek weergegeven.



Bijlage III Variatiecoëfficiënten en Chi-kwadraattoets

Variatiecoëfficiënten

Variantie $\sigma^2 = \sum \frac{(X_i - X_g)^2}{n}$

Standaard deviatie $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Variatiecoëfficiënt $v = \frac{\sigma}{X_g}$

Kozeny-Carman :

Proef	$K \cdot S^2 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \eta$	$(X_i - X_g)^2$	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	1325	971	162
2	1484	16341	2724
3	1336	407	68
4	1288	4647	774
5	1295	3741	624
6	1409	2791	465
Gemiddeld X_g	1356		

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
4816	69	0,051

Hazen :

Proef	$\frac{K}{(d_{10})^2}$	$(X_i - X_g)^2$	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	749	443834	73972
2	1625	44010	7335
3	1580	27097	4516
4	1057	128499	21417
5	1697	79178	13196
6	1784	136082	22680
Gemiddeld X_g	1415		

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
143117	378	0,267

Bedinger :

Proef	$\frac{K}{(d_{50})^2}$	$(X_i - X_g)^2$	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	475	656	109
2	675	30341	5057
3	482	336	56
4	438	3962	660
5	681	32676	5446
6	253	61547	10258
Gemiddeld X_g	501		

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
21586	147	0,293

Terzaghi :

Proef	$\frac{K}{(d_{10})^2} \cdot \frac{(1-n)^{2/3}}{(n-0,13)^2}$	$(X_i - X_g)^2$	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	11615	26028613	4338102
2	17292	330784	55131
3	18381	2770375	461729
4	12296	19544000	3257333
5	18053	1787493	297916
6	22663	35356462	5892744
Gemiddeld X_g	16716		

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
14302954	3782	0,226

Samengevat :

Formule van	Variatiecoëfficiënt v
Kozeny-Carman	0,051
Hazen	0,267
Bedinger	0,293
Terzaghi	0,226

Variatiecoëfficiënt Chi-kwadraattoets

Variantie $\sigma^2 = \sum \frac{(X_i - X_g)^2}{n}$

Standaard deviatie $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Variatiecoëfficiënt $v = \frac{\sigma}{X_g}$

Kozeny-Carman :

Proef	$K \cdot S^2 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \eta$	C_{kozeny}	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	1325	1383	561
2	1484	1383	1700
3	1336	1383	368
4	1288	1383	1504
5	1295	1383	1291
6	1409	1383	113
	Gemiddeld	X_g 1383	

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
5537	74	0,054

Hazen :

Proef	$\frac{K}{(d_{10})^2}$	C_{Hazen}	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	749	1000	10487
2	1625	1000	65136
3	1580	1000	56063
4	1057	1000	540
5	1697	1000	80911
6	1784	1000	102511
	Gemiddeld	X_g 1000	

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
315647	562	0,562

Bedinger :

Proef	$\frac{K}{(d_{50})^2}$	$C_{Bedinger}$	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	475	100	23437
2	675	100	55063
3	482	100	24356
4	438	100	19002
5	681	100	56330
6	253	100	3876
	Gemiddeld	X_g 100	

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
182064	427	4,267

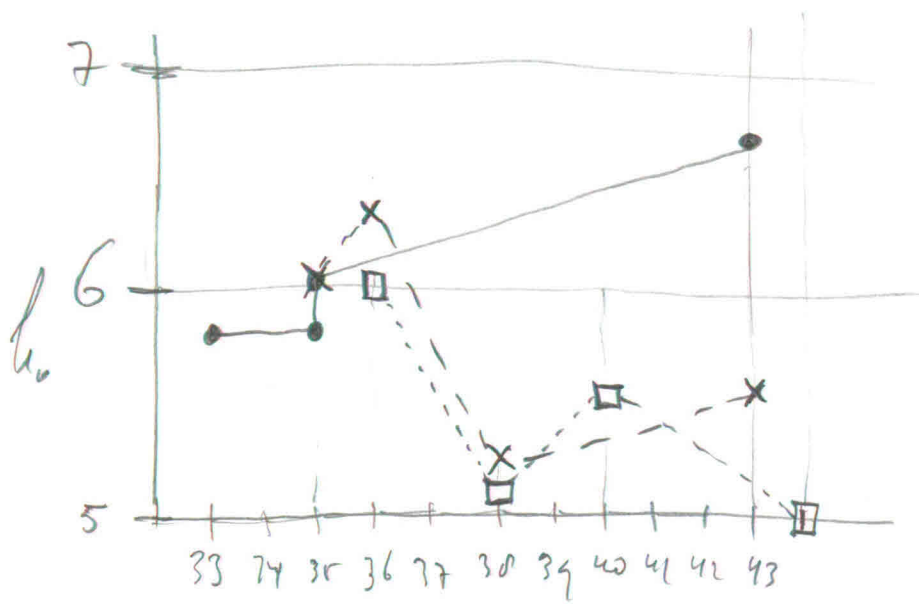
Terzaghi :

Proef	$\frac{K}{(d_{10})^2} \cdot \frac{(1-n)^{2/3}}{(n-0,13)^2}$	$C_{Terzaghi}$	$\frac{(X_i - X_g)^2}{n}$
1	11615	5450	6333711
2	17292	5450	23370425
3	18381	5450	27867885
4	12296	5450	7810288
5	18053	5450	26474257
6	22663	5450	49378659
	Gemiddeld	X_g 5450	

Variantie σ^2	Standaard deviatie σ	Variatiecoëfficiënt v
141235225	11884	2,181

Samengevat :

Formule van	Variatiecoëfficiënt Chi-kwadraattoets v
Kozeny-Carman	0,054
Hazen	0,562
Bedinger	4,267
Terzaghi	2,181



- 0,71 - 0,14
- × 0,60 - 0,71
- 0,50 - 0,60

Bijlage IV Bepaling k_0 fracties

Fractie 0,71 - 0,85 mm

Proef	t_{gem} (s)	$L_{monster}$ (cm)	Gewicht (gr)	n	S (m^{-1})	$K_{gemeten}$ (cm/s)	k_0
1	42,9	31,7	1464,9	0,35	7692,3	0,2897	5,865
2	40,0	24,3	1151,6	0,33	7692,3	0,2381	5,872
3	17,8	28,5	1151,6	0,43	7692,3	0,6286	6,618
4	42,5	31,8	1461,9	0,35	7692,3	0,2929	6,035

Fractie 0,60 - 0,71 mm

Proef	t_{gem} (s)	$L_{monster}$ (cm)	Gewicht (gr)	n	S (m^{-1})	$K_{gemeten}$ (cm/s)	k_0
1	57,9	29,5	1353,5	0,36	9160,3	0,1995	6,341
2	25,8	33,2	1353,5	0,43	9160,3	0,5048	5,513
3	59,8	29,5	1365,0	0,35	9160,3	0,1934	6,135
4	39,4	30,7	1365,0	0,38	9160,3	0,3057	5,189

Fractie 0,50 - 0,60 mm

Proef	t_{gem} (s)	$L_{monster}$ (cm)	Gewicht (gr)	n	S (m^{-1})	$K_{gemeten}$ (cm/s)	k_0
1	29,5	32,1	1291,0	0,44	10909,1	0,4267	4,985
2	48,8	28,8	1269,6	0,38	10909,1	0,2314	5,128
3	45,3	30,8	1313,4	0,40	10909,1	0,2667	5,556
4	68,8	28,5	1291,0	0,36	10909,1	0,1623	6,039

Samengevat

Proevenserie	Gemiddelde k_0
0,71 - 0,85 mm	6,083
0,60 - 0,71 mm	5,757
0,50 - 0,60 mm	5,340

Het gemiddelde van k_0 voor alle proeven is $k_0 = 5,75$

