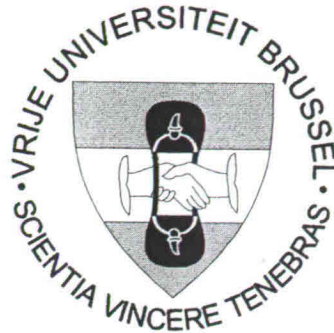


Vrije Universiteit Brussel



Faculteit Toegepaste Wetenschappen  
Hydrologie en Waterbouwkunde

**De geotechnische aspecten van baggeren:  
de bepaling van de walssnelheid en  
de berekening van zuigputproducties.**

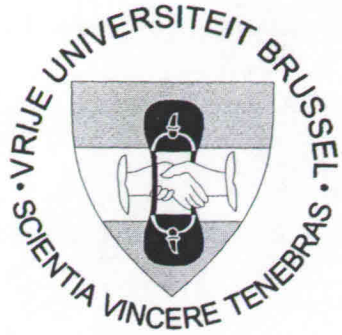
Promotor: J. J. Peters  
Academiejaar 1998-1999

Proefschrift ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk  
Bouwkundig Ingenieur

door  
Tom Lauwagie



Vrije Universiteit Brussel



Faculteit Toegepaste Wetenschappen  
Hydrologie en Waterbouwkunde

**De geotechnische aspecten van baggeren:  
de bepaling van de walssnelheid en  
de berekening van zuigputproducties.**

Promotor: J. J. Peters  
Academiejaar 1998-1999

Proefschrift ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk  
Bouwkundig Ingenieur

door  
Tom Lauwagie

*If you have to contend with water,  
first use experience, then reason.*

*Leonardo Da Vinci*

***Dankwoord***

Vooreerst wens ik Professor Jean Jacques Peters en Marc Van Den Broeck te bedanken, omdat zij mij de mogelijkheid gaven dit afstudeerwerk in verband met de geotechnische aspecten van baggertechnieken te maken. Tevens wens ik ze, samen met Pierre Smekens, te bedanken voor hun geboden begeleiding.

Tenslotte sta ik erop mijn vader te bedanken voor de hulp die hij me bood bij de controle van de typografie.

*Tom Lauwagie, April 99.*

---

## **Samenvatting**

### **1. Nederlands**

Uitgraven door middel van erosie door middel van de zwaartekracht is een van de meest economische manieren om niet cohesive gronden te baggeren. In dit proces wordt, door een zuigbuis, een onstabiel grondtalud gecreëerd. De productie wordt dan bepaald door de hoeveelheid zand die naar de zuigmond kan toestromen. Deze hoeveelheid zand is afhankelijk van de verplaatsingssnelheid van het onstabiele talud. De beweging van dit talud wordt beschreven aan de hand van de "walsnelheid". In deze thesis worden verschillende methodes om de "walsnelheid" te berekenen opgesteld, onderzocht en vergeleken samen met formules voor de berekening van putproducties.

### **2. English**

One of the most cost effective ways to dredge non-cohesive soils is by means of excavation by gravitational flows. In this process a suction pipe creates an unstable slope of soil. The production is determined by the rate at which the soil is able to flow towards the suction mouth and this rate is mainly controlled by the displacement velocity of the unstable slope. The movement of this unstable slope is described by the "wall velocity". In the thesis different methods to calculate this "wall velocity" are drawn up, examined and compared together with formulas to calculate pit productions.

### **3. Français**

L'excavation à moyen d'érosion par la pesanteur est une des pratiques les plus économiques pour draguer un sol de nature non-cohésive. Au long de ce procès un talud labile est créé à l'aide d'un tube aspirateur. La production est déterminée par la quantité de sable que peut affluer vers la bouche du tube. Cette quantité de sable dépend de la vitesse de déplacement du talud instable. Le mouvement de ce talud peut être décrit d'après la vitesse de mur de terre. Différentes méthodes de calcul de cette vitesse de mur de terre sont élaborées, examinées et comparées dans ce mémoire en même temps que les formules pour le calcul de la productions du puis.

## Inhoudstafel

HOOFDSTUK 1: HET BEGRIP "WALSNELHEID" .....	18.
1.1. INLEIDING .....	18.
1.2. DE ORIËNTERENDE ZUIGPROEVEN .....	18.
1.3. INVLOED VAN DE PAKKING .....	20.
1.4. BESLUITEN .....	20.
1.5. OVERZICHT .....	21.
HOOFDSTUK 2: DE WALSNELHEID: THEORETISCHE BESCHRIJVING .....	22.
2.1. DILATANTIE .....	22.
2.2. THEORETISCH MODEL VAN DE WALSNELHEID .....	23.
2.2.1. THEORETISCHE BESCHRIJVING .....	23.
2.2. ANALYTISCHE UITDRUKKING .....	25.
HOOFDSTUK 3: EMPIRISCHE FORMULES .....	29.
3.1. INLEIDING .....	29.
3.2. MEETRESULTATEN .....	29.
3.3. REGRESSIES .....	30.
3.3.1. INLEIDING .....	30.
3.3.2. UITGEVOERDE REGRESSIES .....	30.
3.3.2.1. REGRESSIE 1 .....	30.
3.3.2.2. REGRESSIE 2 .....	30.
3.3.2.3. REGRESSIE 3 .....	30.
3.3.2.4. REGRESSIE 4 .....	30.
3.3.2.5. REGRESSIE 5 .....	31.
3.3.2.6. REGRESSIE 6 .....	31.
3.3.2.7. REGRESSIE 7 .....	31.
3.3.2.8. REGRESSIE 8 .....	31.
3.3.2.9. REGRESSIE 9 .....	31.
3.3.2.10. REGRESSIE 10 .....	31.
3.3.2.11. REGRESSIE 11 .....	31.
3.3.2.12. REGRESSIE 12 .....	31.
3.3.2.13. REGRESSIE 13 .....	32.
3.3.2.14. REGRESSIE 14 .....	32.
3.3.2.15. REGRESSIE 15 .....	32.
3.3.2.16. REGRESSIE 16 .....	32.
3.3.2.17. REGRESSIE 17 .....	32.
3.3.2.18. REGRESSIE 18 .....	32.
3.3.3. REGRESSIE CURVEN .....	33.
3.3.3.1. REGRESSIE 1 .....	33.
3.3.3.2. REGRESSIE 2 .....	33.
3.3.3.3. REGRESSIE 3 .....	34.
3.3.3.4. REGRESSIE 4 .....	34.
3.3.3.5. REGRESSIE 5 .....	35.

3.3.3.6. REGRESSIE 6.....	35.
3.3.3.7. REGRESSIE 7.....	36.
3.3.3.8. REGRESSIE 8.....	36.
3.3.3.9. REGRESSIE 9.....	37.
3.3.3.10. REGRESSIE 10.....	37.
3.3.3.11. REGRESSIE 11.....	38.
3.3.3.12. REGRESSIE 12.....	38.
3.3.3.13. REGRESSIE 13.....	39.
3.3.3.14. REGRESSIE 14.....	39.
3.3.3.15. REGRESSIE 15.....	40.
3.3.3.16. REGRESSIE 16.....	40.
3.3.3.17. REGRESSIE 17.....	41.
3.3.3.18. REGRESSIE 18.....	41.
3.3.4. BESPREKING VAN DE REGRESSIES.....	42.
3.3.4.1. LINEAIRE REGRESSIES 1 & 2.....	42.
3.3.4.2. POLYNOMIALE REGRESSIES.....	42.
3.3.4.2.1. LAGE ORDE FUNCTIES – REGRESSIE 3 & 4.....	42.
3.3.4.2.2. HOGE ORDE FUNCTIES – REGRESSIE 5, 6 & 7.....	42.
3.3.4.3. REGRESSIE 8.....	42.
3.3.4.4. EXPONENTIELE FUNCTIES.....	42.
3.3.4.4.1. REGRESSIE 9.....	42.
3.3.4.4.2. REGRESSIE 10.....	42.
3.3.4.4.3. REGRESSIE 11.....	42.
3.3.4.4.4. REGRESSIE 12.....	43.
3.3.4.5. PSEUDO LINEAIRE REGRESSIES.....	43.
3.3.4.5.1. REGRESSIE 13.....	43.
3.3.4.5.2. REGRESSIE 14.....	43.
3.3.4.5.3. REGRESSIE 15.....	43.
3.3.4.5.4. REGRESSIE 16 & 17.....	43.
3.3.4.5.5. REGRESSIE 18.....	43.
3.4. BESLUITEN.....	43.
3.4.1. BESPREKING.....	43.
3.4.2. EXTRA MEETWAARDEN.....	45.
 HOOFDSTUK 4: TWEE DIMENSIONALE ZUIGPROEVEN.....	 47.
4.1. INLEIDING.....	47.
4.2. PROEFOPSTELLING.....	47.
4.3. VOORAFGAANDE METINGEN.....	48.
4.4. METINGEN TIJDENS DE ZUIGPROEVEN.....	49.
 HOOFDSTUK 5: EVALUATIE VAN HET WISKUNDIG MODEL.....	 50.
5.1. INLEIDING.....	50.
5.2. BEPALING VAN DE WALSNELHEID MET HET WISKUNDIGE MODEL.....	50.
5.3. BEREKENINGSRESULTATEN.....	50.
5.3.1. GEZEEFD ZAND 80µM.....	51.



<i>Inhoudstafel</i>	<i>Walsnelheid</i>
5.3.2. DUINZAND 140 $\mu$ M.....	52.
5.3.3. DUINZAND 210 $\mu$ M.....	53.
5.3.4. GLASPARELS 230 $\mu$ M.....	54.
5.3.5. METSELZAND 300 $\mu$ M.....	55.
5.3.6. RIVIERZAND 450 $\mu$ M.....	56.
5.3.7. RIVIERZAND 650 $\mu$ M.....	57.
5.3.8. GEMENGD ZAND 75-25.....	58.
5.3.9. GEMENGD ZAND 50-50.....	59.
5.3.10. GEMENGD ZAND 25-75.....	60.
5.4. BESLUITEN.....	61.
5.5. PRAKTISCH GEBRUIK VAN HET WISKUNDIGE MODEL.....	61.
HOOFDSTUK 6: DOORLAATBAARHEIDSFOMULES.....	64.
6.1. INLEIDING.....	64.
6.2. DOORLAATBAARHEIDSFOMULES.....	64.
6.2.1. DE OORSPRONKELIJKE WET VAN HAZEN – 1893.....	64.
6.2.2. DE AANGEPASTE WET VAN HAZEN.....	64.
6.2.2.1. EERSTE VORM.....	64.
6.2.2.2. TWEDE VORM.....	64.
6.2.3. DE WET VAN JACKY – 1944.....	65.
6.2.4. DE WET VAN TERZAGHI – 1955.....	65.
6.2.5. DE FORMULE VAN KOZENY.....	65.
6.2.6. VERBETERDE WET VAN HAZEN.....	66.
6.2.7. DE FORMULE VAN MARSH EN DENNY – 1966.....	67.
6.2.8. DE FORMULE VAN KOZENY-CARMAN.....	67.
6.2.9. DE FAIR – HATCH VERGELIJKING.....	67.
6.3. RESULTATEN VAN DE VERSCHILLENDE FORMULES.....	68.
HOOFDSTUK 7: EVALUATIE VAN DE EMPIRISCHE FORMULES.....	70.
7.1. INLEIDING.....	70.
7.2. BEPALEN VAN DE GESCHIKTE DOORLAATBAARHEIDSFOMULE.....	70.
7.3. UITGEBREIDE BEREKENING OP 80 $\mu$ M ZAND.....	71.
7.3.1. DOORLAATBAARHEIDSBEPALING MET DE FORMULE VAN TERZAGI.....	71.
7.3.1.1. SCHATTING VAN DE WALSNELHEID MET DE WET VAN WL /DELFT HYDRAULICS.....	71.
7.3.1.2. SCHATTING VAN DE WALSNELHEID MET REGRESSIE 18.....	71.
7.3.2. DOORLAATBAARHEIDSBEPALING MET DE VERBETERDE FORMULE VAN HAZEN.....	72.
7.3.2.1. SCHATTING VAN DE WALSNELHEID MET DE WET VAN WL /DELFT HYDRAULICS.....	72.
7.3.2.2. SCHATTING VAN DE WALSNELHEID MET REGRESSIE 18.....	72.
7.3.3. BESLUIT.....	72.
7.4. UITGEBREIDE BEREKENING OP 650 $\mu$ M ZAND.....	73.
7.5. OVERZICHT VAN DE RESULTATEN.....	74.
7.5.1. GEZEefd ZAND 80 $\mu$ M.....	74.
7.5.2. DUINZAND 140 $\mu$ M.....	75.
7.5.3. DUINZAND 210 $\mu$ M.....	76.
7.5.4. RIVIERZAND 450 $\mu$ M.....	77.

7.5.5. RIVIERZAND 650 $\mu$ M .....	78.
7.5.6. BESPREKING .....	78.
7.6. RESULTATEN VAN DE ANDERE MATERIALEN .....	79.
7.6.1. GLASPARELS 230 $\mu$ M .....	79.
7.6.2. METSELZAND 300 $\mu$ M .....	79.
7.6.3. GEMENGD ZAND 75% – 25% .....	81.
7.6.4. GEMENGD ZAND 50% – 50% .....	82.
7.6.5. GEMENGD ZAND 25% – 75% .....	84.
7.7. BESLUITEN IN VERBAND MET DE EMPIRISCHE FORMULES .....	85.
7.7.1. UNIFORMITEITSCOËFFICIËNT LAGER DAN 1,8 .....	85.
7.7.2. UNIFORMITEITSCOËFFICIËNT HOGER DAN 1,8 .....	85.
7.8. CORRECTIEFACTOREN .....	86.
7.8.1. SIGNIFICANTE PARAMETERS .....	86.
7.8.2. CORRECTIE VOOR DE INWENDIGE WRIJVINGSHOEK .....	86.
7.8.3. TOEPASSING VAN DE CORRECTIEFACTOR $\chi_{\varphi}$ .....	87.
7.8.3.1. 450 $\mu$ M ZAND .....	87.
7.8.3.2. 650 $\mu$ M ZAND .....	87.
7.8.3.3. GLASPARELS .....	88.
7.8.3.4. BESLUITEN OMTRENT DE CORRECTIEFACTOR $\chi_{\varphi}$ .....	89.
7.8.4. CORRECTIE VOOR SPECIFIEK GEWICHT .....	89.
7.8.5. TOEPASSING VAN DE CORRECTIEFACTOR $\chi_{\gamma}$ .....	90.
7.8.5.1. GLASPARELS 230 $\mu$ M .....	90.
7.8.5.2. BESLUITEN OMTRENT DE CORRECTIEFACTOR $\chi_{\gamma}$ .....	90.
7.8.6. CORRECTIE VOOR DILANTANTIE .....	91.
7.8.6.1. FYSISCHE VERANTWOORDING .....	91.
7.8.6.2. PROEFONDERVINDELIJKE VASTSTELLINGEN .....	92.
7.8.6.3. CORRECTIEFACTOR .....	92.
7.8.7. TOEPASSING VAN DE CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ .....	93.
7.8.7.1. GEMENGD ZAND 75-25 .....	93.
7.8.7.2. GEMENGD ZAND 50-50 .....	94.
7.8.7.3. GEMENGD ZAND 25-75 .....	95.
7.8.7.4. BESLUITEN OMTRENT DE CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ .....	95.
7.8.8. ALGEMENE BESLUITEN OMTRENT DE CORRECTIEFACTOREN .....	96.
7.9. ALGEMENE BESLUITEN .....	96.
7.10. BEREKENINGSSHEMA .....	97.
HOOFDSTUK 8: BEREKENEN VAN PUTPRODUCTIES .....	98.
8.1. INLEIDING .....	98.
8.2. ZUIGPUT MET VERTICALE VERPLAATSING VAN DE BUIS .....	98.
8.2.1. ALGEMEEN .....	98.
8.2.2. ZANDPRODUCTIE .....	98.
8.2.3. MAXIMALE PRODUCTIE .....	100.
8.2.4. PRAKTISCHE BEREKENING .....	101.
8.3. ZUIGPUT MET HORIZONTALE VERPLAATSING VAN DE BUIS .....	101.
8.3.1. ALGEMEEN .....	101.

<i>Inhoudstafel</i>	<i>Walsnelheid</i>
8.3.2. ZANDPRODUCTIE .....	102.
8.4. ZUIGPUT MET VERPLAATSING VAN DE BUIS ONDER EEN HOEK $\delta$ .....	103.
8.4.1. ALGEMEEN .....	103.
8.4.2. ZANDPRODUCTIE .....	103.
8.4.3. MAXIMALE PRODUCTIE .....	107.
8.5. AFSCHUIVINGEN .....	107.
HOOFDSTUK 9: DRIEDIMENSIONALE PROEVEN .....	108.
9.1. PROEFOPSTELLING .....	108.
9.2. GEBRUIKTE MATERIALEN .....	108.
9.3. UITGEVOERDE METINGEN .....	108.
HOOFDSTUK 10: EVALUATIE VAN DE PUTPRODUCTIES .....	110.
10.1. INLEIDING .....	110.
10.2. ZUIGPUTTEN MET VERTICALE BEWEGING VAN DE ZUIGBUIS .....	110.
10.2.1. BEREKENINGSRESULTATEN 80 $\mu$ M ZAND .....	110.
10.2.2. BEREKENINGSRESULTATEN 210 $\mu$ M ZAND .....	101.
10.2.3. BEREKENINGSRESULTATEN 450 $\mu$ M ZAND .....	113.
10.2.4. BEREKENINGSRESULTATEN 620 $\mu$ M ZAND .....	114.
10.2.5. BESLUITEN BIJ VERTICALE ZUIGPUTTEN .....	115.
10.3. HORIZONTALE ZUIGPUTTEN .....	115.
10.3.1. 80 $\mu$ M ZAND .....	115.
10.3.2. 210 $\mu$ M ZAND .....	116.
10.3.3. 450 $\mu$ M ZAND .....	116.
10.3.4. BESLUITEN BIJ HORIZONALE ZUIGPUTTEN .....	116.
HOOFDSTUK 11: OPMERKINGEN, AANTEKENINGEN & BEDENKINGEN .....	117.
11.1. INLEIDING .....	117.
11.2. VORM VAN DE KORRELS .....	117.
11.3. INWENDIGE WRIJVINGSHOEK .....	117.
11.4. PAKKING .....	118.
11.5. AFSCHUIVINGEN .....	118.
11.6. STROMINGEN .....	118.
11.7. SCHAALEFFECTEN .....	119.
11.8. MORS .....	120.
11.9. BEREKENINGSSHEMA .....	120.
11.10. RICHTLIJNEN VOOR VERDER ONDERZOEK .....	120.
HOOFDSTUK 12 : GEOTECHNISCHE GEGEVENS .....	122.
12.1. GEZEefd ZAND 80 $\mu$ M .....	122.
12.2. DUINZAND 140 $\mu$ M .....	123.
12.3. DUINZAND 210 $\mu$ M .....	124.
12.4. GLASPARELS 230 $\mu$ M .....	125.
12.5. METSELZAND 300 $\mu$ M .....	126.
12.6. RIVIERZAND 450 $\mu$ M .....	127.

<i>Inhoudstafel</i>	<i>Walsnelheid</i>
12.7. RIVIERZAND 620 $\mu$ M.....	128.
12.8. RIVIERZAND 650 $\mu$ M.....	129.
12.9. GEMENGD ZAND 75% (210 $\mu$ M) – 25% (80 $\mu$ M).....	130.
12.10. GEMENGD ZAND 50% (210 $\mu$ M) – 50% (80 $\mu$ M).....	131.
12.11. GEMENGD ZAND 25% (210 $\mu$ M) – 75% (80 $\mu$ M).....	132.
HOOFDSTUK 13: BIBLIOGRAFIE.....	133.

**Lijst van de figuren**

FIGUUR 1: DE PROEFOPSTELLING VOOR DE ORIËTERENDE ZUIGPROEVEN .....	18.
FIGUUR 2: ONTWIKKELING VAN DE KUILVORMING IN DE TIJD.....	19.
FIGUUR 3: RESULTATEN VAN ENKELE METINGEN.....	20.
FIGUUR 4: SIMULATIE VAN HET ZUIGEN DOOR EEN KLEP.....	20.
FIGUUR 5: DE WALSNELHEID $v_w$ .....	20.
FIGUUR 6: DE DIRECTE AFSCHUIVINGSPROEF.....	22.
FIGUUR 7: VOLUME VERANDERING TIJDENS DE PROEF.....	22.
FIGUUR 8: BREUKMECHANISME BIJ DICHTE PAKKING.....	23.
FIGUUR 9: DE PORIËNDRUK IN DE BRES.....	24.
FIGUUR 10: EEN ONDERWATER TALUD.....	24.
FIGUUR 11: DE KRACHTEN INWERKEND OP EEN GRONDMOOTJE.....	25.
FIGUUR 12: VERBAND TUSSEN $v_z$ EN $v_f$ .....	26.
FIGUUR 13: VERBAND TUSSEN $v_z$ EN $v_w$ .....	27.
FIGUUR 14: GRAFISCHE VOORSTELLING VAN DE 43 MEETPUNTEN.....	30.
FIGUUR 15: REGRESSIECURVE 1.....	33.
FIGUUR 16: REGRESSIECURVE 2.....	33.
FIGUUR 17: REGRESSIECURVE 3.....	34.
FIGUUR 18: REGRESSIECURVE 4.....	34.
FIGUUR 19: REGRESSIECURVE 5.....	35.
FIGUUR 20: REGRESSIECURVE 6.....	35.
FIGUUR 21: REGRESSIECURVE 7.....	36.
FIGUUR 22: REGRESSIECURVE 8.....	36.
FIGUUR 23: REGRESSIECURVE 9.....	37.
FIGUUR 24: REGRESSIECURVE 10.....	37.
FIGUUR 25: REGRESSIECURVE 11.....	38.
FIGUUR 26: REGRESSIECURVE 12.....	38.
FIGUUR 27: REGRESSIECURVE 13.....	39.
FIGUUR 28: REGRESSIECURVE 14.....	39.
FIGUUR 29: REGRESSIECURVE 15.....	40.
FIGUUR 30: REGRESSIECURVE 16.....	40.
FIGUUR 31: REGRESSIECURVE 17.....	41.
FIGUUR 32: REGRESSIECURVE 18.....	41.
FIGUUR 33: SPREIDINGSDOMEIN VAN $\pm 33\%$ VOOR REGRESSIE 13.....	44.
FIGUUR 34: SPREIDINGSDOMEIN VAN $\pm 33\%$ VOOR REGRESSIE 18.....	44.
FIGUUR 35: DE MEETPUNTEN VAN DE DRIEDIMENSIONALE PROEVEN.....	45.
FIGUUR 36: DE PROEFOPSTELLING VAN DE TWEEDIMENSIONALE PROEVEN.....	47.
FIGUUR 37: OPSTELLING VOOR DE FLUÏDISATIE PROEVEN.....	48.
FIGUUR 38: DE GEVORMDE TALUDS.....	49.
FIGUUR 39: PROEFONDERVINDELJKE BEPALING VAN DE WALSNELHEID.....	49.
FIGUUR 40: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – $80\mu\text{m}$ ZAND.....	51.
FIGUUR 41: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – $140\mu\text{m}$ ZAND.....	52.
FIGUUR 42: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – $210\mu\text{m}$ ZAND.....	53.
FIGUUR 43: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – GLASPARELS.....	54.

FIGUUR 44: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – METSELZAND 300 $\mu$ M.....	55.
FIGUUR 45: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – 450 $\mu$ M.....	56.
FIGUUR 46: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – 650 $\mu$ M.....	57.
FIGUUR 47: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – GEMENGD ZAND 75-25.....	58.
FIGUUR 48: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – GEMENGD ZAND 50-50.....	59.
FIGUUR 49: WISKUNDIGE VOORSPELLING VAN DE WALSNELHEID – GEMENGD ZAND 25-75.....	60.
FIGUUR 50: DOORLAATBAARHEID BIJ FLUÏDISATIE IN FUNCTIE VAN $d_{50}$ .....	62.
FIGUUR 51: PORIËNGEHALTE BIJ FLUÏDISATIE IN FUNCTIE VAN $d_{50}$ .....	62.
FIGUUR 52: INVLOED VAN EEN AFWIJING VAN $n^*$ OP DE BEKOMEN WAARDE VAN DE WALSNEL.....	63.
FIGUUR 53: DOORLAATBAARHEID VOLGENS MARSH EN DENNY.....	57.
FIGUUR 54: EVALUATIE VAN DE DOORLAATBAARHEID VAN HET 80 $\mu$ M ZAND .....	68.
FIGUUR 55: EVALUATIE VAN DE DOORLAATBAARHEID VAN HET 80 $\mu$ M ZAND .....	69.
FIGUUR 56: SCHATTING VAN DE WALSNELHEID MET DE VERSCHILLENDE DOORLAATBAARHEIDS.....	70.
FIGUUR 57: COMBINATIE TERZAGHI – WL /DELFT HYDRAULICS.....	71.
FIGUUR 58: COMBINATIE TERZAGHI – REGRESSIE 18 .....	71.
FIGUUR 59: COMBINATIE VERBETERDE HAZEN – WL /DELFT HYDRAULICS.....	72.
FIGUUR 60: COMBINATIE VERBETERDE HAZEN – REGRESSIE 18 .....	72.
FIGUUR 61: VERGELIJKING VAN DE WET WL /DELFT HYDRAULICS MET REGRESSIE 18.....	73.
FIGUUR 62: BEREKENINGEN MET TERZAGHI .....	74.
FIGUUR 63: BEREKENINGEN MET VERBETERDE HAZEN .....	74.
FIGUUR 64: BEREKENINGEN MET TERZAGHI .....	75.
FIGUUR 65: BEREKENINGEN MET VERBETERDE HAZEN .....	75.
FIGUUR 66: BEREKENINGEN MET TERZAGHI .....	77.
FIGUUR 67: BEREKENINGEN MET VERBETERDE HAZEN .....	77.
FIGUUR 68: BEREKENINGEN MET TERZAGHI .....	77.
FIGUUR 69: BEREKENINGEN MET VERBETERDE HAZEN .....	77.
FIGUUR 70: BEREKENINGEN MET TERZAGHI .....	78.
FIGUUR 71: BEREKENINGEN MET VERBETERDE HAZEN .....	78.
FIGUUR 72: BEREKENINGEN VERSUS MEETINGEN – GLASPARELS .....	79.
FIGUUR 73: VERGELIJKING VAN RESULTATEN BEKOMEN MET TWEE DOORLAATBAARHEIDSWETTEN.....	80.
FIGUUR 74: VERGELIJKING VAN DE TWEE DOORLAATBAARHEIDSWETTEN – 75-25.....	82.
FIGUUR 75: BEREKENINGEN MET VERBETERDE HAZEN .....	83.
FIGUUR 76: BEREKENINGEN MET WL /DELFT HYDRAULICS.....	83.
FIGUUR 77: BEREKENINGEN MET VERBETERDE HAZEN .....	84.
FIGUUR 78: BEREKENINGEN MET WL /DELFT HYDRAULICS.....	84.
FIGUUR 79: VERGELIJKING MET EN ZONDER CORRECTIEFACTOR $\chi_\phi$ – 450 $\mu$ M ZAND .....	87.
FIGUUR 80: VERGELIJKING MET EN ZONDER CORRECTIEFACTOR $\chi_\phi$ – 650 $\mu$ M ZAND.....	88.
FIGUUR 81: VERGELIJKING MET EN ZONDER CORRECTIEFACTOR $\chi_\phi$ – GLASPARELS 230 $\mu$ M.....	89.
FIGUUR 82: VERGELIJKING MET EN ZONDER CORRECTIEFACTOR $\chi_\phi$ EN $\chi_\gamma$ – GLASPARELS 230 $\mu$ M ..	90.
FIGUUR 83: AFSCHUIVINGSMECHANISME BIJ EEN UNIFORME GROND.....	91.
FIGUUR 84: AFSCHUIVINGSMECHANISME BIJ EEN NIET UNIFORME GROND.....	92.
FIGUUR 85: VERGELIJKING MET EN ZONDER CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ – GEMEND ZAND 75-25.....	93.
FIGUUR 86: VERGELIJKING MET EN ZONDER CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ – GEMEND ZAND 50-50.....	94.
FIGUUR 87: VERGELIJKING MET EN ZONDER CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ – GEMEND ZAND 25-75.....	95.

FIGUUR 88: HET BEREKENINGSSCHEMA VOOR DE BEPALING VAN DE WALSNELHEID .....	97.
FIGUUR 89: ZUIGPUT BIJ EEN VERTICALE BEWEGING VAN DE BUIS. ....	98.
FIGUUR 90: SNELHEIDVECTOREN.....	99.
FIGUUR 91: AFMETINGEN VAN DE ZUIGPUT.....	99.
FIGUUR 92: PUTPRODUCTIE IN FUNCTIE VAN $v_w$ .....	100.
FIGUUR 93: ZUIGPUT BIJ EEN HORIZONTALE VERPLAATSING VAN DE BUIS.....	101.
FIGUUR 94: DE GEVORMDE SLEUF .....	102.
FIGUUR 95: ZUIGPUT BIJ DE VERPLAATSING VAN DE BUIS ONDER EEN HOEK $\delta$ .....	103.
FIGUUR 96: DETAIL VAN DE BODEM VAN DE ZUIGPUT MET DE SNELHEIDSVECTOREN.....	104.
FIGUUR 97: DE PROEFOPSTELLING VOOR DE DRIE DIMENSIONALE ZUIGPROEVEN. ....	108.
FIGUUR 98: DE GEVOLGEN VAN EROSIE VERSCHIJNSELEN OP DE WALLEN .....	119.
FIGUUR 99: DE GEVOLGEN VAN EROSIE VERSCHIJNSELENE OP DE FINALE VORM VAN DE PUT ....	119.
FIGUUR 100: DE TERUGSTORT OPSTELLING.....	120.
FIGUUR 101: GRANULOMETRISCHE CURVE – 80 $\mu$ M ZAND. ....	122.
FIGUUR 102: GRANULOMETRISCHE CURVE – 140 $\mu$ M ZAND. ....	123.
FIGUUR 103: GRANULOMETRISCHE CURVE – 210 $\mu$ M ZAND. ....	124.
FIGUUR 104: GRANULOMETRISCHE CURVE – 230 $\mu$ M GLASPARELS. ....	125.
FIGUUR 105: GRANULOMETRISCHE CURVE – 300 $\mu$ M ZAND. ....	126.
FIGUUR 106: GRANULOMETRISCHE CURVE – 450 $\mu$ M ZAND. ....	127.
FIGUUR 107: GRANULOMETRISCHE CURVE – 620 $\mu$ M ZAND. ....	128.
FIGUUR 108: GRANULOMETRISCHE CURVE – 650 $\mu$ M ZAND. ....	129.
FIGUUR 109: GRANULOMETRISCHE CURVE – 75-25 GEMENGD ZAND.....	130.
FIGUUR 110: GRANULOMETRISCHE CURVE – 50-50 GEMENGD ZAND.....	131.
FIGUUR 111: GRANULOMETRISCHE CURVE – 25-75 GEMENGD ZAND.....	132.

**Lijst van de tabellen**

TABEL 1: DE 43 GEVONDEN MEETWAARDEN .....	29.
TABEL 2: RESULTATEN VAN DRIEDIMENSIONALE ZUIGPROEVEN.....	45.
TABEL 3: DE GEBRUIKTE ZANDEN .....	48.
TABEL 4: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – 80 $\mu$ M ZAND .....	51.
TABEL 5: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – 140 $\mu$ M ZAND.....	52.
TABEL 6: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – 210 $\mu$ M ZAND.....	53.
TABEL 7: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – GLASPARELS .....	54.
TABEL 8: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – METSELZAND 300 $\mu$ M.....	55.
TABEL 9: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – 450 $\mu$ M ZAND.....	59.
TABEL 10: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – 650 $\mu$ M ZAND.....	57.
TABEL 11: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – GEMENGD ZAND 75-25 .....	58.
TABEL 12: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – GEMENGD ZAND 50-50 .....	59.
TABEL 13: BEREKENINGEN WISKUNDIGE MODEL – GEMENGD ZAND 25-75 .....	60.
TABEL 14: GEMETEN FLUIDISATIE PARAMETERS.....	61.
TABEL 15: VERGELIJKING VAN DE GEMETEN EN DE GESCHATTE WAARDEN VAN $n^*$ EN $k^*$ .....	63.
TABEL 16: DE WAARDE VAN DE FACTOR $C_k$ .....	64.
TABEL 17: DE WAARDE VAN DE FACTOR $\kappa_k$ .....	65.
TABEL 18: AFWIJINGEN VOOR HET 650 $\mu$ M ZAND.....	73.
TABEL 19: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET TERZAGHI – 80 $\mu$ M.....	74.
TABEL 20: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 80 $\mu$ M .....	74.
TABEL 21: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET TERZAGHI – 140 $\mu$ M.....	75.
TABEL 22: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 140 $\mu$ M .....	75.
TABEL 23: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET TERZAGHI – 210 $\mu$ M.....	76.
TABEL 24: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 120 $\mu$ M .....	76.
TABEL 25: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET TERZAGHI – 450 $\mu$ M.....	77.
TABEL 26: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 450 $\mu$ M .....	77.
TABEL 27: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET TERZAGHI – 650 $\mu$ M.....	78.
TABEL 28: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 650 $\mu$ M .....	78.
TABEL 29: OVERZICHT VAN DE BEKOMEN AFWIJINGEN.....	79.
TABEL 30: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 300 $\mu$ M.....	79.
TABEL 31: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET WL /DELFT HYDRAULICS – 300 $\mu$ M..	80.
TABEL 32: UNIFORMITEITSCOËFFICIËNTEN VAN DE ZANDEN.....	81.
TABEL 33: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 75-25 .....	81.
TABEL 34: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET WL /DELFT HYDRAULICS – 75-25 ...	82.
TABEL 35: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 50-50 .....	83.
TABEL 36: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET WL /DELFT HYDRAULICS – 50-50 ...	83.
TABEL 37: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET VERBETERDE HAZEN – 25-75 .....	84.
TABEL 38: TOEPASSING VAN DE EMPIRISCHE FORMULES MET WL /DELFT HYDRAULICS – 25-75.....	84.
TABEL 39: GEMIDDELDE AFWIJINGEN.....	85.
TABEL 40: GEMIDDELDE AFWIJINGEN.....	86.
TABEL 41: TOEPASSING CORRECTIEFACTOR $\chi_\phi$ – 450 $\mu$ M ZAND.....	87.
TABEL 42: TOEPASSING CORRECTIEFACTOR $\chi_\phi$ – 650 $\mu$ M ZAND.....	88.



TABEL 43: TOEPASSING CORRECTIEFACTOR $\chi_\phi$ – GLASPARELS 230 $\mu$ M .....	88.
TABEL 44: VERGELIJKING VAN DE GEMIDDELDE AFWIJKINGEN MET EN ZONDER CORRECTIE $\chi_\phi$ .....	89.
TABEL 45: TOEPASSING CORRECTIEFACTOR $\chi_\gamma$ – GLASPARELS .....	90.
TABEL 46: VERGELIJKING VAN DE GEMIDDELDE AFWIJKINGEN MET EN ZONDER CORRECTIE $\chi_\gamma$ ....	91.
TABEL 47: VERGELIJKING VAN DE VERSCHILLENDE POTENTIËLE PARAMETERS .....	92.
TABEL 48: TOEPASSING CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ – GEMENGD ZAND 75-25 .....	93.
TABEL 49: TOEPASSING CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ – GEMENGD ZAND 50-50 .....	94.
TABEL 50: TOEPASSING CORRECTIEFACTOR $\chi_d$ – GEMENGD ZAND 25-75 .....	95.
TABEL 51: VERGELIJKING VAN DE GEMIDDELDE AFWIJKINGEN MET EN ZONDER CORRECTIE $\chi_d$ .....	96.
TABEL 52: VERGELIJKING WISKUNDIG EN EMPIRISCHE MODEL .....	97.
TABEL 53: DE GEBRUIKTE ZANDEN .....	108.
TABEL 54: BEREKENING VAN $v_w$ EN $\beta$ – 80 $\mu$ M ZAND .....	110.
TABEL 55: BEREKENING PUTPRODUCTIES VERTICAAL ZUIGEN – 80 $\mu$ M ZAND.....	111.
TABEL 56: AFWIJKINGEN BIJ BEREKENING MET MEETWAARDEN.....	111.
TABEL 57: BEREKENING VAN $v_w$ EN $\beta$ – 210 $\mu$ M ZAND .....	112.
TABEL 58: BEREKENING PUTPRODUCTIES VERTICAAL ZUIGEN – 210 $\mu$ K ZAND .....	113.
TABEL 59: AFWIJKINGEN BIJ BEREKENING MET MEETWAARDEN.....	113.
TABEL 60: BEREKENING VAN $v_w$ EN $\beta$ – 450 $\mu$ M ZAND .....	113.
TABEL 61: BEREKENING PUTPRODUCTIES VERTICAAL ZUIGEN – 450 $\mu$ M ZAND.....	113.
TABEL 62: AFWIJKINGEN BIJ BEREKENING MET MEETWAARDEN.....	114.
TABEL 63: BEREKENING VAN $v_w$ EN $\beta$ – 620 $\mu$ M ZAND .....	114.
TABEL 64: BEREKENING PUTPRODUCTIES VERTICAAL ZUIGEN – 620 $\mu$ M ZAND.....	114.
TABEL 65: AFWIJKINGEN BIJ BEREKENING MET MEETWAARDEN.....	115.
TABEL 66: BEREKENING VAN $v_w$ EN $P_B$ – 80 $\mu$ M ZAND.....	115.
TABEL 67: BEREKENING VAN $v_w$ EN $P_B$ – 210 $\mu$ M ZAND.....	116.
TABEL 68: BEREKENING VAN $v_w$ EN $P_B$ – 450 $\mu$ M ZAND.....	116.
TABEL 69: AFWIJKINGEN BIJ BEREKENING MET MEETWAARDEN.....	116.
TABEL 70: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 80 $\mu$ M ZAND .....	122.
TABEL 71: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 140 $\mu$ M ZAND .....	123.
TABEL 72: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 210 $\mu$ M ZAND .....	124.
TABEL 73: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 230 $\mu$ M GLASPARELS .....	125.
TABEL 74: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 300 $\mu$ M ZAND .....	126.
TABEL 75: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 450 $\mu$ M ZAND .....	127.
TABEL 76: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 620 $\mu$ M ZAND .....	128.
TABEL 77: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 650 $\mu$ M ZAND .....	129.
TABEL 78: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 75-25 GEMENGD ZAND.....	130.
TABEL 79: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 50-50 GEMENGD ZAND.....	131.
TABEL 80: GEOTECHNISCHE GEGEVENS – 25-75 GEMENGD ZAND.....	132.

**Gebruikte symbolen**

$\beta$	Helling van een instabiel onderwatertalud	°
$\gamma$	Specifiek gewicht (algemeen)	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_m$	Specifiek gewicht van het mengsel zand-water	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$	Specifiek gewicht van de korrels	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	Specifiek gewicht van het water	kN/m <sup>3</sup>
$\delta$	Hoek tussen de as van de zuigbuis en een horizontaal vlak	°
$\varphi$	Inwendige wrijvingshoek	°
$\mu$	Viscositeit	Pa.s
$\chi_\gamma$	Correctiefactor voor het specifieke gewicht	—
$\chi_\varphi$	Correctiefactor voor de inwendige wrijvingshoek	—
$\chi_d$	Correctiefactor voor de dilatantie	—
B	Diepte van de zuigput	m
C	Dichtheid, verhouding van $V_s$ tot $V_t$	—
d	Korrel diameter	$\mu\text{m}$
$d_{10}$	Korrel diameter, de diameter van 10% – gewicht – van de korrels is kleiner dan $d_{10}$	$\mu\text{m}$
$d_{40}$	Korrel diameter, de diameter van 40% – gewicht – van de korrels is kleiner dan $d_{40}$	$\mu\text{m}$
$d_{50}$	Korrel diameter, de diameter van 50% – gewicht – van de korrels is kleiner dan $d_{50}$	$\mu\text{m}$
$d_{60}$	Korrel diameter, de diameter van 60% – gewicht – van de korrels is kleiner dan $d_{60}$	$\mu\text{m}$
$d_{90}$	Korrel diameter, de diameter van 90% – gewicht – van de korrels is kleiner dan $d_{90}$	$\mu\text{m}$
$d_m$	Korrel diameter van de korrels die met de grootste frequentie voorkomen	$\mu\text{m}$
e	Poriëngetal, de verhouding van $V_v$ tot $V_s$	—
exp	Exponentiële functie – $e^x$	—
g	Versnelling van de zwaartekracht	m/s <sup>2</sup>
i	Hydraulische gradiënt	—
k	Doorlaatbaarheidscoëfficiënt (algemeen)	mm/s
$k^*$	Doorlaatbaarheidscoëfficiënt bij fluïdisatie	mm/s
$k_0$	Doorlaatbaarheidscoëfficiënt bij ongeroerde toestand	mm/s
ln	Neperiaans logaritmische functie	—
log	Tiendelige logaritmische functie	—
n	Poriëngehalte, de verhouding van $V_v$ tot $V_t$	—
$n^*$	Poriëngehalte bij fluïdisatie	—
$n_0$	Poriëngehalte bij ongeroerde toestand	—
$\Delta n$	Relatieve volume verandering tussen ongeroerde toestand en fluïdisatie	—
$P_B$	De zandproductie van een zuigput met diepte B	l/s
$R^2$	Wiskundige correlatie coëfficiënt	—
$S_s$	Oppervlakte van de korrels	m <sup>2</sup>
t	Tijd	s
T	Temperatuur	°C
$U_c$	Uniformiteitscoëfficiënt, de verhouding van $d_{60}$ tot $d_{10}$	—
v	Snelheid (algemeen)	m/s
$v_\varphi$	Voortplantingssnelheid van een wal	mm/s
$v_f$	Filtersnelheid	mm/s

*Gebruikte symbolen**Walsnelheid*

---

$v_h$	Horizontale component van de bewegingssnelheid van de zuigbuis	mm/s
$v_m$	Zuigsnelheid in de zuigbuis	m/s
$v_v$	Verticale component van de bewegingssnelheid van de zuigbuis	mm/s
$v_w$	Walsnelheid – horizontale component van $v_\phi$	mm/s
$v_z$	Horizontale snelheid van het instabiele onderwater talud	m/s
$V$	Volume (algemeen)	$m^3$
$V_s$	Volume van de korrels	$m^3$
$V_t$	Totaal volume – korrels & poriën	$m^3$
$V^*$	Totaal volume van de grond bij fluïdisatie	$m^3$
$V_0$	Totaal volume van de grond in ongeroerde toestand	$m^3$

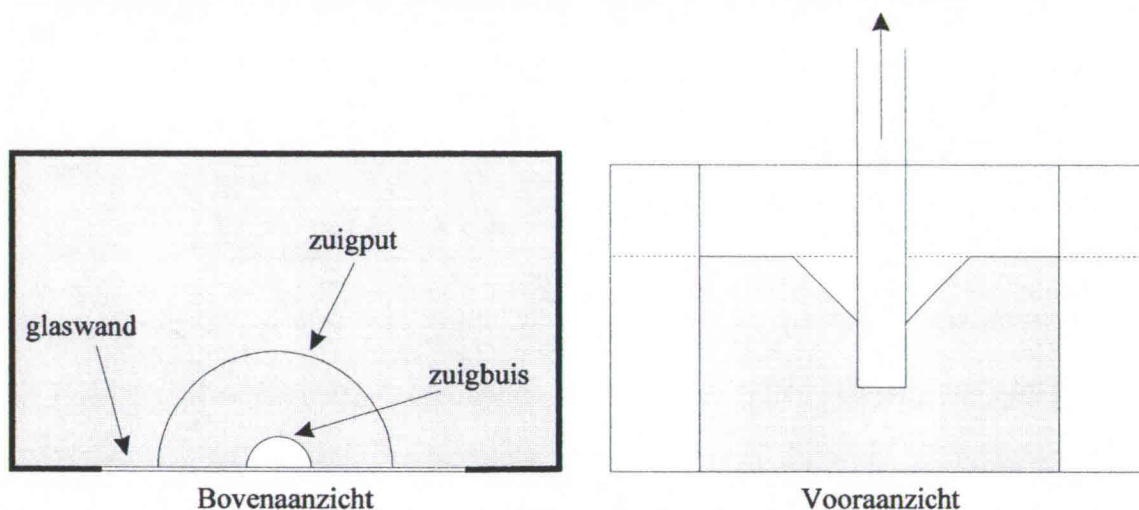
## Hoofdstuk 1: Het begrip “walsnelheid”

### 1.1. Inleiding

Een van de belangrijkste ontgravingsprocessen in de baggertechniek is de erosie van zand. Deze erosie kan tot stand gebracht worden door middel van de zwaartekracht en/of door middel van sterke waterstromsnelheden. Bij het zuigen van zand is echter alleen de zwaartekracht verantwoordelijk voor de erosie van het zand. Het gebruik van de zwaartekracht gebeurt bij het zogenaamde bresproces dat optreedt bij steile onderwater taluds. Het is dan ook het bresproces dat de productie van de zuigput zal bepalen.

### 1.2. De oriënterende zuigproeven

Om meer inzicht te krijgen over het gedrag van de grond tijdens het grondzuigen werden in de jaren 60 oriënterende proeven uitgevoerd. Het te zuigen materiaal – zand – bevond zich in een bak die aan één zijde voorzien was van een glazenwand. Het materiaal werd opgezogen met een zuigbuis die een halve cirkelvormige doorsnede had. Door de glazen wand kon het gedrag van het talud, en de grootte van de zuigput in functie van de tijd bestudeerd worden – figuur 1.

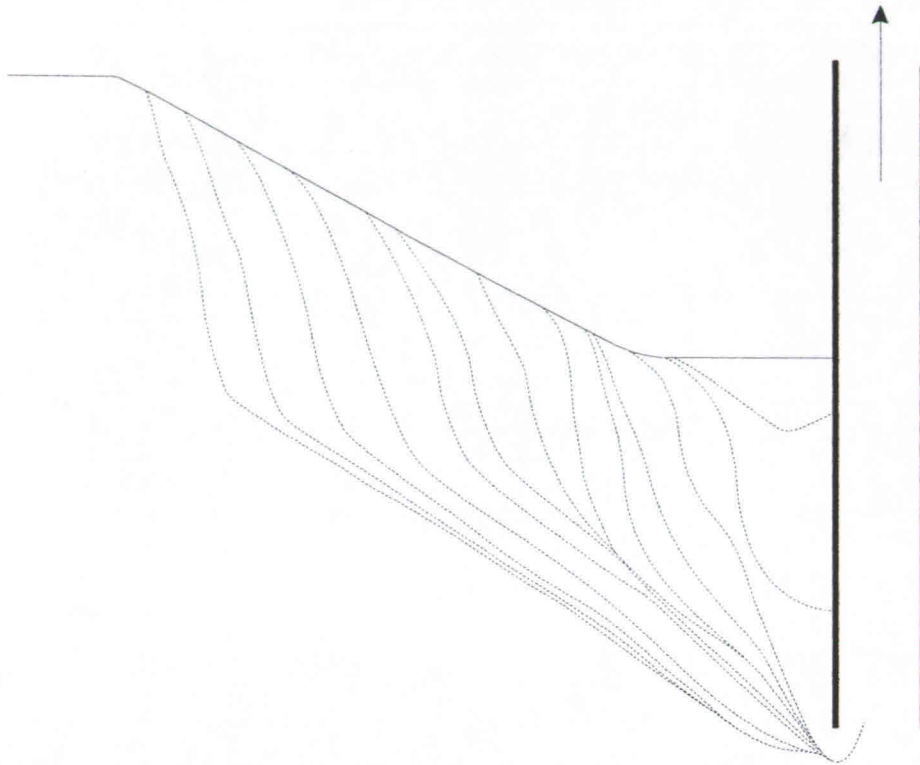


Figuur 1: De proefopstelling voor de oriënterende zuigproeven.

Op de figuur 2 wordt de evolutie van de zuigput in functie van de tijd geschetst. Bij het begin van de proef ontstaat een discontinuïteit in de zuigput onder de vorm van een bijna verticaal wandgedeelte. De verstoring verplaatst zich vervolgens radiaal met een constante snelheid naar boven, tot de hele schuine laag verdwenen is, en het talud terug zijn natuurlijke helling heeft aangenomen. Deze steile wanden, die zich radiaal naar buiten verplaatsen worden wallen of walletjes genoemd. In de wal komt het zand uit de steile wand onder invloed van de zwaartekracht los en vormt met het omgevingswater een dichtheidsstroom die langs het talud omlaag stroomt. Het losgekomen zand, stroomt dan met een vrij grote snelheid – vele malen groter dan de lokale watersnelheid – naar de zuigmond van de buis.

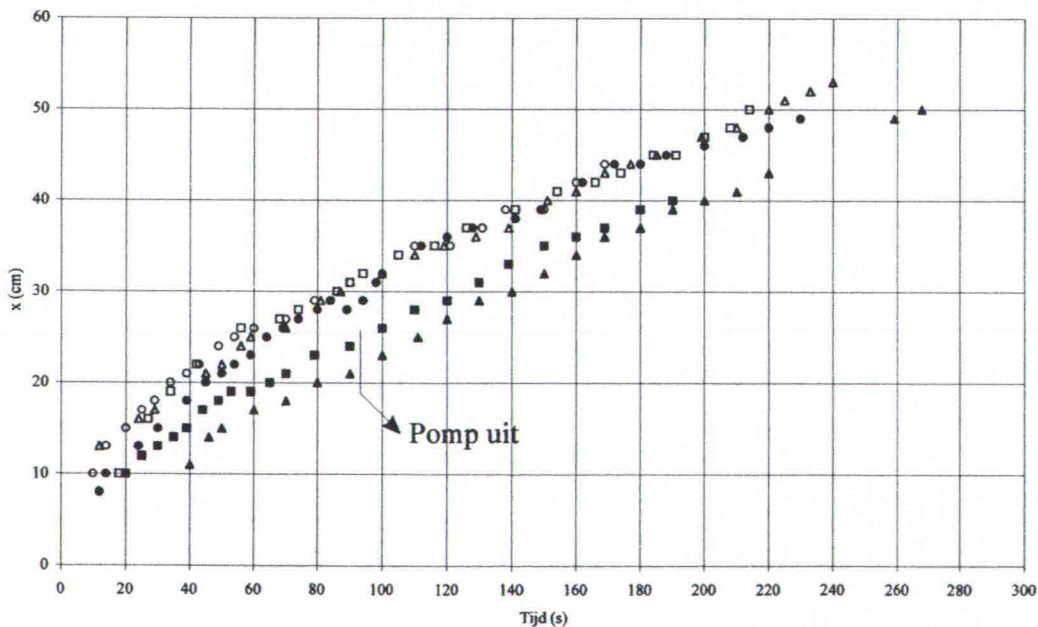
Uit deze proeven bleek dat de grootte van de zuigput als functie van de tijd weinig afhankelijk was van de zuigsnelheid. Dit komt doordat de watersnelheden zeer snel afnemen met de afstand tot de zuigmond van de buis. De waterbeweging gecreëerd door het zuigen van de buis, heeft slechts tot op een afstand van anderhalve buisdiameter – gemeten vanaf de symmetrieas van de buis – een invloed op de beweging van de zandkorrels. Dit betekent dat het invloedsveld van het zuigen van

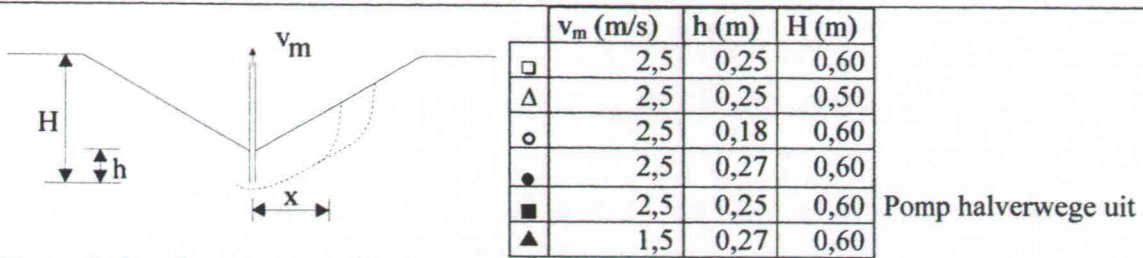
de buis een zeer beperkte omvang heeft en dus ook geen grote invloed uitoefent op de zandproductie van de put.



Figuur 2: Ontwikkeling van de kuilvorming in de tijd.

Tijdens sommige van de proeven werd de pomp stilgelegd. Dit had echter geen enkel effect op de voortplanting van de gecreëerde wal. De meetresultaten van zo'n meting zijn voorgesteld op figuur 3. Uiteindelijk kunnen we dus stellen dat de rol van de zuigbuis zich beperkt tot het creëren van de verstoring in het talud, en het evacueren van het geërodeerde zand dat de talud afstroomt.

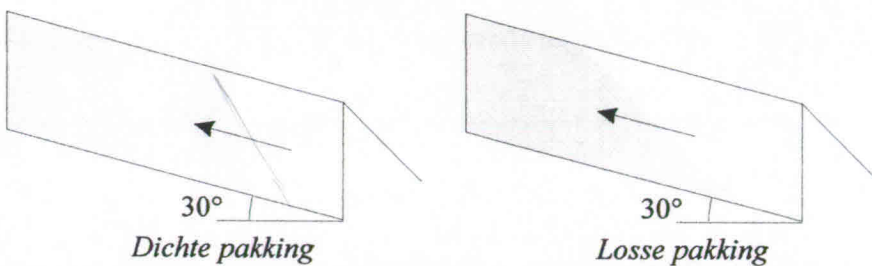




Figuur 3: Resultaten van enkele metingen.

### 1.3. Invloed van de pakking

Voor een onderzoek naar de invloed van de pakking op het afstromen van het materiaal zijn een aantal proeven uitgevoerd in een bak waar het zuigen door het wegdraaien van een klep werd gesimuleerd. Na het weg draaien van de klep kon het materiaal wegstromen.

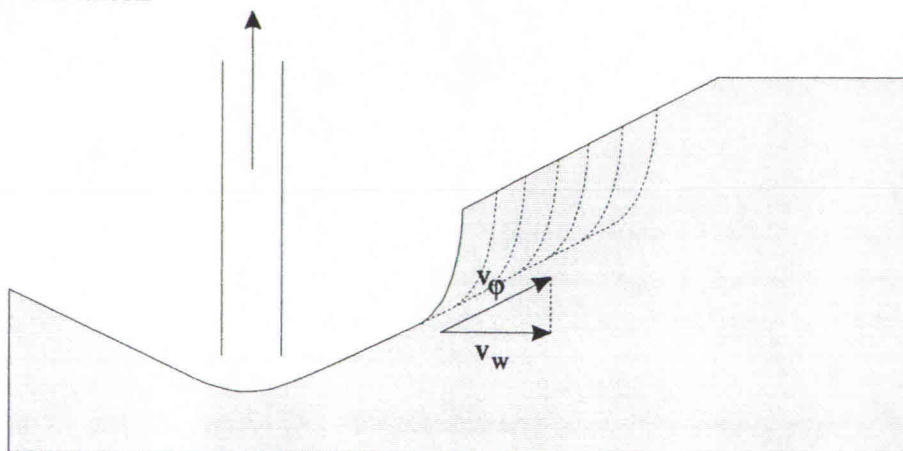


Figuur 4: Simulatie van het zuigen door een klep.

Deze proeven werden uitgevoerd met glasparels. Er bleek een grote invloed van de pakking van de parels op de wijze van afstromen. Bij een losse pakking stroomde het materiaal in korte tijd – orde van 10 seconden – weg met slechts een geringe toename van de taludhelling. Bij een dichte pakking trad een vergroting van de taludhelling op en verliep het proces veel langzamer – 40 à 50 seconden.

De aanwezigheid van onderdrukken in de poriën werd vastgesteld. Juist boven het parelpakket was een laag kleurstof aangebracht. Na het opendraaien van de klep drong deze kleurstof de poriën van het parelpakket binnen. Dit wordt verklaard door dat de kleurstof door de ontstane onderdrukken naar binnen gezogen wordt.

### 1.4. Besluiten



Figuur 5: De walsnelheid  $v_w$ .

Uit deze oriënterende zuigproeven blijkt dat de storings die door de zuigbuis in het talud worden aangebracht zich met een nagenoeg constante snelheid langs het natuurlijk talud voortplanten. Deze snelheid is nagenoeg onafhankelijk van de insteekdiepte en de zuigsnelheid. Zelfs het stoppen van de zuigpomp tijdens de proef heeft geen invloed op deze snelheid. De horizontale component van deze snelheid wordt de walsnelheid –  $v_w$  – genoemd – zie figuur 5. Kenmerkend voor deze snelheid is dat ze ook niet afhangt van de steilheid van de verstoring. De walsnelheid is echter wel afhankelijk van de pakking en de doorlaatbaarheid van de grond, de walsnelheid is dus eigenlijk te beschouwen als een eigenschap van het zandpakket.

### 1.5. Overzicht

In deze paragraaf zullen we vlug de algemene opbouw van dit studiewerk schetsen. In het tweede en derde hoofdstuk wordt respectievelijk een wiskundig en empirisch model voor de berekening van de walsnelheid opgesteld. In het vijfde hoofdstuk wordt het wiskundige model geanalyseerd aan de hand van meetresultaten die met de in het vierde hoofdstuk beschreven proeven bekomen werden. Het zesde hoofdstuk geeft ons een overzicht van enkele formules voor de berekening van de doorlaatbaarheid, en dit omdat de kennis van de doorlaatbaarheid van een grond noodzakelijk is om het empirische model te kunnen toe passen. In het zevende hoofdstuk wordt het empirische model geëvalueerd, aangepast en vergeleken met het wiskundige model. De formules voor de berekening van de zandproducties van zuigputten worden opgesteld in het achtste hoofdstuk en geëvalueerd in het tiende hoofdstuk. Deze evaluatie gebeurt aan de hand van de in het negende hoofdstuk beschreven zuigproeven. Het elfde hoofdstuk bundelt naast een aantal bedenkingen bij de voorgaande tien hoofdstukken, ook enkele aanbevelingen voor verder onderzoek. Een overzicht van de geotechnische gegevens van de gebruikte materialen wordt in het twaalfde hoofdstuk gegeven.

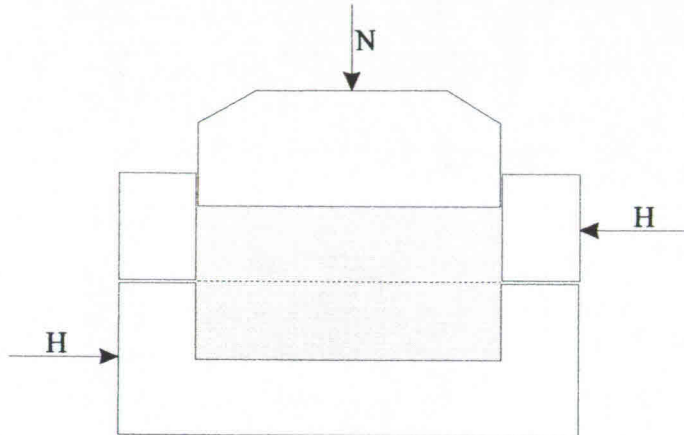
Tenslotte wens ik nog eens de aandacht te vestigen dat de kennis om de walsnelheid te berekenen niet zo zeer zijn terugslag op technisch vlak maar vooral op economisch vlak heeft. Uit een goede kennis van de walsnelheid kunnen we afleiden welk baggermaterieel er best gebruikt kan worden. Het leert ons ook hoe dit materieel optimaal gebruikt wordt en hoelang het gebruikt zal moeten worden om een bepaald werk uit te voeren. Samengevat betekent dit dat een goede kennis van de walsnelheid ons een goede schatting van de totale economische kost van het werk zal leveren.

## Hoofdstuk 2: De walsnelheid: theoretische beschrijving

### 2.1. Dilatantie

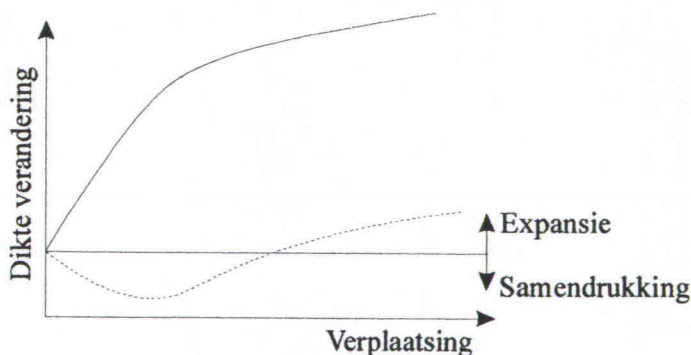
Om het fenomeen van de walsnelheid te verklaren is een kennis van het begrip dilatantie onontbeerlijk. Hier volgt eerst een korte beschrijving van dit fenomeen.

Bij een directe afschuivingsproef wordt het grondmonster in een doos geplaatst, bestaande uit twee delen, gesneden volgens een horizontaal symmetrievlak. Beide halve dozen glijden praktisch zonder wrijving over elkaar. Het monster ondergaat een verticale en constante kracht  $N$ . De onderste halve doos wordt met een constante snelheid verplaatst – soms met een constante belastingsgradiënt – terwijl de bovenste tegengehouden wordt door middel van een dynamometrische ring, die de waarde van de uitgeoefende horizontale kracht  $H$  opmeet. Het monster ondergaat aldus een bijna zuivere afschuiving in het snijvlak.



Figuur 6: De directe afschuivingsproef.

In functie van zijn pakking kan de grond op twee duidelijk verschillende manieren reageren. Wanneer bij een bepaalde normaalbelasting  $N$  het monster afgeschoven wordt, dan zien we dat bij een losse pakking de nodige schuifkracht  $H$  oplopen tot een bepaalde eindwaarde. Bij een monster met vaste pakking zien we evenwel dat er een hogere waarde van de nodige afschuifkracht  $H$  bereikt wordt, maar naar het einde toe wordt de nodige afschuifkracht gelijk aan deze van de losse pakking. Bij een vaste pakking moet er dus initieel een grotere weerstand overwonnen worden.



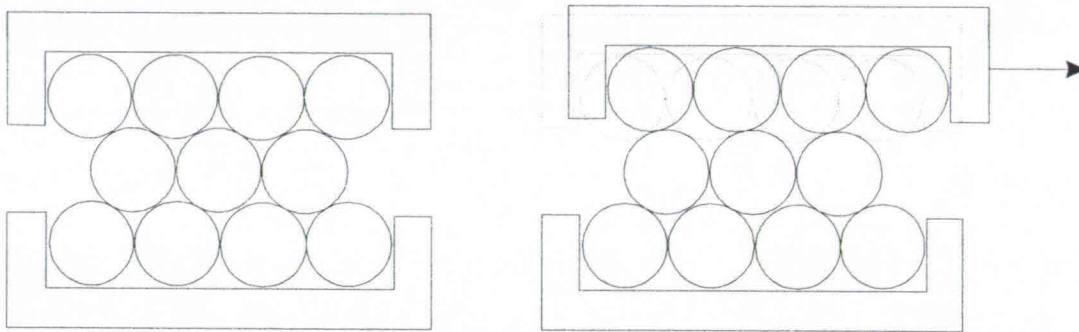
Figuur 7: Volume verandering tijdens de proef.

Een ander waargenomen effect bij deze proef is de verandering van de hoogte van het monster tijdens het afschuiven. Dit verschijnsel wordt weergegeven op de figuur 7, de volle lijn stelt de



volume verandering bij een vaste pakking voor, de streeplijn deze bij een losse pakking. Bij het los gepakte monster wordt de hoogte van het monster tijdens de proef kleiner, we hebben dus een samendrukking. Bij het vast gepakte monster neemt de hoogte tijdens de proef meteen toe. In dit geval krijgen we duidelijk een volumevergroting van het monster, dit fenomeen wordt dilatantie genoemd.

Het verschil wordt verklaard door de manier waarop de breuk ontstaat. Bij een zeer losse grond kan het skelet gemakkelijk herschikt worden, de grondkorrels kunnen inderdaad de relatief grote tussenruimtes zonder moeite bezetten zodat de afschuiving gepaard gaat met een verdichting van het monster en dus met een volume vermindering. Bij een zeer dichte grond daarentegen, moeten de grondkorrels zich eerst vrijmaken om over elkaar te kunnen glijden, zodat de afschuiving gepaard gaat met een volume vermeerdering – zie figuur 8.



Figuur 8: Breukmechanisme bij dichte pakking.

Het verschijnsel van dilatantie ervaren we ook wanneer we bij laag water over het harde, goed beloobbare deel van het natte strand lopen. Dit strand ontleent zijn hardheid aan de relatief dichte pakking die het zand door de werking van de golven heeft verkregen. Bij elke voetstap die we zetten, zien we het zand om onze voet wit worden. Door de belasting vindt blijkbaar geen samenpersing of volumeverkleining plaats – indien dit zou gebeuren dan zou het water aan de oppervlakte tevoorschijn komen. Blijkbaar voltrekt er zich een volume vermeerdering, dilatantie, die het water van het oppervlak naar binnen zuigt. Bij vastgepakt zand zal dus elke volume verandering door een uitwendige belasting alleen maar een volume vergroting kunnen zijn.

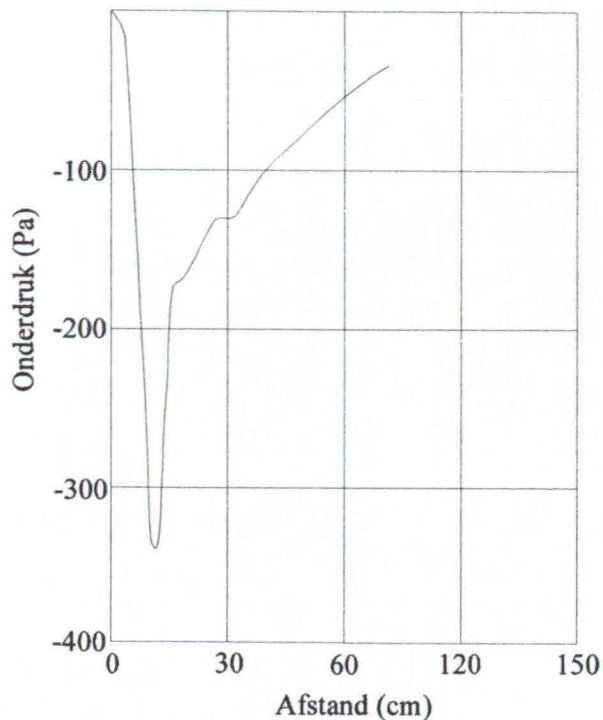
## 2.2. Theoretisch model van de walsnelheid

### 2.2.1. Theoretische beschrijving

Voor de afleiding van de formules van de walsnelheid  $v_w$  worden alleen taluds beschouwd, bestaande uit zanden die dichter gepakt zijn dan de kritische pakking. Alleen in dit geval zal er tijdens de afschuiving een volume vergroting plaatsvinden – dilatantie.

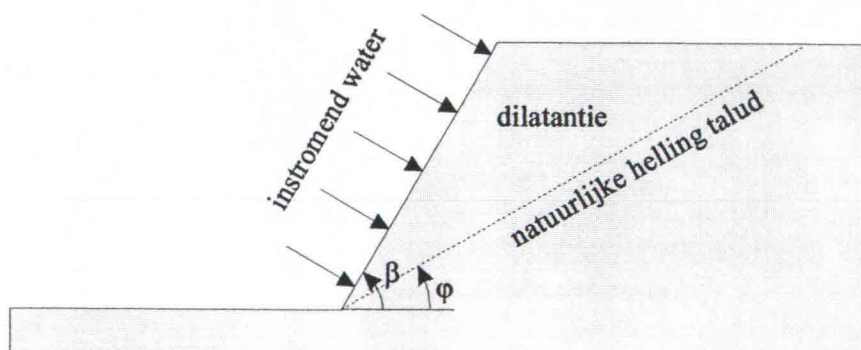
We zullen één voortbewegende storing beschouwen. Deze storing is in feite een talud met een helling die steiler is dan de helling van het natuurlijke talud. Dit talud is niet stabiel en zal ten gevolge van zijn eigengewicht willen afschuiven.

De volume vergroting die optreedt tijdens het afschuiven zal ervoor zorgen dat de ruimte tussen de korrels groter wordt en hierdoor zal de poriëndruk dalen. De verlaagde poriëndruk zal de zandkorrel samen houden, en zo kan het talud een helling groter dan zijn natuurlijke helling vertonen. Figuur 9 toont de experimenteel bepaalde drukverlaging in een actieve bres van 0,8m en met een taludhelling van  $80^\circ$ .



Figuur 9: De poriëndruk in de bres.

Aangezien de poriëndruk lager is dan de lokale waterdruk zal het omringende water het talud binnen stromen en uiteindelijk de drukgradiënt gaan neutraliseren. De onderdruk tussen de korrels is nu verdwenen, en het talud zal wegschuiven tot het zijn natuurlijke helling bereikt heeft. De snelheid waarmee dit afschuiffront zich zal verplaatsen hangt duidelijk af van de snelheid waarmee het water de poriën kan infiltreren, dus van de doorlaatbaarheid van de grond. Hoe groter de doorlaatbaarheid van de grond, hoe sneller de beweging van het talud zal zijn. Als de grond meer gecompacteerd is, zal de volumevergroting groter zijn, dus zal de hoeveelheid water die de poriën moet binnen stromen groter zijn, en hieruit volgt dat de beweging van het talud trager zal verlopen. Een ander gevolg van een grotere compactheid is de lagere doorlaatbaarheid. Een verhoogde compactheid heeft dus een dubbel vertragend effect op de walsnelheid.



Figuur 10: Een onstabiel onderwater talud.

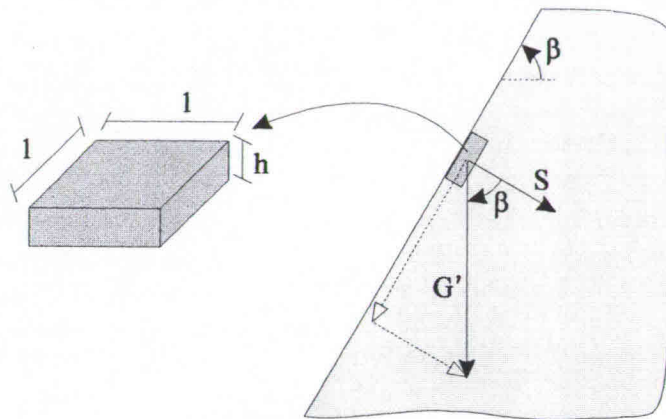
## 2.2. Analytische uitdrukking

We moeten echter wel opmerken dat het walletjesfenomeen niet enkel een oppervlakteverschijnsel is, want in een groot deel van het talud treden er deformaties op. Toch kan met een eenvoudige model, waarbij alleen verschijnselen nabij het taludoppervlak in beschouwing worden genomen, een goede beschrijving van de walletjesnelheid gegeven worden.

In de berekeningen wordt een index "o" gebruikt om de initiële toestand aan te duiden, een index "\*" wijst op de toestand wanneer er nog juist geen afschuiving optreedt.

Op het talud beschouwen we een grondmootje met een eenheidslengte en breedte, en een dikte  $h$ . Op dit mootje werken de volgende krachten in:

- $G'$  – het eigengewicht van het grondmootje. Aangezien de grond ondergedompeld is wordt dit:  
 $G' = (\gamma_m - \gamma_w) \cdot 1 \cdot 1 \cdot h^*$ ,  $G'$  is vertikaal naar beneden gericht en  $\gamma_w$  en  $\gamma_m$  zijn respectievelijk het specifiek gewicht van het water en het grond-water mengsel.
- $S$  – de kracht die door het binnen stromende water op het instroomoppervlak wordt uitgeoefend:  
 $S = \gamma_w \cdot (\tan i \cdot h^*) \cdot 1 \cdot 1 \approx \gamma_w \cdot i \cdot h^*$ ,  $S$  is loodrecht op het instroomoppervlak gericht, en  $i$  is de hydraulische gradiënt.



Figuur 11: De krachten inwerkend op een grondmootje.

Bij grensevenwicht hebben we – indien we een cohesieloze grond beschouwen:

$$G' \cdot \sin \beta = (S + G' \cdot \cos \beta) \cdot \tan \varphi$$

waarbij  $\varphi$  de inwendige wrijvingshoek van het ondergedompelede zand is.

Indien we  $G'$  en  $S$  door hun respectievelijke uitdrukkingen vervangen vinden we:

$$(\gamma_m - \gamma_w) \cdot h^* \cdot \sin \beta = [\gamma_w \cdot h^* \cdot i + (\gamma_m - \gamma_w) \cdot h^* \cdot \cos \beta] \cdot \tan \varphi$$

$$\gamma_w \cdot i \cdot \tan \varphi = (\gamma_m - \gamma_w) \cdot \sin \beta - (\gamma_m - \gamma_w) \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi$$

$$i = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} \left( \frac{\sin \beta}{\tan \varphi} - \cos \beta \right)$$

Als  $q$  het debiet van het binnenstromende water is om de poriën te vullen, dan vinden we volgens de wet van Darcy:

$$q = k^* \cdot \Omega \cdot i, \text{ met } \Omega \text{ het binnenstroomoppervlak dat gelijk is aan } 1 \cdot 1.$$

De volumeverandering is gelijk aan de hoeveelheid binnen stromend water, dus:

$$\Delta V = q \cdot \Delta t$$

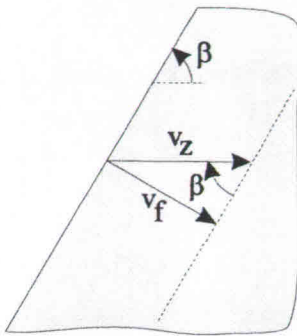
$$V^* - V_0 = k^* \cdot i \cdot \Delta t$$

$$\frac{V^* - V_0}{V_0} \cdot V_0 = k^* \cdot i \cdot \Delta t$$

$$\Delta n \cdot V_0 = k^* \cdot i \cdot \Delta t, \text{ met } V_0 = h_0 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\frac{h_0}{\Delta t} = \frac{k^* \cdot i}{\Delta n}$$

Indien we de filtersnelheid van het water door  $v_f$  aanduiden en de horizontale voortplantingsnelheid van het talud  $v_z$  noemen dan zien we op figuur 12 het volgende verband:



Figuur 12: Verband tussen  $v_z$  en  $v_f$ .

$$v_f = \sin \beta \cdot v_z$$

$$v_z = \frac{v_f}{\sin \beta}$$

$$= \frac{h_0}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\sin \beta}$$

Aangezien het water een afstand  $h_0$  in de grond binnendringt gedurende een tijdsspanne  $\Delta t$ , is de filtersnelheid  $v_f$  dus het quotiënt van deze twee termen.

$$= \frac{k^* \cdot i}{\Delta n} \cdot \frac{1}{\sin \beta}$$

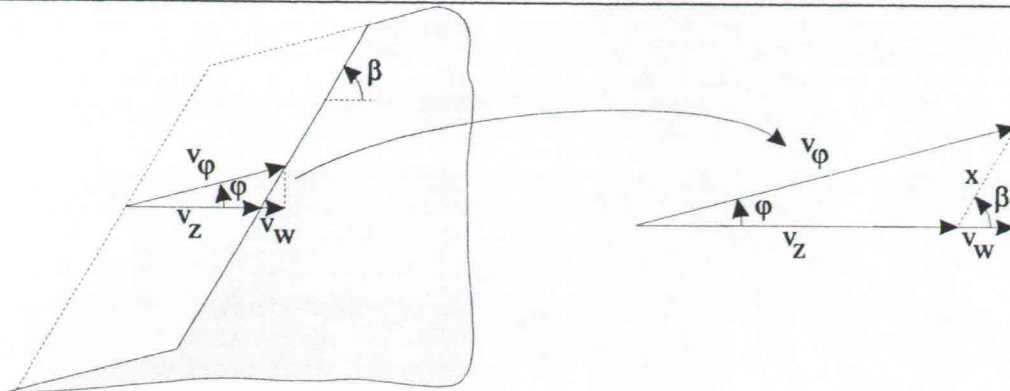
Indien we in deze laatste uitdrukking  $i$  vervangen dan vinden we:

$$v_z = \frac{k^*}{\Delta n} \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} \left( \frac{\sin \beta}{\tan \varphi} - \cos \beta \right) \cdot \frac{1}{\sin \beta}$$

$$= \frac{k^*}{\Delta n} \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} \left( \frac{1}{\tan \varphi} - \frac{1}{\tan \beta} \right)$$

$$= \frac{k^*}{\Delta n} \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} \frac{1}{\tan \varphi} \left( 1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \right)$$

Op de figuur 13 zien we dat er een verband tussen deze snelheid  $v_z$  en de gezochte walsnelheid  $v_w$  bestaat. De snelheid  $v_\varphi$  is de voortplantingssnelheid van de wal, deze snelheid is met een hoek  $\varphi$  geheld ten opzichte van een horizontaal.



Figuur 13: Verband tussen  $v_z$  en  $v_w$ .

Uit de figuur 13 kunnen we de twee volgende relaties halen:

$$x \cdot \cos\beta = v_w - v_z$$

$$\frac{x}{\sin\phi} = \frac{v_\phi}{\sin(180^\circ - \beta)}$$

Als we  $x$  uit deze twee vergelijkingen elimineren vinden we:

$$\frac{v_w - v_z}{\sin\phi \cdot \cos\beta} = \frac{v_\phi}{\sin\beta}$$

Op figuur 13 zien we ook het volgende verband tussen  $v_\phi$  en  $v_w$ :

$$v_w = v_\phi \cdot \cos\phi$$

Als we nu  $v_\phi$  elimineren krijgen we:

$$\frac{v_w - v_z}{\sin\phi \cdot \cos\beta} = \frac{v_w}{\sin\beta \cdot \cos\phi}$$

$$v_w - v_w \frac{\sin\phi \cdot \cos\beta}{\cos\phi \cdot \sin\beta} = v_z$$

$$v_z = v_w \cdot \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right)$$

Nu kunnen we  $v_z$  vervangen door de reeds gevonden uitdrukking:

$$v_z = \frac{k^*}{\Delta n} \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} \tan\phi \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right) = v_w \cdot \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right)$$

$$\Rightarrow v_w = \frac{k^*}{\Delta n} \cdot \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{\tan\phi}$$

In deze formule is  $\Delta n$  de relatieve volume verandering en deze wordt als volgt berekend:

$$\Delta n = \frac{V_i^* - V_{i,0}}{V_{i,0}}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta n &= \frac{\frac{V_t^*}{V_s} - \frac{V_{t,0}}{V_s}}{\frac{V_{t,0}}{V_s}} \\
 &= \frac{(1+e^*) - (1+e_0)}{(1+e_0)} \\
 &= \frac{e^* - e_0}{1+e_0} \\
 &= \frac{\frac{n^*}{1-n^*} - \frac{n_0}{1-n_0}}{1 + \frac{n_0}{1-n_0}} \\
 &= \frac{\frac{n^* - n_0 \cdot n^* - n_0 + n_0 \cdot n^*}{(1-n^*)(1-n_0)}}{\frac{1-n_0+n_0}{1-n_0}} \\
 &= \frac{n^* - n_0}{1-n^*}
 \end{aligned}$$

$$\frac{V_v}{V_s} = e \Rightarrow \frac{V_t}{V_s} = 1 + e$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

Het specifieke gewicht van het mengsel grond-water  $\gamma_m$  wordt op volgende manier bepaald:

$$\begin{aligned}
 \gamma_m \cdot V_t &= \gamma_s \cdot V_s^* + \gamma_w \cdot V_v^* && \text{Het ganse poriën volume - } V_v \text{ - is opgevuld met water.} \\
 \gamma_m &= \gamma_s \cdot \frac{V_s^*}{V_t} + \gamma_w \cdot \frac{V_v^*}{V_t} && \frac{V_s}{V_t} = C = 1 - n, \quad \frac{V_v}{V_t} = n \\
 &= (1-n^*) \cdot \gamma_s + n^* \cdot \gamma_w
 \end{aligned}$$

Uit de theorie volgt dan dat het talud uiteindelijk een helling  $\varphi$  ten opzichte van de horizontaal zal aannemen. In werkelijkheid blijkt deze hoek lichtjes kleiner dan  $\varphi$  te zijn. Deze afwijking wordt vermoedelijk verklaard door het individuele gedrag van de korrels – hierop wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 11.

## Hoofdstuk 3: Empirische formules

### 3.1. Inleiding

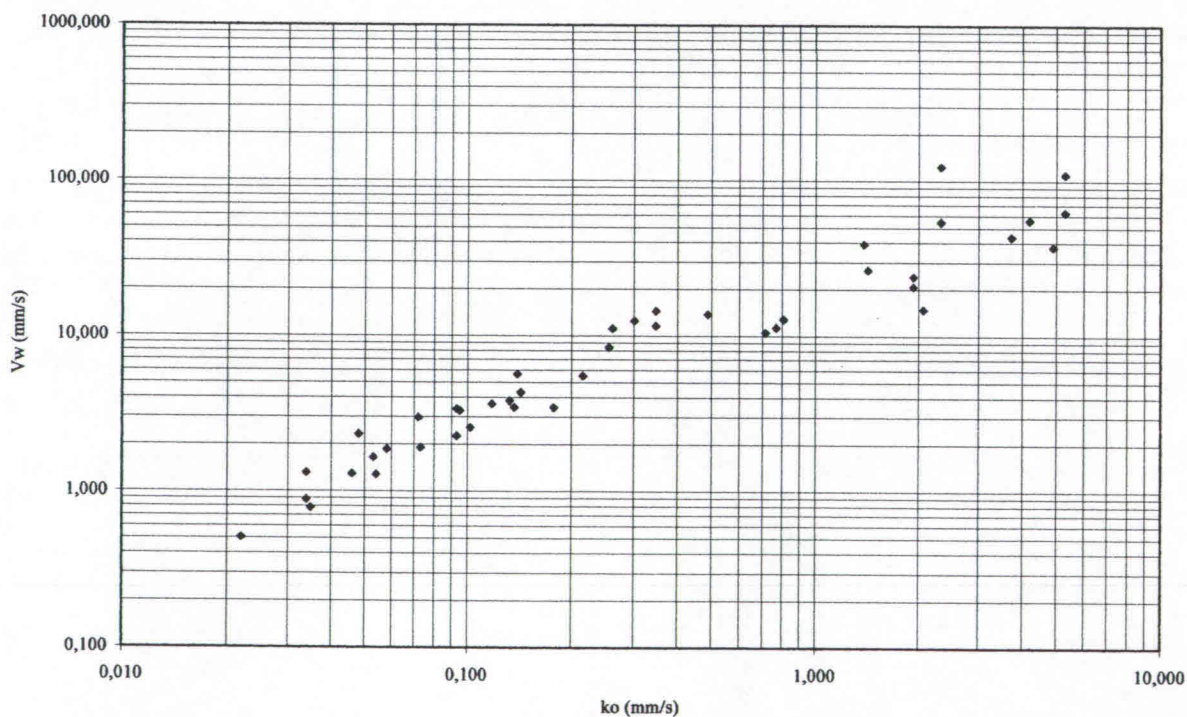
In de archieven van Dredging International werden meetwaarden van 43 metingen van de walsnelheid terug gevonden – tabel 1, pagina 30. Voor elke meting werd echter slechts de walsnelheid  $v_w$  en de doorlaatbaarheid in ongeroerde toestand  $k_0$  bijgehouden. Geen enkel ander gegeven over deze proeven – zoals door wie ze uitgevoerd werden, op welk materiaal ze uitgevoerd werden, ... – kon terug gevonden worden.

Uit de proefresultaten bleek dat  $v_w$  evenredig is met  $k_0$ , zijnde de doorlaatbaarheidscoëfficiënt  $k$  van het zandpakket in ongeroerde toestand. In de theoretisch afgeleide formule blijkt evenwel geen evenredigheid te bestaan tussen de walletjessnelheid  $v_w$  en de doorlaatbaarheid van de ongestoorde grond. De in deze formule voorkomende  $k^*$  is de doorlaatbaarheid van de grond op het moment dat deze gaat afschuiven, en kan voor een bepaalde zandsoort als een constante worden verondersteld, en is dus onafhankelijk van de pakking in ongestoorde toestand.

Dat  $v_w$  toch evenredig blijkt te zijn met de doorlaatbaarheid van het grondpakket in ongeroerde toestand wordt veroorzaakt door een evenredigheid die blijkt te bestaan tussen  $\frac{k^*}{\Delta n}$  en  $k_0$ .

### 3.2. Meetresultaten

Figuur 14 geeft ons een grafische voorstelling van de 43 meetpunten van tabel 1. Wegens de grote rijkwijdte van de meetwaarden zullen we de gegevens op grafieken met een dubbele logaritmische schaal voorstellen.



Figuur 14: Grafische voorstelling van de 43 meetpunten.

	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (mm/s)		$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (mm/s)		$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (mm/s)
1.	0,022	0,504	16.	0,118	3,624	30.	0,768	11,303
2.	0,034	0,885	17.	0,133	3,808	31.	0,806	12,776
3.	0,034	1,313	18.	0,137	3,449	32.	1,389	39,034
4.	0,035	0,783	19.	0,140	5,658	33.	1,428	26,640
5.	0,046	1,294	20.	0,143	4,309	34.	1,931	20,852
6.	0,048	2,321	21.	0,178	3,449	35.	1,931	24,153
7.	0,053	1,641	22.	0,215	5,520	36.	2,072	14,798
8.	0,054	1,281	23.	0,255	8,409	37.	2,330	54,205
9.	0,058	1,857	24.	0,261	11,138	38.	2,330	123,818
10.	0,072	2,972	25.	0,301	12,467	39.	3,728	43,481
11.	0,073	1,904	26.	0,348	14,440	40.	4,192	55,550
12.	0,093	2,264	27.	0,348	11,583	41.	4,905	37,538
13.	0,093	3,364	28.	0,487	13,750	42.	5,303	109,961
14.	0,095	3,282	29.	0,715	10,502	43.	5,303	62,787
15.	0,102	2,562						

Tabel 1: De 43 gevonden meetwaarden.

### 3.3. Regressies

#### 3.3.1. Inleiding

Het is duidelijk dat de doorlaatbaarheid een belangrijk rol speelt in het walfenomeen. Met de gegevens van de 43 metingen die we hebben, kunnen we via een wiskundige regressie een empirische formule voor de walsnelheid in functie van de doorlaatbaarheid in ongeroerde toestand proberen op te stellen. In het totaal werden er 18 verschillende regressie trends uitgerekend. Bij de keuze van deze 18 trends werd geen rekening gehouden met de fysica van het walfenomeen, de keuze van deze 18 trends gebeurde volledig arbitrair.

Paragraaf 3.3.2. geeft een overzicht van de uitgevoerde regressies. Op de eerste regel staat de algemene wiskundige vergelijking van de regressie trend. Daarna de bekomen vergelijking, en op de laatste regel staat de bekomen wiskundige correlatie uitdrukt door de correlatiecoëfficiënt  $R^2$ . In de paragraaf 3.3.3. staan de grafische voorstellingen – met dubbele logaritmische schaal – van deze regressie trends, samen met de meetpunten.

#### 3.3.2. Uitgevoerde regressies

##### 3.3.2.1. Regressie 1

$$y = a \cdot x$$

$$v_w = 15,39 \cdot k_0$$

$$R^2 = 0,622$$

##### 3.3.2.2. Regressie 2

$$y = a \cdot x + b$$

$$v_w = 14,274 \cdot k_0 + 3,649$$

$$R^2 = 0,635$$

##### 3.3.2.3. Regressie 3

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

$$v_w = -1,901 \cdot k_0^2 + 23,139 \cdot k_0 + 0,9972$$

$$R^2 = 0,656$$



**3.3.2.4. Regressie 4**

$$y = a.x^3 + b.x^2 + c.x + d$$

$$v_w = 0,8997.k_0^3 - 8,4899.k_0^2 + 33,836.k_0 - 0,6191$$

$$R^2 = 0,662$$

**3.3.2.5. Regressie 5**

$$y = a.x^4 + b.x^3 + c.x^2 + d.x + e$$

$$v_w = 1,5117.k_0^4 - 14,61.k_0^3 + 40,045.k_0^2 - 12,572.k_0 + 4,6373$$

$$R^2 = 0,699$$

**3.3.2.6. Regressie 6**

$$y = a.x^5 + b.x^4 + c.x^3 + d.x^2 + e.x + f$$

$$v_w = 1,52.k_0^5 - 17,391.k_0^4 + 64,948.k_0^3 - 89,545.k_0^2 + 56,486.k_0 - 1,157$$

$$R^2 = 0,744$$

**3.3.2.7. Regressie 7**

$$y = a.x^6 + b.x^5 + c.x^4 + d.x^3 + e.x^2 + f.x + g$$

$$v_w = -0,3253.k_0^6 + 6,5757.k_0^5 - 46,585.k_0^4 + 141,51.k_0^3 - 177.k_0^2 + 91,535.k_0 - 3,6397$$

$$R^2 = 0,749$$

**3.3.2.8. Regressie 8**

$$y = a.\ln x + b$$

$$v_w = 12,413.\ln k_0 + 33,017$$

$$R^2 = 0,558$$

**3.3.2.9. Regressie 9**

$$y = a.e^{b.x}$$

$$v_w = 3,4353.e^{0,7292.k_0}$$

$$R^2 = 0,6266$$

**3.3.2.10. Regressie 10**

$$y = a.x^b$$

$$v_w = 19,342.k_0^{0,8221}$$

$$R^2 = 0,926$$

**3.3.2.11. Regressie 11**

$$\ln y = a.(\ln x)^b$$

$$\ln(v_w \cdot 1000) = 3,556.(\ln(k_0 \cdot 1000))^{0,5311}$$

$$R^2 = 0,943$$

**3.3.2.12. Regressie 12**

$$\frac{1}{y} = a \cdot \left(\frac{1}{x}\right)^b \Rightarrow y = a' \cdot x^{b'}$$

$$v_w = 19,342 \cdot k_0^{0,8221}$$

$$R^2 = 0,926$$

**3.3.2.13. Regressie 13**

$$\frac{1}{y} = a \cdot \frac{1}{x} \Rightarrow y = a' \cdot x$$

$$v_w = 27,24 \cdot k_0$$

$$R^2 = 0,929$$

**3.3.2.14. Regressie 14**

$$\frac{1}{y} = a \cdot \frac{1}{x} + b \Rightarrow y = \frac{x}{a' + b' \cdot x}$$

$$\frac{1}{v_w} = \frac{k_0}{0,0374 + 0,0142 \cdot k_0}$$

$$R^2 = 0,930$$

**3.3.2.15. Regressie 15**

$$\sqrt{y} = a \cdot \sqrt{x} + b$$

$$\sqrt{v_w} = 3,5296 \cdot \sqrt{k_0} + 0,7233$$

$$R^2 = 0,818$$

**3.3.2.16. Regressie 16**

$$\ln(\sqrt{y}) = a \cdot \ln(\sqrt{x}) + b$$

$$\ln(\sqrt{v_w}) = 0,8239 \cdot \ln(\sqrt{k_0}) + 1,4838$$

$$R^2 = 0,926$$

**3.3.2.17. Regressie 17**

$$\frac{1}{\sqrt{y}} = \frac{a}{\sqrt{x}} + b$$

$$\frac{1}{\sqrt{v_w}} = \frac{0,1787}{\sqrt{k_0}} + 1,4838$$

$$R^2 = 0,946$$

**3.3.2.18. Regressie 18**

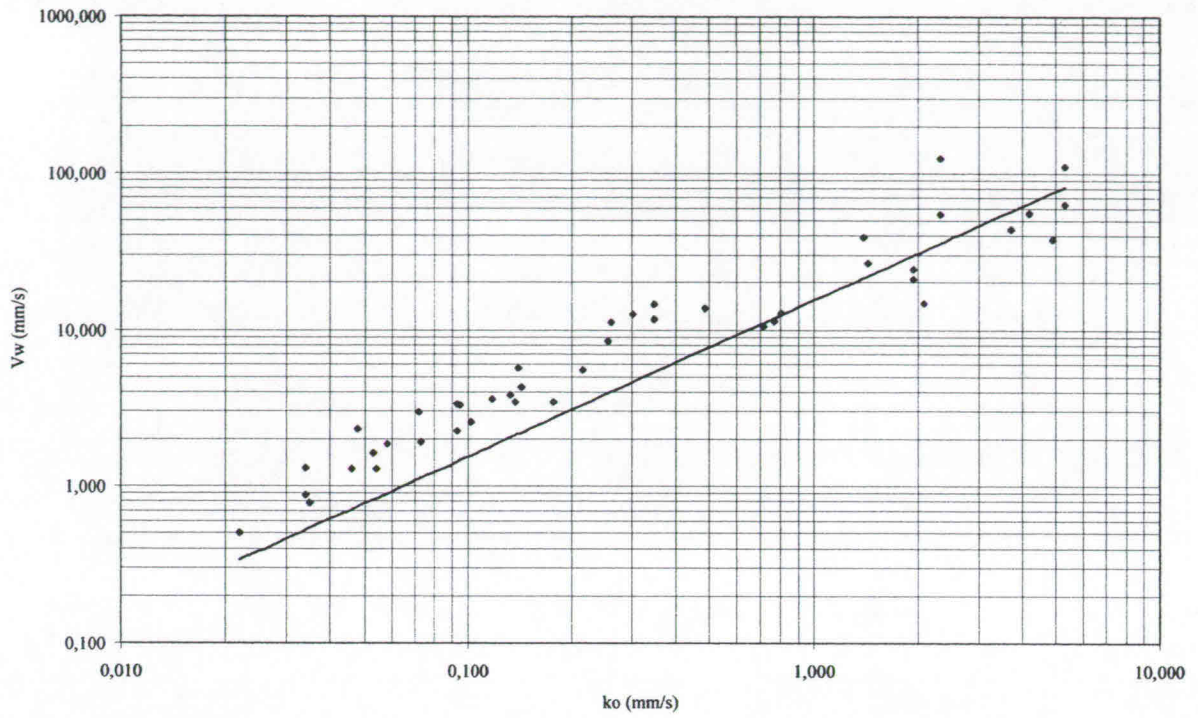
$$\frac{1}{\ln y} = \frac{a}{\ln x} + b$$

$$\frac{1}{\ln(1000 \cdot v_w)} = \frac{0,3277}{\ln(1000 \cdot k_0)} + 0,0530$$

$$R^2 = 0,951$$

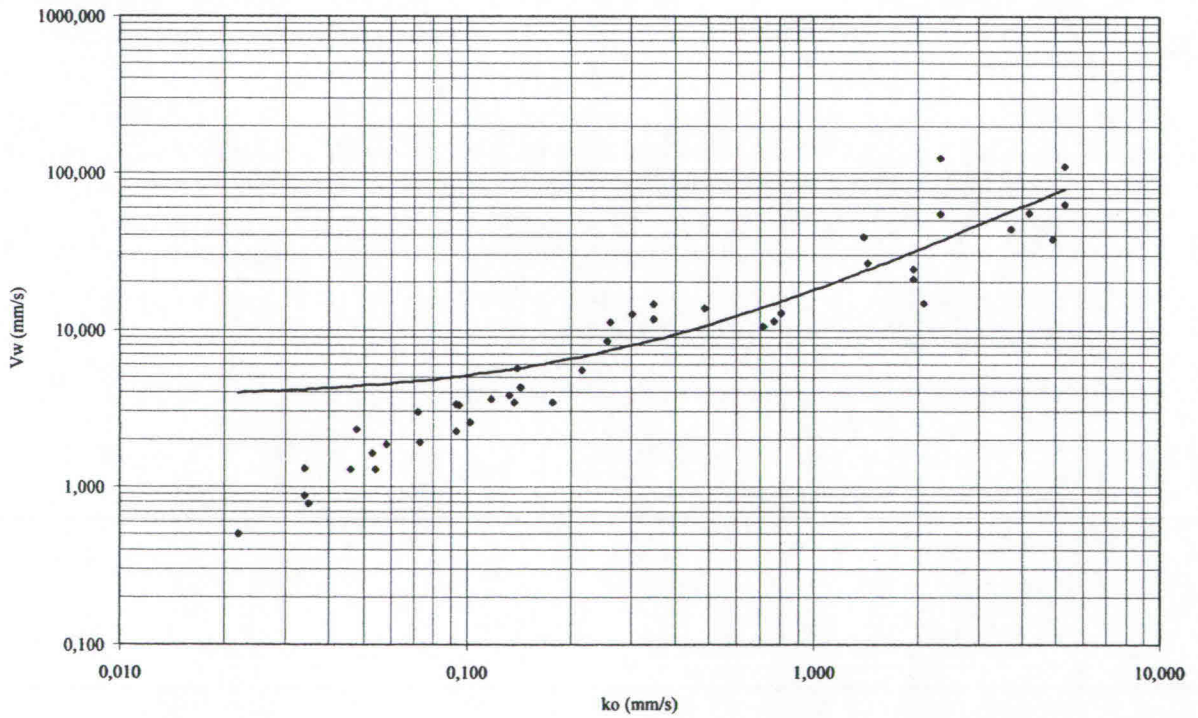
### 3.3.3. Regressie curven

#### 3.3.3.1. Regressie 1



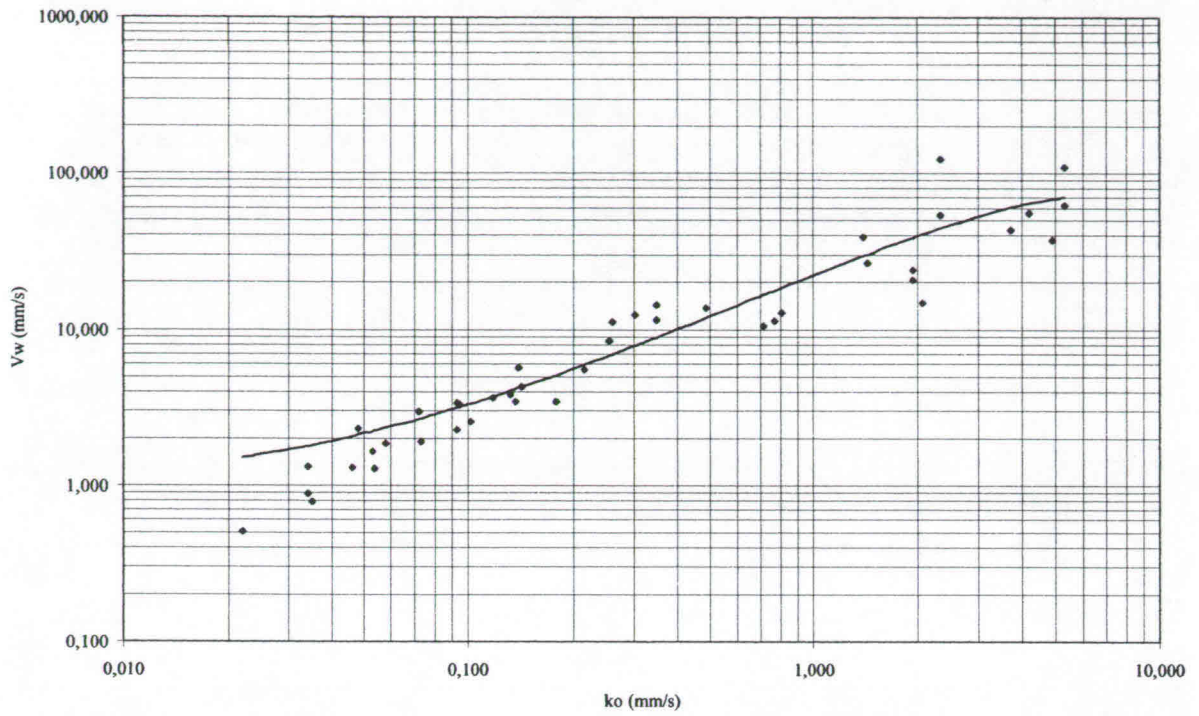
Figuur 15: Regressiecurve 1.

#### 3.3.3.2. Regressie 2



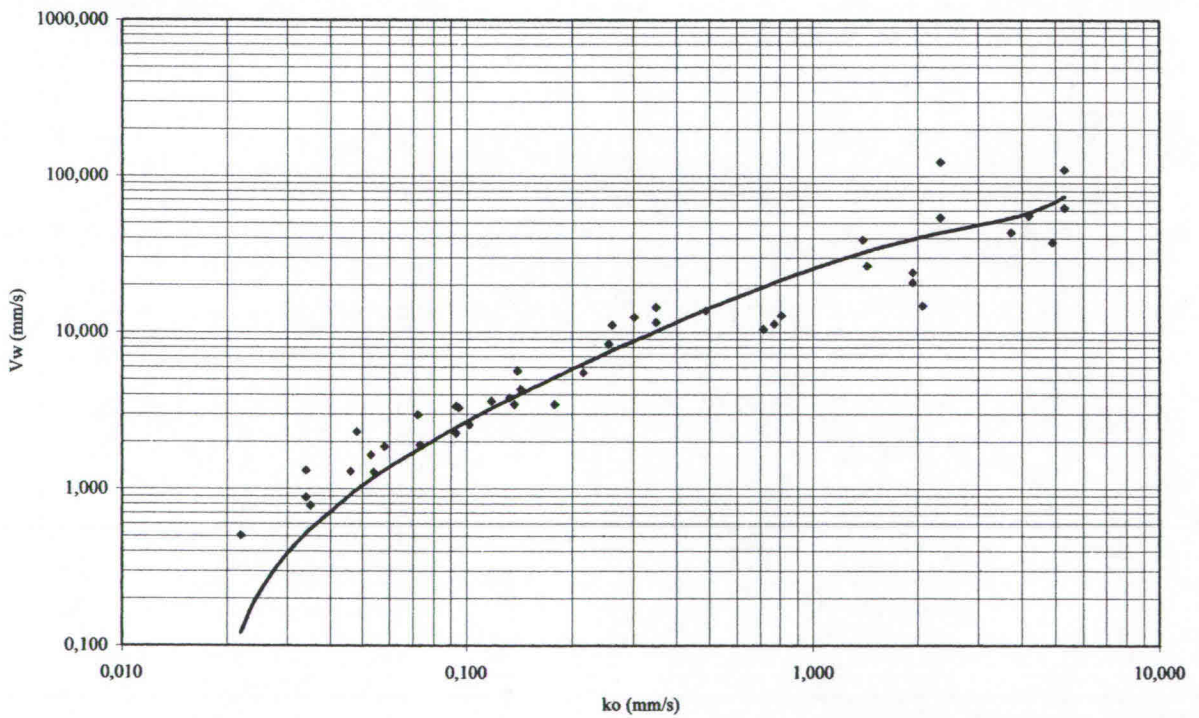
Figuur 16: Regressiecurve 2.

3.3.3.3. Regressie 3



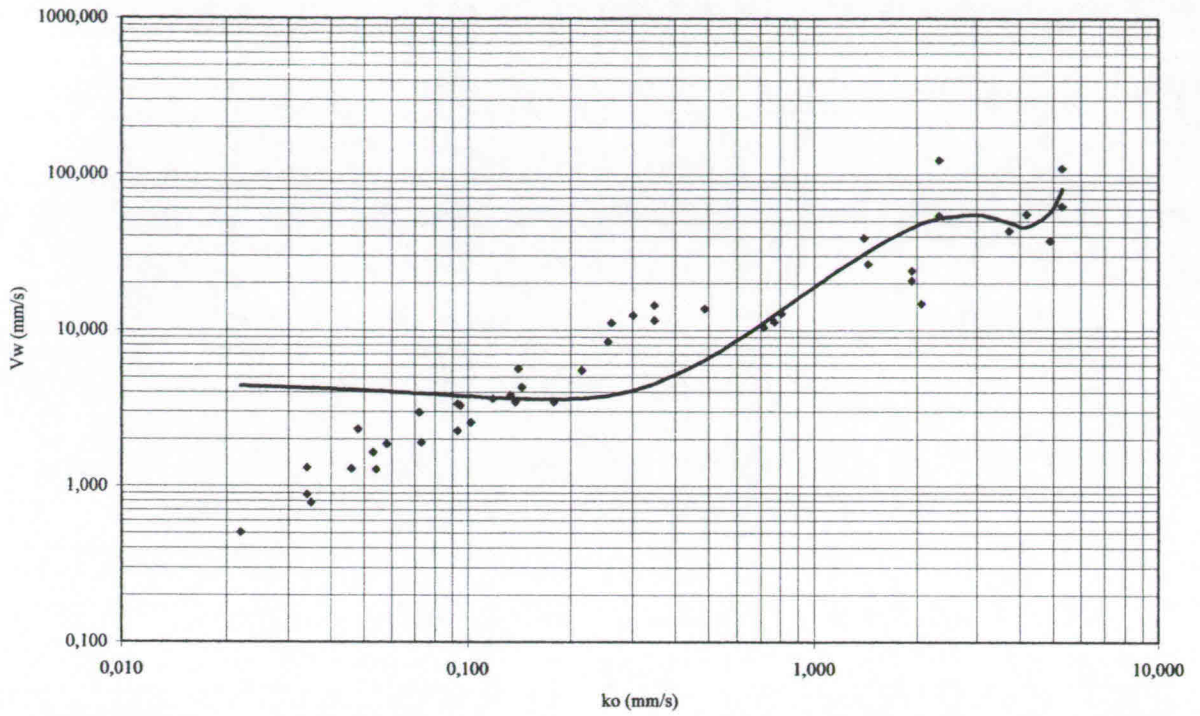
Figuur 17: Regressiecurve 3.

3.3.3.4. Regressie 4



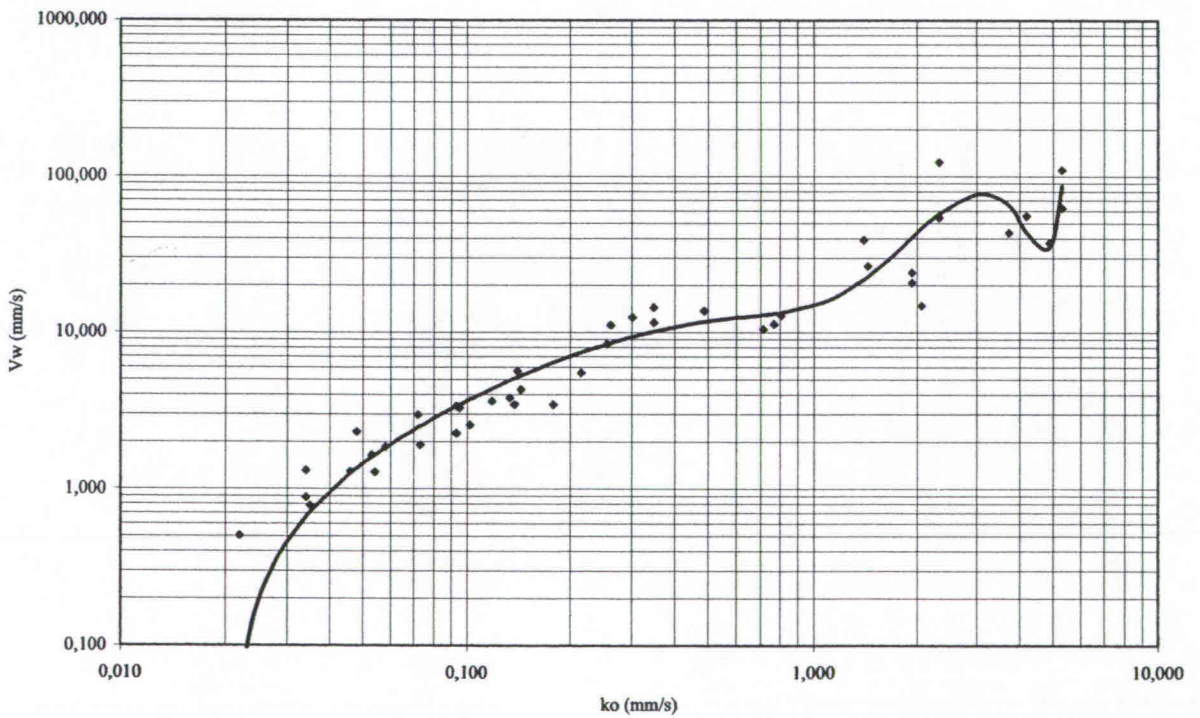
Figuur 18: Regressiecurve 4.

### 3.3.3.5. Regressie 5



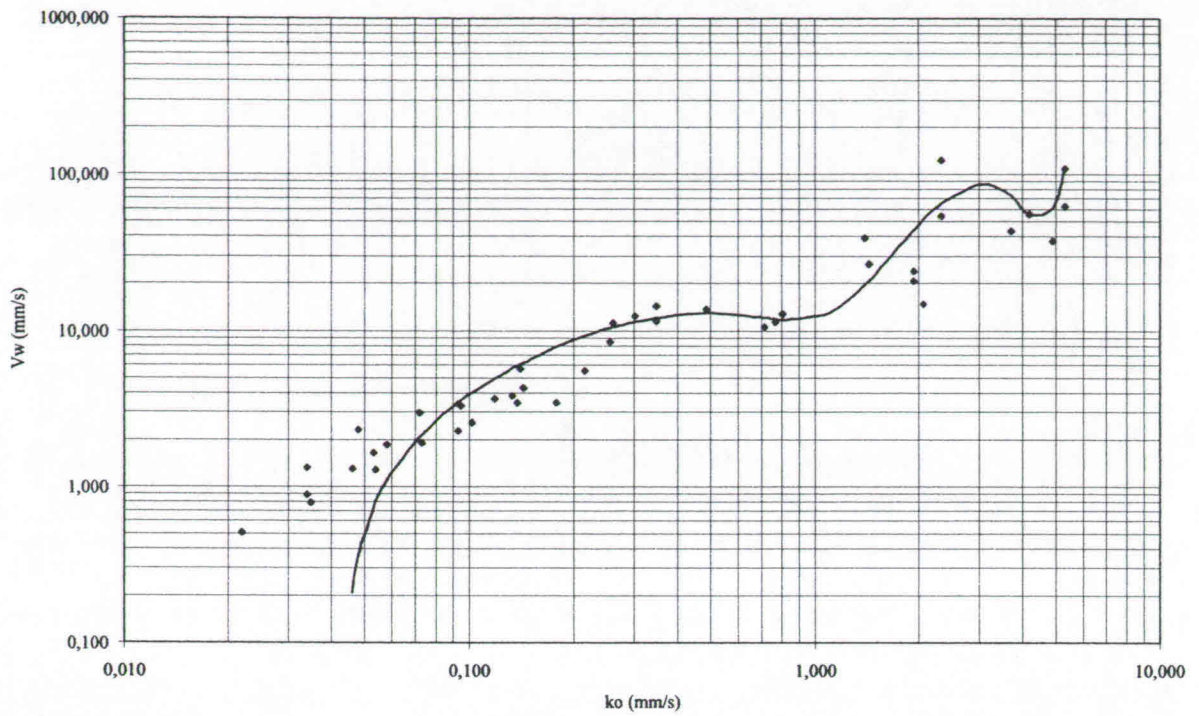
Figuur 19: Regressiecurve 5.

### 3.3.3.6. Regressie 6



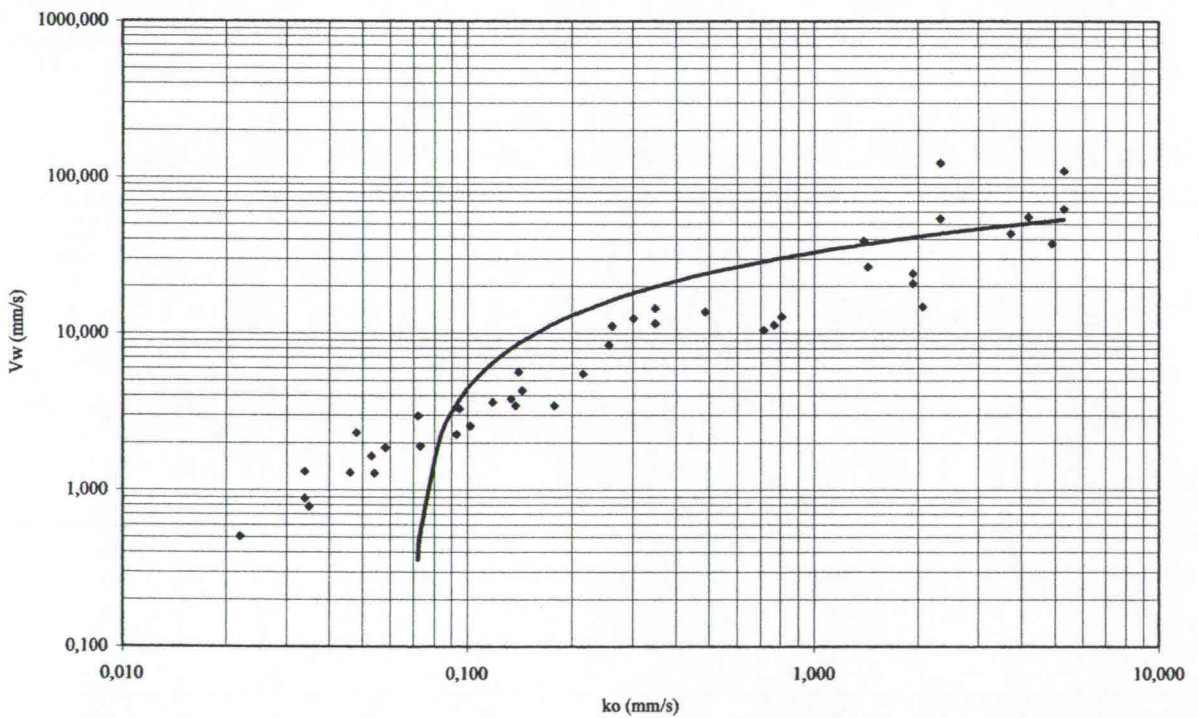
Figuur 20: Regressiecurve 6.

### 3.3.3.7. Regressie 7



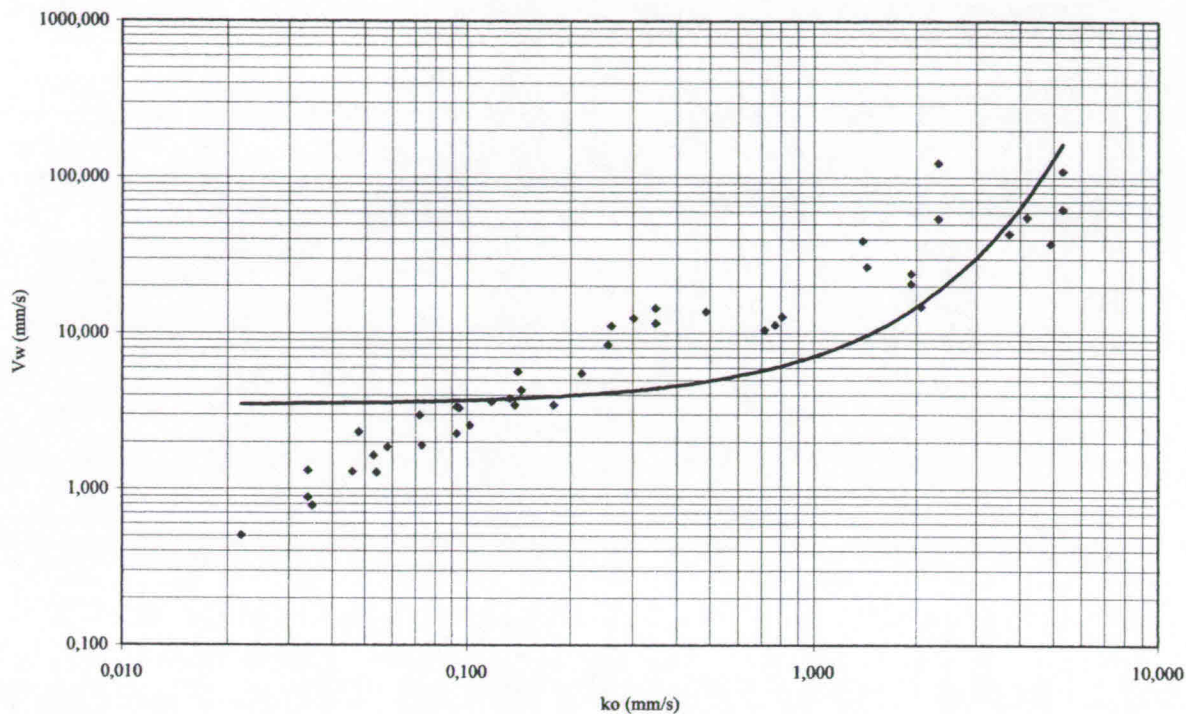
Figuur 21: Regressiecurve 7.

### 3.3.3.8. Regressie 8



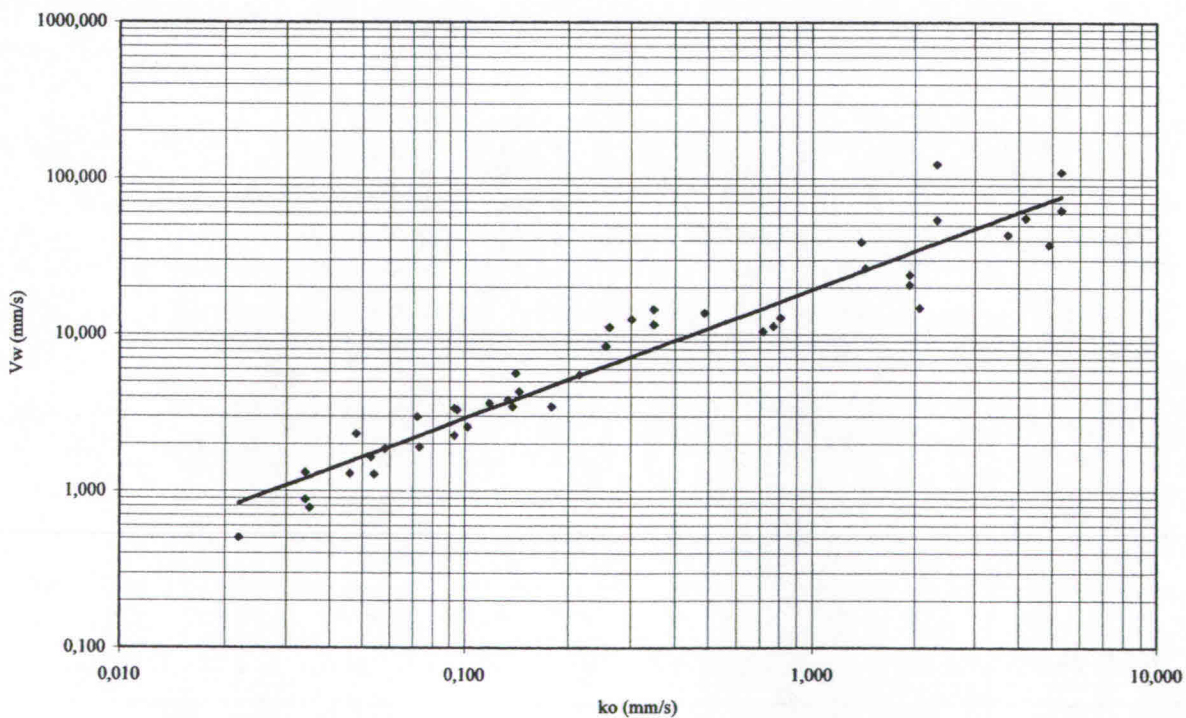
Figuur 22: Regressiecurve 8.

3.3.3.9. Regressie 9



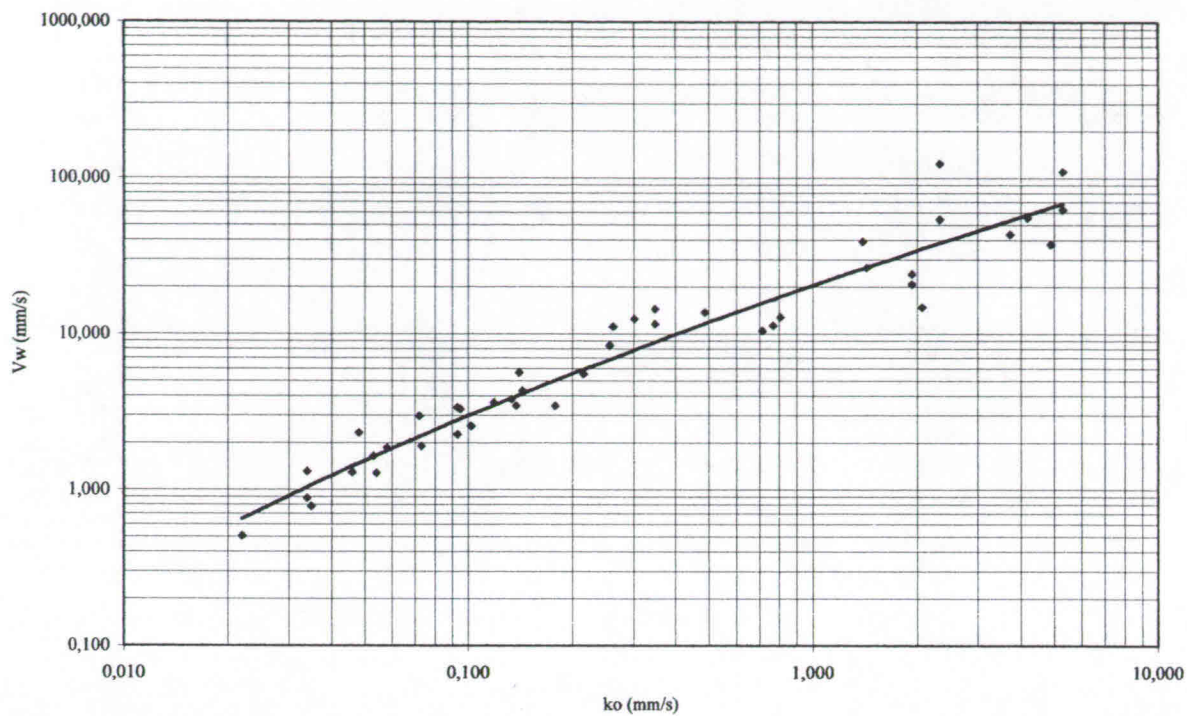
Figuur 23: Regressiecurve 9.

3.3.3.10. Regressie 10



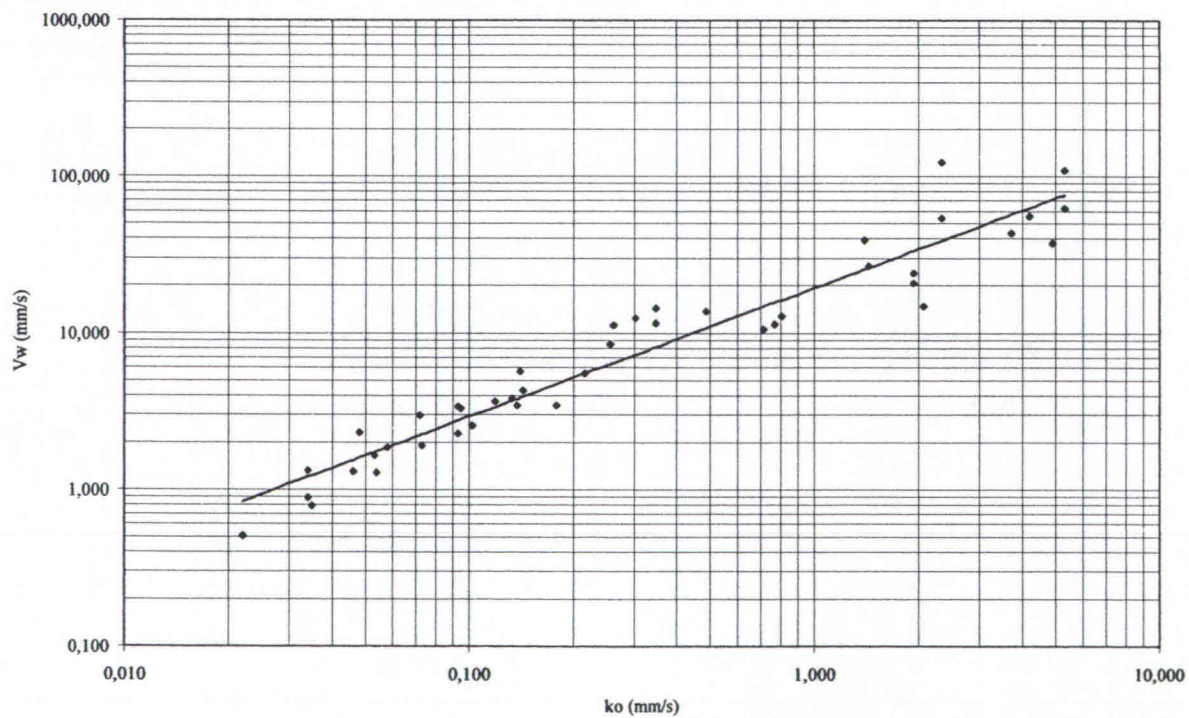
Figuur 24: Regressiecurve 10.

### 3.3.3.11. Regressie 11



Figuur 25: Regressiecurve 11.

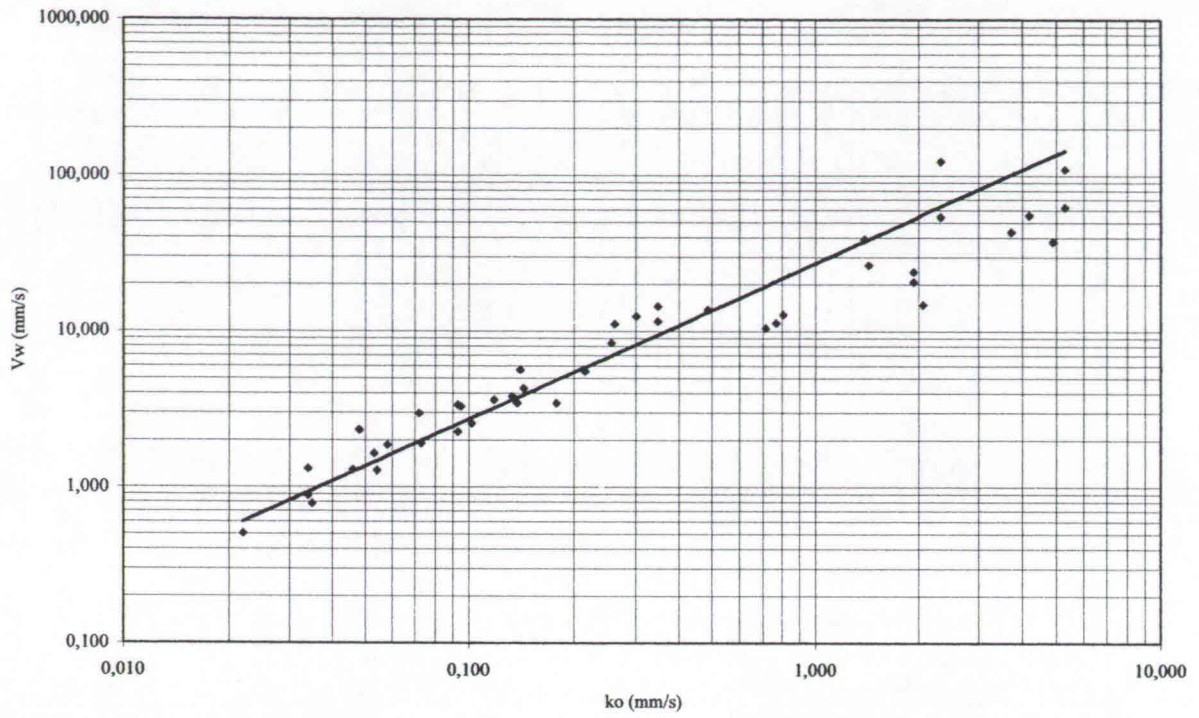
### 3.3.3.12. Regressie 12



Figuur 26: Regressiecurve 12.

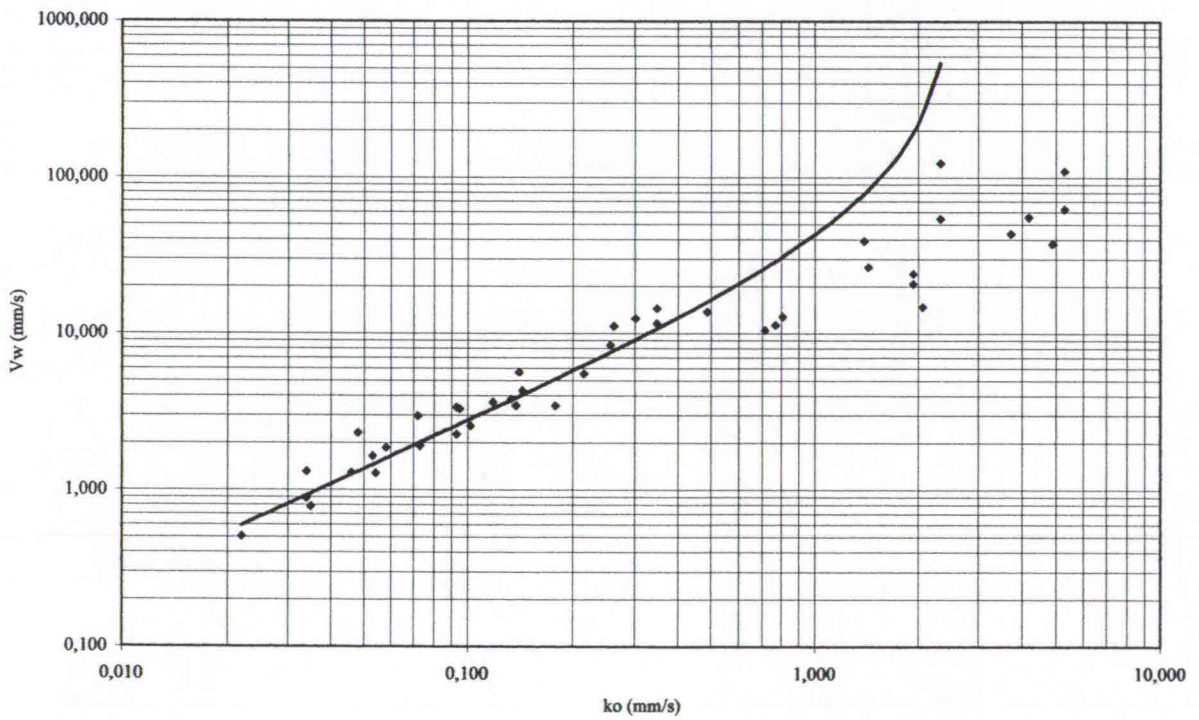


3.3.3.13. Regressie 13



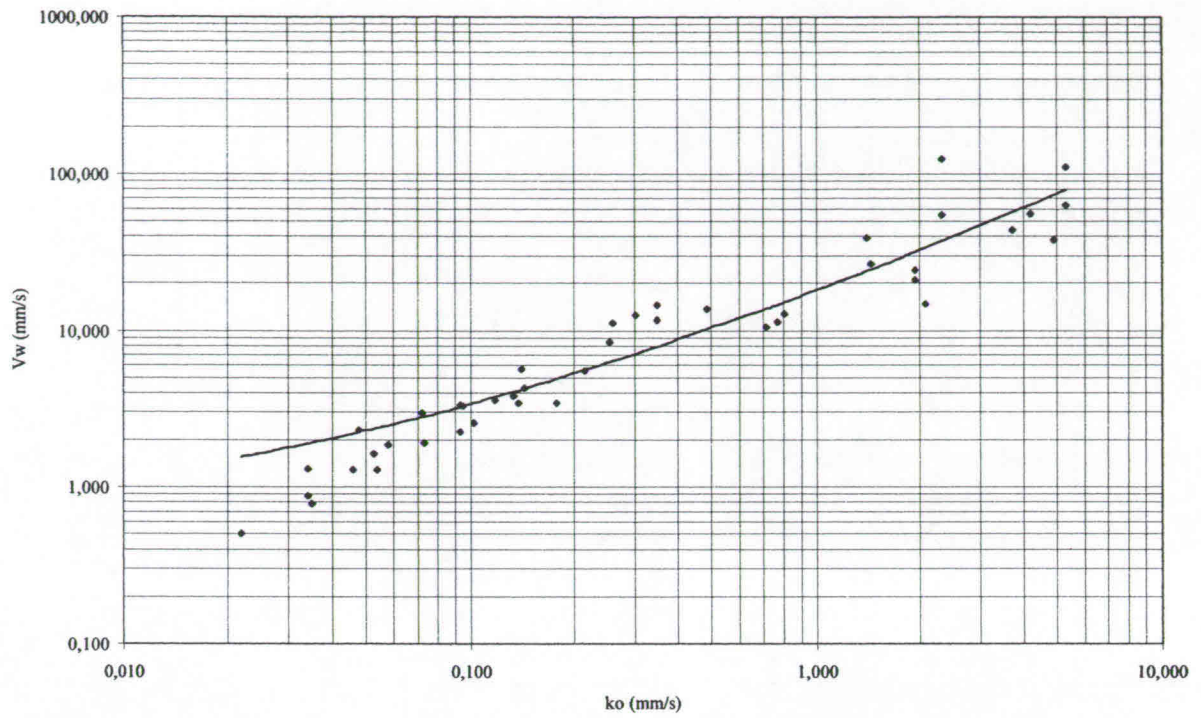
Figuur 27: Regressiecurve 13.

3.3.3.14. Regressie 14



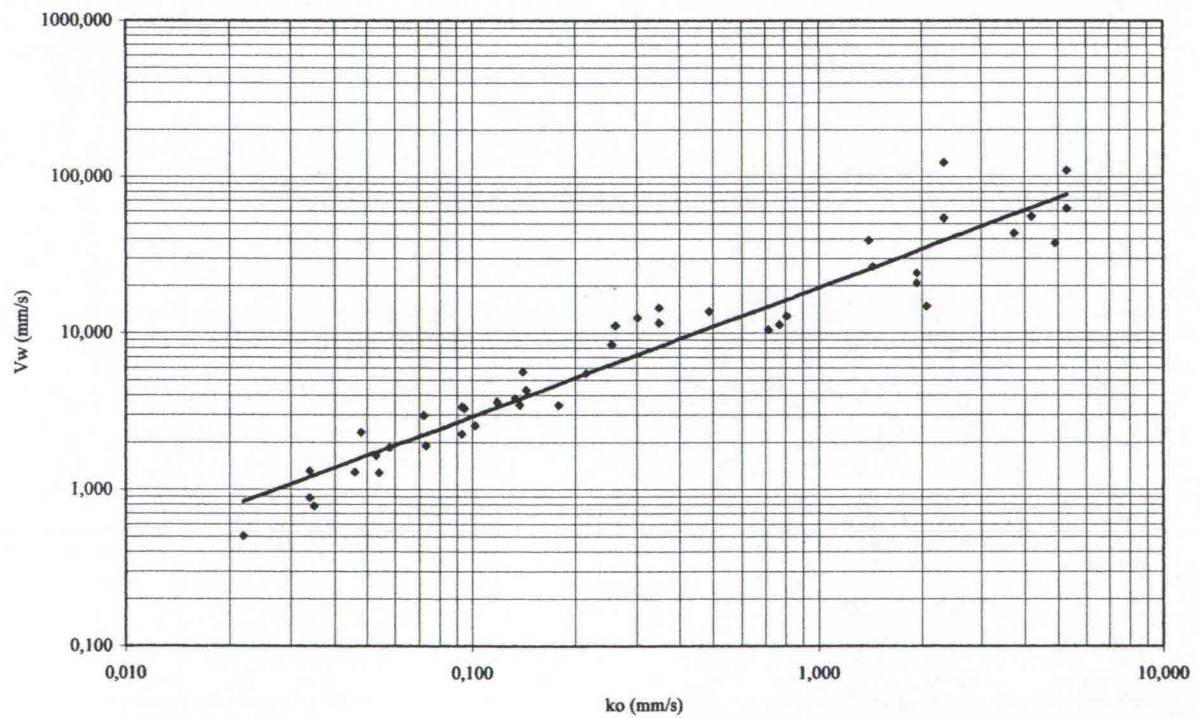
Figuur 28: Regressiecurve 14.

**3.3.3.15. Regressie 15**



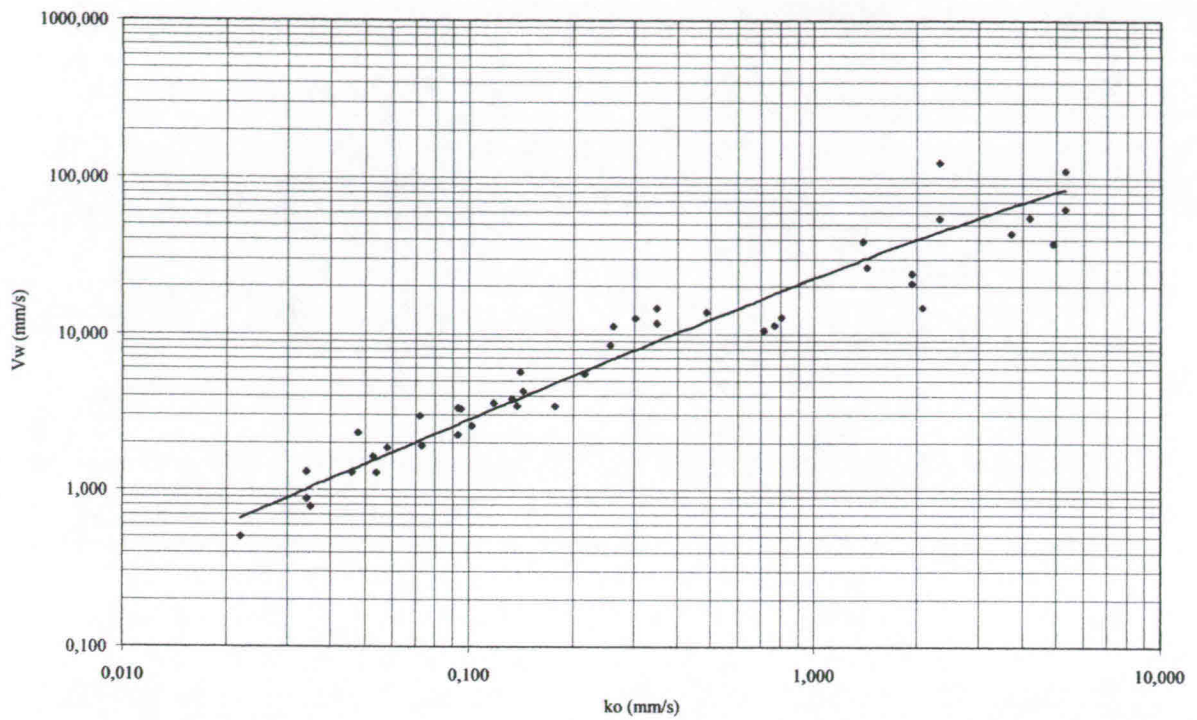
*Figuur 29: Regressiecurve 15.*

**3.3.3.16. Regressie 16**



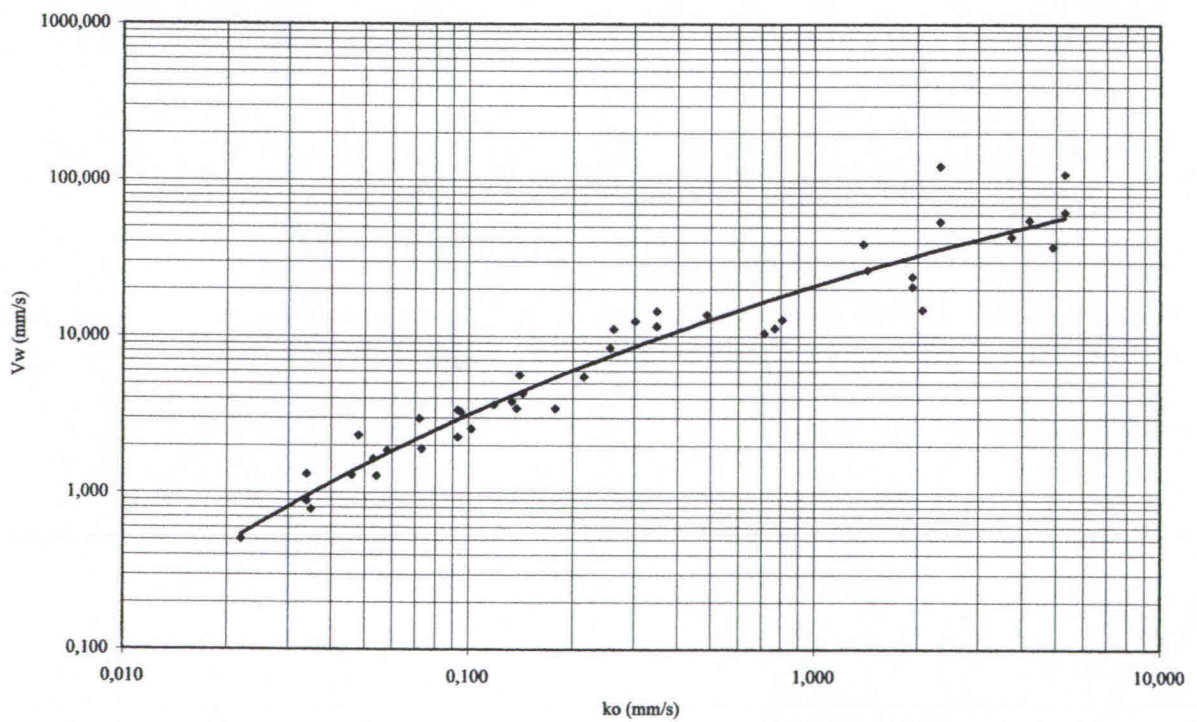
*Figuur 30: Regressiecurve 16.*

3.3.3.17. Regressie 17



Figuur 31: Regressiecurve 17.

3.3.3.18. Regressie 18



Figuur 32: Regressiecurve 18.

### 3.3.4. Bespreking van de regressies

#### 3.3.4.1. Lineaire regressies 1 & 2

De bekomen regressie curve bij de eerste regressie volgt de algemene spreiding van de meetpunten maar toch moeten we op de grafiek 1 opmerken dat de bekomen rechte onder de gevonden meetpunten ligt. Ook de wiskunde correlatie van deze regressie formule is laag  $-0,662$ . In de literatuur van WL|Delft Hydraulics over de walsnelheid werd de uitdrukking  $v_w = 20 \text{ à } 40 \cdot k_0$  terug gevonden. De hier gevonden coëfficiënt van 15 wijkt daar duidelijk van af.

De tweede regressie wijkt enorm af voor de kleine waarden van de doorlaatbaarheidscoëfficiënt, en hierdoor wordt ze onbruikbaar.

#### 3.3.4.2. Polynomiale regressies

##### 3.3.4.2.1. Lage orde functies – regressie 3 & 4

De regressies 3 en 4 zijn polynomiaalfuncties van lagere orde en geven een betere wiskundige correlatie dan de lineaire regressies. Op de grafieken zien we dat de bekomen curven dezelfde trends volgen als de spreiding van de meetpunten.

##### 3.3.4.2.2. Hoge orde functies – regressie 5, 6 & 7

De regressies 5 tot en met 7 zijn polynomiaalfuncties van hogere orde. Hoewel deze functies op wiskundig vlak een betere correlatie geven dan regressies 3 en 4, zien we op de grafieken dat er fysisch geen goede correlatie bekomen wordt. Bij het gebruik van polynomiaalfuncties van hogere orde geeft de regressie curve te veel de invloed van de individuele waarden van bepaalde metingen weer, in plaats van de algemene trend van de spreiding van de metingen. Het lijkt dus ook zinloos om polynomiaalfuncties van een nog hogere orde te gaan uitrekenen.

##### 3.3.4.3. Regressie 8

Deze logaritmische regressie geeft fysisch niet interpreteerbare waarden – negatieve waarden voor de walsnelheid – wat resulteert in een zeer lage wiskundige correlatie van  $0,558$ .

#### 3.3.4.4. Exponentiele functies

##### 3.3.4.4.1. Regressie 9

Op de grafiek van regressie 9 zien we duidelijk dat ook deze functie onbruikbaar is.

##### 3.3.4.4.2. Regressie 10

De exponentiële regressie 10 levert een goede wiskundige correlatie op  $-0,926$ . Ook op de grafiek van figuur 24 zien we een aanvaardbare overeenstemming tussen de trend van de regressie curve en de meetpunten.

##### 3.3.4.4.3. Regressie 11

Naast een goede wiskundige correlatie  $-0,929$ , de hoogste correlatie tot nu toe – volgt de bekomen functie ook duidelijk het algemeen spreidingspatroon van de metingen. De regressie 11 levert dus een bruikbare functie op.

Om deze regressie wiskundig mogelijk te maken, moesten de eenheden van de metingen herschaald worden. Indien dit niet gebeurde moesten wortels van negatieve getallen genomen worden. Door de herschaling van mm/s naar  $10^{-6}$ m/s werden de absolute waarden van de metingen groter waardoor de logaritmes positief bleven. Dit verklaart de factor 1000 in de bekomen formule.

**3.3.4.4. Regressie 12**

Deze regressie formule kan wiskundig herleid worden naar een analoge vorm als van de regressie 10. Uiteindelijk bekomen we dezelfde vergelijking als bij de regressie 10.

**3.3.4.5. Pseudo lineaire regressies**

Hier voeren we telkens een lineaire regressie uit nadat we de basis van de gegevens aangepast hebben.

**3.3.4.5.1. Regressie 13**

De regressie 13 geeft zowel wiskundig als fysisch een goede overeenstemming met de meetpunten. De gebruikte interpolatiewet kan herschreven worden als een lineaire wet tussen de doorlaatbaarheidscoëfficiënt en de walsnelheid – analoog met de vergelijking van de eerste regressie. Nu bekomen we een evenredigheidsfactor van 27 tussen de walsnelheid en de doorlaatbaarheid en dit met een aanzienlijk hogere correlatiecoëfficiënt van 0,929. We kunnen dus besluiten dat indien we het verband tussen  $v_w$  en  $k_0$  met een lineaire wet wensen uit te drukken we inderdaad de betrekking “ $v_w = 20 \text{ à } 40.k_0$ ” bekomen.

**3.3.4.5.2. Regressie 14**

Hoewel deze functie een goede wiskundige correlatie heeft, zien we op de figuur 28 dat ze veel te hoge waarden voor de walsnelheid geeft voor hoge waarden van de doorlaatbaarheid.

**3.3.4.5.3. Regressie 15**

Deze regressie heeft een matige wiskundige correlatie – 0,818 – wat zich uit in een overschatting van de walsnelheid voor lage doorlaatbaarheden.

**3.3.4.5.4. Regressie 16 & 17**

Deze twee regressies leveren – bijna lineaire – curven op die goed overeenstemmen met de metingen, vertaalt in wiskundige correlatie coëfficiënten geeft dit respectievelijk 0,926 en 0,946.

**3.3.4.5.5. Regressie 18**

Deze regressie levert de hoogst gevonden correlatie op – 0,951 – van alle uitgevoerde regressies. Op de grafiek van figuur 32 ziet men dat de licht gebogen vorm van de regressie curve zeer goed aansluit bij de algemene trend van de spreiding van de meetresultaten. Ook hier moest, om de regressie mogelijk te maken, een herschaling van mm/s naar  $10^{-6}$ m/s uitgevoerd worden.

**3.4. Besluiten****3.4.1. Bespreking**

Uit de analyse van deze 43 metingen blijkt dat indien we het verband tussen  $k_0$  en  $v_w$  als een lineaire wet wensen te schrijven, we de uitdrukking  $v_w = 20 \text{ à } 40 k_0$  terug vinden – regressie 13. Deze regel is in feite een veralgemening van de wet  $v_w = 30.k_0$  waarbij een spreidingsinterval van 33% – in positieve en negatieve zin – in rekening wordt gebracht.

Op de grafiek van figuur 27 zien we duidelijk dat voor grote doorlaatbaarheden – groter dan 1mm/s – we met deze formule de walsnelheid stelselmatig gaan overschatten. De andere regressies met een hoge correlatie – 11, 16, 17 en 18 – geven steeds lagere waarden voor de walsnelheid in dit domein. Van deze reeks regressies heeft regressie 18 de hoogste wiskundige correlatie – 0,951. Wiskundig gezien is dit niet aan de hoge kant, maar uiteindelijk toch nog aanvaardbaar. Zeker als we de soms grote spreiding van de verschillende meetresultaten in acht nemen. Indien we de

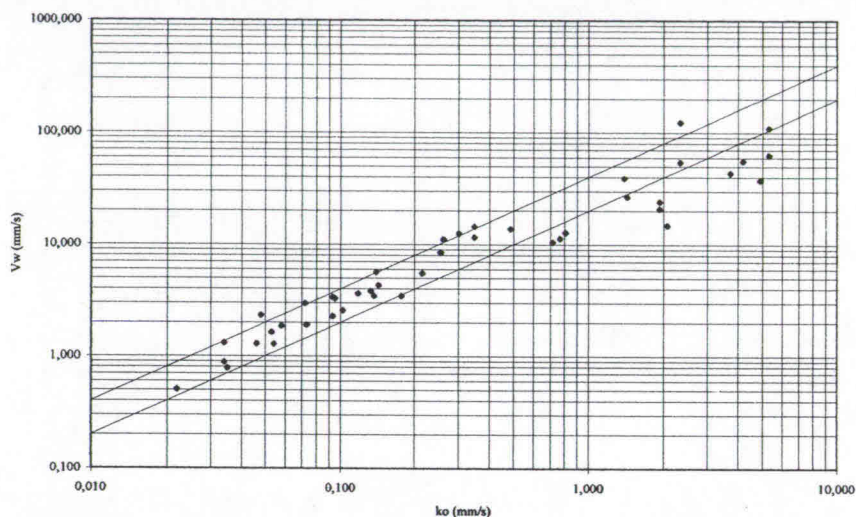
walsnelheid wensen uit te drukken in functie van één enkele fysische parameter – de doorlaatbaarheid  $k_0$  – dan zal er hoogst waarschijnlijk geen correlerende functie gevonden worden met een beduidend hogere correlatie.

Indien we de wet 18 wiskundig gaan herschrijven naar  $v_w$  en  $k_0$  in mm/s – de factor 1000 wegwerken – dan vinden we de uitdrukking:

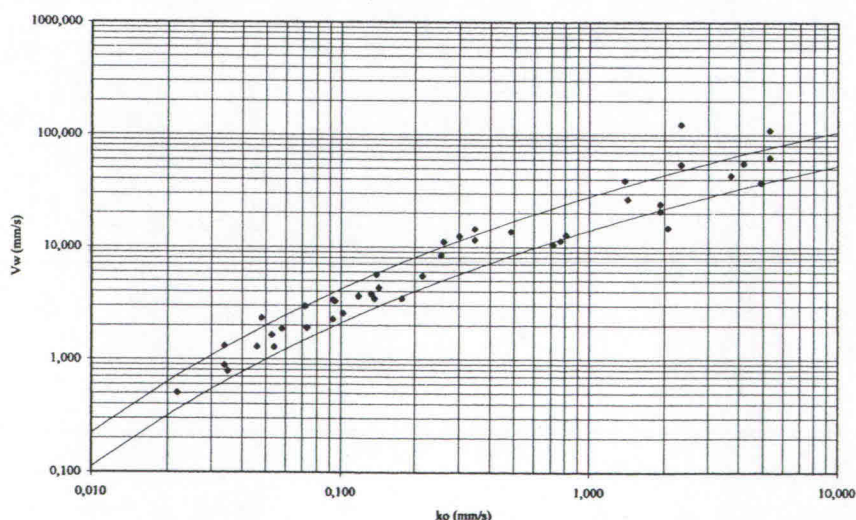
$$\ln v_w = \frac{\ln k_0 + 3,34}{0,084 \cdot \ln k_0 + 1,09}, \text{ met } v_w \text{ en } k_0 \text{ in mm/s}$$

Uit deze analyse kunnen we besluiten dat de hierboven vernoemde wet kan gebruikt worden in plaats van de wet “ $v_w = 20 \text{ à } 40 k_0$ ”, zeker indien we doorlaatbaarheidscoëfficiënten hebben die groter zijn dan 1 mm/s.

“ $v_w = 20 \text{ à } 40 k_0$ ” is de regressie 13 waar aan beide zijden van de curve een afwijking van 33% bij gerekend wordt. Indien we voor de regressie 18 dezelfde afwijking in rekening brengen kunnen we de twee wetten vergelijken. We vinden de volgende grafieken die de reeds vermelde conclusies voor grote doorlaatbaarheden duidelijk aantonen:



Figuur 33: Spreidingsdomein van  $\pm 33\%$  voor regressie 13.



Figuur 34: Spreidingsdomein van  $\pm 33\%$  voor regressie 18.

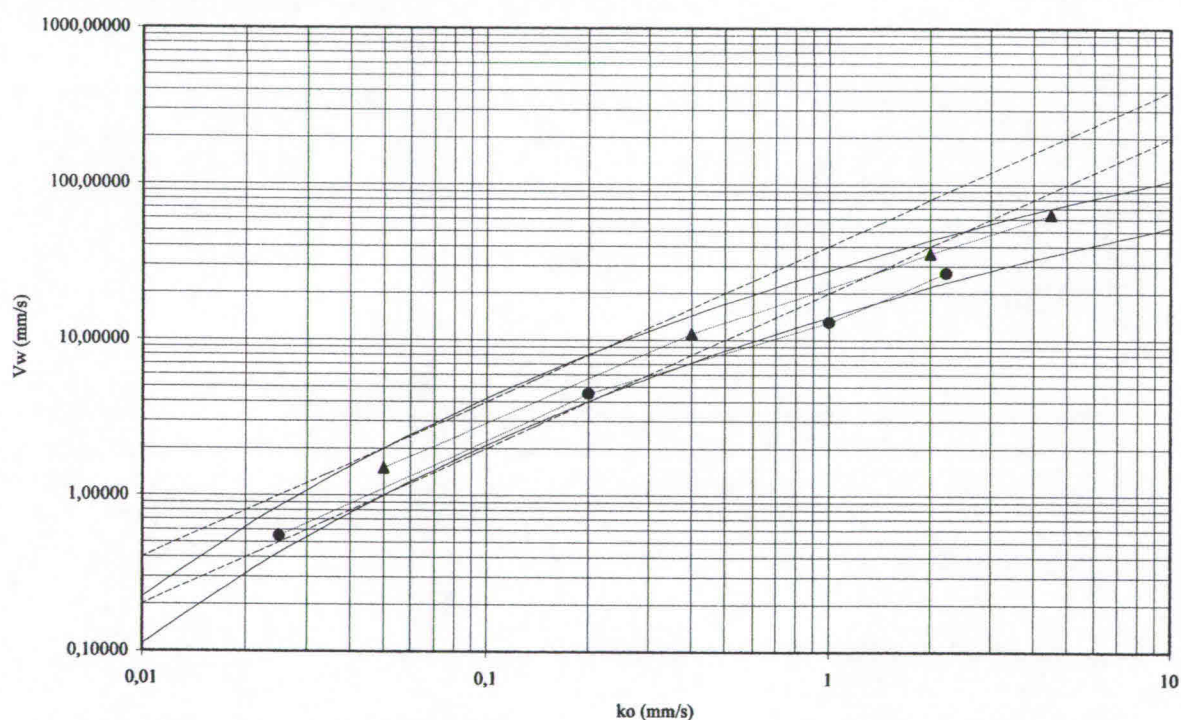
### 3.4.2. Extra meetwaarden

Voor de controle van de formules voor zuigputproducties werden in Delft driedimensionale laboproeven uitgevoerd. Bij deze proeven werden ook de walsnelheid en de doorlaatbaarheid in ongeroerde toestand opgemeten. De gemiddelde waarden van de bekomen resultaten werden opgenomen in tabel 2.

Zand ( $d_{50}$ )	Vaste pakking			Losse pakking		
	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (mm/s)	$v_w/k_0$	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (mm/s)	$v_w/k_0$
80 $\mu$ m	0,025	0,55	22	0,05	1,5	28
210 $\mu$ m	0,2	4,5	22,5	0,4	11	27,5
450 $\mu$ m	1,0	13	13	2,0	36	18
620 $\mu$ m	2,25	27	12	4,5	64	14,2

Tabel 2: Resultaten van driedimensionale zuigproeven

Uit de waarden van tabel 2 kunnen we twee besluiten trekken. Ten eerste kunnen we deze waarden gaan vergelijken met de voorspellingen die de regressie formules ons geven. Indien we deze punten uit tekenen krijgen we de volgende grafiek.



Figuur 35: De meetpunten van de driedimensionale proeven.

De metingen uitgevoerd op de grond met vast pakking zijn voorgesteld door een punt – ● –, de metingen op grond met een losse pakking door een driehoek – ▲. De twee evenwijdige streeplijnen stellen de wet " $v_w = 20$  à  $40 k_0$ " voor, de volle lijnen de regressie wet 18 – met afwijkingen van  $\pm 33\%$ . We zien dat er slechts één punt – juist – buiten het domein van de regressie 18 valt, terwijl alle punten voor doorlaatbaarheden groter dan 1mm/s buiten het voorspellingsdomein van de lineaire wet vallen. Tabel 2 toont tevens dat de verhouding tussen de walsnelheid en de doorlaatbaarheid  $k_0$  duidelijk lager – dan 30 – ligt voor het 450 $\mu$ m en 620 $\mu$ m zand.

De puntlijnen tussen de verschillende meetpunten – figuur 35 – hebben geen fysische betekenis maar tonen ons wel duidelijk dat er een aanzienlijke invloed van de pakking is op de walsnelheid. Bij een zelfde doorlaatbaarheid  $k_0$  maar met een dichtere pakking wordt er een aanzienlijk lagere walsnelheid bereikt. Bij een dichtere pakking zal de volumetoename tijdens het afschuiven van de wallen groter zijn dan bij een losse pakking, dus zal de walsnelheid lager liggen. Dit toont ons duidelijk dat de doorlaatbaarheid  $k_0$  ons enkel een schatting van de walsnelheid kan leveren. Om een nauwkeurige voorspelling van de walsnelheid te maken moeten we duidelijk meer dan een parameter in rekening brengen – zoals bijvoorbeeld de pakking, zie figuur 35.

De grote spreiding van de 43 meetpunten waarmee de regressies werden uitgevoerd is hoogst waarschijnlijk te verklaren door de invloed van andere parameters – naast de doorlaatbaarheid – die niet constant gehouden werden. Jammer genoeg kon er geen enkele bijkomende informatie over deze gegevens gevonden worden, zodat de invloed van andere parameters op deze metingen niet bestudeerd kan worden.



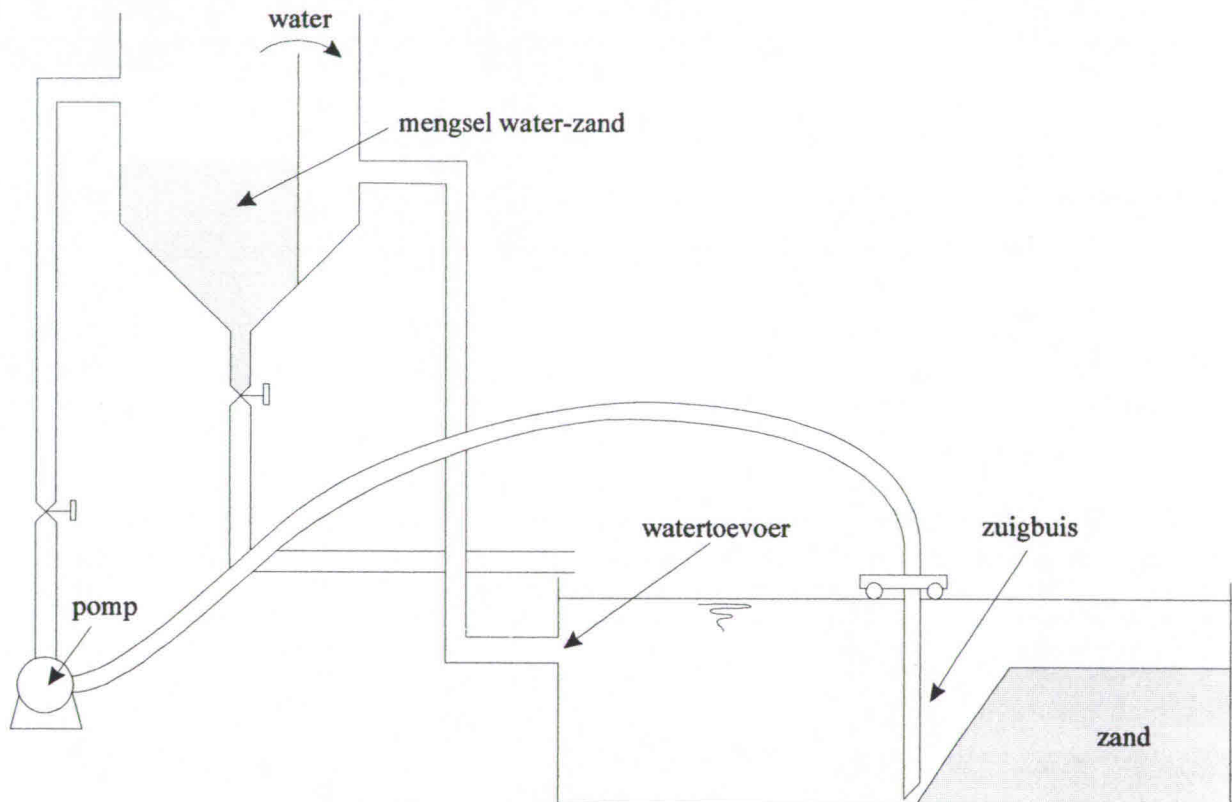
## Hoofdstuk 4: Twee dimensionale zuigproeven

### 4.1. Inleiding

Tijdens de oriënterende zuigproeven heeft men de vorming en voortplanting van de walletjes ontdekt. Omdat de invloed van de zuigbuis slechts tot op een afstand van ongeveer anderhalve buisdiameter voelbaar is zal het proces van de walvoortplanting en niet het zuigvermogen de productie van de zuigput bepalen. De zuigbuis zal enkel het losgekomen zand verwijderen.

Om zuiver het fenomeen van de voortplanting van de wallen verder te gaan onderzoeken werd – bij WL|Delft Hydraulics – een programma van twee dimensionale proeven uitgevoerd. Omdat het bij de driedimensionale opstelling – deze die bij de oriënterende proeven gebruikt werd – het door de grootte van het model moeilijk was de relevante grondparameters te later variëren werd er voor een twee dimensionale proefopstelling geopteerd.

### 4.2. Proefopstelling



Figuur 36: De proefopstelling van de tweedimensionale proeven.

De gebruikte proefopstelling is geschetst op de figuur 36. Het te zuigen materiaal bevond zich in een glazen bak met een lengte van 2,2m en een breedte en diepte van 0,4m. In de bak werd een laag van 23 à 26 centimeter materiaal aangebracht. Verschillende pakkingen werden bekomen door het zand te trillen met beton trilnaalden. Boven aan de bak was een rail aangebracht waarop een wagentje met de zuigbuis met een regelbare snelheid, horizontaal kon bewegen. De zuigbuis bevond zich over de ganse breedte van de bak – vandaar het twee dimensionaal karakter van deze opstelling. Onderaan was de buis afgesneden onder een hoek van 45°. Tijdens de proef bewoog de buis met een constante snelheid zodat er steeds nieuwe wallen gecreëerd werden.

Het afgezogen materiaal wordt naar een vergaarbak afgevoerd. In deze bak bezinkt het zand en het afgezogen water wordt via een overloop terug naar de zuigbak afgeleid. Zo behoudt men een constant waterpeil in de zuigbak. Omdat de zuigsnelheid geen invloed heeft op de vorm en de grootte van de zuigput – zie oriënterende proeven – werd er tijdens de proeven steeds met dezelfde zuigsnelheid gewerkt – namelijk een debiet van 5 liter per seconde. Tijdens de proeven had het water een temperatuur van ongeveer 17°C.

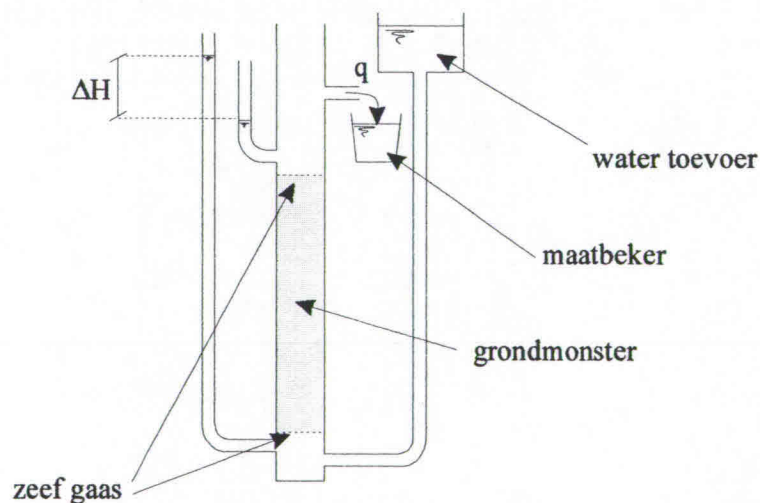
### 4.3. Voorafgaande metingen

Voor dat men de zuigproeven uitvoerde om de walsnelheid te bepalen werden de gebruikte materialen eerst geanalyseerd. Voor alle materialen werd een granulometrische curve opgesteld. De zanden worden aangeduid door middel van de korrel diameter  $d_{50}$ . Als te zuigen materialen werden de volgende materialen gebruikt:

Zand – $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$	$d_{50} = 80 \mu\text{m}$	Gezeefd zand
	$d_{50} = 140 \mu\text{m}$	Duinzand
	$d_{50} = 210 \mu\text{m}$	Duinzand
	$d_{50} = 300 \mu\text{m}$	Metselzand: Dit was het enige zand met scherpe korrels.
	$d_{50} = 450 \mu\text{m}$	Maaszand
	$d_{50} = 650 \mu\text{m}$	Maaszand
Glasparels – $\gamma_s = 29,4 \text{ kN/m}^3$	$d_{50} = 230 \mu\text{m}$	
Gemengde zanden	75% (210 $\mu\text{m}$ ) – 25% (80 $\mu\text{m}$ )	
	50% (210 $\mu\text{m}$ ) – 50% (80 $\mu\text{m}$ )	
	25% (210 $\mu\text{m}$ ) – 75% (80 $\mu\text{m}$ )	

Tabel 3: De gebruikte zanden.

Voor elk materiaal werd ook de pakking en de doorlaatbaarheid bij fluïdisatie van de grond bepaald. Dit gebeurde met het volgende toestel:



Figuur 37: Opstelling voor de fluïdisatie proeven.

Aangezien de doorlaatbaarheid een primordiale rol speelt in het voortplantingsproces van de wallen werden een aanzienlijk aantal doorlaatbaarheidsproeven uitgevoerd. Voor de verschillende

materialen werd proefondervindelijk de doorlaatbaarheid bij verschillende pakkingen opgemeten. Uit de spreiding van de resultaten werd de volgende correlatie vergelijking afgeleid:

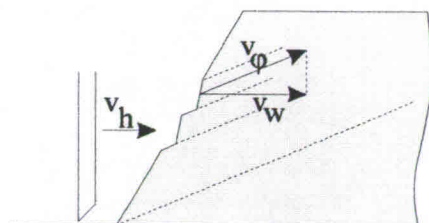
$$\log k = 2,38 \cdot \log \frac{d_{50}}{10,5} + 0,06 \cdot n$$

waarbij  $k$  uitgedrukt is in cm/s,  $d_{50}$  in mm en  $n$  in percent.

In hoofdstuk 12 wordt een volledig overzicht gegeven van de eigenschappen van de gebruikte materialen.

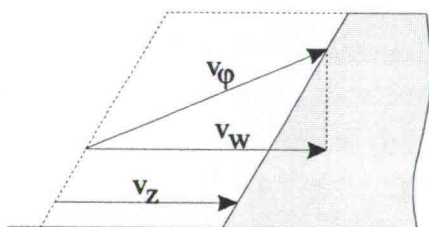
#### 4.4. Metingen tijdens de zuigproeven

Tijdens de zuigproeven wordt het materiaal via de zuigbuis weggezogen terwijl deze zich met een constante snelheid –  $v_h$  – horizontaal verplaatst. Met deze proeven bekwam men een recht talud met een helling  $\beta$  dat zich horizontaal verplaatste. Wegens de continue beweging van de zuigmond worden er voortdurend nieuwe kleine walletjes gevormd. Hierdoor kunnen we de afzonderlijke wallen niet meer van elkaar onderscheiden, en zien we slechts één enkel recht talud. Eens deze stationaire toestand bereikt is verplaatst het talud zich met een horizontale snelheid  $v_z$ , deze is dan gelijk aan de translatiesnelheid  $v_h$  van de zuigbuis.



Figuur 38: De gevormde taluds.

Door de glazen wand werd de voortplanting van dit talud gefilmd. De hoeken  $\beta$  en  $\phi$  kunnen op één enkel beeld gemeten worden. Indien we twee beelden van hetzelfde talud maar op verschillende tijdstippen nemen kan de walsnelheid op de volgende manier afgeleid worden.



Figuur 39: Proefondervindelijke bepaling van de walsnelheid.

Bij bepaalde proeven werden de drukken in de poriën gemeten. Dit gebeurde door het inbrengen van buisjes – met een diameter van 3mm – in het zandpakket. De buisjes waren gevormd uit een gaas. Door middel van een differentiële drukmeter werd het drukverschil tussen de poriëndruk en de druk juist boven het oppervlak van het zandpakket opgemeten.

Voor elke materiaal werden een aantal zuigproeven uitgevoerd met verschillende pakkingen van het materiaal en verschillende horizontale translatiesnelheden van de zuigbuis.

## Hoofdstuk 5: Evaluatie van het wiskundig model

### 5.1. Inleiding

In hoofdstukken twee en drie werden formules opgesteld om de walsnelheid te berekenen. In dit hoofdstuk zullen we nagaan als het mogelijk is de waarden van de walsnelheid die tijdens de twee dimensionale proeven gemeten werden terug te vinden met de formule die via het wiskundige model opgesteld werd. In het volgende hoofdstuk zullen we dan de toepasbaarheid van de formules van hoofdstuk drie onderzoeken.

### 5.2. Bepaling van de walsnelheid met het wiskundige model

In de paragraaf 2.2. werd door de wiskundige beschrijving van de voortplanting van de walletjes de volgende analytische formule afgeleid – pagina 27:

$$v_w = \frac{k^*}{\Delta n} \cdot \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{\tan \varphi}$$

waarbij:

$$\Delta n = \frac{n^* - n_0}{1 - n^*}$$

$$\gamma_m = (1 - n^*)\gamma_s + n^* \cdot \gamma_w$$

Aangezien alle parameter die in dit model gebruikt worden proefondervindelijk bepaald werden, kunnen we de bekomen resultaten tijdens de twee dimensionale proeven gaan na rekenen.

### 5.3. Berekeningsresultaten

In deze paragraaf worden alle berekeningsresultaten weergegeven, bekomen aan de hand van de uitwerking van de hierboven vermelde formules. De resultaten zijn als volgt voorgesteld.

In de eerste kolom van de tabellen met de berekeningsresultaten staat het poriëngehalte van de grond in ongeroerde toestand, uitgedrukt in procent. De walsnelheid wordt steeds uitgedrukt in mm/s en de waarden die uit de berekeningen met het wiskundige model volgen worden gegeven in de derde kolom. In de vierde kolom staan de proefondervindelijk gemeten waarden van de walsnelheid. Kolom vijf geeft de afwijking van de berekende waarde ten opzichte van de gemeten waarde in procent. De gemiddelde afwijking is het gemiddelde van de absolute waarden van de afzonderlijke afwijkingen. In de rechter tabel worden de relevante geotechnische gegevens van de zanden gegeven.

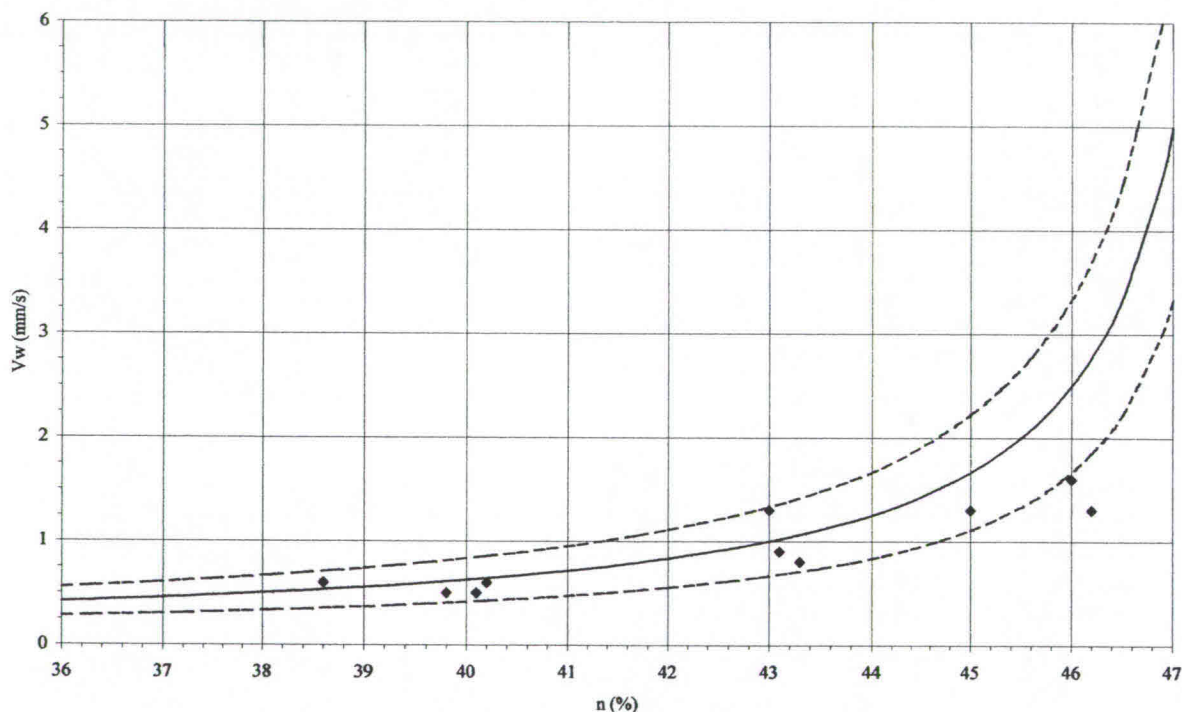
Op de grafieken wordt de berekende waarde van de walsnelheid in functie van de pakking – poriëngehalte – gegeven door de volle lijn. De twee stippellijnen bakenen het domein af waarin de fouten ten opzichte van de berekende waarde kleiner zijn dan 33%.

5.3.1. Gezeefd zand 80µm

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Vershil
		Rekenw.	Meetw.	
38,6	0,181	0,5	0,6	-11,4%
39,8	0,158	0,6	0,5	21,9%
40,1	0,152	0,6	0,5	26,5%
40,2	0,150	0,6	0,6	6,8%
43,0	0,096	1,0	1,3	-23,1%
43,1	0,094	1,0	0,9	13,3%
43,3	0,090	1,1	0,8	32,9%
45,0	0,058	1,7	1,3	28,2%
46,0	0,038	2,5	1,6	56,2%
46,2	0,035	2,8	1,3	113,6%
Gemiddelde afwijking				33,7%

d <sub>50</sub>	80 µm
φ	32 °
n*	48 %
k*	0,07 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	18,58 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 4: Berekeningen wiskundige model – 80µm zand.



Figuur 40: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – 80µm zand.

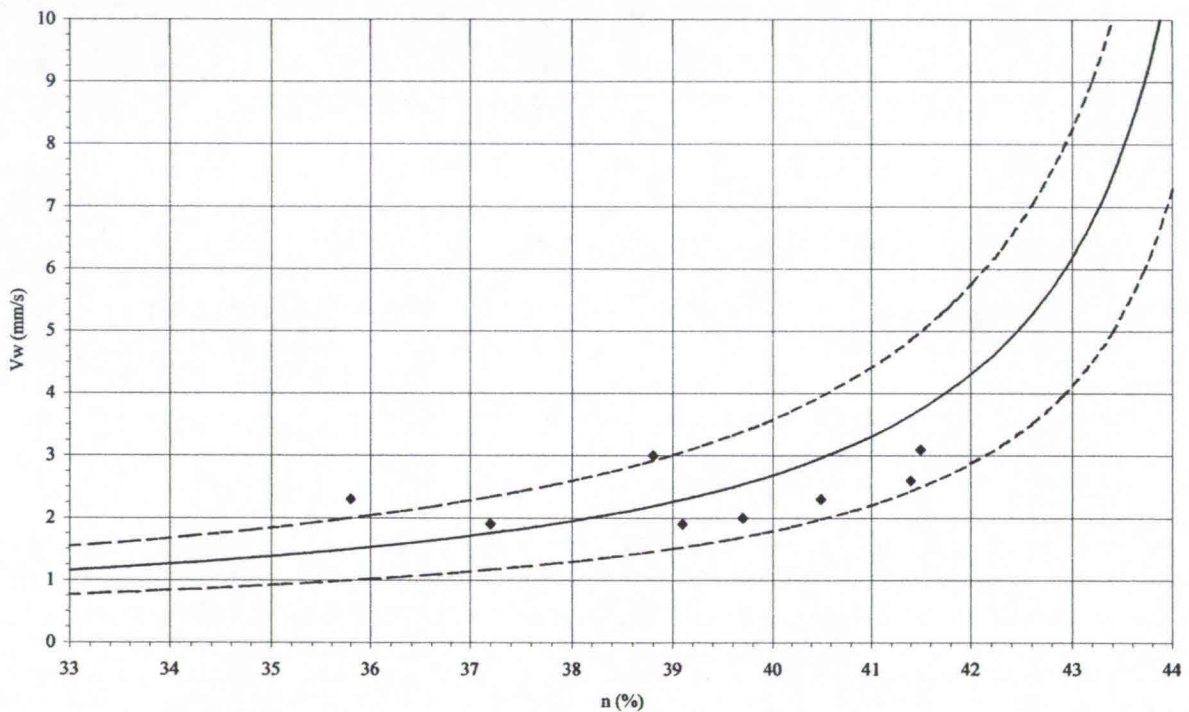
We zien dat, op twee punten na, alle waarden binnen het spreidingsdomein van 33% ten opzichte van de berekende waarden liggen. Indien het poriëngehalte, het poriëngehalte bij fluïdisatie benadert, krijgen we een grote overschatting van de walsnelheid – 100% voor het laatste meetpunt.

5.3.2. Duinzand 140µm

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Verschil
		Rekenw.	Meetw.	
35,8	0,174	1,5	2,3	-34,9%
37,2	0,148	1,8	1,9	-7,6%
38,8	0,119	2,2	3,0	-27,1%
39,1	0,113	2,3	1,9	20,7%
39,7	0,102	2,5	2,0	27,0%
40,5	0,088	3,0	2,3	28,8%
41,4	0,071	3,6	2,6	40,3%
41,5	0,069	3,7	3,1	20,7%
Gemiddelde afwijking				25,9%

d <sub>50</sub>	140 µm
φ	32 °
n*	45,3 %
k*	0,18 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	19,03 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 5: Berekeningen wiskundige model – 140µm zand.



Figuur 41: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – 140µm zand.

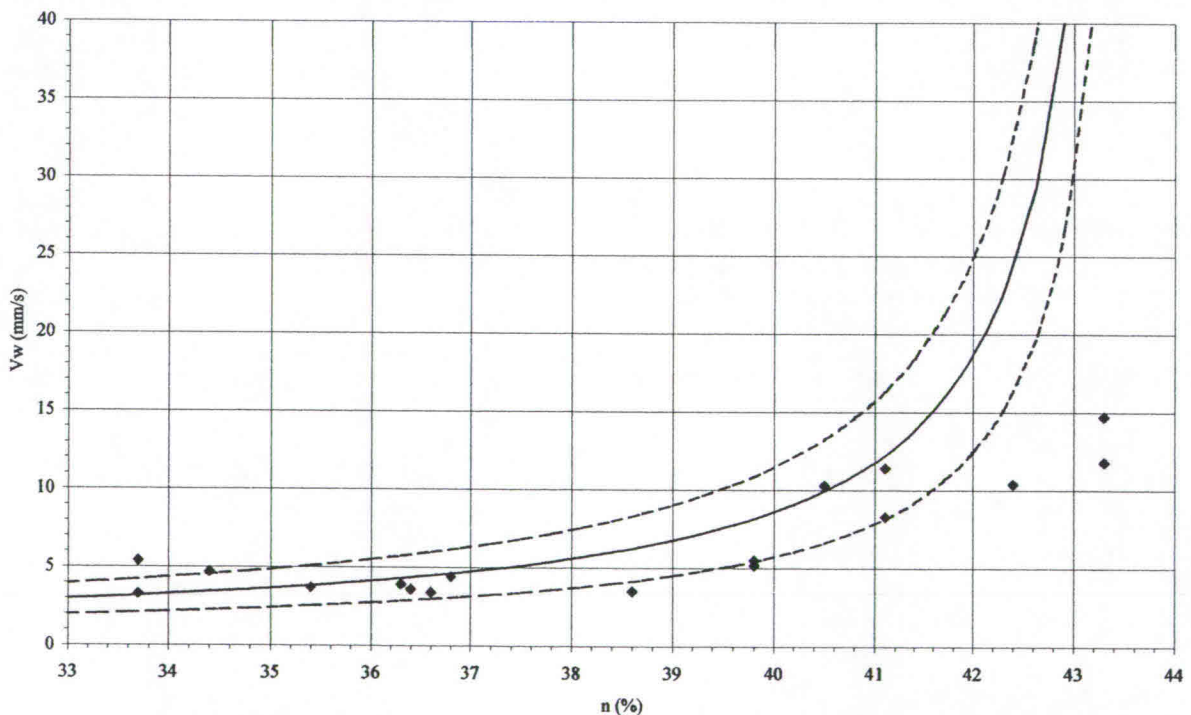
Ook hier zien we een relatief goede overeenkomst tussen de gemeten en de berekende waarden.

5.3.3. Duinzand 210µm

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Verschil
		Rekenw.	Meetw.	
33,7	0,178	3,2	5,4	-41,1%
33,7	0,178	3,2	3,3	-3,6%
34,4	0,165	3,4	4,7	-27,2%
35,4	0,147	3,8	3,7	3,6%
36,3	0,131	4,3	3,9	10,2%
36,4	0,130	4,4	3,6	21,0%
36,6	0,126	4,5	3,4	31,8%
36,8	0,123	4,6	4,4	4,8%
36,8	0,123	4,6	4,4	4,8%
38,6	0,091	6,2	3,5	78,2%
39,8	0,069	8,2	5,2	56,8%
39,8	0,069	8,2	5,5	48,3%
40,5	0,057	9,9	10,3	-3,5%
41,1	0,046	12,2	8,3	47,4%
41,1	0,046	12,2	11,4	7,3%
42,4	0,023	24,5	10,4	135,2%
43,3	0,007	79,5	11,8	573,8%
43,3	0,007	79,5	14,7	440,9%
Gemiddelde afwijking				85,5%

d <sub>50</sub>	210 µm
φ	32 °
n*	43,7 %
k*	0,38 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	19,29 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 6: Berekeningen wiskundige model – 210µm zand.



Figuur 42: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – 210µm zand.

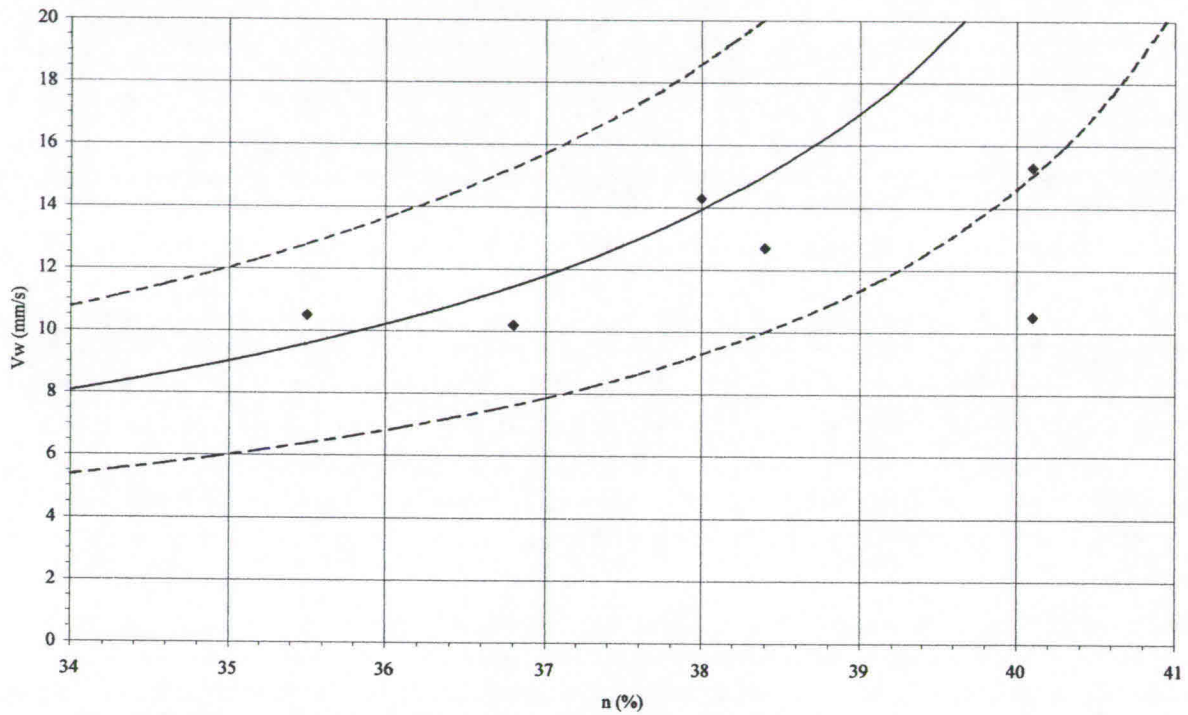
Hier zien we nog veel duidelijker dat we voor poriëngehaltes, die het poriëngehalte bij fluïdisatie benaderen, een grote overschatting van de walsnelheid gaan maken. Voor de andere meetpunten zien we terug een goede overeenstemming met de berekende waarden.

5.3.4. Glasparels 230µm

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Vershil
		Rekenw.	Meetw.	
35,5	0,142	9,6	10,5	-8,8%
36,8	0,119	11,4	10,2	-12,1%
38,0	0,097	13,9	14,3	-2,6%
38,4	0,090	15,0	12,7	18,3%
40,1	0,060	22,5	15,3	47,3%
40,1	0,060	22,5	10,5	114,7%
Gemiddelde afwijking				34,0%

d <sub>50</sub>	230 µm
φ	22 °
n*	43,5 %
k*	0,5 mm/s
γ <sub>s</sub>	29,4 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	20,96 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 7: Berekeningen wiskundige model – glasparels.



Figuur 43: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – glasparels.

Ook voor de glasparels zijn we in staat de walsnelheid te voorspellen.

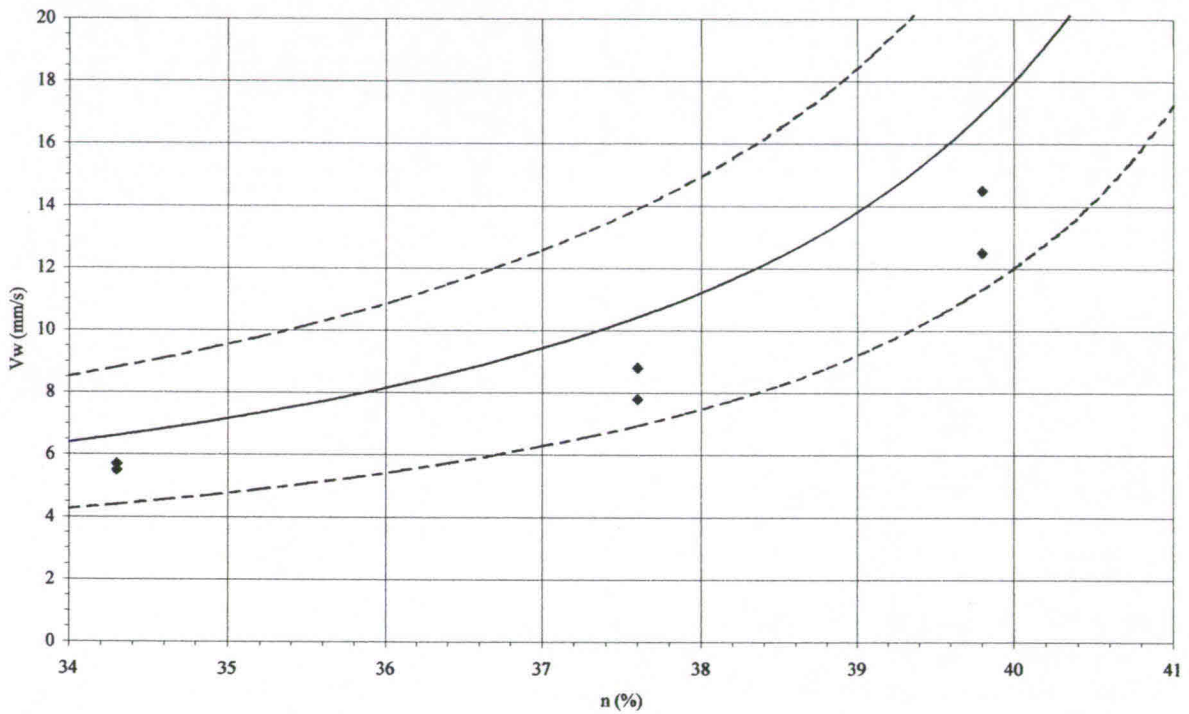


5.3.5. Metselzand 300µm

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Verschil
		Rekenw.	Meetw.	
34,3	0,343	6,6	5,7	15,8%
34,3	0,343	6,6	5,5	20,0%
37,6	0,376	10,4	8,8	18,5%
37,6	0,376	10,4	7,8	33,7%
39,8	0,398	17,0	12,5	35,8%
39,8	0,398	17,0	14,5	17,1%
Gemiddelde afwijking				23,5%

d <sub>50</sub>	300 µm
φ	32 °
n*	43,3 %
k*	0,7 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	19,36 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 8: Berekeningen wiskundige model – metselzand 300µm.



Figuur 44: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – metselzand 300µm.

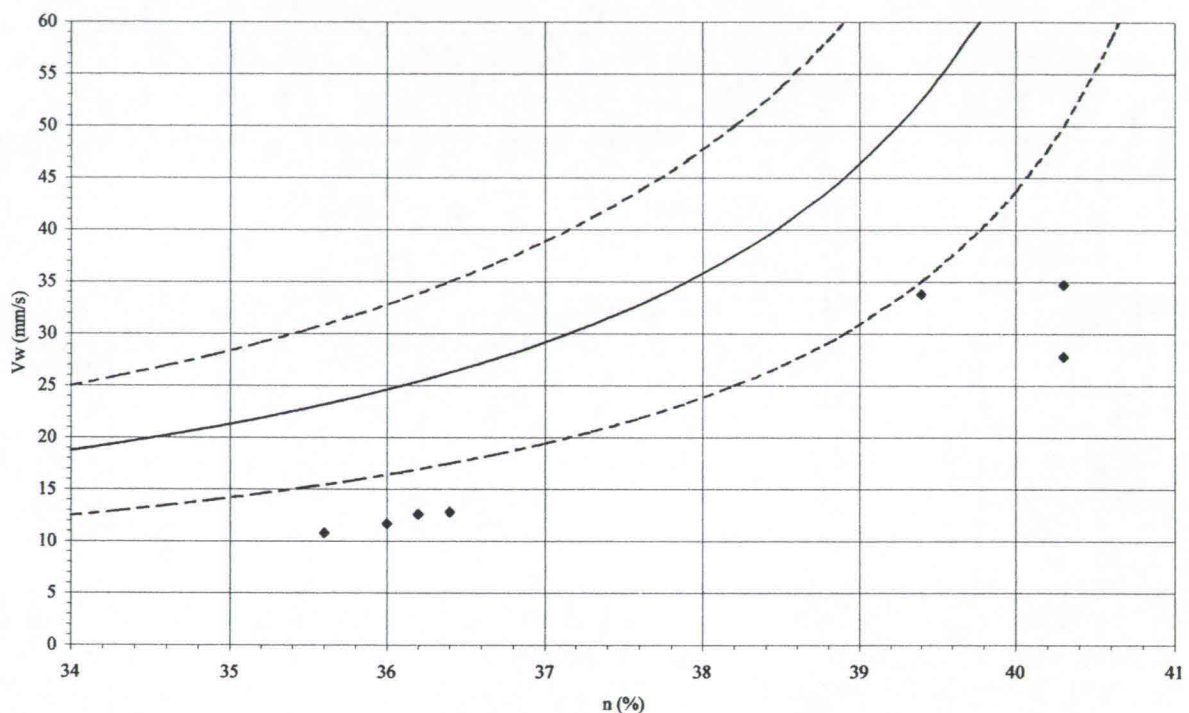
Hier vallen terug alle meetpunten binnen het afwijkingsdomein van 33%. De gemiddelde afwijking bedraagt hier slechts 23%.

5.3.6. Rivierzand 450µm

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Vershil
		Rekenw.	Meetw.	
35,6	0,118	23,2	10,8	114,4%
36,0	0,111	24,6	11,7	110,3%
36,2	0,108	25,4	12,6	101,5%
36,4	0,104	26,2	12,8	105,0%
39,4	0,052	52,5	33,8	55,3%
40,3	0,036	75,0	27,8	169,7%
40,3	0,036	75,0	34,7	116,1%
Gemiddelde afwijking				110,3%

d <sub>50</sub>	450 µm
φ	34 °
n*	42,4 %
k*	1,94 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	19,50 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 9: Berekeningen wiskundige model – 450µm zand.



Figuur 45: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – 450µm zand.

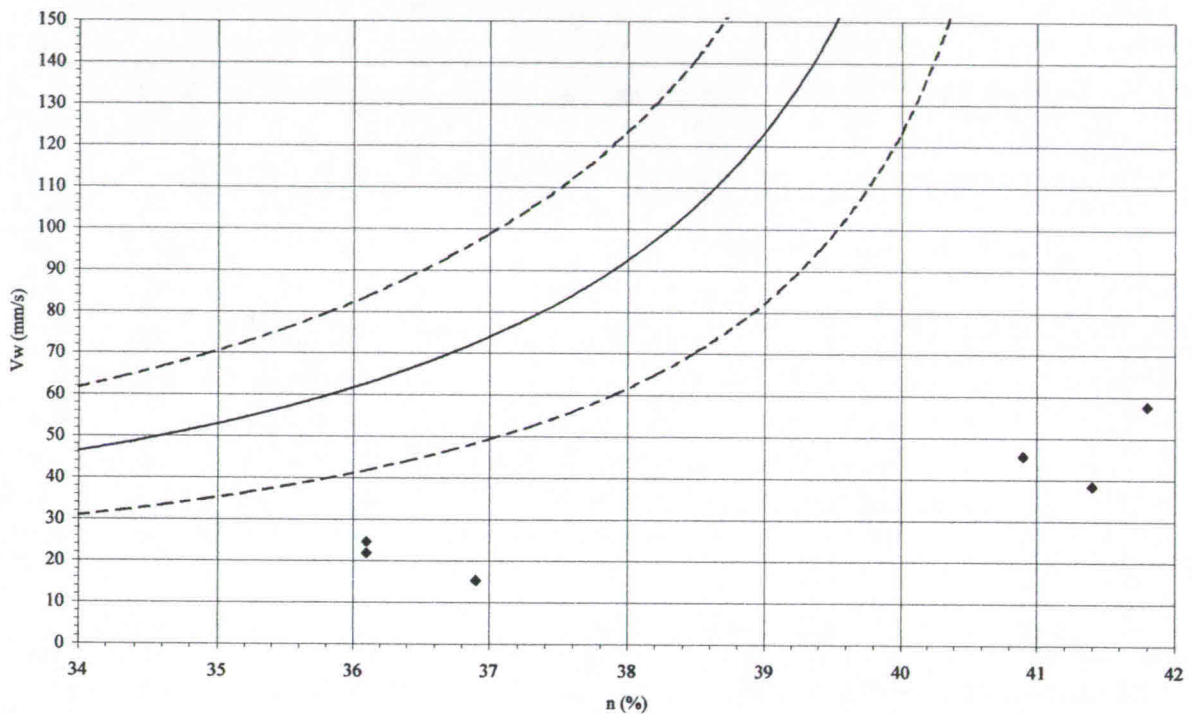
Voor het 450µm valt er geen enkel meetpunt binnen het afwijkingsdomein van 33% ten opzichte van de berekende waarden. We maken duidelijk – en dit voor alle poriegehaltes – een overschatting van de walsnelheid. Gemiddeld liggen de berekende waarden 100% hoger dan de gemeten waarden.

5.3.7. Rivierzand 650µm

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Vershil
		Rekenw.	Meetw.	
36,1	0,102	62,8	24,6	155,1%
36,1	0,102	62,8	21,9	186,6%
36,9	0,088	72,6	15,3	374,6%
40,9	0,019	336,6	45,6	638,3%
41,4	0,010	617,2	38,4	1507,2%
41,8	0,003	1851,5	57,6	3114,5%
Gemiddelde afwijking				996,1%

d <sub>50</sub>	650 µm
φ	34 °
n*	42 %
k*	4,5 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	19,57 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 10: Berekeningen wiskundige model – 650µm zand.



Figuur 46: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – 650µm zand.

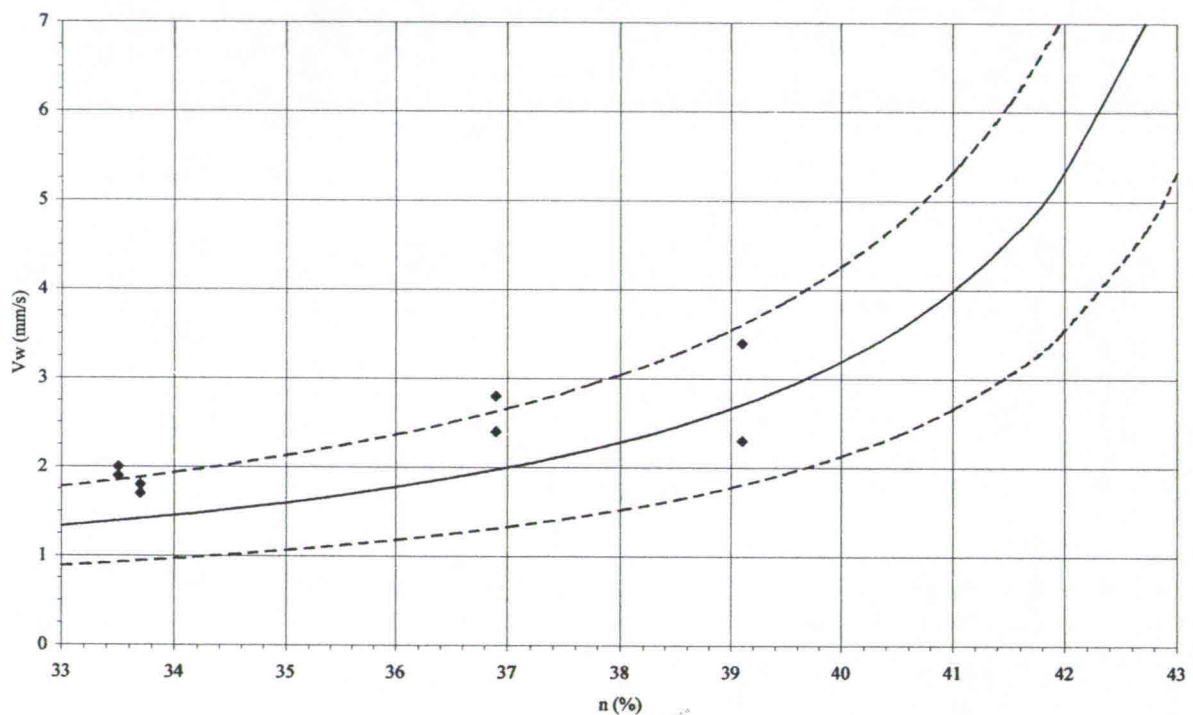
Bij het 650µm zand krijgen we – net als bij het 450µm zand – een algemene overschatting van de walsnelheid. Voor de waarden van het poriëngehalte die de waarden van n\* benaderen krijgen we extreem grote afwijkingen ten opzichte van de meetwaarden – tot ongeveer 3000%.

5.3.8. Gemengd zand 75-25

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Verschil
		Rekenw.	Meetw.	
33,5	0,209	1,4	1,9	-26,9%
33,5	0,209	1,4	2,0	-30,5%
33,7	0,205	1,4	1,7	-16,8%
33,7	0,205	1,4	1,8	-21,5%
36,9	0,147	2,0	2,8	-29,6%
36,9	0,147	2,0	2,4	-17,8%
39,1	0,107	2,7	3,4	-20,4%
39,1	0,107	2,7	2,3	17,7%
Gemiddelde afwijking				23,9%

d <sub>50</sub> 75-25	
φ	32 °
n*	45 %
k*	0,2 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	19,08 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 11: Berekeningen wiskundige model – gemengd zand 75-25.



Figuur 47: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – gemengd zand 75-25.

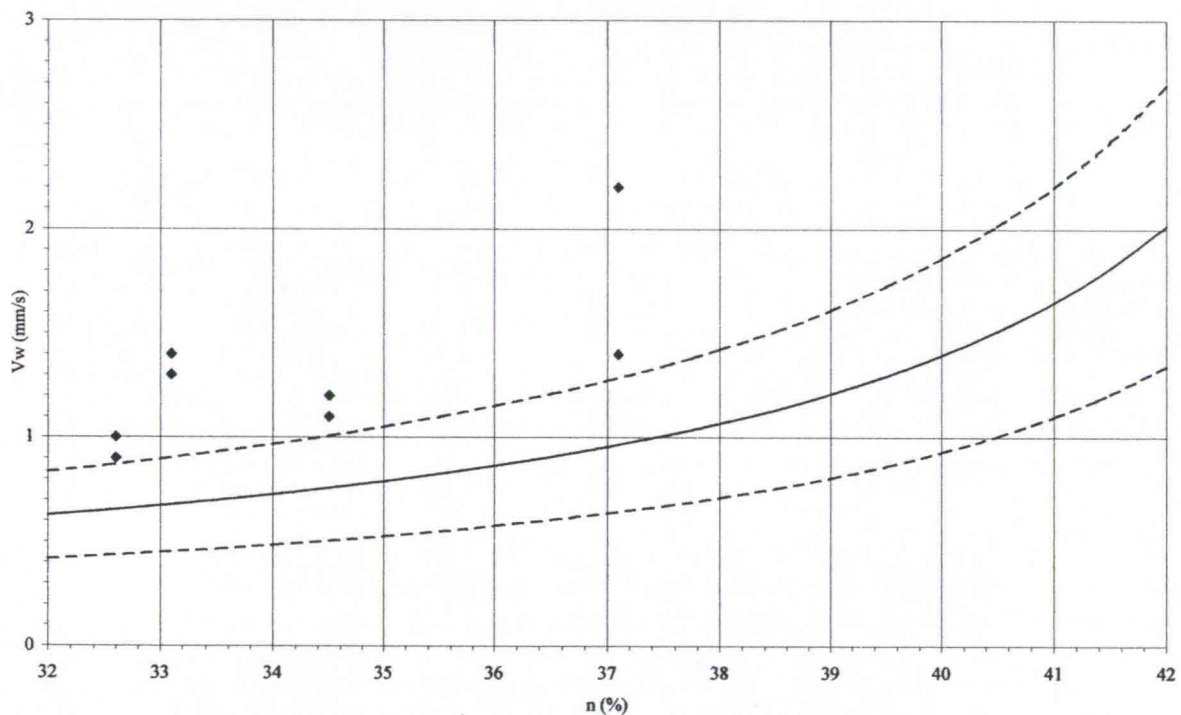
Hier krijgen we terug een aanvaardbare afwijking ten opzichte van de meetpunten.

5.3.9. Gemengd zand 50-50

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Verschil
		Rekenw.	Meetw.	
32,6	0,260	0,7	0,9	-27,5%
32,6	0,260	0,7	1,0	-34,8%
33,1	0,250	0,7	1,3	-47,9%
33,1	0,250	0,7	1,4	-51,7%
34,5	0,224	0,8	1,2	-37,0%
34,5	0,224	0,8	1,1	-31,3%
37,1	0,176	1,0	2,2	-56,1%
37,1	0,176	1,0	1,4	-31,1%
Gemiddelde afwijking				38,4%

d <sub>50</sub>	50-50
φ	32 °
n*	42,5 %
k*	0,12 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	18,83 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 12: Berekeningen wiskundige model – gemengd zand 50-50.



Figuur 48: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – gemengd zand 50-50.

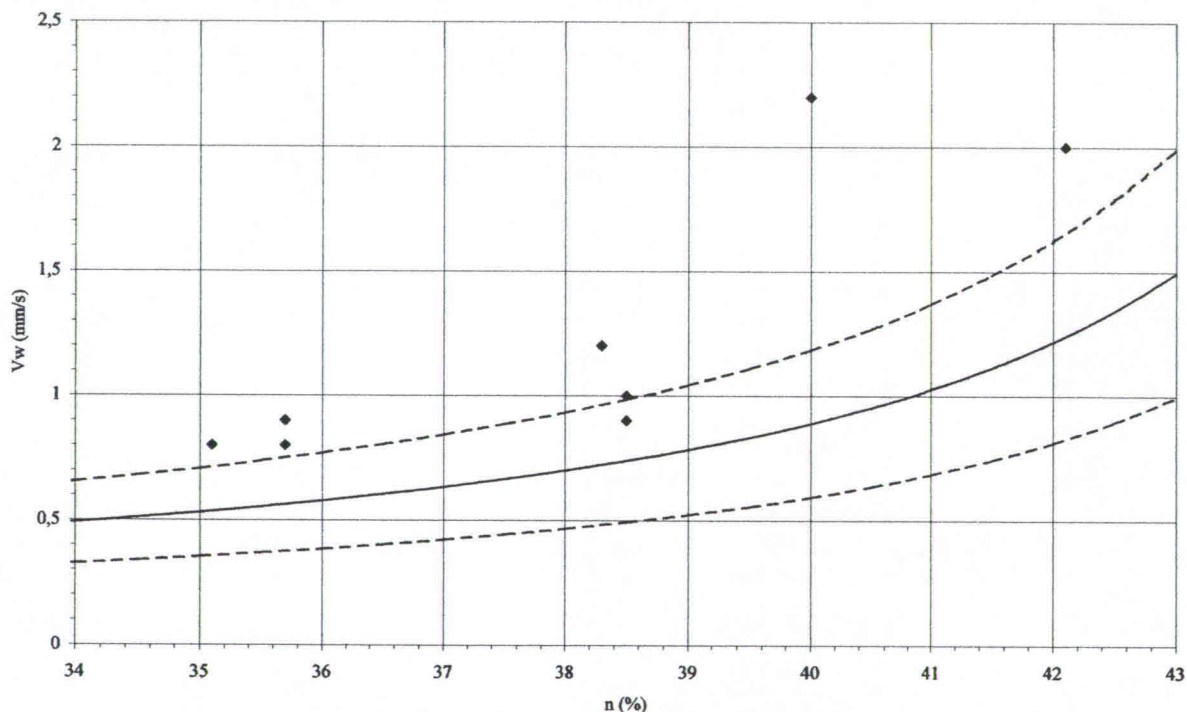
Voor het gemengd zand 50-50 gaan we terug de walsnelheid stelselmatig gaan onderschatten. Geen enkel meetpunt valt binnen het afwijkingsdomein van 33%.

5.3.10. Gemengd zand 25-75

n <sub>0</sub> (%)	Δn	v <sub>w</sub> (mm/s)		Verschil
		Rekenw.	Meetw.	
35,1	0,234	0,5	0,8	-33,2%
35,1	0,234	0,5	0,8	-33,2%
35,7	0,222	0,6	0,8	-29,8%
35,7	0,222	0,6	0,9	-37,6%
38,3	0,173	0,7	1,2	-39,8%
38,3	0,173	0,7	1,2	-39,8%
38,5	0,169	0,7	1,0	-26,1%
38,5	0,169	0,7	0,9	-17,9%
40,0	0,141	0,9	2,2	-59,6%
42,1	0,101	1,2	2,0	-38,0%
42,1	0,101	1,2	1,1	12,8%
Gemiddelde afwijking				33,4%

d <sub>50</sub>	25-75
φ	32 °
n*	47,4 %
k*	0,09 mm/s
γ <sub>s</sub>	26,5 kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>m</sub>	18,78 kN/m <sup>3</sup>

Tabel 13: Berekeningen wiskundige model – gemengd zand 25-75.



Figuur 49: Wiskundige voorspelling van de walsnelheid – gemengd zand 25-75.

Ook bij dit gemengd zand hebben we een stelselmatige onderschatting van de walsnelheid.

#### 5.4. Besluiten

We merken dat voor de zanden van 80 $\mu$ m, 140 $\mu$ m, 210 $\mu$ m, 300 $\mu$ m en de glaspereels we de walsnelheid relatief nauwkeurig kunnen bepalen. We moeten er echter meteen bijvoegen dat, indien het poriëngehalte in ongeroerde toestand dicht bij het poriëngehalte bij fluïdisatie ligt het totaal onmogelijk wordt de walsnelheid te voorspellen. Dit is duidelijk zichtbaar op de grafiek van het 210 $\mu$ m zand – figuur 42, pagina 53. Voor de gronden met een poriëngehalte van meer dan 42 procent gaan we de walsnelheid mateloos overschatten. Bij losse pakkingen is de invloed van de onderdrukken dus kleiner dan andere effecten die de erosiesnelheid van de grond beperken.

Voor de gronden met een grote doorlaatbaarheid – 450 $\mu$ m en 650 $\mu$ m – vinden we slechte tot zeer slechte resultaten – gemiddelde afwijkingen van 110% en 996%. Voor deze twee zanden vallen alle meetpunten buiten het afwijkingsinterval van 33% ten opzichte van de berekende waarden.

Voor de gemengde zanden vinden we ongeveer dezelfde gemiddelde afwijkingen – van ongeveer 30% – als voor de eerste groep zanden – 80 $\mu$ m tot 300 $\mu$ m. Er is echter een verschil, voor de gemengde zanden gaan we – op één enkel meetpunt na – de walsnelheid steeds onderschatten. Hiervoor kon echter geen verklaring gevonden worden.

Algemeen kunnen we dus stellen dat het wiskundige model bruikbaar is voor zanden met een korreldiameter van maximaal 300 $\mu$ m en waarvoor het poriëngehalte veel kleiner is dan het poriëngehalte bij fluïdisatie. In dit geval hebben we een gemiddelde afwijking van ongeveer 30% tussen de meetwaarden en de meetpunten.

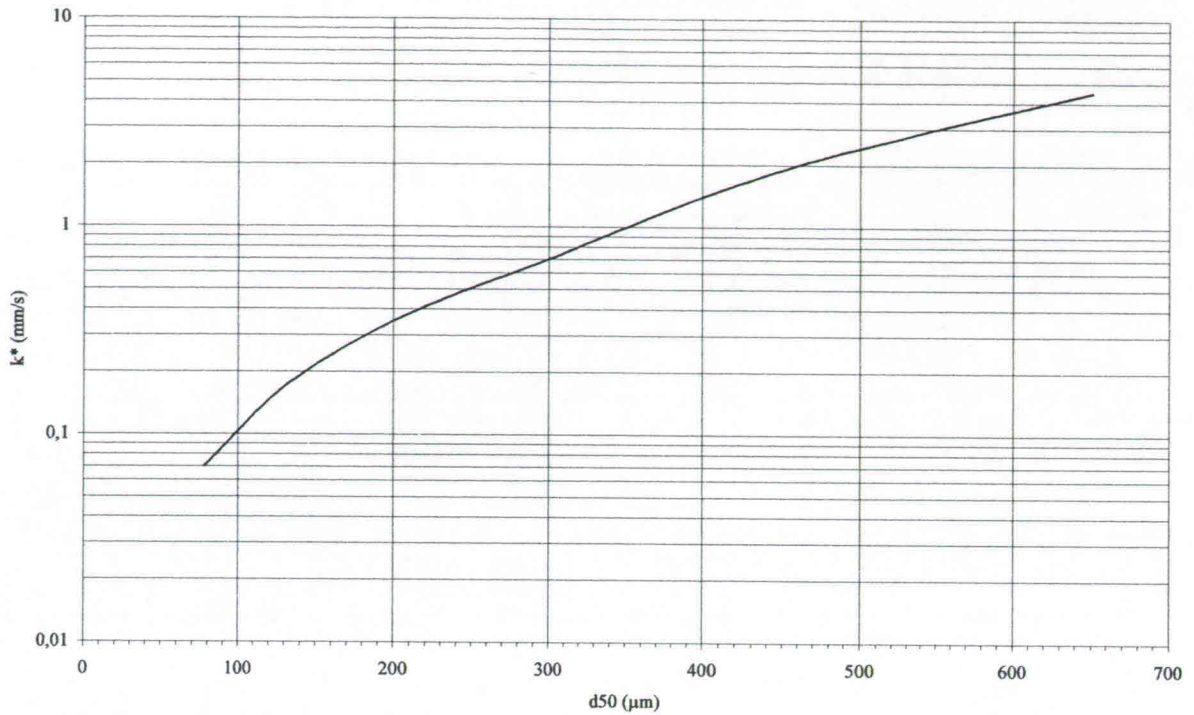
#### 5.5. Praktisch gebruik van het wiskundige model

Voor het gebruik van het wiskundig model is de kennis de volgende parameters noodzakelijk:  $k^*$ ,  $n^*$ ,  $n_0$ ,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_w$  en  $\phi$ . Bij een aanbesteding van een baggerwerk zijn meestal de volgende gegevens beschikbaar:  $n_0$  – afgeleid uit een penetratie test –,  $\gamma_s$ ,  $\phi$  en de granulometrische curve. Om het wiskundige model te kunnen toepassen moeten we dus de fluïdisatie parameters  $k^*$  en  $n^*$  gaan schatten uit de granulometrische gegevens van de grond.

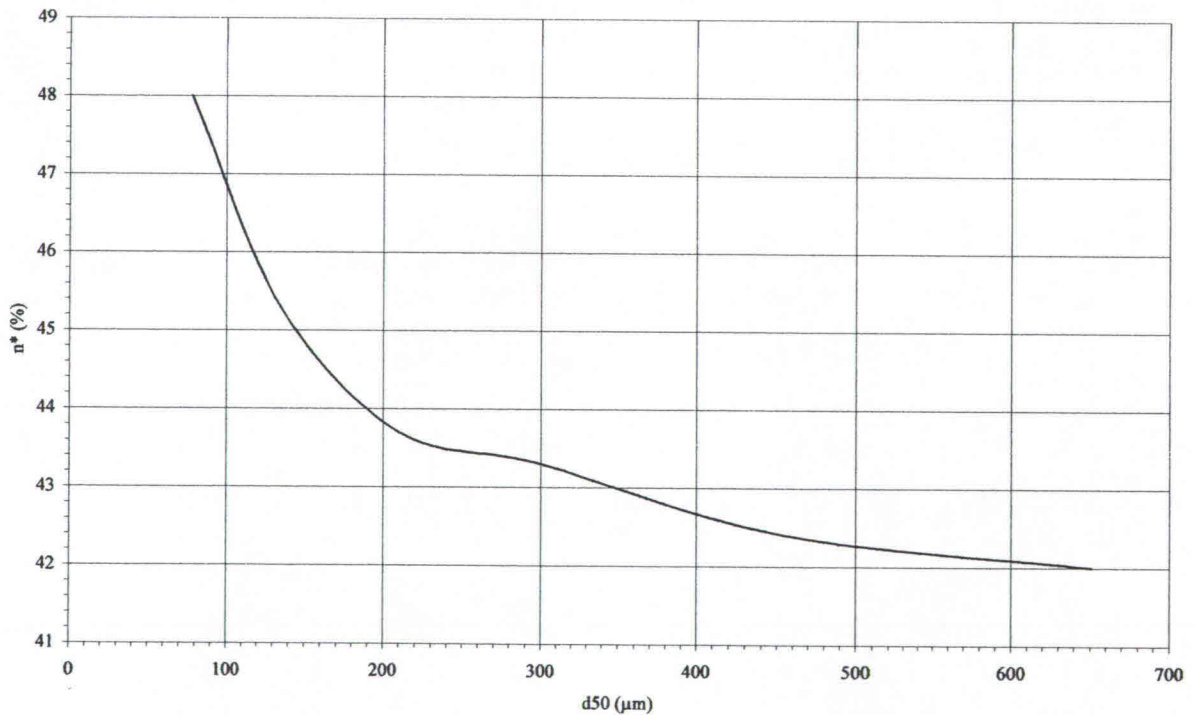
Zand	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$k^*$ (mm/s)	$n^*$ (%)
80 $\mu$ m	78	0,07	48
140 $\mu$ m	135	0,18	45,3
210 $\mu$ m	210	0,38	43,7
300 $\mu$ m	300	0,7	43,3
450 $\mu$ m	455	1,94	42,4
650 $\mu$ m	651	4,5	42

Tabel 14: Gemeten fluïdisatie paramaters.

Tijdens de fluïdisatie proeven werden de parameters  $k^*$  en  $n^*$  opgemeten in functie van de korreldiameter  $d_{50}$ . Indien we deze gegevens van de zanden grafisch uitzetten krijgen we de grafieken van figuur 50 – voor de waarden van  $k^*$  – en de figuur 51 – voor de waarden van  $n^*$ . Tabel 14 geeft een overzicht van de gemeten waarden.



Figuur 50: Doorlaatbaarheid bij fluïdisatie in functie van  $d_{50}$ .



Figuur 51: Poriëngehalte bij fluïdisatie in functie van  $d_{50}$ .

De fluïdisatie parameters van de gemengde gronden werden niet gebruikt om de bovenstaande grafieken op te stellen. Om te controleren of deze grafieken bruikbare waarden leveren gaan we de fluïdisatie parameters van de gemengde gronden gaan schatten met behulp van de grafieken. Eerst gaan we uit de granulometrische gegevens van de gemengde gronden de  $d_{50}$  bepalen. Vervolgens



lezen we de waarden van  $k^*$  en  $n^*$  op de grafieken af. Aangezien deze parameters voor deze gronden ook proefondervindelijk gemeten werden kunnen we de nauwkeurigheid van deze grafieken voor het schatten van de fluïdisatie parameters na gaan. We vonden:

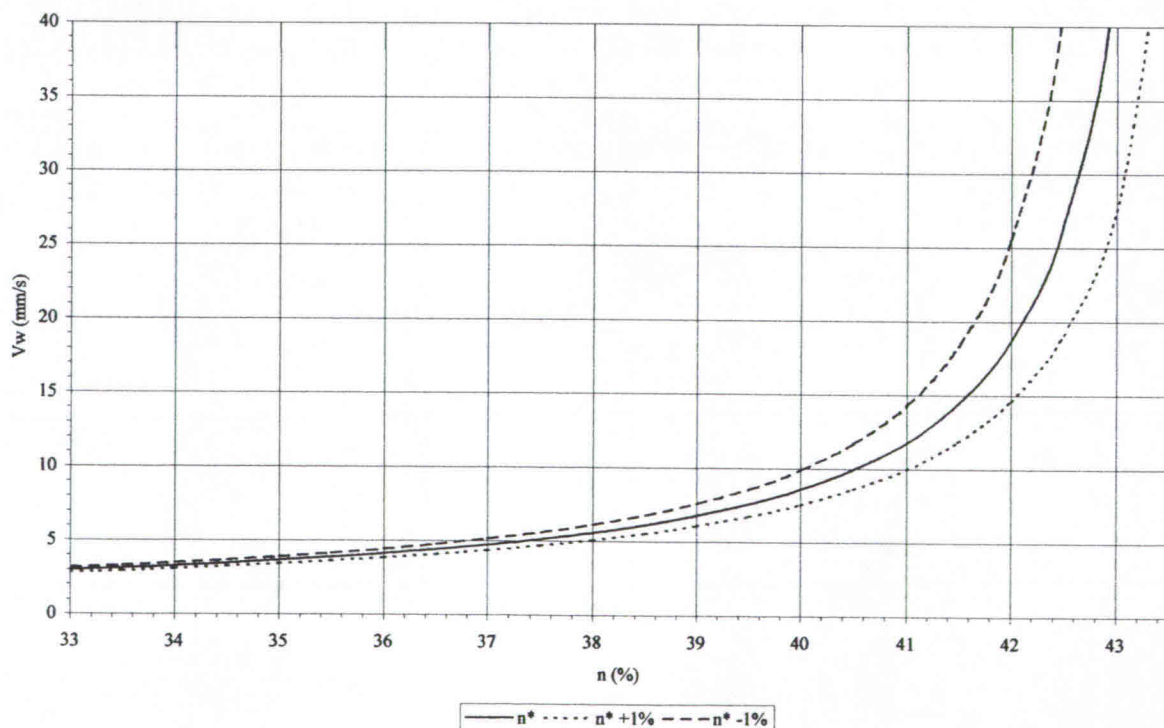
Zand	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$n^*$ (%)		$k^*$ (mm/s)	
		Gemeten	Geschat	Gemeten	Geschat
75 – 25	150	45,0	44,9	0,21	0,21
50 – 50	119	46,5	45,9	0,12	0,14
25 – 75	86	47,4	47,6	0,09	0,08

Tabel 15: Vergelijking van de gemeten en de geschatte waarden van  $n^*$  en  $k^*$ .

Uit deze beperkte controle blijkt dat het mogelijk is de fluïdisatie parameters  $k^*$  en  $n^*$  te schatten in functie van de korreldiameter  $d_{50}$ .

We moeten echter wel opmerken dat het wiskundig model gevoelig is voor een afwijking op de waarde van  $n^*$ . De term  $n^*$  komt voor in de uitdrukking van de factor  $\Delta n$ , die in de noemer van de uitdrukking van de walsnelheid staat. Een kleine verandering  $\Delta n$  kan dus een grote verandering van de bekomen waarde van de walsnelheid teweeg brengen. Voor het zand 50 – 50 hebben we een relatief grote afwijking. Daarom is het noodzakelijk dat we de invloed van een afwijking van  $n^*$  op het resultaat zullen nagaan. Op de grafiek van figuur 52 wordt de invloed van een verandering met 1% van de waarde van  $n^*$  uitgetekend voor het 210 $\mu\text{m}$  zand. Het domein waar de grote afwijkingen voorkomen door een variatie van  $n^*$  is tevens het domein waar het wiskundig model niet meer met de metingen overeenstemt.

Het wiskundig model is dus toepasbaar, met de geschatte fluïdisatie parameters, indien we een poriëngetal in ongeroerde toestand hebben dat voldoende lager ligt dan het poriëngetal bij fluïdisatie.



Figuur 52: Invloed van een afwijking van  $n^*$  op de bekomen waarde van de walsnelheid – 210 $\mu\text{m}$ .

## Hoofdstuk 6: Doorlaatbaarheidsformules

### 6.1. Inleiding

De empirische formules voor de berekening van de walsnelheid stellen een verband tussen de doorlaatbaarheid bij ongeroerde toestand en de walssnelheid. Voor we een evaluatie van de empirische formules kunnen maken moeten we eerst de doorlaatbaarheid  $k_0$  gaan berekenen. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de bestaande doorlaatbaarheidsformules. Deze formules werden terug gevonden in documenten van Dredging International waarbij geen referenties vermeld waren.

### 6.2. Doorlaatbaarheidsformules

Door verscheidene onderzoekers werden proefondervindelijke formules opgesteld waarmee benaderende waarden van de doorlaatbaarheidscoëfficiënten kunnen bepaald worden. Wegens hun invloed op het resultaat zouden in deze formules de korrelverdeling, de dichtheid, de korrel structuur, evenals de temperatuur moeten voorkomen, of tenminste factoren die zelf functie zijn van deze parameters.

Deze formules zijn zeer talrijk en meestal, afhankelijk van de wijze waarop zij werden opgesteld, met beperkte toepassing. Ze kunnen in elke geval alleen worden toegepast op zandgronden.

#### 6.2.1. De oorspronkelijke wet van Hazen – 1893

$$k = 116 \cdot d_{10}^2$$

waarin  $d_{10}$  uitgedrukt wordt in centimeter, ze geeft de doorlaatbaarheidscoëfficiënt  $k$  in cm/s. Het gebruik van de  $d_{10}$  wordt verklaard door het feit dat de kleinste korrels de doorlaatbaarheid het meest gaan beperken. Dit werd op experimentele manier door Hazen bevestigd. Deze formule werd opgesteld om de doorlaatbaarheid van zandfilters te berekenen. Omdat zandfilters uit gekalibreerd zand bestaan is deze formule in weze slechts van toepassing voor uniforme zanden. De doorlaatbaarheid wordt hier enkel in functie van de korreldiameter uitgedrukt, er wordt dus geen rekening gehouden met de temperatuur en de pakking.

#### 6.2.2. De aangepaste wet van Hazen

##### 6.2.2.1. Eerste vorm

$$k = 116 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T) \cdot d_{10}^2$$

waarin  $d_{10}$  uitgedrukt wordt in centimeter en waarin  $T$  is de temperatuur is uitgedrukt in °C, deze formule geeft de doorlaatbaarheidscoëfficiënt  $k$  in cm/s.

Hier wordt de invloed van de temperatuur op de doorlaatbaarheid in rekening gebracht. Voor een temperatuur van 10°C vinden we de oorspronkelijke wet van Hazen terug.

##### 6.2.2.2. Tweede vorm

$$k = \kappa_t \cdot C_k \cdot d_{10}^2$$

waarin  $C_k$  een experimentele coëfficiënt is die afhangt van de aard van de grond,  $\kappa_t$  een coëfficiënt is die de temperatuursafhankelijkheid in rekening brengt. De  $d_{10}$  wordt uitgedrukt in mm, en de formule geeft de doorlaatbaarheid  $k$  in mm/s.

De waarde van  $C_k$  kan op de volgende manier geschat worden:

$C_k$	Grond type	$d_{10}$ interval (mm)
8 – 12	Uniforme zanden ( $U_c < 5$ )	0,06 – 3,0
5 – 8	Niet uniforme zanden ( $U_c \geq 5$ )	0,003 – 0,6

Tabel 16: De waarde van de factor  $C_k$ .

De waarden van de coëfficiënt  $\kappa_t$  zijn:

T (°C)	$\kappa_t$	T (°C)	$\kappa_t$
0	1,779	30	0,808
4	1,555	40	0,670
10	1,299	50	0,550
15	1,133	60	0,468
20	1,000	70	0,410
25	0,906		

Tabel 17: De waarde van de factor  $\kappa_t$ .

### 6.2.3. De wet van Jacky – 1944

$$k = 100 \cdot d_m^2$$

waarin  $d_m$  de maatgevende korreldiameter is en in centimeter uitgedrukt wordt, ze geeft de doorlaatbaarheidscoëfficiënt  $k$  in cm/s. Deze maatgevende korreldiameter  $d_m$  is de korreldiameter die met de grootste frequentie voorkomt.

### 6.2.4. De wet van Terzaghi – 1955

Geen enkel van de bovenstaande formules houdt rekening met het poriënvolume. Omdat het water precies door deze poriën stroomt voelen we intuïtief gemakkelijk aan dat deze parameter een – belangrijke – invloed op de doorlaatbaarheid moet hebben. Terzaghi stelde de volgende betrekking voor:

$$k = 200 \cdot d_{10}^2 \cdot e^2 = 200 \cdot d_{10}^2 \cdot \left( \frac{n}{1-n} \right)^2$$

waarin  $d_{10}$  in cm wordt uitgedrukt en  $e$  het poriëngetal is, de doorlaatbaarheid wordt in cm/s gegeven. Het poriëngetal is de verhouding van het volume van de poriën tot het volume van de korrels.

### 6.2.5. De formule van Kozeny

Hier gaat men uit van het feit dat de stroming doorheen de poriën plaatsvindt. Niet alleen de korreldiameters maar ook de pakking van de grond zal een rol spelen in de doorlaatbaarheid. Men definieert een factor  $r$ , die met de natte straal uit de hydraulica kan vergeleken worden.

$$r = \frac{V_v}{S_s}, \text{ waarin } S_s \text{ het korreloppervlak is.}$$

$$r = \frac{V_v}{S_s} = \frac{V_s}{S_s} \cdot \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_s}{S_s} \cdot \frac{n}{1-n}$$

In een doorsnede loodrecht op de stroming kan men de oppervlakte van de poriën bepalen:

$$\Omega_v = \frac{V_v}{l}, \text{ met } l \text{ de lengte van het monster.}$$

De gemiddelde snelheid van de stroming doorheen de poriën is dan:

$$v' = \frac{Q}{\Omega_v} = \frac{Q \cdot l}{V_v} = \frac{Q}{\Omega} \cdot \frac{\Omega \cdot l}{V_v} = \frac{Q}{\Omega} \cdot \frac{V_t}{V_v} = \frac{Q}{\Omega} \cdot \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{Q}{\Omega} = n \cdot v'$$

De filtersnelheid is:

$$v = \frac{Q}{\Omega_t} = nv'$$

Algemeen kunnen we schrijven dat de doorlaatbaarheidscoëfficiënt een functie is van het korrelig media – en dit door het kwadraat van een representatieve korreldiameter en van een factor in verband met de pakkingsdichtheid –, en van de karakteristieken van de vloeistof – het specifieke gewicht  $\gamma$  en de viscositeit  $\mu$  waarin de temperatuur dus ook een rol speelt. Dit geeft ons:

$$k = \frac{\gamma}{\mu} \cdot C \cdot d^2$$

Voor de stroming doorheen de poriën kunnen we een gelijkaardige betrekking schrijven, zodat er geldt:

$$k' = \frac{\gamma}{\mu} \cdot C \cdot r^2$$

Uit de wet van Darcy kunnen we halen dat:

$$\begin{aligned} v' = k' \cdot i &\Rightarrow i = \frac{v'}{k'} \\ &= \frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{1}{C \cdot r^2} \cdot v' \\ &= \frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{\frac{v}{n}}{C \cdot \left(\frac{V_s}{S_s}\right)^2 \cdot \frac{n^2}{(1-n)^2}} \\ &= \frac{\mu}{\gamma} \cdot \left(\frac{S_s}{V_s}\right)^2 \cdot \frac{v \cdot (1-n)^2}{C \cdot n^3} \\ v = k \cdot i &\Rightarrow \frac{v}{k} = \frac{\mu}{\gamma} \cdot \left(\frac{S_s}{V_s}\right)^2 \cdot \frac{v \cdot (1-n)^2}{C \cdot n^3} \\ k &= \frac{\gamma}{\mu} \cdot C \cdot \left(\frac{V_s}{S_s}\right)^2 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \end{aligned}$$

Uiteindelijk is Kozeny tot de volgende formule gekomen:

$$k = \frac{1,5 \cdot 10^4}{S_s^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2}$$

waarin  $S_s$  het korreloppervlak is in  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ , en  $k$  in  $\text{cm}/\text{s}$  wordt uitgedrukt.

### 6.2.6. Verbeterde wet van Hazen

Dit is een experimenteel verbeterde wet van Hazen waarin ook de pakkingsdichtheid beschouwd wordt:

$$k = 150 \cdot \left(\frac{n}{0,45}\right)^6 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T) \cdot d_{10}^2$$

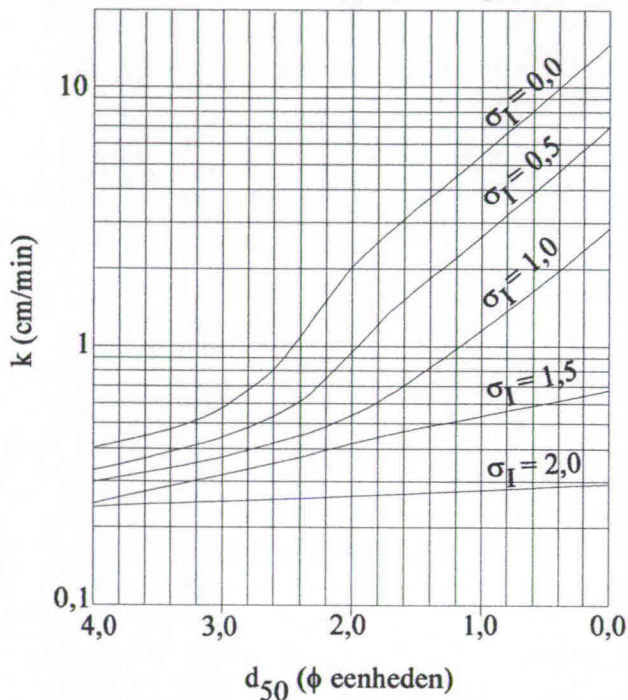
waarin  $d_{10}$  uitgedrukt wordt in centimeter en  $T$  de temperatuur is uitgedrukt in  $^{\circ}\text{C}$ , deze formule geeft de doorlaatbaarheidscoëfficiënt  $k$  in  $\text{cm}/\text{s}$ .

### 6.2.7. De formule van Marsh en Denny – 1966

Hier wordt de doorlaatbaarheid in functie van een aantal karakteristieke korreldiameters geschreven. Ten eerste wordt de – door Krumbein gedefinieerde – coëfficiënt  $\phi$  berekend voor de korreldiameter  $d_{50}$ . De coëfficiënt  $\phi$  wordt als volgt berekend:  $\phi = -\log_2 d$ , waarbij  $d$  in mm wordt uitgedrukt. Vervolgens wordt een standaard deviatie  $\sigma_1$  op volgende wijze bepaald:

$$\sigma_1 = \frac{d_{24} - d_{16}}{4} + \frac{d_{95} - d_5}{6,6}$$

Aan de hand van laboratorium proeven werden curven opgesteld die de doorlaatbaarheidscoëfficiënt  $k$  in functie van  $\phi(d_{50})$  en  $\sigma_1$  geeft:



Figuur 53: Doorlaatbaarheid volgens Marsh en Denny

### 6.2.8. De formule van Kozeny-Carman

Kozeny bewees dat theoretisch de volgende relatie geldig was:

$$k = \frac{\gamma}{\mu} \cdot C \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2}$$

Uit een experimentele studie volgde de volgende praktisch bruikbare formule:

$$k = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{d_m^2}{180}$$

waarin alle gebruikte eenheden de SI-eenheden zijn.

### 6.2.9. De Fair – Hatch vergelijking

Deze vergelijking is terug een uitwerking van de theoretische formule van Kozeny. De formule verschilt slechts met deze van Kozeny-Carman door de term die de invloed van de korrelverdeling uitdrukt. De volgende formule werd terug op experimentele weg bekomen:

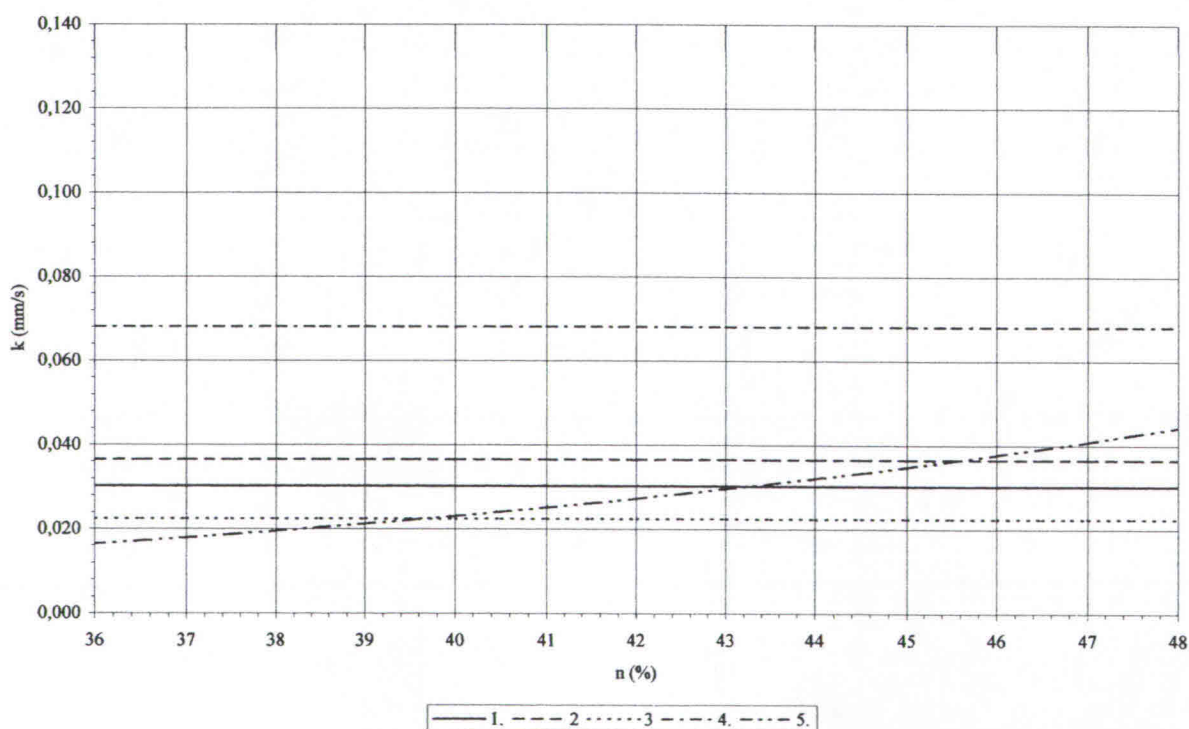
$$k = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{5 \cdot \left( \frac{\theta}{100} \cdot \sum \frac{P}{d_m} \right)^2}$$

waarin  $\theta$  een factor is die de invloed van de vorm van de korrel in rekening brengt. Voor sferische korrels wordt een waarde van 6,0 voorgesteld, voor hoekige korrels wordt een waarde van 7,7 voorop gesteld. De factor P is het percentage korrels die tussen twee opeenvolgende zeven blijft liggen. De factor  $d_m$  is het geometrische gemiddelde van de zeef mazen van de twee beschouwde opeenvolgende zeven. Deze vergelijking is dimensioneel correct en kan dus met elke set van consistente eenheden gebruikt worden.

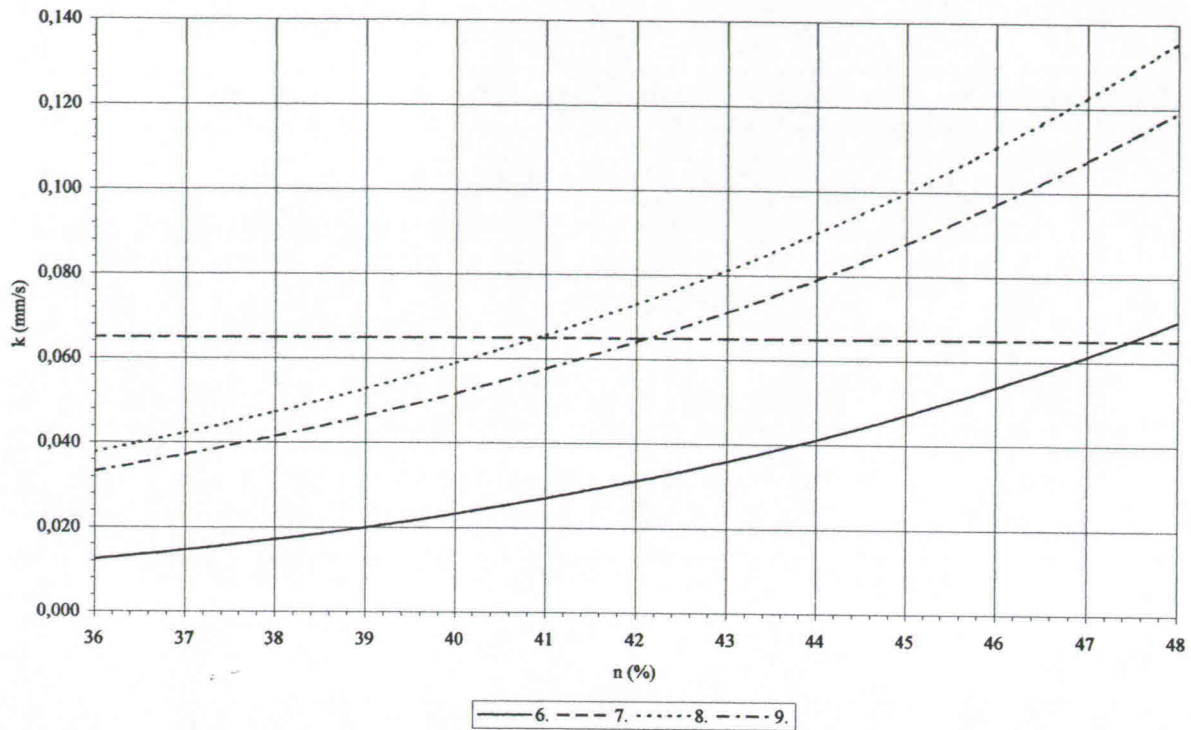
### 6.3. Resultaten van de verschillende formules

Het is duidelijk dat al deze verschillende formules niet dezelfde waarden zullen geven. Indien we de doorlaatbaarheid van de 80 $\mu$ m grond met de bovenstaande formules berekenen, worden de resultaten van figuur 54 en 55 gevonden. De verschillende formules werden op onderstaand manier genummerd.

1. Oorspronkelijke wet van Hazen – paragraaf 6.2.1.
2. Aangepaste wet van Hazen – paragraaf 6.2.2.1.
3. Aangepaste wet van Hazen – paragraaf 6.2.2.2.
4. De wet van Jacky – paragraaf 6.2.3.
5. De wet van Terzaghi – paragraaf 6.2.4.
6. Verbeterde wet van Hazen – paragraaf 6.2.6.
7. De formule van Marsh en Denny – paragraaf 6.2.7.
8. De formule van Kozeny-Carman – paragraaf 6.2.8.
9. De Fair – Hatch vergelijking – paragraaf 6.2.9.



Figuur 54: Evaluatie van de doorlaatbaarheid van het 80 $\mu$ m zand.



Figuur 55: Evaluatie van de doorlaatbaarheid van het 80 $\mu$ m zand.

De formule van paragraaf 6.2.5. – Kozeny – kon niet worden toegepast omdat het korreloppervlak niet gekend was. De spreiding van de bekomen waarden van de verschillende formules is enorm. Voor een poriëngehalte van 36% vinden we een minimum waarde van 0,0124mm/s – volgens formule 6 – en een maximum waarde van 0,0681mm/s – volgens formule 4. Voor een poriëngehalte van 48% vinden we een minimum waarde van 0,0225 – volgens formule 3 – en een maximum waarde van 0,1356mm/s – volgens formule 8. In het eerste geval bedraagt de verhouding tussen maximum en minimum 5,5 in het tweede geval 6.

Parallel met de evaluatie van de empirische formules voor de walsnelheid zullen we dus ook een evaluatie van de doorlaatbaarheidsformules moeten uitvoeren.

## Hoofdstuk 7: Evaluatie van de empirische formules

### 7.1. Inleiding

In het hoofdstuk 3 werden er door middel van regressies empirische formules voor de walsnelheid opgesteld. We zullen terug een evaluatie uitvoeren aan de hand van de resultaten bekomen tijdens de twee dimensionale proeven – dezelfde resultaten die gebruikt werden bij de evaluatie van het wiskundige model.

De empirische formules geven een verband tussen de doorlaatbaarheid van de grond in ongeroerde toestand en de walsnelheid. De twee weerhouden formules waren:

$$- v_w = 30 \cdot k_0 \text{ (WL|Delft Hydraulics)}$$

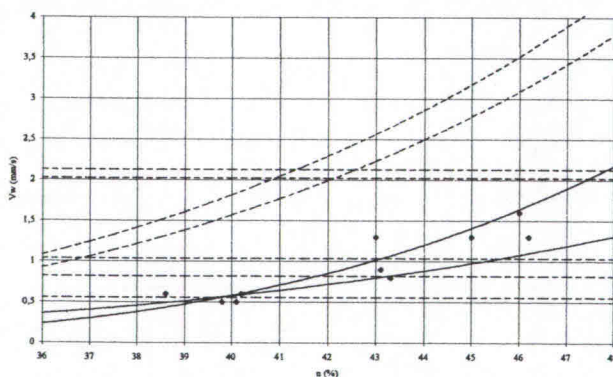
$$- \ln v_w = \frac{\ln k_0 + 3,34}{0,084 \cdot \ln k_0 + 1,09} \text{ (Regressie 18)}$$

Hierbij merken we op dat de wet “ $v_w = 30 \cdot k_0$ ” de uitdrukking “ $v_w = 20 \text{ à } 40 \cdot k_0$ ” zonder spreidingsinterval weergeeft.

Om de walsnelheid te schatten moeten we dus eerst de doorlaatbaarheid gaan schatten. In hoofdstuk 6 werden een reeks formules gegeven om de doorlaatbaarheid van een grond te bepalen. Deze formules geven echter – zeer – uiteenlopende resultaten. We zullen eerste de geschikte formule voor de berekening van de doorlaatbaarheid moeten vinden.

### 7.2. Bepaling van de geschikte doorlaatbaarheidsformule

In het hoofdstuk 6 werd, voor het 80 $\mu$ m zand, de doorlaatbaarheid met de verschillende formules berekend. Om te zien met welke formule we de doorlaatbaarheid moeten berekenen om de walsnelheid te bepalen, werd de walsnelheid voor al deze doorlaatbaarheden berekend en samen met de experimenteel bepaalde waarden van de walsnelheid uitgezet op grafiek – figuur 56.



Figuur 56: Schatting van de walsnelheid met de verschillende doorlaatbaarheidsformules.

We zien snel dat de twee volle lijnen de enige twee zijn die een – goede – benadering van de meetpunten geven. De steilste lijn werd bekomen door de toepassing van formule 6 – aangepaste Hazen –, de andere is berekend met de formule 5 – Terzaghi. Gelijkaardige berekeningen op de andere zanden bevestigen deze resultaten. De nuttige doorlaatbaarheidsformules zijn dus:

$$- k = 200 \cdot d_{10}^2 \cdot \left( \frac{n}{1-n} \right)^2 \text{ (Terzaghi)}$$

$$- k = 150 \cdot \left( \frac{n}{0,45} \right)^6 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T) \cdot d_{10}^2 \text{ (verbeterde Hazen)}$$



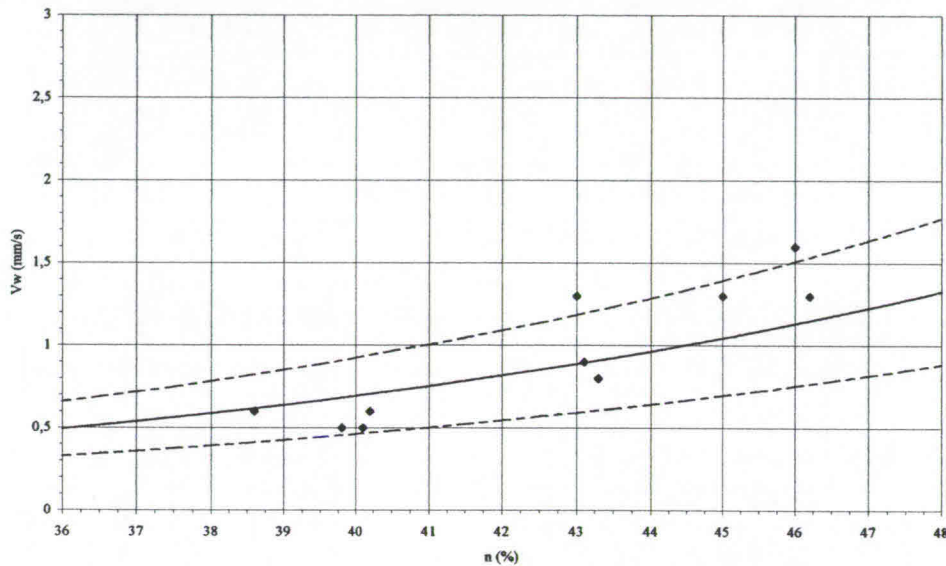
**7.3. Uitgebreide berekening op 80µm zand**

We hebben nu twee bruikbare formules voor de berekening van de doorlaatbaarheid – Terzaghi en verbeterde Hazen. Er zijn ook twee mogelijk formules voor de berekening van de walsnelheid: de wet van WL|Delft Hydraulics en de regressie formule 18. We zullen nu voor het 80µm zand de vier mogelijke combinaties gaan vergelijken.

**7.3.1. Doorlaatbaarheidsbepaling met de formule van Terzaghi**

**7.3.1.1. Schatting van de walsnelheid met de wet van WL|Delft Hydraulics**

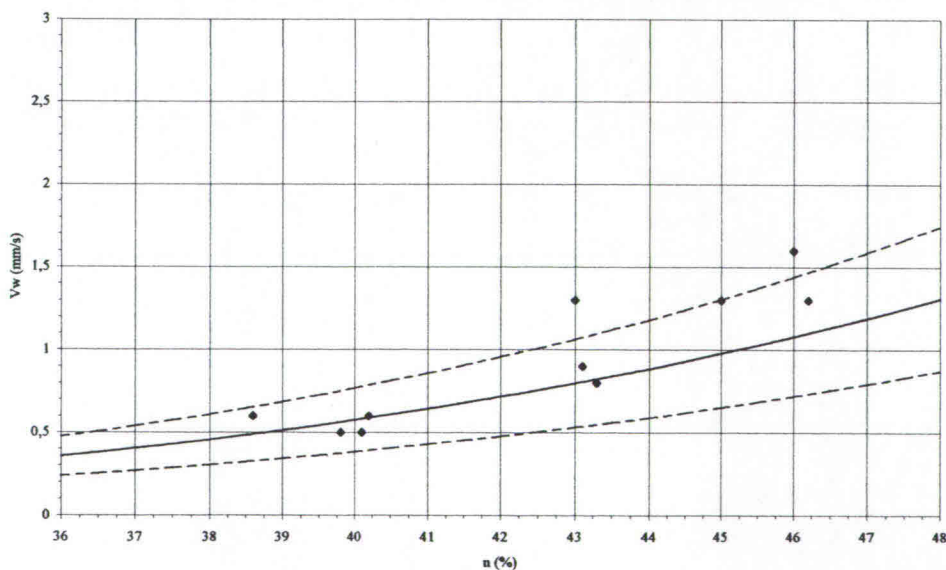
In dit geval is de gemiddelde afwijking van de berekende resultaten ten opzichte van de meetresultaten gelijk aan 21%. De streeplijnen op de grafiek duiden een afwijkingsinterval van 33% ten opzichte van de berekende waarden aan.



Figuur 57: Combinatie Terzaghi – WL|Delft Hydraulics.

**7.3.1.2. Schatting van de walsnelheid met regressie 18**

Hier hebben de berekende resultaten een afwijking van 17% ten opzichte van de meetresultaten.

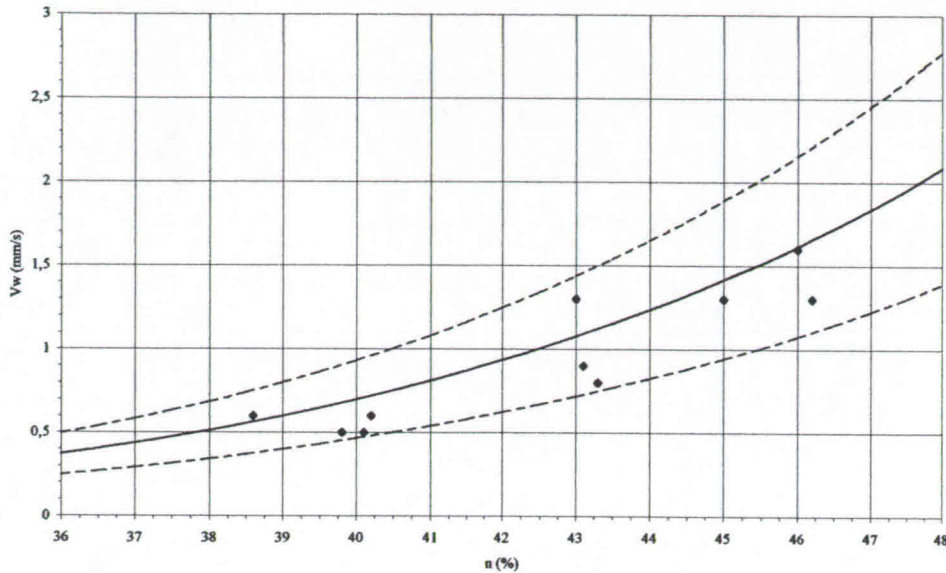


Figuur 58: Combinatie Terzaghi – Regressie 18.

**7.3.2. Doorlaatbaarheidsbepaling met de verbeterde formule van Hazen**

**7.3.2.1. Schatting van de walsnelheid met de wet van WL | Delft Hydraulics**

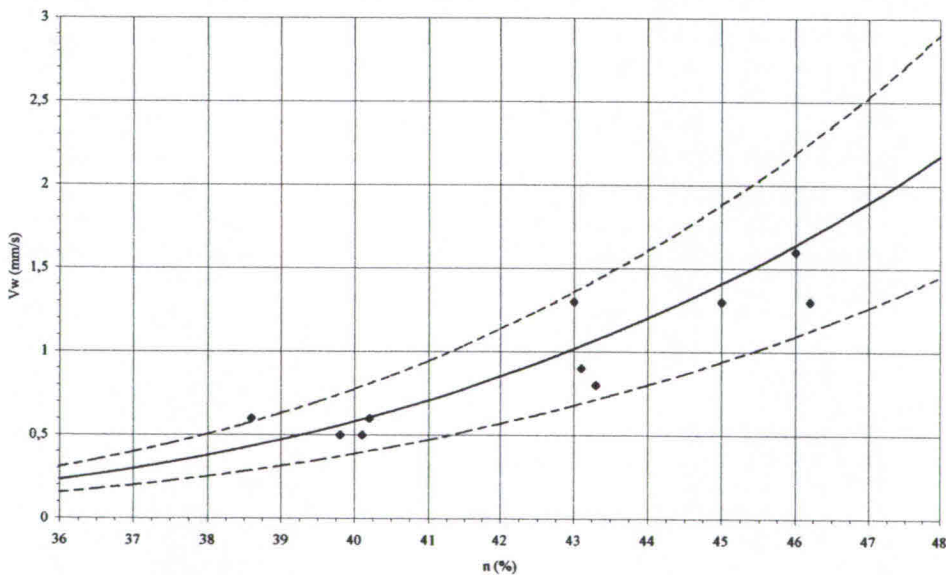
Met deze combinatie vinden we een gemiddelde afwijking van de berekende resultaten ten opzichte van de meetresultaten van 18%.



Figuur 59: Combinatie verbeterde Hazen – WL | Delft Hydraulics

**7.3.2.2. Schatting van de walsnelheid met regressie 18**

Deze combinatie resulteert in een gemiddelde afwijking van 17%



Figuur 60: Combinatie verbeterde Hazen – Regressie 18.

**7.3.3. Besluit**

De toepassing van de verbeterde formule van Hazen levert betere resultaten dan de toepassing van de formule van Terzaghi. De toepassing van de regressie formule 18 levert betere resultaten dan de toepassing van de formule van WL | Delft Hydraulics.

In hoofdstuk 3 bleek de regressie formule 18 vooral betere resultaten voor grote doorlaatbaarheden te geven. Hier blijkt ze ook voor zanden met lage doorlaatbaarheden, waarden te geven die iets dichter aansluiten bij de meetwaarden.

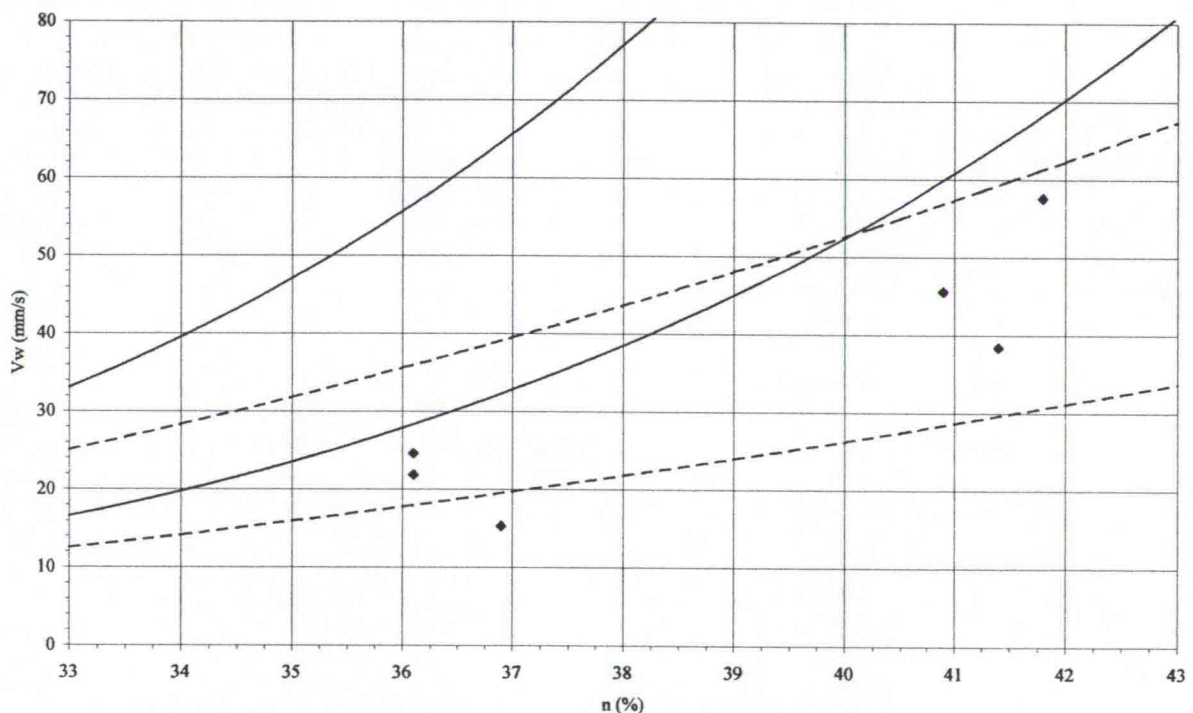
#### 7.4. Uitgebreide berekening op 650 $\mu$ m zand

Na het zand met de kleinste doorlaatbaarheid zullen we nu het zand met de grootste doorlaatbaarheid onderzoeken. Dezelfde combinaties als in paragraaf 7.3. worden uitgerekend. De volgende afwijkingen van de meetresultaten worden terug gevonden.

	Formule Terzaghi	Formule Hazen
WL   Delft Hydraulics	141,0%	118,3%
Regressie 18	40,3%	27,9%

Tabel 18: Afwijkingen voor het 650 $\mu$ m zand.

Hier zien we duidelijk dat de regressie formule 18 aanzienlijk betere waarden geeft voor gronden met grote doorlaatbaarheden – groter dan 1mm/s. We zien ook dat de toepassing van de verbeterde formule van Hazen iets betere resultaten geeft dan de formule van Terzaghi.



Figuur 61: Vergelijking van de wet WL/Delft Hydraulics met de regressie formule 18.

Op de figuur 61 wordt in stippellijn het domein met een afwijking van 33% ten opzichte van de berekening met de regressie 18 weergegeven – doorlaatbaarheid met verbeterde Hazen. In volle lijn wordt dit domein, bekomen met de formule van WL/Delft Hydraulics, afgebakend. We zien duidelijk dat de formule van WL/Delft Hydraulics een overschatting van de walsnelheid maakt voor gronden met een grote doorlaatbaarheid.

Uiteindelijk kunnen we besluiten dat, net zoals bij het 80 $\mu$ m zand – de combinatie van de verbeterde formule van Hazen met de regressie formule 18 de beste resultaten geeft.

7.5. Overzicht van de resultaten

7.5.1. Gezeefd zand 80µm

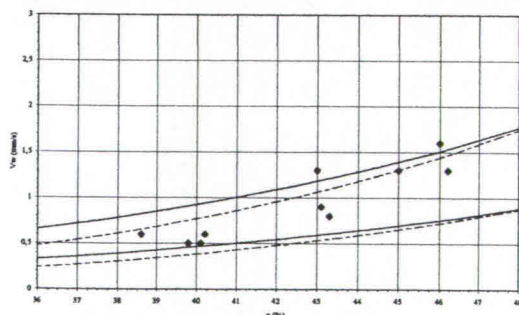
Terzaghi							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Verschil	Rekenw.	Meetw.	Verschil
38,6	0,0206	0,5	0,6	-18,3%	0,6	0,6	-2,7%
39,8	0,0227	0,6	0,5	12,6%	0,7	0,5	-26,7%
40,1	0,0233	0,6	0,5	16,5%	0,7	0,5	-28,5%
40,2	0,0235	0,6	0,6	-1,9%	0,7	0,6	-14,9%
43,0	0,0296	0,8	1,3	-38,7%	0,9	1,3	46,4%
43,1	0,0298	0,8	0,9	-10,5%	0,9	0,9	0,5%
43,3	0,0303	0,8	0,8	2,8%	0,9	0,8	-12,1%
45,0	0,0348	1,0	1,3	-24,7%	1,0	1,3	24,4%
46,0	0,0377	1,0	1,6	-32,5%	1,1	1,6	41,3%
46,2	0,0384	1,0	1,3	-15,2%	1,2	1,3	13,0%
Gemiddelde afwijking				17,4%	Gemiddelde afwijking		21,1%

Tabel 19: Toepassing van de empirische formules met Terzaghi – 80µm.

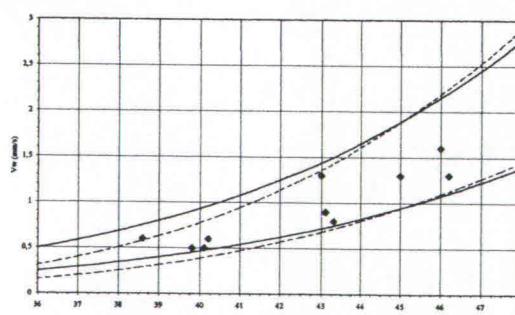
Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Verschil	Rekenw.	Meetw.	Verschil
38,6	0,0188	0,4	0,6	-27,9%	0,6	0,6	6,4%
39,8	0,0226	0,6	0,5	11,6%	0,7	0,5	-26,2%
40,1	0,0236	0,6	0,5	18,6%	0,7	0,5	-29,5%
40,2	0,0240	0,6	0,6	0,9%	0,7	0,6	-16,6%
43,0	0,0359	1,0	1,3	-21,7%	1,1	1,3	20,6%
43,1	0,0364	1,0	0,9	15,0%	1,1	0,9	-17,7%
43,3	0,0375	1,1	0,8	33,9%	1,1	0,8	-28,8%
45,0	0,0472	1,4	1,3	8,5%	1,4	1,3	-8,2%
46,0	0,0539	1,6	1,6	2,6%	1,6	1,6	-1,0%
46,2	0,0553	1,7	1,3	30,1%	1,7	1,3	-21,6%
Gemiddelde afwijking				17,1%	Gemiddelde afwijking		17,7%

Tabel 20: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 80µm.

De volle lijnen bakenen het domein met een afwijking van 33% voor de wet van WL | Delft Hydraulics af, de streeplijnen voor de regressie formule 18.



Figuur 62: Berekeningen met Terzaghi



Figuur 63: Berekeningen met verbeterde Hazen

7.5.2. Duinzand 140µm

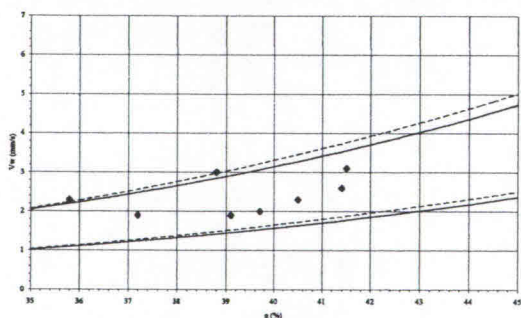
Terzaghi							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
35,8	0,0550	1,7	2,3	-27,0%	1,7	2,3	-28,3%
37,2	0,0620	1,9	1,9	-1,2%	1,9	1,9	-2,1%
38,8	0,0710	2,2	3	-25,7%	2,1	3	-29,0%
39,1	0,0728	2,3	1,9	20,5%	2,2	1,9	15,0%
39,7	0,0766	2,4	2	20,8%	2,3	2	14,9%
40,5	0,0819	2,6	2,3	12,6%	2,5	2,3	6,8%
41,4	0,0882	2,8	2,6	7,6%	2,7	2,6	1,8%
41,5	0,0889	2,8	3,1	8,9%	2,7	3,1	-13,9%
Gemiddelde afwijking				15,5%	Gemiddelde afwijking		14,0%

Tabel 21: Toepassing van de empirische formules met Terzaghi – 140µm.

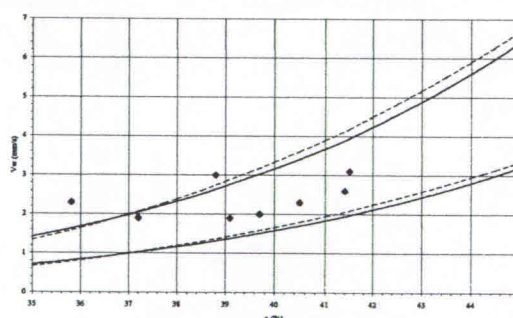
Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
35,8	0,0407	1,2	2,3	-48,6%	1,2	2,3	-47,0%
37,2	0,0512	1,6	1,9	-18,5%	1,5	1,9	-19,2%
38,8	0,0659	2,1	3	-31,5%	2,0	3	-34,1%
39,1	0,0690	2,2	1,9	13,7%	2,1	1,9	9,0%
39,7	0,0756	2,4	2	19,1%	2,3	2	13,4%
40,5	0,0852	2,7	2,3	17,4%	2,6	2,3	11,2%
41,4	0,0972	3,1	2,6	18,9%	2,9	2,6	12,2%
41,5	0,0987	3,1	3,1	1,2%	3,0	3,1	-4,5%
Gemiddelde afwijking				21,1%	Gemiddelde afwijking		18,8%

Tabel 22: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 140µm.

De volle lijnen bakenen het domein met een afwijking van 33% voor de wet van WL|Delft Hydraulics af, de streeplijnen voor de regressie formule 18.



Figuur 64: Berekeningen met Terzaghi



Figuur 65: Berekeningen met verbeterde Hazen

7.5.3. Duinzand 210 $\mu$ m

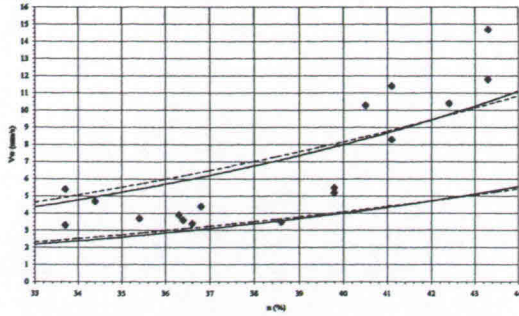
Terzaghi								
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics			
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil	
33,7	0,1163	3,7	5,4	-31,6%	3,5	5,4	-35,4%	
33,7	0,1163	3,7	3,3	11,9%	3,5	3,3	5,7%	
34,4	0,1237	3,9	4,7	-16,5%	3,7	4,7	-21,0%	
35,4	0,1351	4,3	3,7	15,4%	4,1	3,7	9,6%	
36,3	0,1461	4,6	3,9	17,9%	4,4	3,9	12,4%	
36,4	0,1474	4,6	3,6	28,8%	4,4	3,6	22,8%	
36,6	0,1500	4,7	3,4	38,6%	4,5	3,4	32,3%	
36,8	0,1526	4,8	4,4	8,8%	4,6	4,4	4,0%	
36,8	0,1526	4,8	4,4	8,8%	4,6	4,4	4,0%	
38,6	0,1778	5,5	3,5	57,5%	5,3	3,5	52,4%	
39,8	0,1967	6,0	5,2	16,1%	5,9	5,2	13,5%	
39,8	0,1967	6,0	5,5	9,7%	5,9	5,5	7,3%	
40,5	0,2085	6,4	10,3	-38,3%	6,3	10,3	-39,3%	
41,1	0,2191	6,6	8,3	-20,0%	6,6	8,3	-20,8%	
41,1	0,2191	6,6	11,4	-41,8%	6,6	11,4	-42,3%	
42,4	0,2438	7,3	10,4	-30,0%	7,3	10,4	-29,7%	
43,3	0,2624	7,8	11,8	-34,3%	7,9	11,8	-33,3%	
43,3	0,2624	7,8	14,7	-47,3%	7,9	14,7	-46,4%	
Gemiddelde afwijking				26,3%	Gemiddelde afwijking			24,0%

Tabel 23: Toepassing van de empirische formules met Terzaghi – 210 $\mu$ m.

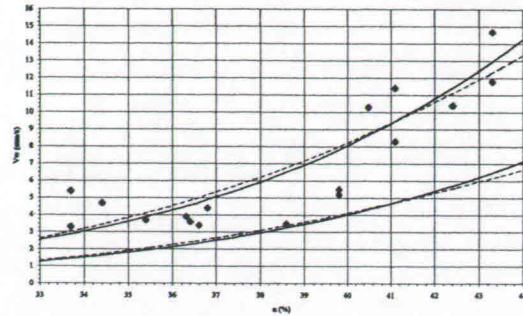
Verbeterde formule van Hazen								
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics			
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil	
33,7	0,0720	2,3	5,4	-58,1%	2,2	5,4	-60,0%	
33,7	0,0720	2,3	3,3	-31,4%	2,2	3,3	-34,5%	
34,4	0,0815	2,6	4,7	-45,1%	2,4	4,7	-48,0%	
35,4	0,0968	3,1	3,7	-16,8%	2,9	3,7	-21,5%	
36,3	0,1125	3,6	3,9	-8,3%	3,4	3,9	-13,4%	
36,4	0,1144	3,6	3,6	1,0%	3,4	3,6	-4,7%	
36,6	0,1182	3,8	3,4	10,4%	3,6	3,4	4,3%	
36,8	0,1221	3,9	4,4	-11,9%	3,7	4,4	-16,7%	
36,8	0,1221	3,9	4,4	11,9%	3,7	4,4	16,7%	
38,6	0,1627	5,1	3,5	45,2%	4,9	3,5	39,4%	
39,8	0,1955	6,0	5,2	15,4%	5,9	5,2	12,8%	
39,8	0,1955	6,0	5,5	9,1%	5,9	5,5	6,6%	
40,5	0,2170	6,6	10,3	-36,1%	6,5	10,3	-36,8%	
41,1	0,2370	7,1	8,3	-14,4%	7,1	8,3	-14,3%	
41,1	0,2370	7,1	11,4	-37,7%	7,1	11,4	-37,6%	
42,4	0,2857	8,3	10,4	-19,9%	8,6	10,4	-17,6%	
43,3	0,3241	9,2	11,8	-21,7%	9,7	11,8	-17,6%	
43,3	0,3241	9,2	14,7	-37,1%	9,7	14,7	-33,9%	
Gemiddelde afwijking				24,0%	Gemiddelde afwijking			24,2%

Tabel 24: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 210 $\mu$ m.

De volle lijnen bakenen het domein met een afwijking van 33% voor de wet van WL | Delft Hydraulics af, de streeplijnen voor de regressie formule 18.



Figuur 66: Berekeningen met Terzaghi



Figuur 67: Berekeningen met verbeterde Hazen

7.5.4. Rivierzand 450µm

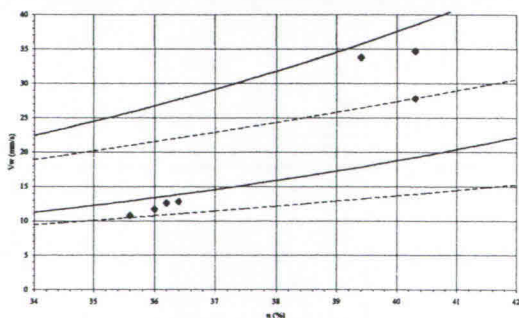
Terzaghi							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
35,6	0,6455	15,7	10,8	45,7%	19,4	10,8	79,3%
36,0	0,6684	16,1	11,7	37,9%	20,1	11,7	71,4%
36,2	0,6801	16,3	12,6	29,7%	20,4	12,6	61,9%
36,4	0,6920	16,5	12,8	29,3%	20,8	12,8	62,2%
39,4	0,8930	19,8	33,8	-41,4%	26,8	33,8	-20,7%
40,3	0,9626	20,9	27,8	-24,9%	28,9	27,8	3,9%
40,3	0,9626	20,9	34,7	-39,9%	28,9	34,7	-16,8%
Gemiddelde afwijking				35,3%			45,2%

Tabel 25: Toepassing van de empirische formules met Terzaghi – 450µm.

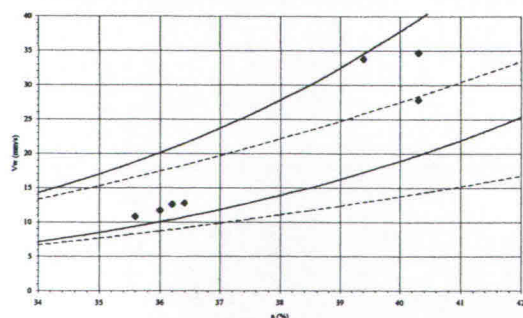
Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
35,6	0,4700	12,4	10,8	14,8%	14,1	10,8	30,5%
36,0	0,5026	13,1	11,7	11,6%	15,1	11,7	28,9%
36,2	0,5195	13,4	12,6	6,3%	15,6	12,6	23,7%
36,4	0,5370	13,7	12,8	7,2%	16,1	12,8	25,9%
39,4	0,8637	19,4	33,8	-42,7%	25,9	33,8	-23,3%
40,3	0,9890	21,3	27,8	-23,5%	29,7	27,8	6,7%
40,3	0,9890	21,3	34,7	-38,7%	29,7	34,7	-14,5%
Gemiddelde afwijking				20,7%	Gemiddelde afwijking		21,9%

Tabel 26: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 450µm.

De volle lijnen bakenen het domein met een afwijking van 33% voor de wet van WL|Delft Hydraulics af, de streeplijnen voor de regressie formule 18.



Figuur 68: Berekeningen met Terzaghi



Figuur 69: Berekeningen met verbeterde Hazen

7.5.5. Rivierzand 650µm

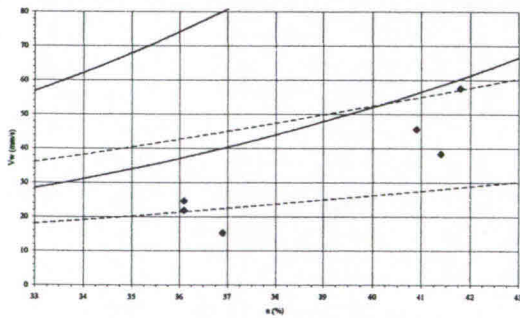
Terzaghi							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
36,1	1,8683	32,2	24,6	-30,7%	56,0	24,6	-127,8%
36,1	1,8683	32,2	21,9	-46,8%	56,0	21,9	-155,9%
36,9	2,0018	33,6	15,3	-119,3%	60,1	15,3	-292,5%
40,9	2,8035	41,1	45,6	10,0%	84,1	45,6	-84,4%
41,4	2,9217	42,1	38,4	-9,5%	87,6	38,4	-128,3%
41,8	3,0195	42,9	57,6	25,6%	90,6	57,6	-57,3%
Gemiddelde afwijking				40,3%	Gemiddelde afwijking		141,0%

Tabel 27: Toepassing van de empirische formules met Terzaghi – 650µm.

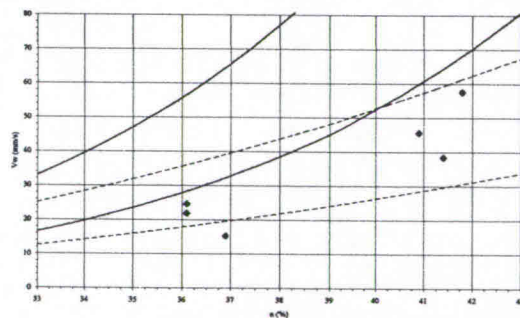
Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
36,1	1,4159	27,0	24,6	-9,7%	42,5	24,6	-72,7%
36,1	1,4159	27,0	21,9	-23,2%	42,5	21,9	-94,0%
36,9	1,6149	29,3	15,3	-91,8%	48,4	15,3	-216,7%
40,9	2,9946	42,7	45,6	6,5%	89,8	45,6	-97,0%
41,4	3,2211	44,5	38,4	-15,9%	96,6	38,4	-151,6%
41,8	3,4124	46,0	57,6	20,2%	102,4	57,6	-77,7%
Gemiddelde afwijking				27,9%	Gemiddelde afwijking		118,3%

Tabel 28: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 650µm.

De volle lijnen bakenen het domein met een afwijking van 33% voor de wet van WL | Delft Hydraulics af, de streeplijnen voor de regressie formule 18.



Figuur 70: Berekeningen met Terzaghi



Figuur 71: Berekeningen met verbeterde Hazen

7.5.6. Bespreking

Indien we de gemiddelde afwijkingen vergelijken, vinden we:

Zand	Terzaghi		Verbeterde Hazen	
	Regressie 18	WL   Delft H.	Regressie 18	WL   Delft H.
80µm	17,4%	21,1%	17,1%	17,7%
140µm	15,5%	14,0%	21,1%	18,8%
210µm	26,3%	24,0%	24,0%	24,2%
450µm	35,3%	45,2%	20,7%	21,9%
650µm	40,3%	141,0%	27,9%	118,3%

Tabel 29: Overzicht van de bekomen afwijkingen.



Behalve voor het 140µm zand geeft de toepassing van de verbeterde wet van Hazen steeds betere waarden dan de toepassing van de wet van Terzaghi. Naarmate de doorlaatbaarheid groter wordt stijgt de verbetering van de wet van Hazen ten opzichte van de wet van Terzaghi.

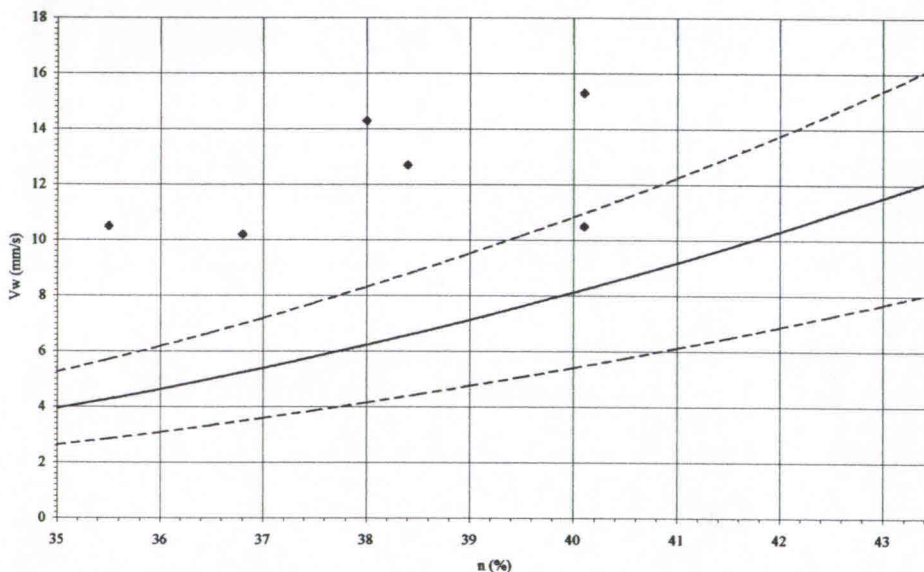
Op drie gevallen na – Terzaghi 140µm en 210µm, Hazen 140µm – geeft de regressie formule 18 betere resultaten dan de formule van WL|Delft Hydraulics. Deze verbetering is zeer groot voor het 650µm zand.

Uiteindelijk kunnen we besluiten dat de berekening van de doorlaatbaarheid met de verbeterde wet van Hazen, samen met de regressie formule 18 algemeen de beste benadering van de walsnelheid geeft. De maximale gemiddelde afwijking van de meetwaarden in dit geval bedroeg 28% voor deze vijf geteste zanden.

**7.6. Resultaten van de andere materialen**

**7.6.1. Glasparels 230µm**

Gemiddeld liggen de berekende waarden zo'n 50% lager dan de gemeten waarden. Dit is waarschijnlijk te verklaren door het afwijken van bepaalde parameters –  $\gamma_s$ ,  $\phi$  – ten opzichte van deze van zandgronden. De gebruikte formules voor de berekening van de walsnelheid zijn opgesteld aan de hand van metingen op zandgronden en houden dus geen rekening met deze afwijkingen. Voor een verdere bespreking van deze problematiek verwijzen we naar paragraaf 7.8.



Figuur 72: Berekeningen versus metingen – glasparels.

**7.6.2. Metselzand 300µm**

Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Verschil	Rekenw.	Meetw.	Verschil
34,3	0,1041	3,3	5,7	-41,9%	3,1	5,7	-45,2%
34,3	0,1041	3,3	5,5	-39,8%	3,1	5,5	-43,2%
37,6	0,1806	5,6	8,8	-36,5%	5,4	8,8	-38,4%
37,6	0,1806	5,6	7,8	-28,3%	5,4	7,8	-30,5%
39,8	0,2540	7,5	12,5	-39,7%	7,6	12,5	-39,0%
39,8	0,2540	7,5	14,5	-48,0%	7,6	14,5	-47,4%
Gemiddelde afwijking				39,0%	Gemiddelde afwijking		40,6%

Tabel 30: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 300µm.

De berekeningen – met de verbeterde wet van Hazen en regressie formule 18 – uitgevoerd op het metselzand geven geen bevredigende resultaten. Het is duidelijk dat we de walsnelheid – met gemiddeld 40% – gaan onderschatten.

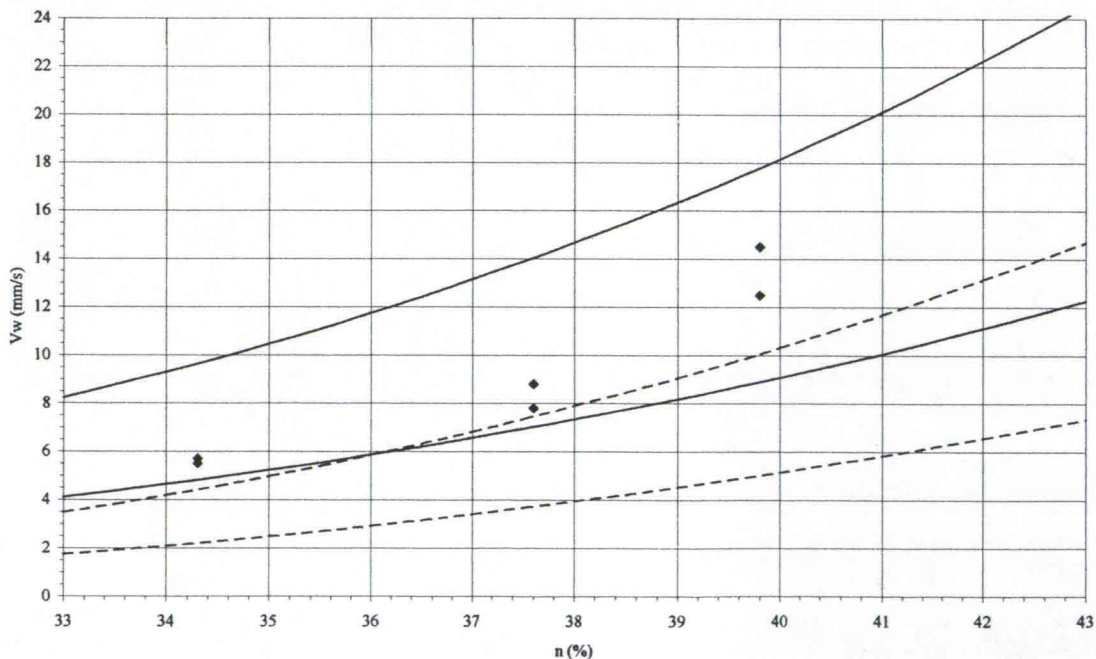
De onderschatting van de walsnelheid is het gevolg van de onderschatting van de doorlaatbaarheid van de grond. Proefondervindelijk werd de doorlaatbaarheid van de testgronden bepaald. Voor de gebruikte gronden werd de doorlaatbaarheid in functie van de pakking en de  $d_{50}$  door de volgende betrekking gegeven:

$$\log k = 2,38 \cdot \log \frac{d_{50}}{10,5} + 6 \cdot n$$

Voor de 80 $\mu$ m, 140 $\mu$ m, 210 $\mu$ m, 450 $\mu$ m en 650 $\mu$ m zanden leveren deze betrekking en de verbeterde wet van Hazen ongeveer dezelfde waarden – afwijking van ongeveer 20%. Bij toepassing op het 300 $\mu$ m metselzand geven deze twee betrekkingen waarden die 100% met elkaar verschillen. Indien we nu de walsnelheid gaan schatten met de doorlaatbaarheden bekomen met de empirische formule opgesteld tijdens de proeven vinden we de volgende resultaten.

Empirische wet WL		Delft Hydraulics					
n (%)	$k_0$ (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL / Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
34,3	0,2416	7,2	5,7	26,8%	7,2	5,7	27,2%
34,3	0,2416	7,2	5,5	31,4%	7,2	5,5	31,8%
37,6	0,3812	10,5	8,8	19,7%	11,4	8,8	29,9%
37,6	0,3812	10,5	7,8	35,0%	11,4	7,8	46,6%
39,8	0,5166	13,3	12,5	6,6%	15,5	12,5	24,0%
39,8	0,5166	13,3	14,5	-8,1%	15,5	14,5	6,9%
Gemiddelde afwijking				21,3%	Gemiddelde afwijking		27,7%

Tabel 31: Toepassing van de empirische formules met WL / Delft Hydraulics – 300 $\mu$ m.



Figuur 73: Vergelijking van resultaten bekomen met twee doorlaatbaarheidswetten.

Nu vinden we resultaten met een zelfde nauwkeurigheid als in paragraaf 7.5. Op figuur 73 wordt het verschil tussen de twee berekeningen gevisualiseerd. De streeplijnen bakenen het domein af met een afwijking van 33% uitgevoerd met de berekening van de doorlaatbaarheid met de verbeterde wet van Hazen, de volle lijnen het domein verkregen door berekeningen met de tijdens deze proeven opgestelde doorlaatbaarheidsbetrekking.

De wet van Hazen gebruikt de  $d_{10}$  als karakteristieke diameter, de andere wet gebruikt de  $d_{50}$ . De uniformiteitscoëfficiënt  $U_c = d_{60}/d_{10}$ , geeft een indicatie van de korrelspreiding en dus ook van het verschil tussen de  $d_{10}$  en de  $d_{50}$ . Voor de gebruikte gronden vinden we de volgende waarden:

Zand	$U_c$
80 $\mu$ m	1,63
140 $\mu$ m	1,52
210 $\mu$ m	1,53
300 $\mu$ m	2,16
450 $\mu$ m	1,48
650 $\mu$ m	1,24

Tabel 32: Uniformiteitscoëfficiënten van de zanden.

Het zand van 300 $\mu$ m heeft een uniformiteitscoëfficiënt die duidelijk hoger ligt dan de andere,  $U_c = 2,16$ . We moeten voorzichtig zijn vanuit dit ene geval te veralgemenen, maar waarschijnlijk geeft de verbeterde wet van Hazen een onderschatting van de doorlaatbaarheid van gronden met een grote uniformiteitscoëfficiënt. Daarom is het misschien nuttig de empirische formule van WL|Delft Hydraulics te gebruiken voor gronden met een hoge uniformiteitscoëfficiënt. We moeten tevens waarschuwen voor het veralgemeend gebruik van deze formule. Ze werd afgeleid uit meetwaarden van doorlaatbaarheidsproeven op de gronden die voor de zuigproeven gebruikt werden. Het is dus normaal dat ze voor deze gronden betere resultaten geven dan andere formules. Tenslotte wensen we nog op te merken dat de toepassing van de doorlaatbaarheidsformule van WL|Delft Hydraulics op de 80 $\mu$ m, 140 $\mu$ m, 210 $\mu$ m, 450 $\mu$ m en 650 $\mu$ m geen betere benaderingen van de walsnelheid oplevert.

### 7.6.3. Gemengd zand 75% – 25%

Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (mm/s) Regressie 18			$v_w$ (mm/s) WL Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
33,5	0,0147	0,3	1,9	-84,1%	0,4	1,9	-76,8%
33,5	0,0147	0,3	2,0	-84,9%	0,4	2,0	-77,9%
33,7	0,0152	0,3	1,7	-81,2%	0,5	1,7	-73,1%
33,7	0,0152	0,3	1,8	-82,3%	0,5	1,8	-74,6%
36,9	0,0263	0,7	2,8	-75,6%	0,8	2,8	-71,9%
36,9	0,0263	0,7	2,4	-71,6%	0,8	2,4	-67,2%
39,1	0,0372	1,1	3,4	-68,8%	1,1	3,4	-67,2%
39,1	0,0372	1,1	2,3	-53,9%	1,1	2,3	-51,5%
Gemiddelde afwijking				75,3%	Gemiddelde afwijking		70,0%

Tabel 33: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 75-25.

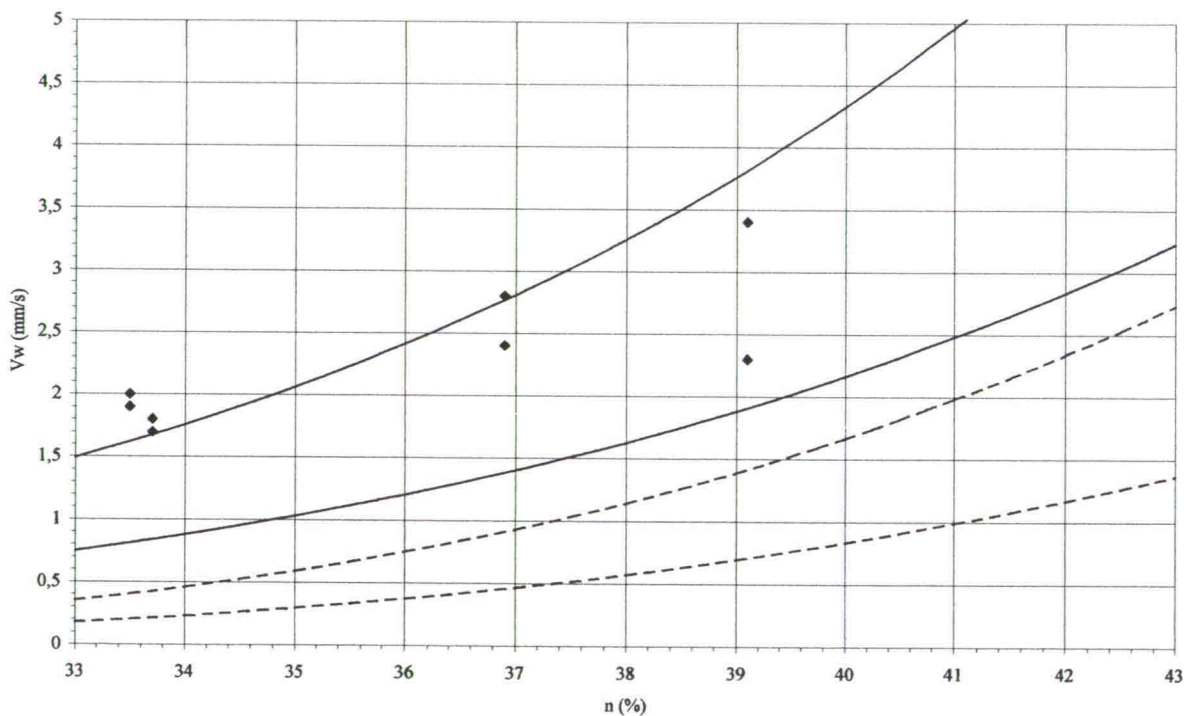
Zoals voor het metselzand hebben we hier terug een duidelijke onderschatting van de walsnelheid. Indien we de uniformiteitscoëfficiënt  $U_c$  berekenen dan vinden we een waarden van 2,39. Deze waarde ligt dus terug duidelijk hoger dan de waarde van de andere gronden. Volgens de conclusies

van paragraaf 7.6.2. zouden we betere waarden moeten bekomen door toepassing van de doorlaatbaarheidswet van WL|Delft Hydraulics. We vinden:

Empirische wet WL		Delft Hydraulics					
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
33,5	0,0416	1,2	1,9	-36,1%	1,2	1,9	-34,4%
33,5	0,0416	1,2	2,0	-39,3%	1,2	2,0	-37,7%
33,7	0,0427	1,3	1,7	-26,2%	1,3	1,7	-24,6%
33,7	0,0427	1,3	1,8	-30,3%	1,3	1,8	-28,8%
36,9	0,0665	2,1	2,8	-25,9%	2,0	2,8	-28,8%
36,9	0,0665	2,1	2,4	-13,6%	2,0	2,4	-16,9%
39,1	0,0901	2,9	3,4	-15,9%	2,7	3,4	-20,5%
39,1	0,0901	2,9	2,3	24,4%	2,7	2,3	17,5%
Gemiddelde afwijking				26,5%	Gemiddelde afwijking		26,1%

Tabel 34: Toepassing van de empirische formules met WL|Delft Hydraulics – 75-25.

Indien we de twee bekomen resultaten grafisch voorstellen – WL|Delft Hydraulics in volle lijn, verbeterde Hazen in streeplijn – dan bekomen we het volgende:



Figuur 74: Vergelijking van de twee doorlaatbaarheidswetten – 75-25.

Op de figuur 74 kunnen we vast stellen dat de conclusies van paragraaf 7.6.2. hier duidelijk ook van toepassing zijn.

#### 7.6.4. Gemengd zand 50% – 50%

Dit samengestelde zand heeft de hoogte uniformiteitscoëfficiënt van alle gebruikte zanden,  $U_c = 2,98$ . De toepassing van de verbeterde wet van Hazen levert geen goede resultaten, er is een gemiddelde onderschatting van 70 à 80%. De toepassing van de wet van WL|Delft Hydraulics

levert aanzienlijk beter resultaten maar er blijft nog steeds een onderschatting van de walsnelheid met ongeveer 40%. Net zoals voor het gemengde zand 75-25 levert ook de toepassing van de walsnelheidsformule van WL|Delft Hydraulics betere resultaten dan de regressie formule 18.

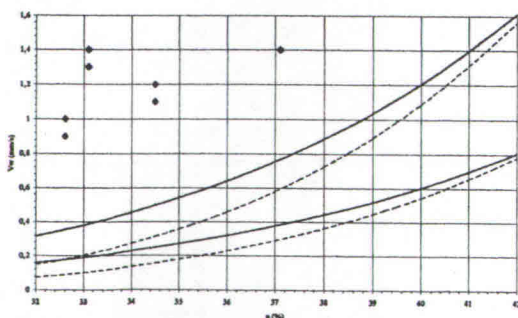
Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
32,6	0,0088	0,1	0,9	-85,1%	0,3	0,9	-70,6%
32,6	0,0088	0,1	1,0	-86,6%	0,3	1,0	-73,5%
33,1	0,0097	0,2	1,3	-88,0%	0,3	1,3	-77,7%
33,1	0,0097	0,2	1,4	-88,8%	0,3	1,4	-79,3%
34,5	0,0124	0,2	1,2	-80,6%	0,4	1,2	-69,0%
34,5	0,0124	0,2	1,1	-78,8%	0,4	1,1	-66,2%
37,1	0,0192	0,4	2,2	-79,8%	0,6	2,2	-73,9%
37,1	0,0192	0,4	1,4	-68,2%	0,6	1,4	-58,9%
Gemiddelde afwijking				82,0%	Gemiddelde afwijking		71,1%

Tabel 35: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 50-50.

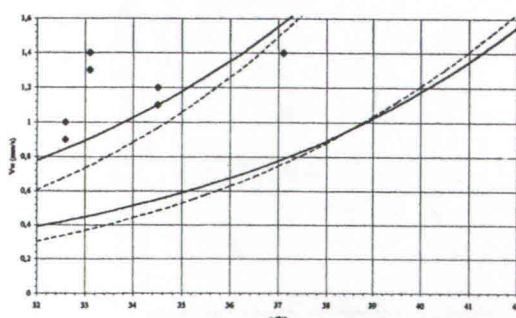
Empirische wet WL Delft Hydraulics							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
32,6	0,0212	0,5	0,9	-43,3%	0,6	0,9	-29,5%
32,6	0,0212	0,5	1,0	-49,0%	0,6	1,0	-36,5%
33,1	0,0227	0,6	1,3	-56,9%	0,7	1,3	-47,7%
33,1	0,0227	0,6	1,4	-60,0%	0,7	1,4	-51,4%
34,5	0,0275	0,7	1,2	-39,6%	0,8	1,2	-31,2%
34,5	0,0275	0,7	1,1	-34,1%	0,8	1,1	-25,0%
37,1	0,0394	1,1	2,2	-48,3%	1,2	2,2	-46,3%
37,1	0,0394	1,1	1,4	-18,7%	1,2	1,4	-15,6%
Gemiddelde afwijking				43,7%	Gemiddelde afwijking		35,4%

Tabel 36: Toepassing van de empirische formules met WL|Delft Hydraulics – 50-50.

De berekening van walsnelheid met de regressie formule 18 levert hier minder goede waarden op dan met de formule van WL|Delft Hydraulics. De volgende figuren geven een overzicht, bij de linkse figuur werden de doorlaatbaarheden berekend met de verbeterde formule van Hazen en bij de rechtse figuur met de wet van WL|Delft Hydraulics. De volle lijnen bakenen het domein met een afwijking van 33% voor de wet van WL|Delft Hydraulics af, de streeplijnen voor de regressie formule 18.



Figuur 75: Berekeningen verbeterde Hazen



Figuur 76: Berekeningen WL|Delft Hydraulics

**7.6.5. Gemengd zand 25% – 75%**

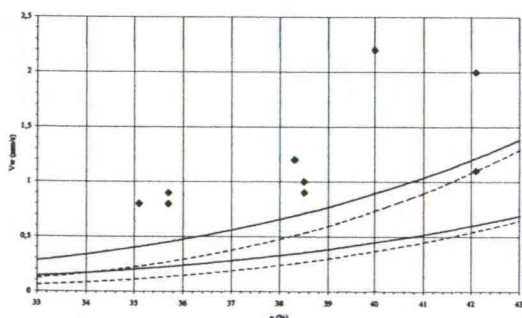
Verbeterde formule van Hazen							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
35,1	0,0124	0,2	0,8	-71,0%	0,4	0,8	-53,6%
35,1	0,0124	0,2	0,8	-71,0%	0,4	0,8	-53,6%
35,7	0,0137	0,3	0,8	-66,1%	0,4	0,8	-48,7%
35,7	0,0137	0,3	0,9	-69,8%	0,4	0,9	-54,4%
38,3	0,0209	0,5	1,2	-58,3%	0,6	1,2	-47,8%
38,3	0,0209	0,5	1,2	-58,3%	0,6	1,2	-47,8%
38,5	0,0215	0,5	1,0	-47,7%	0,6	1,0	-35,4%
38,5	0,0215	0,5	0,9	-41,9%	0,6	0,9	-28,2%
40,0	0,0271	0,7	2,2	-67,7%	0,8	2,2	-63,1%
42,1	0,0368	1,0	2,0	-47,6%	1,1	2,0	-44,8%
42,1	0,0368	1,0	1,1	-4,7%	1,1	1,1	0,4%
Gemiddelde afwijking				54,9%	Gemiddelde afwijking		43,3%

Tabel 37: Toepassing van de empirische formules met verbeterde Hazen – 25-75.

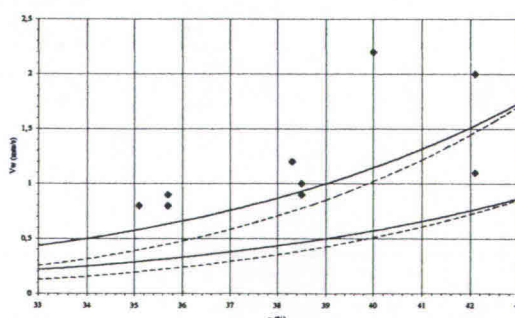
Empirische wet WL   Delft Hydraulics							
n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	v <sub>w</sub> (mm/s) Regressie 18			v <sub>w</sub> (mm/s) WL   Delft Hydraulics		
		Rekenw.	Meetw.	Vershil	Rekenw.	Meetw.	Vershil
35,1	0,0146	0,3	0,8	-62,7%	0,4	0,8	-45,4%
35,1	0,0146	0,3	0,8	-62,7%	0,4	0,8	-45,4%
35,7	0,0158	0,3	0,8	-57,8%	0,5	0,8	-40,6%
35,7	0,0158	0,3	0,9	-62,5%	0,5	0,9	-47,2%
38,3	0,0227	0,6	1,2	-53,3%	0,7	1,2	-43,3%
38,3	0,0227	0,6	1,2	-53,3%	0,7	1,2	-43,3%
38,5	0,0233	0,6	1,0	-41,8%	0,7	1,0	-30,1%
38,5	0,0233	0,6	0,9	-35,3%	0,7	0,9	-22,3%
40,0	0,0287	0,8	2,2	-65,2%	0,9	2,2	-60,9%
42,1	0,0383	1,1	2,0	-45,0%	1,1	2,0	-42,5%
42,1	0,0383	1,1	1,1	0,1%	1,1	1,1	4,5%
Gemiddelde afwijking				49,1%	Gemiddelde afwijking		38,7%

Tabel 38: Toepassing van de empirische formules met WL | Delft Hydraulics – 25-75.

De volle lijnen bakenen het domein met een afwijking van 33% voor de wet van WL | Delft Hydraulics af, de streeplijnen voor de regressie formule 18.



Figuur 77: Berekeningen verbeterde Hazen



Figuur 78: Berekeningen WL | Delft Hydraulics

Deze grond heeft een  $U_c$  van 2,10 en het gebruik van de doorlaatbaarheidswet van WL|Delft Hydraulics levert betere waarden op dan het gebruik van de verbeterde wet van Hazen. Toch blijven we hier steeds de walsnelheid onderschatten. De berekening van de walsnelheid met de formule van WL|Delft Hydraulics levert ook betere waarden dan met de regressie formule 18.

## 7.7. Besluiten in verband met de empirische formules

### 7.7.1. Uniformiteitscoëfficiënt lager dan 1,8

Voor de zanden met een uniformiteitscoëfficiënt  $U_c$  lager dan 1,8 kunnen we algemeen stellen dat de beste resultaten bekomen worden door toepassing van:

$$k_0 = 150 \cdot \left( \frac{n_0}{0,45} \right)^6 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T) \cdot d_{10}^2$$

Voor de berekening van de doorlaatbaarheid  
(verbeterde wet van Hazen)

$$\ln v_w = \frac{\ln k_0 + 3,34}{0,084 \cdot \ln k_0 + 1,09}$$

Voor de berekening van de walsnelheid  
(Regressie formule 18)

Voor zanden met een grote doorlaatbaarheid is het zelfs de enigste methode die aanvaardbare resultaten oplevert. De gemiddelde afwijkingen ten opzichte van de metingen zijn de volgende:

Zand	Afwijking
80 $\mu$ m	17,1%
140 $\mu$ m	21,1%
210 $\mu$ m	24,0%
450 $\mu$ m	20,7%
650 $\mu$ m	27,9%

Tabel 39: Gemiddelde afwijkingen.

### 7.7.2. Uniformiteitscoëfficiënt hoger dan 1,8

Voor zanden met een uniformiteitscoëfficiënt  $U_c$  hoger dan 1,8 levert de vorige methode een onderschatting van de walsnelheid op. Het gebruik van een doorlaatbaarheidswet, bepaald door WL|Delft Hydraulics, levert hier betere resultaten. Voor zanden met een lage doorlaatbaarheid – de gemengde zanden, doorlaatbaarheid van de orde van 0,01mm/s – werd de beste oplossing terug gevonden met de volgende combinatie:

$$\log k_0 = 2,38 \cdot \log \frac{d_{50}}{10,5} + 6 \cdot n_0$$

Voor de berekening van de doorlaatbaarheid  
(WL|Delft Hydraulics)

$$v_w = 30 \cdot k_0$$

Voor de berekening van de walsnelheid  
(WL|Delft Hydraulics)

Voor zanden met een hoge doorlaatbaarheid – het 300 $\mu$ m zand, doorlaatbaarheid van de orde van 0,1mm/s – wordt de beste oplossing gevonden door gebruik te maken van de regressie formule 18.

We gebruiken dus de formules:

$$\log k_0 = 2,38 \cdot \log \frac{d_{50}}{10,5} + 6 \cdot n_0$$

Voor de berekening van de doorlaatbaarheid  
(WL|Delft Hydraulics)

$$\ln v_w = \frac{\ln k_0 + 3,34}{0,084 \cdot \ln k_0 + 1,09}$$

Voor de berekening van de walsnelheid  
(Regressie formule 18)

De gevonden afwijkingen ten opzichte van de metingen waren:

Zand	Afwijking
300 $\mu$ m	21,3%
75-25	26,1%
50-50	35,4%
25-75	37,9%

Tabel 40: Gemiddelde afwijkingen.

## 7.8. Correctiefactoren

### 7.8.1. Significante parameters

Er is een ganse reeks van parameters die elk hun invloed hebben op de walsnelheid. In het wiskundige model zagen we duidelijk de invloed van deze parameters. In de empirische formules is dit verband niet zo duidelijk.

De empirische formules schrijven een verband tussen de doorlaatbaarheid in ongeroerde toestand en de walsnelheid. De volgende parameters werden tot nog toe in het empirische model in rekening gebracht: pakking in ongeroerde toestand –  $n_0$  –, granulometrische eigenschappen –  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $U_c$  – en de temperatuur –  $T$ . Parameters als het specifiek gewicht van de korrel, de inwendige wrijvingshoek, de vorm van de korrels werden niet gebruikt. Het is echter duidelijk dat deze parameters een significante invloed op de walsnelheid zullen hebben.

De empirische formules werden opgesteld aan de hand van meetwaarden. De invloed van de verschillende parameters – naast de doorlaatbaarheid – zitten geïntegreerd in de numerieke coëfficiënten van de formules. Zolang de parameters van de grond waarvan we de walsnelheid wensen te berekenen gelijk zijn aan de parameters van de testgronden, zullen de formules een correcte waarde geven. Indien deze parameters echter verschillen dan zal de formule de invloed van deze parameters verkeerd terug geven.

Om de invloed van de verwaarloosde parameters in rekening te brengen zullen we partiële correctiefactoren invoeren die de specifiek invloed van één enkele parameter zal teruggeven.

### 7.8.2. Correctie voor de inwendige wrijvingshoek

De walsnelheid is de horizontale component van de verplaatsingssnelheid van het onstabiele onderwater talud. Indien de verplaatsingssnelheden van twee taluds gelijk zijn, maar de hoek  $\varphi$  van beide taluds verschillen, dan hebben we een andere walsnelheid. De empirische formules houden hier echter geen rekening mee.

Indien we veronderstellen dat de metingen, waarmee we de empirische formules opgesteld hebben, uitgevoerd waren op zandgronden dan moeten we een  $\varphi$  van ongeveer  $32^\circ$  hebben. Dit betekent dat de empirische formules correcte waarden voor de walsnelheid geven als de hoek  $\varphi$  gelijk is aan  $32^\circ$ , in de andere gevallen geeft de formule een afwijkende waarde. In het wiskundige model

wordt de invloed van de inwendige wrijvingshoek gegeven door de factor  $\frac{1}{\tan \varphi}$ . We kunnen de

walsnelheid dus vermenigvuldigen met de volgende correctiefactor om de invloed van de hoek  $\varphi$  in rekening te brengen:

$$\chi_\varphi = \frac{\tan 32^\circ}{\tan \varphi}$$



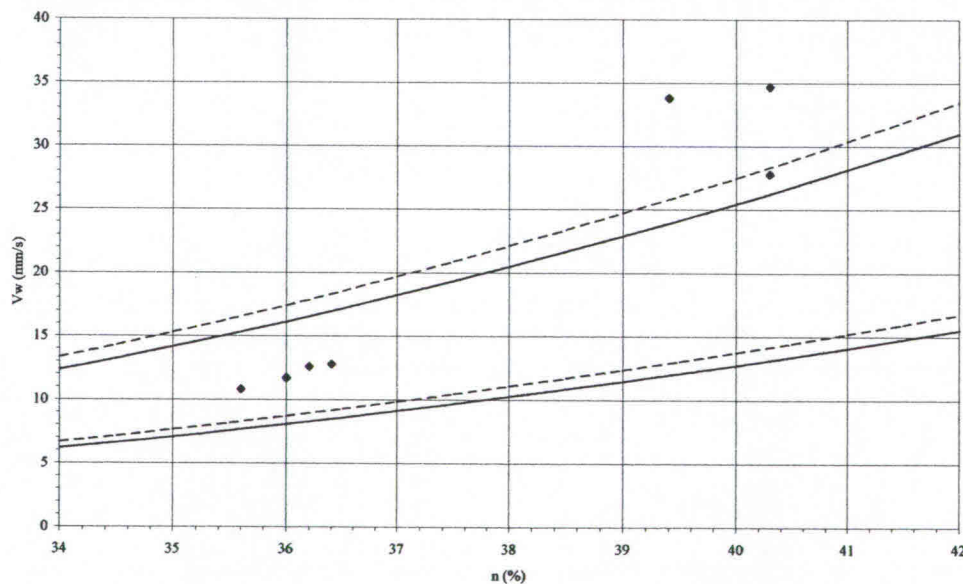
### 7.8.3. Toepassingen van de correctiefactor $\chi_\varphi$

#### 7.8.3.1. 450 $\mu\text{m}$ zand

Het rivierzand 450 $\mu\text{m}$  heeft een inwendige wrijvingshoek van 34° in plaats van 32°. Dit levert een correctiefactor  $\chi_\varphi$  van 0,926 op. We krijgen de resultaten van tabel 41. De gemiddelde afwijking daalt van 21% naar 19%. Hier wordt de overschatting van de walsnelheid bij losse pakking echter groter. Op de figuur 79 worden de resultaten met en zonder correctie grafisch vergeleken. De volle lijnen geven het afwijkingsinterval van 33% voor de berekening met correctie, de streeplijnen geven dit interval voor de berekeningen zonder correctie. Op de figuur 79 is duidelijk zichtbaar dat de toepassing van de correctie factor de nauwkeurigheid van de resultaten negatief beïnvloedt in het domein met lichte pakkingen.

n (%)	$k_0$ (mm/s)	Meetw.	$v_w$ zonder correctie		$v_w$ met correctie	
			Rekenw.	Verschil	Rekenw.	Verschil
35,6	0,4700	10,8	12,4	14,8%	11,5	6,4%
36,0	0,5026	11,7	13,1	11,6%	12,1	3,4%
36,2	0,5195	12,6	13,4	6,3%	12,4	-1,6%
36,4	0,5370	12,8	13,7	7,2%	12,7	-0,7%
39,4	0,8637	33,8	19,4	-42,7%	17,9	-46,9%
40,3	0,9890	27,8	21,3	-23,5%	19,7	-29,2%
40,3	0,9890	34,7	21,3	-38,7%	19,7	-43,2%
G. afwijk.				20,7%	G. afwijk.	18,8%

Tabel 41: Toepassing correctiefactor  $\chi_\varphi$  – 450 $\mu\text{m}$  zand.



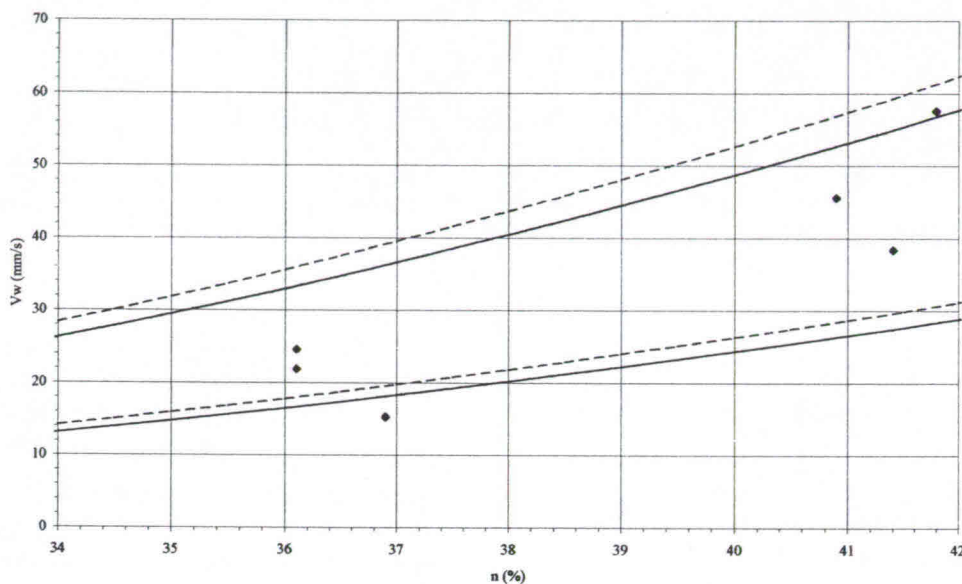
Figuur 79: Vergelijking met en zonder correctiefactor  $\chi_\varphi$  – 450 $\mu\text{m}$  zand.

#### 7.8.3.2. 650 $\mu\text{m}$ zand

Ook het zand 650 $\mu\text{m}$  heeft een hoek  $\varphi$  van 34°. We moeten dus dezelfde correctiefactor als bij het 450 $\mu\text{m}$  zand toepassen. In de tabel 42 merken duidelijk dat de toepassing van de correctiefactor  $\chi_\varphi$  een algemene verbetering van de resultaten geeft voor het 650 $\mu\text{m}$  zand. Het gevolg is dat de gemiddelde afwijking van 28% naar 23% daalt.

n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	Meetw.	v <sub>w</sub> zonder correctie		v <sub>w</sub> met correctie	
			Rekenw.	Vershil	Rekenw.	Vershil
36,1	1,4159	24,6	27,0	-9,7%	25,0	1,6%
36,1	1,4159	21,9	27,0	-23,2%	25,0	14,1%
36,9	1,6149	15,3	29,3	-91,8%	27,2	77,7%
40,9	2,9946	45,6	42,7	6,5%	39,5	-13,3%
41,4	3,2211	38,4	44,5	-15,9%	41,2	7,3%
41,8	3,4124	57,6	46,0	20,2%	42,6	-26,1%
G. afwijk.			27,9%		G. afwijk.	23,4%

Tabel 42: Toepassing correctiefactor  $\chi_\phi$  - 650 $\mu$ m zand.



Figuur 80: Vergelijking met en zonder correctiefactor  $\chi_\phi$  - 650 $\mu$ m zand.

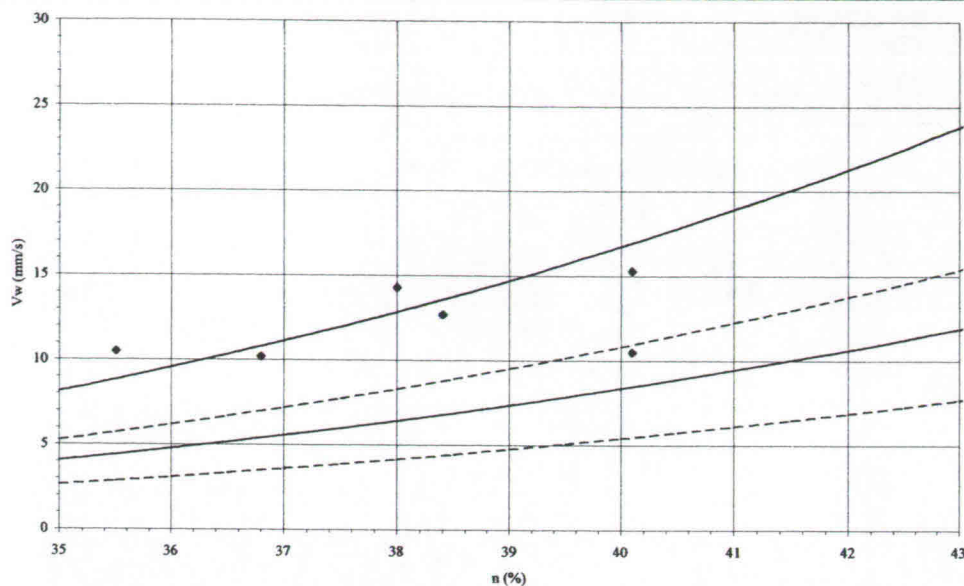
### 7.8.3.3. Glasparels 230 $\mu$ m

In paragraaf 7.6.1. hebben we vastgesteld dat de voorspelling van de walsnelheid in dit geval niet lukte. De inwendige wrijvingshoek van de glasparels bedraagt 22° en ligt dus aanzienlijk lager dan de inwendige wrijvinghoek van zand. Dit geval is eigenlijk de ultieme verificatie van de juistheid van de ingevoerde correctie factor  $\chi_\phi$ . Voor de glasparels wordt de correctie factor  $\chi_\phi$  1,546. We krijgen dus een aanzienlijke verhoging van de geschatte waarde van de walsnelheid.

n (%)	k <sub>0</sub> (mm/s)	Meetw.	v <sub>w</sub> zonder correctie		v <sub>w</sub> met correctie	
			Rekenw.	Vershil	Rekenw.	Vershil
35,5	0,1355	10,5	4,3	-59,2%	6,62	-36,9%
36,8	0,1682	10,2	5,2	-48,6%	8,10	-20,6%
38,0	0,2039	14,3	6,2	-56,4%	9,64	-32,6%
38,4	0,2171	12,7	6,6	-48,2%	10,18	-19,8%
40,1	0,2815	15,3	8,2	-46,2%	12,72	-16,9%
40,1	0,2815	10,5	8,2	-21,7%	12,72	21,1%
G. afwijk.			46,7%		G. afwijk.	24,7%

Tabel 43: Toepassing correctiefactor  $\chi_\phi$  - glasparels 230 $\mu$ m.

Grafisch geeft de correctieterm  $\chi_\phi$  het volgende:



Figuur 81: Vergelijking met en zonder correctiefactor  $\chi_\phi$  – glasparsels 230 $\mu$ .

Hier merken we duidelijk het nut van de correctiefactor. Bij de glasparsels is het onmogelijk de walsnelheid te voorspellen zonder de aanpassing voor de afwijking van de hoek  $\phi$  ten opzichte van  $32^\circ$ . Deze correctiefactor werkt reeds een groot deel van de initiële onderschatting weg.

#### 7.8.3.4. Besluiten omtrent de correctiefactor $\chi_\phi$

We zien dat de toepassing van de correctiefactor  $\chi_\phi$  een gunstig effect heeft op de resultaten. Zowel voor een hoek groter als kleiner dan  $32^\circ$  werden de resultaten beter. Bij de materialen, waar deze correctie noodzakelijk was, werden de volgende verbeteringen van de algemene afwijkingen gevonden:

Materiaal	Zonder corr.	Met corr.
450 $\mu$ m zand	20,7%	18,8%
650 $\mu$ m zand	27,9%	23,4%
230 $\mu$ m glasparsels	46,7%	24,7%

Tabel 44: Vergelijking van de gemiddelde afwijkingen met en zonder correctiefactor  $\chi_\phi$

#### 7.8.4. Correctie voor specifiek gewicht

Aangezien we veronderstellen dat de empirische formules opgesteld zijn aan de hand van metingen die uitgevoerd zijn op zandgronden, betekent dit dat de formule slechts geldig is voor gronden met een specifiek gewicht van  $26,6\text{kN/m}^3$ . In de formule die uit het wiskundig model resulteert zien we dat niet het specifiek gewicht maar het specifiek gewicht onder water een rol speelt. Als correctiefactor voor het specifiek gewicht –  $\chi_\gamma$  – stellen we voor:

$$\chi_\gamma = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{26,5 - \gamma_w} = \frac{\gamma_s - 10}{16,5}$$

Hierbij is  $\gamma_w$  het specifiek gewicht van het water en  $\gamma_s$  het specifiek gewicht van de korrels uitgedrukt in  $\text{kN/m}^3$ .

### 7.8.5. Toepassing van de correctiefactor $\chi_\gamma$

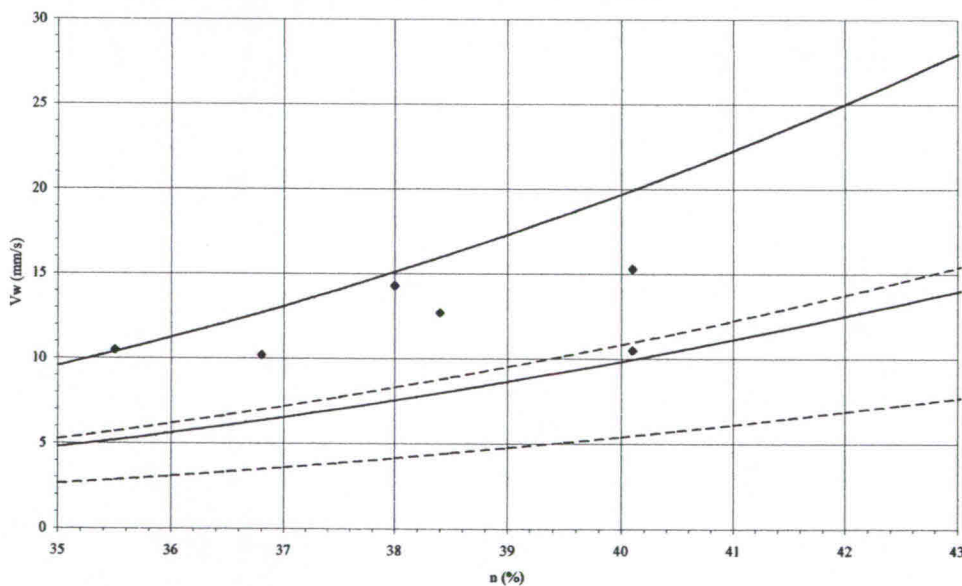
#### 7.8.5.1. Glasparels 230 $\mu\text{m}$

Voor de glasparels met een specifiek gewicht van  $29,4\text{kN/m}^3$  geeft dit een correctiefactor  $\chi_\gamma$  van 1,109. Indien we dit toepassen op de resultaten die reeds gecorrigeerd zijn met een correctiefactor  $\chi_\phi$  vinden we:

n (%)	$k_0$ (mm/s)	Meetw.	$v_w$ zonder correctie $\chi_\gamma$		$v_w$ met correctie $\chi_\gamma$		
			Rekenw.	Vershil	Rekenw.	Vershil	
35,5	0,1355	10,5	6,6	-36,9%	7,8	-25,8%	
36,8	0,1682	10,2	8,1	-20,6%	9,5	-6,6%	
38,0	0,2039	14,3	9,6	-32,6%	11,3	-20,8%	
38,4	0,2171	12,7	10,2	-19,8%	12,0	-5,7%	
40,1	0,2815	15,3	12,7	-16,9%	15,0	-2,2%	
40,1	0,2815	10,5	12,7	21,1%	15,0	42,4%	
G. afwijk.			24,7%		G. afwijk.		17,3%

Tabel 45: Toepassing correctiefactor  $\chi_\gamma$  – glasparels.

We merken terug een aanzienlijke verbetering van de resultaten. Op de figuur 82 worden de resultaten bekomen met de correctiefactoren  $\chi_\phi$  en  $\chi_\gamma$  vergeleken met de resultaten zonder correctiefactoren. De volle lijnen geven het afwijkingsinterval van 33% voor de berekening met correctie, de streeplijnen geven dit interval voor de berekening zonder correctie.



Figuur 82: Vergelijking met en zonder correctiefactor  $\chi_\phi$  en  $\chi_\gamma$  – glasparels 230  $\mu\text{m}$ .

We zien dat alleen de toepassing van beide correctiefactor  $\chi_\phi$  en  $\chi_\gamma$  goede resultaten geeft.

#### 7.8.5.2. Besluiten omtrent de correctiefactor $\chi_\gamma$

Hoewel we slechts één materiaal hebben om deze correctie factor te evalueren is het, wegens de te opvallende verbetering, duidelijk dat deze correctiefactor nuttig is. Voor de gemiddelde afwijkingen vonden we:

Materiaal	Zonder corr.	Met corr.
230 $\mu$ m glasparsels	24,7%	17,3%

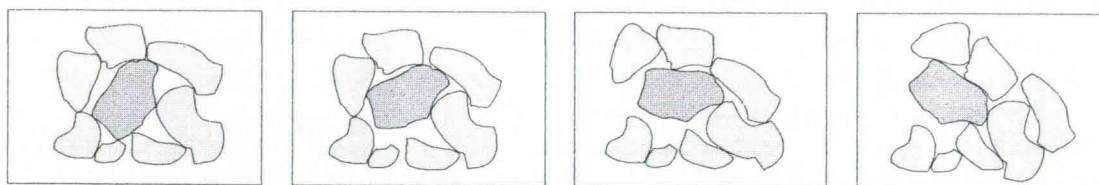
Tabel 46: Vergelijking van de gemiddelde afwijkingen met en zonder correctiefactor  $\chi_r$

### 7.8.6. Correctie voor dilatantie

#### 7.8.6.1. Fysische verantwoording

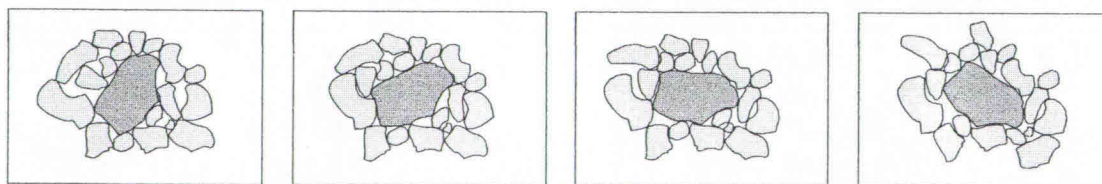
Dilatantie is het uitzetten van de grond tijdens afschuiving. Ze is het gevolg van de reorganisatie van de korrels in de grond tijdens de afschuivingen. De dilatantie is duidelijk functie van de pakking van de korrels. Bij een dichte pakking zullen de bewegende korrels grotere openingen creëren dan bij een losse pakking.

Maar de dilatantie is ook functie van de granulometrische verdeling van de grond. Bij een uniforme grond hebben de korrels ongeveer allemaal dezelfde grootte. Indien de korrels zich verplaatsen door een afschuiving van de grond dan zullen er grotere poriën gevormd worden. Omdat alle korrels ongeveer van dezelfde grootte zijn, zullen deze nieuwe poriën relatief moeilijk opgevuld worden.



Figuur 83: Afschuivingsmechanisme bij een uniforme grond.

Bij een niet uniforme grond zijn er een ganse reeks van korrelgroottes aanwezig. De nieuwe poriën die gevormd worden kunnen hier gemakkelijk worden ingenomen door de kleinere korrels. Bij niet uniforme gronden kunnen de korrels gemakkelijker bewegen zonder nieuwe grote poriën te vormen dan bij een uniforme grond. De grove korrels bewegen doorheen de kleine korrels die steeds de poriën gemakkelijk kunnen opvullen. Het verschil tussen het bewegen van de korrels in uniforme en niet uniforme gronden wordt schematisch voorgesteld op de figuren 83 en 84.



Figuur 84: Afschuivingsmechanisme bij een niet uniforme grond.

Aangezien bij niet uniforme zanden de kleine korrels de poriën snel kunnen opvullen zal de toename van het poriënvolume kleiner zijn – er zal een kleinere dilatantie zijn. En een kleinere dilatantie zal dus tot een hogere walsnelheid leiden omdat er kleinere onderdrukken in de poriën zijn en omdat er minder water moet toestromen om deze onderdrukken te neutraliseren.

Aangezien de empirische formules goede resultaten geven voor de uniforme zanden – 80 $\mu$ m, 140 $\mu$ m, 210 $\mu$ m, 450 $\mu$ m, 650 $\mu$ m – kunnen we veronderstellen dat ze opgesteld zijn aan de hand van proeven op uniforme zanden. Dit betekent dat ze een onderschatting van de walsnelheid zouden

moeten geven voor niet uniforme zanden, aangezien we de dilatantie in de geval zouden overschatten.

### 7.8.6.2. Proefondervindelijke vaststellingen

In de paragraaf 7.6. merken we inderdaad een lichte onderschatting van de walsnelheid voor het 75-25 zand. Maar voor de zanden 50-50 en 25-75 krijgen we systematisch een duidelijke onderschatting van de walsnelheid. Voor het metselzand – 300 $\mu$ m – zien we geen onderschatting van de walsnelheid. In paragraaf 7.7. zien we dat de niet uniforme zanden in twee groepen worden onderverdeeld, deze met een kleine doorlaatbaarheid en deze met een grote doorlaatbaarheid. De eerste groep – kleine doorlaatbaarheid – wordt gevormd door de drie gemengde zanden. De tweede groep – grote doorlaatbaarheid – wordt gevormd door het metselzand. De overschatting van de dilatantie – of onderschatting van de walsnelheid – geldt dus alleen voor de zanden met een lage doorlaatbaarheid.

### 7.8.6.3. Correctiefactor

Nu moeten we dus een parameter zoeken aan de hand waarvan we deze overschatting van de dilatantie kunnen detecteren. Ten eerste moet deze parameter een weerspiegeling zijn van de maat van spreiding van de korrels – omdat dit aan de basis van het afwijkend gedrag ligt. Ten tweede moet de waarde van deze parameter voor de 50-50 en 25-75 zanden sterker afwijken van de waarde van de uniforme zanden dan de waarde van deze parameter voor het 75-25 zand en dit omdat de onderschatting van de walsnelheid voor deze eerste twee zanden duidelijk groter is dan voor het laatst vernoemde zand. Om deze parameter te zoeken zullen we verschillende verhoudingen tussen korreldiameters vergelijken en kijken welke parameter er op deze correcte manier afwijkt. Tabel 47 geeft een overzicht van deze potentiële parameters en hun waarden voor de verschillende zanden. De afwijkende waarden van de parameters werden grijs gekleurd.

	80 $\mu$ m	140 $\mu$ m	210 $\mu$ m	230 $\mu$ m	450 $\mu$ m	650 $\mu$ m	75-25	50-50	25-75
d40/d10	1,43	1,35	1,32	1,22	1,32	1,17	1,99	1,60	1,41
d50/d10	1,53	1,44	1,40	1,28	1,40	1,20	2,17	2,05	1,69
d50/d40	1,07	1,06	1,06	1,05	1,06	1,03	1,09	1,28	1,19
d60/d10	1,63	1,52	1,53	1,34	1,48	1,24	2,39	2,98	2,10
d60/d40	1,14	1,13	1,16	1,10	1,12	1,06	1,20	1,86	1,49
d60/d50	1,06	1,06	1,10	1,04	1,06	1,03	1,10	1,45	1,24
d90/d10	2,04	1,83	2,28	1,63	1,77	1,46	3,38	4,91	4,71
d90/d40	1,42	1,35	1,73	1,33	1,34	1,25	1,70	3,06	3,33
d90/d50	1,33	1,27	1,63	1,27	1,26	1,21	1,55	2,39	2,79
d90/d60	1,25	1,20	1,49	1,22	1,19	1,18	1,41	1,65	2,24

Tabel 47: Vergelijking van de verschillende potentiële parameters.

Alleen de waarden van de verhoudingen  $d_{60}/d_{10}$  en  $d_{90}/d_{10}$  wijken voor de drie gemengde zanden duidelijk af van de waarden voor de uniforme zanden. De verhouding  $d_{60}/d_{10}$  is geen geschikte verhouding omdat deze voor het 75-25 zand duidelijk meer afwijkt dan voor het 25-75 zand. De verhouding  $d_{90}/d_{10}$  lijkt de meest geschikte parameter te zijn omdat ze voor het 75-25 zand minder afwijkt dan voor de zanden 50-50 en 25-75.

Het is echter onmogelijk de verhouding  $d_{90}/d_{10}$  op een theoretische manier aan de onderschatting van de walsnelheid te koppelen. Het gemiddelde van deze verhouding voor de uniforme zanden is ongeveer 1,9. Omdat er alleen een correctie nodig is voor niet uniforme zanden stellen we de

volgende uitdrukking van de correctiefactor voor – bij uniforme zanden geeft deze uitdrukking een waarde van ongeveer 1:

$$\chi_d = 1 + \frac{\frac{d_{90}}{d_{10}} - 1,9}{1,9^2}$$

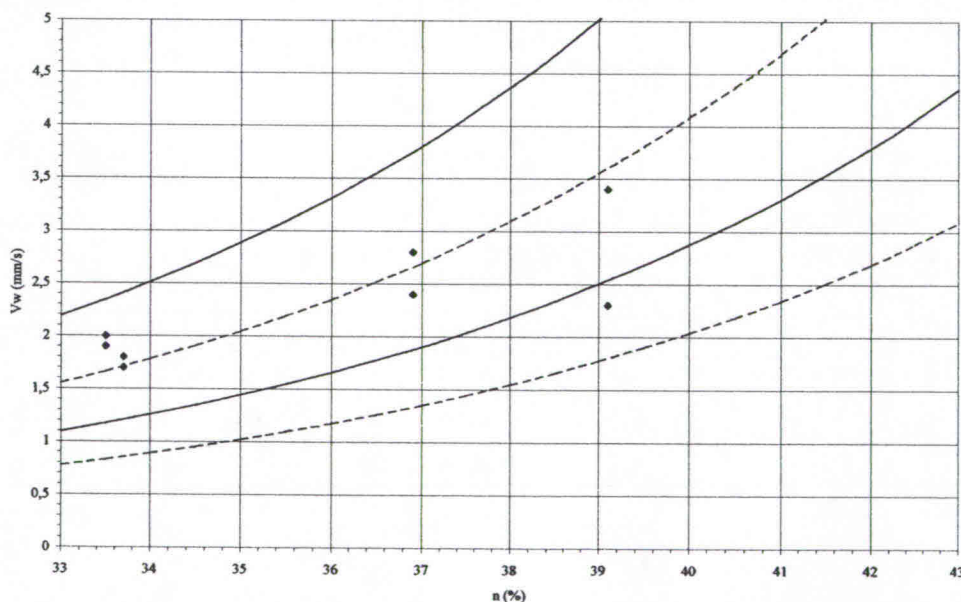
**7.8.7. Toepassing van de correctiefactor  $\chi_d$**

**7.8.7.1. Gemengd zand 75-25**

De waarde van de verhouding  $d_{90}/d_{10}$  is hier gelijk aan 3,38, dit levert ons een correctiefactor  $\chi_d$  van 1,41 op. Toepassing van deze correctiefactor op de berekende waarde geeft:

n (%)	$k_0$ (mm/s)	Meetw.	$v_w$ zonder correctie		$v_w$ met correctie	
			Rekenw.	Verschil	Rekenw.	Verschil
33,5	0,0416	1,9	1,2	-34,4%	1,8	-7,5%
33,5	0,0416	2,0	1,2	-37,7%	1,8	-12,1%
33,7	0,0427	1,7	1,3	-24,6%	1,8	6,3%
33,7	0,0427	1,8	1,3	-28,8%	1,8	0,4%
36,9	0,0665	2,8	2,0	-28,8%	2,8	0,4%
36,9	0,0665	2,4	2,0	-16,9%	2,8	17,2%
39,1	0,0901	3,4	2,7	-20,5%	3,8	12,1%
39,1	0,0901	2,3	2,7	17,5%	3,8	65,7%
G. afwijk.				26,1%	G. afwijk.	15,2%

Tabel 48: Toepassing correctiefactor  $\chi_d$  – gemengd zand 75-25.



Figuur 85: Vergelijking met en zonder correctiefactor  $\chi_d$  – gemengd zand 75-25.

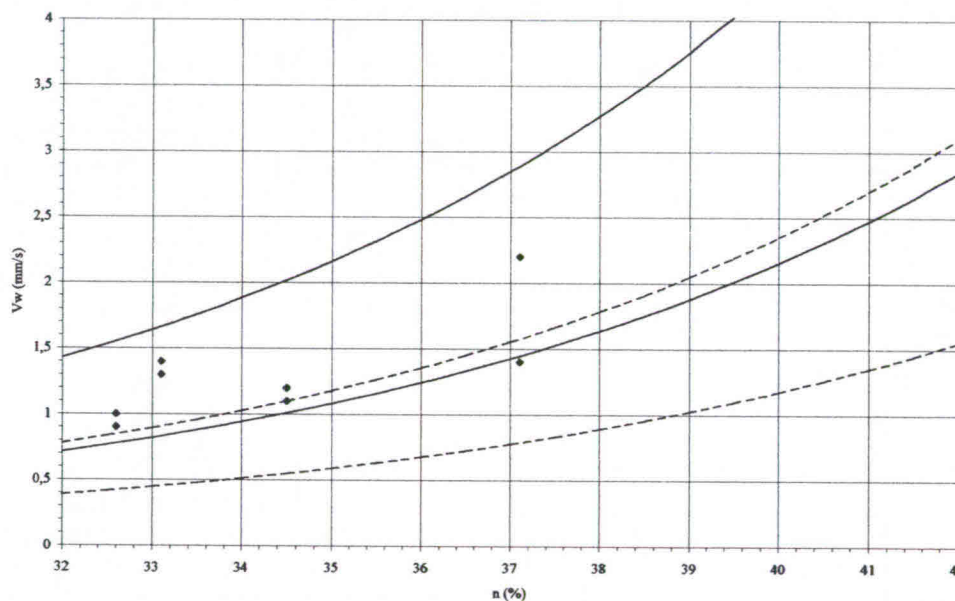
Op de figuur 85 zien we duidelijk de verbetering van de resultaten door de toepassing van de correctiefactor  $\chi_d$ .

**7.8.7.2. Gemengd zand 50-50**

De waarde van de verhouding  $d_{90}/d_{10}$  is hier gelijk aan 4,91, dit levert ons een correctiefactor  $\chi_d$  van 1,83 op. Toepassing van deze correctiefactor op de berekende waarden geeft:

n (%)	$k_0$ (mm/s)	Meetw.	$v_w$ zonder correctie		$v_w$ met correctie		
			Rekenw.	Verschil	Rekenw.	Verschil	
32,6	0,0212	0,9	0,6	-29,5%	1,2	29,3%	
32,6	0,0212	1,0	0,6	-36,5%	1,2	16,4%	
33,1	0,0227	1,3	0,7	-47,7%	1,3	-4,1%	
33,1	0,0227	1,4	0,7	-51,4%	1,3	-10,9%	
34,5	0,0275	1,2	0,8	-31,2%	1,5	26,1%	
34,5	0,0275	1,1	0,8	-25,0%	1,5	37,5%	
37,1	0,0394	2,2	1,2	-46,3%	2,2	-1,5%	
37,1	0,0394	1,4	1,2	-15,6%	2,2	54,8%	
G. afwijk.			35,4%		G. afwijk.		22,6%

Tabel 49: Toepassing correctiefactor  $\chi_d$  – gemengd zand 50-50.



Figuur 86: Vergelijking met en zonder correctiefactor  $\chi_d$  – gemengd zand 50-50.

Bij toepassing van de empirische formule zonder correctiefactor  $\chi_d$  krijgen we een systematische onderschatting van de walsnelheid. Na toepassing van de correctiefactor liggen de meetpunten – op één na – allemaal binnen het spreidingsdomein van 33%.

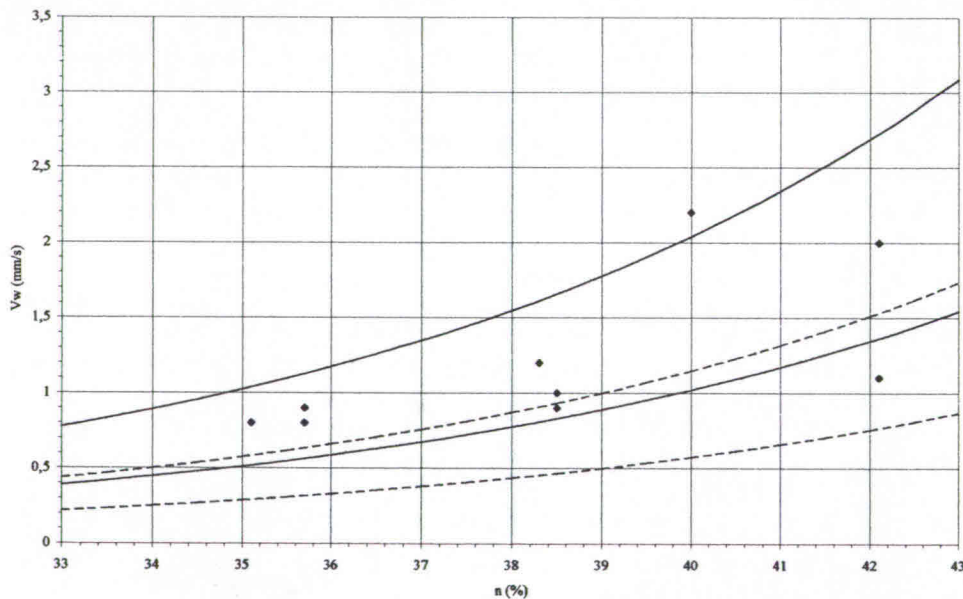


**7.8.7.3. Gemengd zand 25-75**

De waarde van de verhouding  $d_{90}/d_{10}$  is hier gelijk aan 4,71, dit levert ons een correctiefactor  $\chi_d$  van 1,78 op. Toepassing van deze correctiefactor op de berekende waarden geeft:

n (%)	$K_0$ (mm/s)	Meetw.	$v_w$ zonder correctie		$v_w$ met correctie	
			Rekenw.	Vershil	Rekenw.	Vershil
35,1	0,0146	0,8	0,4	-45,4%	0,8	-2,8%
35,1	0,0146	0,8	0,4	-45,4%	0,8	-2,8%
35,7	0,0158	0,8	0,5	-40,6%	0,8	5,6%
35,7	0,0158	0,9	0,5	-47,2%	0,8	-6,2%
38,3	0,0227	1,2	0,7	-43,3%	1,2	0,8%
38,3	0,0227	1,2	0,7	-43,3%	1,2	0,8%
38,5	0,0233	1,0	0,7	-30,1%	1,2	24,3%
38,5	0,0233	0,9	0,7	-22,3%	1,2	38,1%
40,0	0,0287	2,2	0,9	-60,9%	1,5	-30,5%
42,1	0,0383	2,0	1,1	-42,5%	2,0	2,2%
42,1	0,0383	1,1	1,1	4,5%	2,0	85,9%
			G. afwijk.	38,7%	G. afwijk.	18,2%

Tabel 50: Toepassing correctiefactor  $\chi_d$  – gemengd zand 25-75.



Figuur 87: Vergelijking met en zonder correctiefactor  $\chi_d$  – gemengd zand 25-75.

Ook bij dit gemengde zand merken we een aanzienlijke verbetering van de bekomen resultaten. De gemiddelde afwijking daalt van 39% naar 18%.

**7.8.7.4. Besluiten omtrent de correctiefactor  $\chi_d$**

Bij deze drie zandsorten merken we het verdwijnen van de systematische onderschatting van walsnelheid. Het gebruik van de voorgestelde uitdrukking van de correctiefactor  $\chi_d$  levert goede resultaten. Deze factor mag echter alleen gebruikt worden op niet uniforme zanden met een lage doorlaatbaarheid. Uiteindelijk kregen we de volgende verbeteringen van de gemiddelde afwijkingen.

Zand	Zonder corr.	Met corr.
75-25	26,1%	15,2%
50-50	35,4%	22,6%
25-75	38,7%	18,2%

Tabel 51: Vergelijking van de gemiddelde afwijkingen met en zonder correctiefactor  $\chi_d$

### 7.8.8. Algemene besluiten in verband met de correctiefactoren

De correctiefactoren werden ingevoerd om de afwijking van de gronden, die men wenst te onderzoeken ten opzichte van de gronden die gebruikt werden om de empirische formules op te stellen, in rekening te brengen. Sommige belangrijke parameters worden in de empirische formules verwaarloosd en om dit op te vangen wordt de invloed van elk van deze parameters afzonderlijk weergegeven door een multiplicatieve partiële correctiefactor.

In alle gevallen waar we de correctiefactoren toegepast hebben verkregen we een verbetering van de resultaten. Bij sommige gevallen is het toepassen van deze correctiefactoren zelfs onontbeerlijk om aanvaardbare resultaten te bekomen.

### 7.9. Algemene besluiten

We kunnen nu ook de nauwkeurigheid van het wiskundige model vergelijken met deze van de empirische formules. Voor de waarden van het empirische model gebruiken we de waarden die bekomen worden als men de regels van paragrafen 7.7. en 7.8. toepast. De gevonden gemiddelde afwijkingen waren:

	Wiskundig	Empirisch
80 $\mu\text{m}$	33,7%	17,1%
140 $\mu\text{m}$	25,9%	21,1%
210 $\mu\text{m}$	85,5%	24,0%
230 $\mu\text{m}$	34,0%	17,3%
300 $\mu\text{m}$	23,5%	21,3%
450 $\mu\text{m}$	110,3%	18,8%
650 $\mu\text{m}$	996,1%	23,4%
75-25	23,9%	15,2%
50-50	38,4%	22,6%
25-75	33,4%	18,2%

Tabel 52: Vergelijking wiskundig en empirisch model.

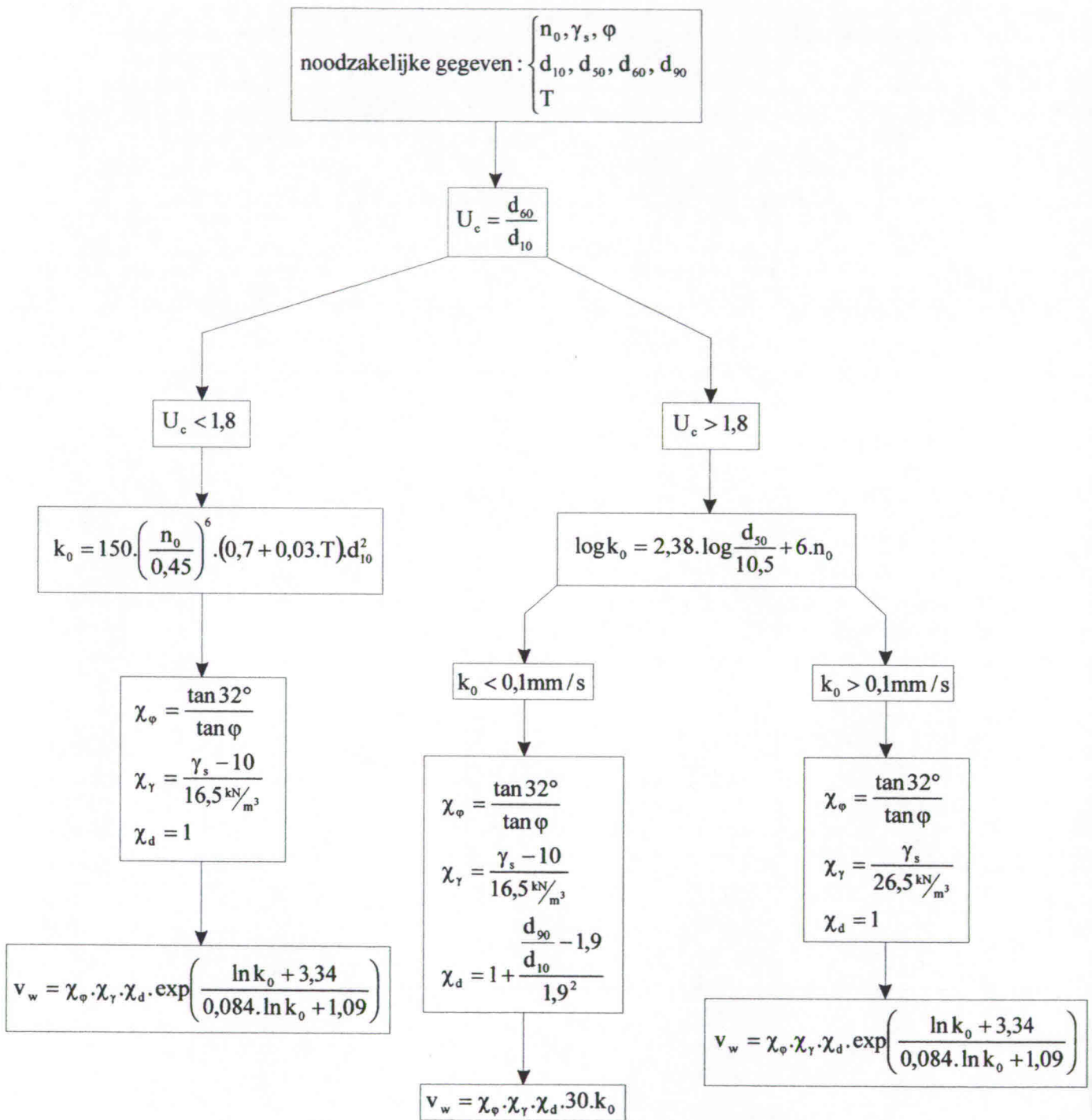
We merken dat in alle gevallen de toepassing van de empirische formules betere resultaten geven. Voor de uniforme zanden met grote doorlaatbaarheid – 450 $\mu\text{m}$  en 650 $\mu\text{m}$  – is de empirische methode de enige die bruikbare resultaten geeft. Het wiskundige model kent ook problemen als het poriëngehalte in ongeroerde toestand dit van fluïdisatie benadert. Dit probleem was duidelijk merkbaar bij het 210 $\mu\text{m}$  zand – paragraaf 5.3.3. Het empirische model vertoont geen problemen in deze omstandigheden.

Voor de niet uniforme zanden en de glaspereels geeft het wiskundige model betere waarden dan de empirische formules. Maar na toepassing van de noodzakelijke correctiefactoren blijkt de empirische methode ook hier betere resultaten te geven.

Naast het voordeel van zijn eenvoudigheid is de empirische methode tevens de meest nauwkeurige. Het is dus duidelijk dat de empirische methode te verkiezen is boven de wiskundige. Paragraaf 7.10. geeft het voorgestelde berekeningsschema voor de bepaling van de walsnelheid.

**7.10. Berekeningsschema**

De conclusies van paragraaf 7.7. en 7.8. leveren het volgende berekeningsschema voor de walsnelheid op:



Figuur 88: Het berekeningsschema voor de bepaling van de walsnelheid.

## Hoofdstuk 8: Berekenen van putproducties

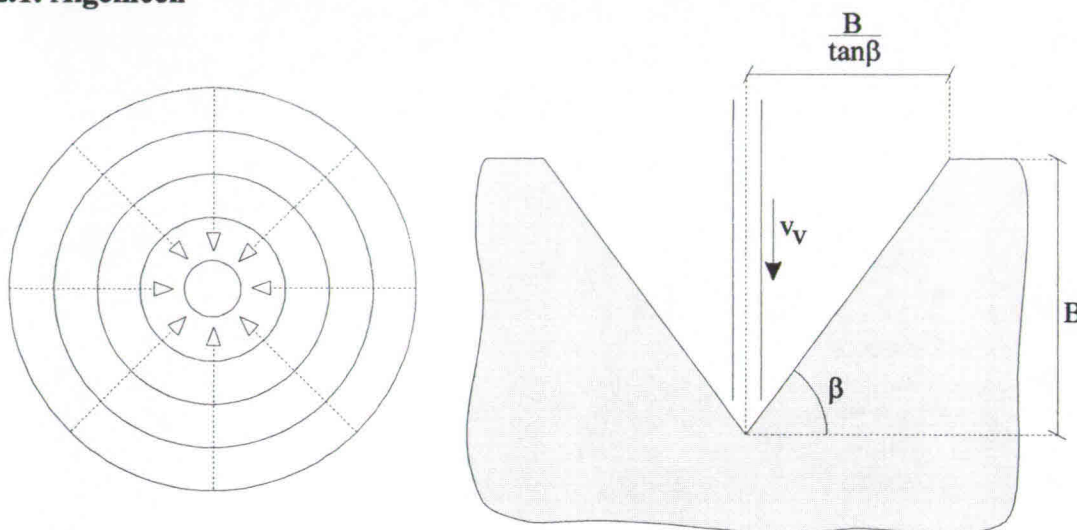
### 8.1. Inleiding

Het uiteindelijke doel van de berekening van de walsnelheid is het schatten van de zandproductie van een zuigput. Zonder kennis van de walsnelheid is dit onmogelijk omdat de walsnelheid de maatgevende factor is bij het loskomen van het zand.

Algemeen kunnen we drie types van zuigputten onderscheiden. Bij het eerste type gaan we de zuigbuis verticaal steeds dieper de grond in duwen. Bij het tweede type gaan we een buis, die reeds in de grond zit, horizontaal gaan verplaatsen. Bij het laatste type wordt een buis onder een bepaalde hoek de grond ingebracht. In dit hoofdstuk worden voor deze drie types de formules opgesteld voor het bepalen van de zandproductie.

### 8.2. Zuigput met verticale verplaatsing van de buis

#### 8.2.1. Algemeen



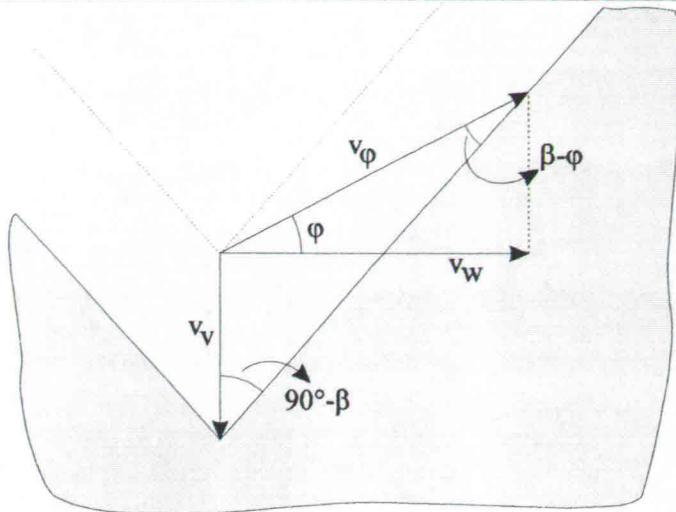
Figuur 89: Zuigput bij een verticale beweging van de buis.

In dit geval wordt de zuigbuis met een constante snelheid  $-v_v$  verticaal de grond ingebracht. Onderaan de put worden er continu walletjes gecreëerd, die zich radiaal naar buiten en naar boven verplaatsen. Zo ontstaat er een conische put in de grond, de helling van de zijwanden heeft een hoek  $\beta$ . De linker afbeelding van figuur 89 geeft een bovenzicht van de zuigput, waarop de verschillende hoogtelijnen zijn aangeduid. De pijlen stellen de zandstromen voor. De rechter afbeelding geeft een doorsnede van de zuigput.

#### 8.2.2. Zandproductie

Het is duidelijk dat de productie van deze zuigput niet constant zal zijn. Op het ganse zijdelinkse oppervlak van de zuigput zijn er walletjes die het zand doen afregenen. Hoe dieper de put wordt hoe groter het actieve oppervlak, en dus hoe groter de zandproductie wordt. De formule voor de zandproductie die zal opgesteld worden, geeft de ogenblikkelijke zandproductie voor een bepaalde diepte  $B$  van de zuigput.

Figuur 90 is een detailbeeld van de bodem van de put, waarop de verschillende snelheidsvectoren die een rol spelen, zijn aangeduid. De twee stippellijnen geven de omtrek van de zuigput op een vorig tijdstip.



Figuur 90: Snelheidsvectoren.

Uit figuur 90 halen we de volgende betrekkingen tussen de verschillende snelheidsvectoren:

$$v_w = \cos \varphi \cdot v_\varphi$$

$$\frac{v_\varphi}{\sin(\beta - 90^\circ)} = \frac{v_v}{\sin(\beta - \varphi)}$$

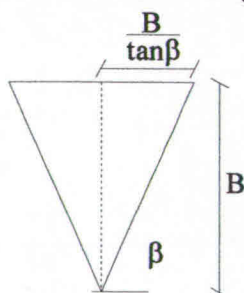
Hieruit halen we een verband tussen  $v_w$  en  $v_v$ :

$$\frac{v_w}{\cos \varphi \cdot \cos \beta} = \frac{v_v}{\sin \beta \cdot \cos \varphi - \cos \beta \cdot \sin \varphi}$$

$$v_w = \frac{v_v}{\tan \beta - \tan \varphi}$$

$$v_v = v_w \cdot (\tan \beta - \tan \varphi)$$

Het volume van de gevormde kegel kunnen we als volgt berekenen:



Figuur 91: Afmetingen van de zuigput.

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left( \frac{B}{\tan \beta} \right)^2 \cdot B \\ &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot B^3}{\tan^2 \beta} \end{aligned}$$

Nu kunnen we de putproductie, op het ogenblik dat de put een diepte B heeft, bepalen:

$$P_B = \frac{dV}{dt}$$

$$= \frac{dV}{dB} \cdot \frac{dB}{dt}$$

We weten dat:

$$\frac{dV}{dB} = \frac{\pi \cdot B^2}{\tan^2 \beta}$$

$$\frac{dB}{dt} = v_v$$

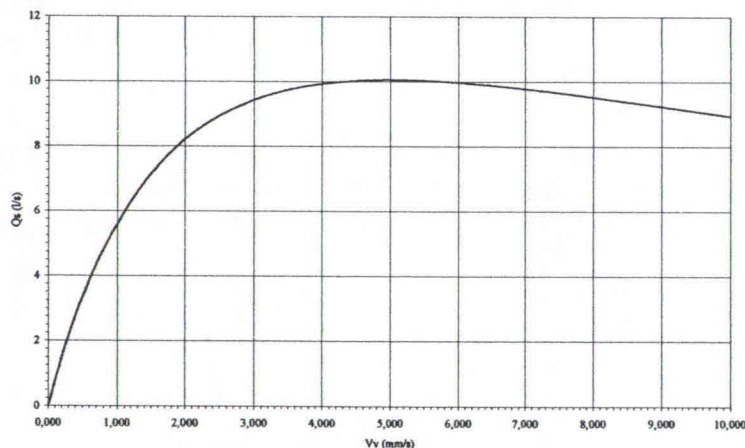
$$= v_w \cdot (\tan \beta - \tan \varphi)$$

Uiteindelijk vinden we de volgende uitdrukking voor de putproductie:

$$P_B = \frac{\pi \cdot v_w \cdot (\tan \beta - \tan \varphi)}{\tan^2 \beta} \cdot B^2$$

### 8.2.3. Maximale productie

Aangezien de zuignelheid geen enkele rol op de productie heeft, is de enige relevante parameter, die we moet bepalen, de verticale translatiesnelheid van de buis –  $v_v$ . Deze snelheid zal, samen met de geotechnische kenmerken van de grond, de hoek  $\beta$  bepalen. Indien we voor een grond –  $\varphi = 32^\circ$  en  $v_w = 8\text{mm/s}$  – de putproductie uitzetten in functie van de verticale translatiesnelheid van de buis  $v_v$  bekomen we de figuur 92. De zandproductie –  $Q_s$  – is hier de productie van een put met een diepte B van 1m.



Figuur 92: Putproductie in functie van  $v_v$ .

We merken dus dat er een optimale waarde voor  $v_v$  bestaat. Deze optimale waarde van  $v_v$  zal resulteren in een optimale waarde van de hoek  $\beta$ . Deze optimale waarde kunnen we als volgt uit de formule van de putproductie halen.

Stel:  $\tan \beta = \vartheta$

$$\frac{dP_B}{d\vartheta} = 0$$

$$\frac{d\left(\frac{\pi \cdot v_w \cdot B^2 \cdot (\vartheta - \tan \varphi)}{\vartheta^2}\right)}{d\vartheta} = 0$$

$$\frac{\pi \cdot v_w \cdot B^2 \cdot (1-0) \cdot \vartheta^2 - \pi \cdot v_w \cdot B^2 \cdot (\vartheta - \tan \varphi) \cdot 2 \cdot \vartheta}{\vartheta^4} = 0$$

$$\vartheta^2 - (\vartheta - \tan \varphi) \cdot 2 \cdot \vartheta = 0$$

$$\vartheta - 2 \cdot \vartheta + 2 \cdot \tan \varphi = 0$$

$$\vartheta = 2 \cdot \tan \varphi$$

De indringingssnelheid van de buis waarvoor  $\tan \beta = 2 \cdot \tan \varphi$  zal ons bij een bepaalde diepte de hoogste zandproductie leveren.

We moeten echter wel opmerken dat deze snelheid ons niet de hoogste zandproductie in de tijd geeft. Hoe sneller we de grond indringen, hoe sneller we een groot actief oppervlak krijgen, en hoe sneller we een grotere productie krijgen. Maar op een bepaalde diepte zullen we dan wel een lagere productie krijgen dan met de optimale indringingssnelheid. De hogere productie na verloop van tijd is te verklaren doordat we veel sneller grotere dieptes bereiken dan met de optimale snelheid.

#### 8.2.4. Praktische berekening

Om te werken met een optimale productie volgens de diepte, kan men als volgt te werk gaan. Uit de geotechnische gegevens bepalen we de walsnelheid  $v_w$  – zie hoofdstuk 7. We bepalen  $\beta$  voor een optimale productie:

$$\tan \beta = 2 \cdot \tan \varphi$$

Om deze hoek te bereiken is een verticale verplaatsingssnelheid van de buis  $v_v$  nodig:

$$v_v = v_w \cdot (\tan \beta - \tan \varphi)$$

Dit levert ons een zand productie in functie van de hoogte:

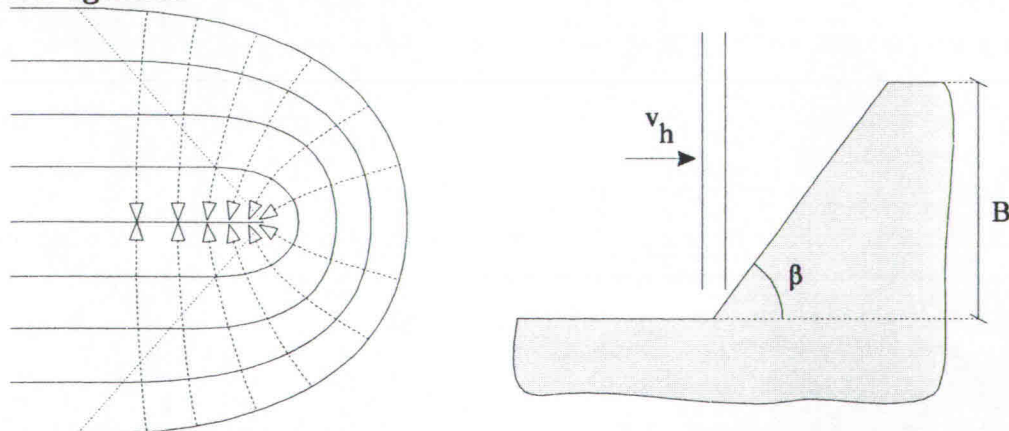
$$P_B = \frac{\pi \cdot v_w \cdot (\tan \beta - \tan \varphi)}{\tan^2 \beta} \cdot B^2$$

of in functie van de tijd:

$$P_t = \frac{\pi \cdot v_w \cdot (\tan \beta - \tan \varphi)}{\tan^2 \beta} \cdot (v_v \cdot t)^2$$

### 8.3. Zuigput met horizontale verplaatsing van de buis

#### 8.3.1. Algemeen

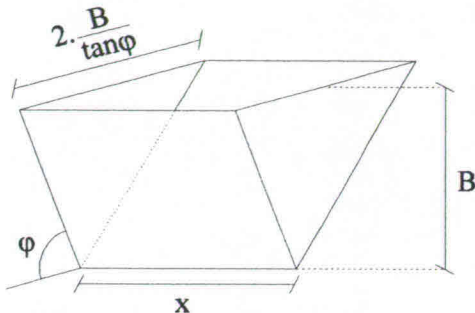


Figuur 93: Zuigput bij een horizontale verplaatsing van de buis.

Indien we de buis enkel horizontaal gaan verplaatsen, nadat ze reeds over een zekere diepte in de grond was gebracht, gaan we een geul in de grond zuigen. Een boven aanzicht en een doorsnede van de gevormde zuigput worden voorgesteld op de figuur 93.

### 8.3.2. Zandproductie

In dit geval gaan we een geul in de bodem trekken, deze wordt voorgesteld op de figuur 94. Aangezien we op de zijkant geen nieuwe wallen gaan creëren zal deze uiteindelijk een helling met hoek  $\varphi$  aannemen.



Figuur 94: De gevormde sleuf.

Het volume van de gevormde sleuf is dus:

$$\begin{aligned} V &= x \cdot \frac{2 \cdot B}{\tan \varphi} \cdot \frac{B}{2} \\ &= \frac{x \cdot B^2}{\tan \varphi} \end{aligned}$$

De putproductie wordt dus:

$$\begin{aligned} P_B &= \frac{dV}{dt} \\ &= \frac{dV}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \end{aligned}$$

We weten dat:

$$\frac{dV}{dx} = \frac{B^2}{\tan \varphi}$$

$$\frac{dx}{dt} = v_h$$

Uiteindelijk vinden we voor de zuigputproductie:

$$P_B = \frac{v_h}{\tan \varphi} \cdot B^2$$

De putproductie is functie van de diepte van de put, maar aangezien deze tijdens het uitvoeren van de werken niet verandert, krijgen we een constante zandproductie.

Bij het opstellen van de formule voor de putproductie hebben we echter verondersteld dat al het zand dat van de putwand afregent door de zuigbuis wordt opgezogen. Het is mogelijk dat op het ogenblik dat de korrels beneden zijn, de zuigbuis zich reeds te ver horizontaal heeft verplaatst. Dit materiaal wordt niet opgezogen en zal zich achter de buis terug opstapelen. Indien de buis te snel

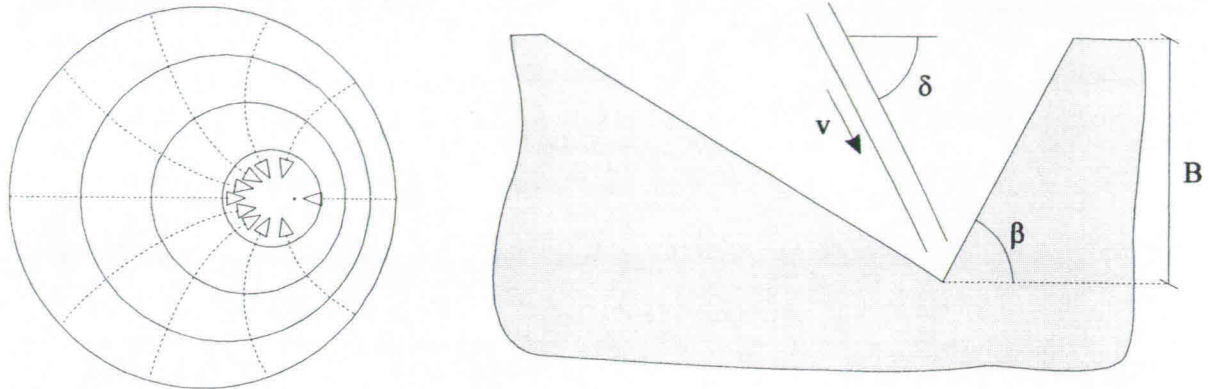


horizontaal beweegt zal er hierdoor een productieverlies zijn. Het zand dat niet wordt opgezogen wordt de mors genoemd. Volgens de onderzoekers in Delft blijft de mors aanvaardbaar zolang de

verhouding  $\frac{v_h}{v_w}$  kleiner blijft dan 0,5.

## 8.4. Zuigput met verplaatsing van de buis onder een hoek $\delta$

### 8.4.1. Algemeen



Figuur 95: Zuigput bij de verplaatsing van de buis onder een hoek  $\delta$ .

De buis wordt nu onder een hoek  $\delta$  de grond ingebracht. We krijgen een zuigput met de vorm van een scheve kegel. Aan de voorkant van de buis krijgen we een talud met helling  $\beta$ . Indien de hoek  $\delta$  groter is dan de hoek  $\varphi$ , dan zullen we achter de zuigbuis ook walletjes krijgen. Mochten we de buis onder een hoek kleiner dan  $\varphi$  de grond inbrengen dan krijgen we achter de buis een talud met deze lichte hoek. Dit talud is dan volledig stabiel, waardoor er ook geen walletjes verschijnen. De creatie van zo'n zuigput is zinloos omdat het de zandproductie aanzienlijk zou laten dalen. In het vervolg van dit hoofdstuk zullen we verder steeds veronderstellen dat de hoek  $\delta$  groter is dan de hoek  $\varphi$ . Zo hebben we op het volledige oppervlak van de kegel steeds walletjes die zand zullen doen afregenen.

### 8.4.2. Zandproductie

Net zoals bij het eerste type zuigput zal de hoeveelheid geproduceerd zand steeds groter worden, naarmate de put dieper wordt. Figuur 96 geeft een detailbeeld van de bodem van de zuigput. De verschillende relevante snelheidsvectoren staan erop aangegeven. We kunnen er de volgende drie betrekkingen tussen de snelheidsvectoren uit afleiden:

$$v_w = \cos \varphi \cdot v_\varphi$$

$$\frac{v_\varphi}{\sin(\beta + \delta)} = \frac{v}{\sin(\beta - \varphi)}$$

$$v_v = \sin \delta \cdot v$$

Hieruit halen we het verband tussen  $v_v$  en  $v_w$ :

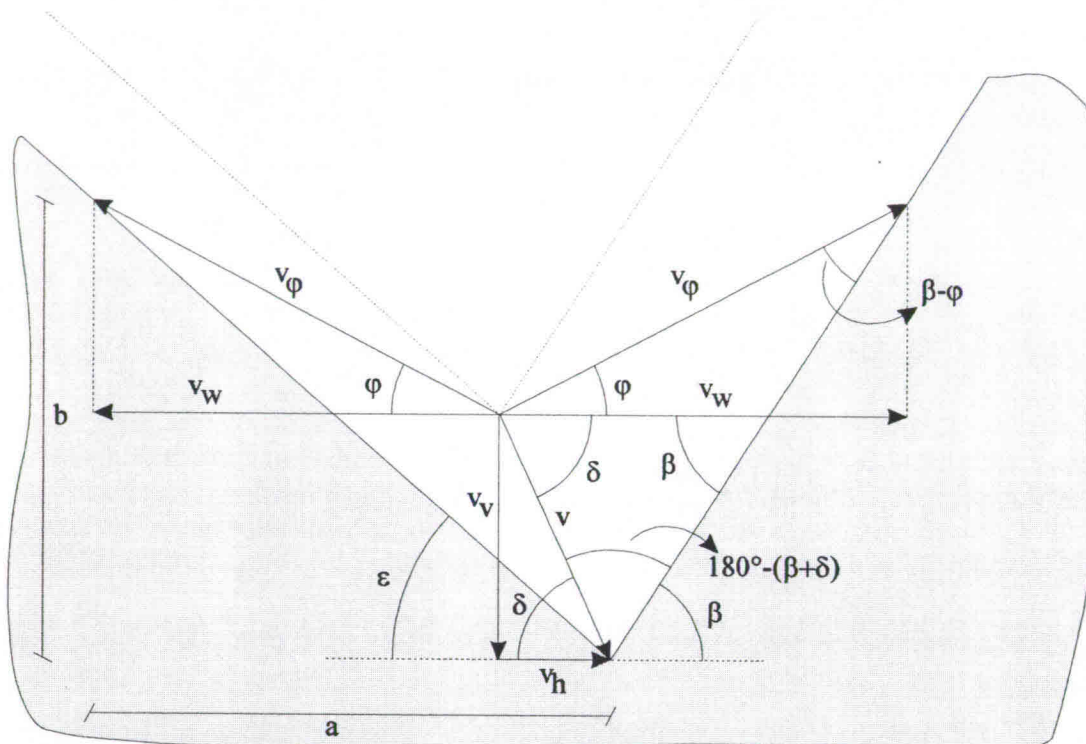
$$\frac{v_w}{\cos \varphi \cdot \sin(\beta + \delta)} = \frac{v_v}{\sin \delta \cdot \sin(\beta - \varphi)}$$

$$v_v = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\beta - \varphi)}{\cos \varphi \cdot \sin(\beta + \delta)} \cdot v_w$$

$$\begin{aligned}
 v_v &= \frac{\sin \delta \cdot (\sin \beta \cdot \cos \varphi - \cos \beta \cdot \sin \varphi)}{\cos \varphi \cdot (\sin \beta \cdot \cos \delta + \cos \beta \cdot \sin \delta)} \cdot v_w \\
 &= \frac{\tan \delta \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi)}{\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \delta} \cdot v_w \\
 &= \tan \delta \cdot \frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta + \tan \delta} \cdot v_w
 \end{aligned}$$

We stellen:

$$\eta = \tan \delta \cdot \frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta + \tan \delta}$$



Figuur 96: Detail van de bodem van de zuigput met de snelheidsvectoren.

Voor het volume van de gevormde kegel vinden we:

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{B}{\tan \beta} + \frac{B}{\tan \epsilon} \right)^2 \cdot B \\
 &= \frac{\pi}{12} \cdot \left( \frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \epsilon} \right)^2 \cdot B^3
 \end{aligned}$$

Op de zijde achter de zuigbuis krijgen we ook walletjes. Globaal wordt er een talud met een onbekende hoek  $\epsilon$  gevormd. Deze hoek kan als volgt berekend worden:

$$\begin{aligned}
 \tan \epsilon &= \frac{b}{a} \\
 &= \frac{v_v + v_\varphi \cdot \sin \varphi}{v_w + v_h}
 \end{aligned}$$

Op de figuur 96 zien we dat:

$$v_h = \cos \delta \cdot v$$

$$v_v = \sin \delta \cdot v$$

$$v_w = \frac{v_v}{\eta} = \frac{\sin \delta \cdot v}{\eta}$$

$$v_\varphi = \frac{\sin(\beta + \delta)}{\sin(\beta - \varphi)} \cdot v$$

$$\begin{aligned} \tan \varepsilon &= \frac{\sin \delta \cdot v + \frac{\sin(\beta + \delta)}{\sin(\beta - \varphi)} \cdot v \cdot \sin \varphi}{\frac{\sin \delta \cdot v}{\eta} + \cos \delta \cdot v} \\ &= \frac{\sin \delta + \frac{\sin(\beta + \delta)}{\sin(\beta - \varphi)} \cdot \sin \varphi}{\frac{\sin \delta}{\eta} + \cos \delta} \end{aligned}$$

De teller kunnen we herschrijven als:

$$\begin{aligned} \sin \delta + \frac{\sin(\beta + \delta)}{\sin(\beta - \varphi)} \cdot \sin \varphi &= \sin \delta + \frac{\sin \beta \cdot \cos \delta + \cos \beta \cdot \sin \delta}{\sin \beta \cdot \cos \varphi - \cos \beta \cdot \sin \varphi} \cdot \sin \varphi \\ &= \sin \delta + \frac{(\tan \beta + \tan \delta) \cdot \cos \delta}{\tan \beta - \tan \varphi} \cdot \tan \varphi \cdot \frac{\tan \delta}{\tan \delta} \\ &= \sin \delta + \frac{\tan \varphi \cdot \sin \delta}{\eta} \end{aligned}$$

Dit geeft:

$$\begin{aligned} \tan \varepsilon &= \frac{\sin \delta + \frac{\tan \varphi \cdot \sin \delta}{\eta}}{\frac{\sin \delta}{\eta} + \cos \delta} \\ &= \frac{\sin \delta \cdot \eta + \tan \varphi \cdot \sin \delta}{\sin \delta + \cos \delta \cdot \eta} \\ &= \frac{\eta + \tan \varphi}{1 + \frac{\eta}{\tan \delta}} \end{aligned}$$

Om de inhoud van de kegel te berekenen hebben we de volgende term nodig:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \varepsilon} &= \frac{\tan \beta + \tan \varepsilon}{\tan \beta \cdot \tan \varepsilon} \\ &= \frac{\tan \beta + \frac{\eta + \tan \varphi}{1 + \frac{\eta}{\tan \delta}}}{\tan \beta \cdot \frac{\eta + \tan \varphi}{1 + \frac{\eta}{\tan \delta}}} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \varepsilon} = \frac{\tan \beta + \frac{\eta \cdot \tan \beta}{\tan \delta} + \tan \varphi + \eta}{\tan \beta \cdot (\tan \varphi + \eta)}$$

De teller kan herschreven worden:

$$\begin{aligned} \text{Teller} &= \tan \beta + \frac{\eta \cdot \tan \beta}{\tan \delta} + \tan \varphi + \eta \\ &= \tan \beta + \tan \beta \cdot \frac{\tan \delta}{\tan \delta} \cdot \frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta + \tan \delta} + \tan \varphi + \tan \delta \cdot \frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta + \tan \delta} \\ &= \frac{\tan^2 \beta + \tan \beta \cdot \tan \delta + \tan^2 \beta - \tan \beta \cdot \tan \varphi + \tan \beta \cdot \tan \varphi + \tan \varphi \cdot \tan \delta + \tan \beta \cdot \tan \delta - \tan \varphi \cdot \tan \delta}{\tan \beta + \tan \delta} \\ &= \frac{2 \cdot \tan \beta \cdot (\tan \beta + \tan \delta)}{\tan \beta + \tan \delta} \\ &= 2 \cdot \tan \beta \end{aligned}$$

Uiteindelijk wordt de formule:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \varepsilon} &= \frac{2 \cdot \tan \beta}{\tan \beta \cdot (\tan \varphi + \eta)} \\ &= \frac{2}{\tan \varphi + \eta} \end{aligned}$$

Het volume van de gevormde kegel wordt nu:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi}{12} \cdot \left( \frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \varepsilon} \right)^2 \cdot B^3 \\ &= \frac{\pi}{12} \cdot \left( \frac{2}{\tan \varphi + \eta} \right)^2 \cdot B^3 \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{(\tan \varphi + \eta)^2} \cdot B^3 \end{aligned}$$

Voor de putproductie vinden we dan:

$$\begin{aligned} P_B &= \frac{dV}{dB} \\ &= \frac{dV}{dB} \cdot \frac{dB}{dt} \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{(\tan \varphi + \eta)^2} \cdot 3 \cdot B^2 \cdot v_v \\ &= \frac{\pi}{(\tan \varphi + \eta)^2} \cdot B^2 \cdot \eta \cdot v_w \end{aligned}$$

Als we  $\eta$  door zijn uitdrukking vervangen vinden we uiteindelijk:

$$P_B = \frac{\tan \delta \cdot \frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta + \tan \delta} \cdot \pi \cdot v_w}{\left( \tan \varphi + \tan \delta \cdot \frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta + \tan \delta} \right)^2} \cdot B^2$$

### 8.4.3. Maximale productie

Net zoals bij het eerste type zuigput zal de hoeveelheid geproduceerd zand steeds groter worden naarmate de put dieper wordt. Nu zijn er echter twee parameters die we moeten bepalen: de bewegingssnelheid  $v$  van de zuigbuis, en de hoek  $\delta$  waarmee de buis de grond binnendringt. We zoeken terug de maximale zuigputproductie voor een bepaalde hoogte. We vinden:

$$\begin{aligned} \frac{dP_B}{d\eta} &= 0 \\ &= \frac{d \left( \frac{\eta \cdot \pi \cdot v_w \cdot B^2}{(\tan \varphi + \eta)^2} \right)}{d\eta} \\ &= \frac{(\tan \varphi + \eta)^2 - \eta \cdot (2 \cdot \tan \varphi + 2 \cdot \eta)}{(\tan \varphi + \eta)^4} \cdot \pi \cdot v_w \cdot B^2 \end{aligned}$$

$$(\tan \varphi + \eta)^2 - \eta \cdot (2 \cdot \tan \varphi + 2 \cdot \eta) = 0$$

$$\tan^2 \varphi + 2 \cdot \eta \cdot \tan \varphi + \eta^2 = 2 \cdot \eta \cdot \tan \varphi + 2 \cdot \eta^2$$

$$\tan^2 \varphi = \eta^2$$

Aangezien  $\eta$  een functie van  $\varphi$ ,  $\delta$  en  $\beta$  is, vinden we dus een verband waaraan  $\delta$  en  $\beta$  moeten voldoen om een optimale productie te krijgen.

### 8.5. Afschuivingen

De randen van de zuigputten zijn taluds met een te steile helling waarvan – in het ideale geval – het zand afregent. In de realiteit schuiven er soms ook ganse schollen van het talud naar beneden. Deze schollen kunnen de productie van de put aanzienlijk verhogen. Maar ze kunnen ook voor het instorten van de put zorgen, zodat de zuigbuis volledig omsloten wordt met zand. Op de zuigleidingen zit een veiligheidsklep om een waterslag en cavitatie in de pomp te voorkomen. Toch moeten we ten alle prijze de instorting van de put voorkomen. Als de buis vast zit, en men niet meer kan zuigen, blijven de actieve wallen de bodem van de put voeden met zand. Dit kan er voor zorgen dat de zuigbuis uiteindelijk volledig geblokkeerd raakt in de grond, zodat men deze slechts los krijgt met speciale takels. De werken worden dan volledig stilgelegd en dit betekent natuurlijk een enorm economisch verlies.

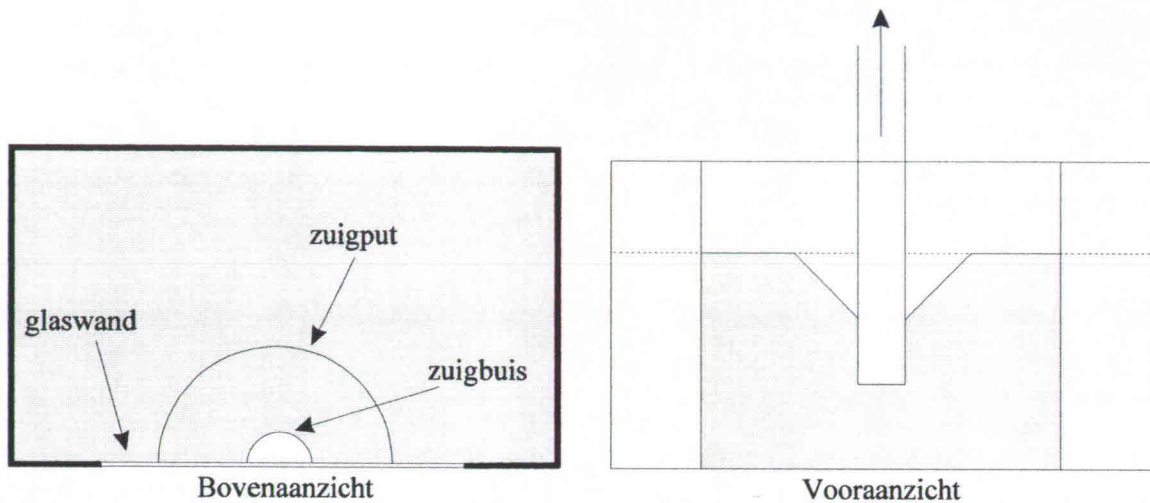
Volgens de onderzoekers in Delft treden deze afschuivingen op – bij de verticale beweging van de buis – als de verhouding  $\frac{v_v}{v_w}$  groter wordt dan 0,4. Als we de bewegingssnelheid van de buis

bepalen voor een optimale productie moeten we dus rekening houden met het feit dat deze snelheid kleiner moet blijven dan  $0,4 \cdot v_w$ , anders bestaat de kans dat de zuigput dichtslaat.

## Hoofdstuk 9: Driedimensionale proeven

### 9.1. Proefopstelling

In hoofdstuk 8 werden de formules voor de zandproductie van de drie types zuigputten opgesteld. Om deze formules te verifiëren werd een reeks van driedimensionale proeven uitgevoerd. De proefopstelling die gebruikt werd is vergelijkbaar met deze van de oriënterende proeven.



Figuur 97: De proefopstelling voor de driedimensionale zuigproeven.

Men simuleerde slechts een halve zuigput, zo kreeg men aan de glazen plaat een beeld van de doorsnede van de zuigput. De bak met het zand had een lengte van 7,0m, een hoogte van 1,2m en was 1,75m breed. De zuigbuis bestond uit een halve cirkelvormige doorsnede, met een diameter van 65mm. Ze kon naast zowel een horizontale als een verticale beweging, ook een kanteling met een hoek  $\delta$  uitvoeren. Tijdens de proeven werd er steeds met een debiet van 5 liter per seconde gezogen, dit leverde een zuigsnelheid  $v_m$  van 3m/s op.

### 9.2. Gebruikte materialen

De volgende vier zandsorten werden gebruikt om de proeven uit te voeren:

$d_{50} = 80\mu\text{m}$	$d_{10} = 51\mu\text{m}$	Gezeefd zand
	$d_{60} = 83\mu\text{m}$	
	$\varphi = 32^\circ$	
$d_{50} = 210\mu\text{m}$	$d_{10} = 150\mu\text{m}$	Duinzand
	$d_{60} = 230\mu\text{m}$	
	$\varphi = 32^\circ$	
$d_{50} = 450\mu\text{m}$	$d_{10} = 325\mu\text{m}$	Maaszand
	$d_{60} = 481\mu\text{m}$	
	$\varphi = 34^\circ$	
$d_{50} = 620\mu\text{m}$	$d_{10} = 523\mu\text{m}$	Maaszand
	$d_{60} = 646\mu\text{m}$	
	$\varphi = 34^\circ$	

Tabel 53: De gebruikte zanden.

### 9.3. Uitgevoerde metingen

In hoofdstuk 4 – beschrijving van de tweedimensionale proeven – werd reeds aangehaald dat het zeer moeilijk is de pakking te laten variëren met deze driedimensionale opstelling. Het is zeer

moeilijk een constante pakking te bekomen in het ganse volume van de zuigbak. Daarom werd er steeds bij twee extreme pakkingen gewerkt.

Op de bodem van de zuigbak waren openingen voor watertoevoer voorzien. Door water onder hoge druk door deze openingen te sturen kon men de ganse zandinhoud van de zuigbak fluïdiseren. De lichte pakking werd bekomen door de volledige inhoud van de zuigbak te fluïdiseren, en daarna terug te laten bezinken. De dichte pakking werd bekomen door zeer lang met betontrilnaalden de grond te compacteren.

Via de glasplaat werd de vorming van de zuigput in functie van de tijd bestudeerd. Uit de beelden werd naast de walsnelheid ook de helling van de putranden afgeleid. Ook het zand debiet werd opgemeten. Er is echter geen informatie teruggevonden over hoe dit gebeurde. De zanddebieten worden gegeven in liter per seconde. Maar nergens werd gevonden voor welke dichtheid van de grond deze debieten representatief zijn.

## Hoofdstuk 10: Evaluatie van de putproducties

### 10.1. Inleiding

Tijdens de driedimensionale proeven werden slechts twee types zuigputten gesimuleerd: de zuigputten met verticale en horizontale verplaatsing van de buis. Deze proeven werden op vier verschillende zanden uitgevoerd. In dit hoofdstuk zullen we voor deze twee types zuigputten nagaan of met de zuigputformules die in het achtste hoofdstuk opgesteld werden, correcte resultaten worden bekomen.

### 10.2. Zuigputten met verticale beweging van de zuigbuis

Bij dit type put wordt de zuigbuis met een constante verticale snelheid –  $v_v$  – de grond ingebracht. In het hoofdstuk 8 bewezen we dat de zandproductie van dit type put gegeven wordt door:

$$P_B = \frac{\pi \cdot v_w \cdot (\tan \beta - \tan \varphi)}{\tan^2 \beta} \cdot B^2$$

$$\tan \beta = \tan \varphi + \frac{v_v}{v_w}$$

De berekening van de walsnelheid gebeurde volgens het schema van paragraaf 7.10. Voor de vier gebruikte zanden leverde dit steeds dezelfde methode op:

$$k_0 = 150 \cdot \left( \frac{n_0}{0,45} \right)^6 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T) \cdot d_{10}^2$$

$$\ln v_w = \chi_\gamma \cdot \chi_\varphi \cdot \chi_d \cdot \frac{\ln k_0 + 3,34}{0,084 \cdot \ln k_0 + 1,09}$$

In de tabellen met de berekeningsresultaten zijn  $v_w$  (calc),  $\beta$  (calc) en  $P_B$  (calc) de berekende waarden van de walsnelheid, de taludhelling  $\beta$  en de zandproductie bij een putdiepte  $B$ . De kolommen met als titel “verschil” geven telkens de procentuele afwijking van de berekende resultaten ten opzichte van de meetresultaten. De gemiddelde afwijking is het gemiddelde van de absolute waarden van de individuele afwijkingen.

#### 10.2.1. Berekeningsresultaten 80 $\mu$ m zand

Bij het 80 $\mu$ m zand werden de debieten opgemeten bij drie verschillende dieptes van de zuigput: 15cm, 30cm en 45cm.

$n_0$ (%)	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (calc)	$v_w$ (mm/s)	Verschil	$v_v$ (mm/s)	$\beta$ (calc)	$\beta$ (°)	Verschil
42	0,031	0,85	0,55	55,1%	1,00	60,9	67,5	-9,8%
42	0,031	0,85	0,65	31,2%	0,50	50,5	53,0	-4,8%
42	0,031	0,85	0,52	64,0%	0,50	50,5	57,0	-11,5%
42	0,031	0,85	0,46	85,4%	1,50	67,2	75,0	-10,3%
42	0,031	0,85	0,50	70,6%	0,25	42,6	47,5	-10,4%
42	0,031	0,85	0,42	103,1%	2,50	74,3	80,0	-7,1%
48	0,070	2,18	1,65	32,0%	1,00	47,3	50,0	-5,4%
48	0,070	2,18	1,90	14,6%	0,50	40,5	40,0	1,3%
48	0,070	2,18	0,90	142,0%	1,50	52,7	66,0	-20,1%
48	0,070	2,18	1,00	117,8%	0,25	36,5	40,0	-8,8%
48	0,070	2,18	2,00	8,9%	5,00	71,1	72,0	-1,2%
Gemiddelde afwijking				65,9%	Gemiddelde afwijking			8,3%

Tabel 54: Berekening van  $v_w$  en  $\beta$  – 80 $\mu$ m zand.



Indien de berekende waarden van  $v_w$  en  $\beta$  gebruikt worden om de putproducties te berekenen vinden we:

$n_0(\%)$	$v_v$	B = 0,15m			B = 0,30m			B = 0,45m		
		$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil
42	1,00	0,022	0,020	9,4%	0,088	0,080	9,4%	0,197	0,150	31,3%
42	0,50	0,024	0,020	20,5%	0,096	0,060	60,6%	0,217	0,150	44,6%
42	0,50	0,024	0,015	60,6%	0,096	0,050	92,8%	0,217	0,110	97,1%
42	1,50	0,019	0,025	-25,4%	0,075	0,060	24,4%	0,168	0,120	40,0%
42	0,25	0,021	0,015	39,8%	0,084	0,045	86,4%	0,189	0,110	71,6%
42	2,50	0,014	0,025	-44,1%	0,056	0,075	-25,5%	0,126	0,130	-3,3%
48	1,00	0,060	0,050	20,3%	0,241	0,130	85,1%	0,541	0,260	108,2%
48	0,50	0,048	0,040	21,0%	0,194	0,140	38,3%	0,436	0,290	50,2%
48	1,50	0,061	0,030	104,8%	0,246	0,100	145,8%	0,553	0,180	207,2%
48	0,25	0,032	0,017	90,0%	0,129	0,050	158,4%	0,291	0,500	-41,9%
48	5,00	0,041	0,040	3,6%	0,166	0,090	84,1%	0,373	0,170	119,3%
		Gem. afwijking		39,9%	Gem. afwijking		73,7%	Gem. afwijking		74,1%

Tabel 55: Berekening putproducties verticaal zuigen – 80 $\mu$ m zand.

In tabel 54 zien we dat hoewel de walsnelheid niet zo goed benaderd wordt – een afwijking van 70% – er toch een goede benadering van de hoek  $\beta$  gevonden kan worden. Deze afwijking op de walsnelheid moet echter gerelativeerd worden. Het is zeer moeilijk een constante pakking van het zandpakket te verkrijgen. De gegeven waarden van  $n_0$  zijn eerder een indicatie – vaste pakking, losse pakking – dan een exacte rekenwaarden. Hoewel we dus bij alle metingen met dezelfde pakking dezelfde waarde van de walsnelheid zouden moeten vinden, zien we duidelijke verschillen tussen de verschillende meetwaarden – voor  $n_0 = 48\%$  vinden we waarden van 0,9 tot 2,0 mm/s. Hieruit kunnen we dus besluiten dat het enerzijds zeer moeilijk is een gewenste toestand te creëren en dat anderzijds tevens moeilijk is een gecreëerde toestand correct te beschrijven.

Diepte B	Afwijking
15cm	26,4%
30cm	39,9%
45cm	38,7%

Tabel 56: Afwijkingen bij berekening met meetwaarden.

Bij het 80 $\mu$ m zand zijn de afwijking van de berekende putproductie niet gering. Indien we de putproducties berekenen met de gemeten waarden van  $v_w$  en  $\beta$  dan bekomen we een betere benadering van de gemeten waarden van de zandproductie – tabel 56. Maar uiteindelijk blijven ook in dit geval de afwijking relatief groot. Dit bevestigt de veronderstelling dat het bij de drie dimensionale opstelling zeer moeilijk is een correct omschreven homogene zandlaag te creëren.

### 10.2.2. Berekeningsresultaten 210 $\mu$ m zand

Bij het 210 $\mu$ m zand werden de debieten opgemeten bij drie verschillende dieptes van de zuigput: 30cm, 45cm en 60cm. Indien de waarden van een variabele niet gemeten konden worden, wordt dit in de tabellen aangeduid met het symbool "N/A".

$n_0(\%)$	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (calc)	$v_w$ (mm/s)	Vershil	$v_v$ (mm/s)	$\beta$ (calc)	$\beta$ (°)	Vershil
36	0,107	3,4	4,7	27,6%	2	50,5	45,5	10,9%
36	0,107	3,4	4,3	20,8%	2	50,5	47,0	7,4%

37	0,126	4,0	4,3	7,0%	2	48,4	47,0	2,9%	
37	0,126	4,0	4,3	7,0%	3	54,0	52,5	2,8%	
37	0,126	4,0	4,0	0,0%	4	58,4	58,0	0,7%	
37	0,126	4,0	4,0	0,0%	1	41,2	40,5	1,7%	
37	0,126	4,0	4,8	16,7%	5	61,9	58,5	5,9%	
37	0,126	4,0	4,5	11,1%	2	48,4	46,5	4,0%	
37	0,126	4,0	4,6	13,0%	2	48,4	46,0	5,1%	
37	0,126	4,0	4,0	0,0%	4	58,4	58,0	0,7%	
37	0,126	4,0	5,9	32,2%	4	58,4	52,0	12,3%	
37	0,126	4,0	5,5	27,3%	4	58,4	53,0	10,2%	
37	0,126	4,0	5,5	27,3%	4	58,4	53,0	10,2%	
37	0,126	4,0	3,9	2,6%	4	58,4	58,5	-0,2%	
38	0,148	4,7	5,0	6,9%	2	46,5	45,0	3,4%	
40	0,201	6,2	5,3	16,3%	2	43,5	44,0	-1,1%	
40	0,201	6,2	5,7	8,2%	2	43,5	43,5	0,0%	
40	0,201	6,2	5,1	20,9%	1	38,2	38,5	-0,8%	
40	0,201	6,2	5,1	20,9%	3	48,0	50,0	-4,0%	
40	0,201	6,2	6,3	2,1%	4	51,9	51,0	1,7%	
41	0,234	7,0	9,0	22,0%	3	46,5	43,5	6,8%	
41	0,234	7,0	8,3	15,4%	2	42,3	40,0	5,7%	
41	0,234	7,0	9,5	26,1%	2	42,3	39,0	8,5%	
42	0,270	7,9	8,9	10,8%	2	41,2	39,5	4,4%	
42	0,270	7,9	10,0	20,6%	3	45,1	42,0	7,3%	
Gemiddelde afwijking				14,5%	Gemiddelde afwijking				4,7%

Tabel 57: Berekening van  $v_w$  en  $\beta$  - 210  $\mu$ m zand.

$n_0(\%)$	$v_v$	B = 0,15m			B = 0,30m			B = 0,45m		
		$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil
36	0,107	0,39	0,66	-41,7%	0,87	1,36	-36,3%	1,54	2,44	-36,9%
36	0,107	0,39	0,60	-35,9%	0,87	1,26	-31,3%	1,54	2,10	-26,7%
37	0,126	0,45	0,80	-44,1%	1,01	1,60	-37,2%	1,79	2,44	-26,7%
37	0,126	0,45	0,60	-25,2%	1,01	1,40	-27,9%	1,80	2,24	-19,9%
37	0,126	0,43	0,58	-26,1%	0,96	1,30	-25,9%	1,71	2,16	-20,7%
37	0,126	0,37	0,44	-16,0%	0,83	1,00	-16,9%	1,48	1,68	-12,0%
37	0,126	0,40	0,40	0,5%	0,91	0,90	0,5%	1,61	1,60	0,5%
37	0,126	0,45	0,50	-10,6%	1,01	1,16	-13,3%	1,79	1,80	-0,7%
37	0,126	0,45	N/A	N/A	1,01	N/A	N/A	1,79	N/A	N/A
37	0,126	0,43	N/A	N/A	0,96	N/A	N/A	1,71	N/A	N/A
37	0,126	0,43	0,86	-50,2%	0,96	1,70	-43,3%	1,71	N/A	N/A
37	0,126	0,43	0,86	-50,2%	0,96	1,70	-43,3%	1,71	N/A	N/A
37	0,126	0,43	0,76	-43,6%	0,96	1,66	-41,9%	1,71	N/A	N/A
37	0,126	0,43	0,70	-38,8%	0,96	1,60	-39,8%	1,71	N/A	N/A
38	0,148	0,51	0,84	-39,4%	1,15	1,72	-33,5%	2,04	2,90	-29,8%
40	0,201	0,63	0,76	-17,4%	1,41	1,72	-17,9%	2,51	2,90	-13,4%
40	0,201	0,63	0,80	-21,6%	1,41	1,80	-21,6%	2,51	2,90	-13,4%
40	0,201	0,46	0,48	-4,9%	1,03	0,90	14,1%	1,83	1,72	6,1%
40	0,201	0,69	0,56	22,6%	1,55	1,50	3,0%	2,75	2,60	5,6%
40	0,201	0,70	0,76	-8,3%	1,57	1,20	30,7%	2,79	2,74	1,8%
41	0,234	0,77	1,40	-45,3%	1,73	2,40	-28,2%	3,06	N/A	N/A
41	0,234	0,68	0,90	-24,1%	1,54	1,70	-9,6%	2,73	N/A	N/A

41	0,234	0,68	N/A	N/A	1,54	N/A	N/A	2,73	N/A	N/A	
42	0,270	0,74	N/A	N/A	1,66	1,92	-13,8%	2,94	N/A	N/A	
42	0,270	0,84	N/A	N/A	1,90	1,60	18,6%	3,38	N/A	N/A	
Gem. afwijking			28,3%		Gem. afwijking		24,9%		Gem. afwijking		15,3%

Tabel 58: Berekening putproducties verticaal zuigen – 210 $\mu$ m zand.

Als we de putproducties berekenen met de gemeten waarden van de walsnelheid en de taludhelling dan vinden we de volgende gemiddelde afwijkingen:

Diepte B	Afwijking
30cm	23,2%
45cm	20,8%
60cm	16,6%

Tabel 59: Afwijkingen bij berekening met meetwaarden.

In de tabel 57 zien we dat we dezelfde gemiddelde afwijkingen van de walsnelheid krijgen als in hoofdstuk 7 – bij de tweedimensionale proeven. Blijkbaar had men bij dit zand minder problemen om een zandlaag met uniforme pakking te creëren. Hier merken we ook dat er niet echt markante verschillen zijn tussen de gemiddelde afwijkingen op  $P_B$  bekomen met de gemeten en de berekende waarden van de walsnelheid en de taludhoek – tabel 58 en 59. Waaruit we dezelfde conclusie kunnen trekken.

### 10.2.3. Berekeningsresultaten 450 $\mu$ m zand

Bij het 80 $\mu$ m zand werden de debieten opgemeten bij drie verschillende dieptes van de zuigput: 30cm, 45cm en 60cm.

$n_0$ (%)	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (calc)	$v_w$ (mm/s)	Verschil	$v_v$ (mm/s)	$\beta$ (calc)	$\beta$ (°)	Verschil
37	0,592	13,7	11,5	19,0%	4	44	44	0,1%
37	0,592	13,7	11,5	19,0%	4	44	44	0,1%
37	0,592	13,7	14,5	5,6%	6	48	46	4,5%
37	0,592	13,7	12,0	14,0%	2	39	38	3,6%
37	0,592	13,7	9,3	47,1%	1	37	36	2,2%
42	1,267	23,2	33,0	29,5%	1	36	33	8,1%
42	1,267	23,2	37,0	37,2%	2	37	34	9,6%
42	1,267	23,2	36,0	35,4%	4	40	36	11,8%
Gemiddelde afwijking				25,9%	Gemiddelde afwijking			5,0%

Tabel 60: Berekening van  $v_w$  en  $\beta$  – 450 $\mu$ m zand.

$n_0$ (%)	$v_v$	B = 0,30m			B = 0,45m			B = 0,60m				
		$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Verschil	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Verschil	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Verschil		
37	4	1,21	1,50	-19,3%	2,72	4,00	-32,0%	4,84	6,00	-19,3%		
37	4	1,21	1,60	-24,4%	2,72	3,60	-24,4%	4,84	6,00	-19,3%		
37	6	1,37	2,20	-37,8%	3,08	4,40	-30,0%	5,48	N/A	N/A		
37	2	0,84	1,20	-30,0%	1,89	2,70	-30,0%	3,36	4,80	-30,0%		
37	1	0,51	0,56	-9,7%	1,14	1,14	-0,2%	2,02	N/A	N/A		
42	1	0,55	N/A	N/A	1,24	N/A	N/A	2,20	N/A	N/A		
42	2	0,98	1,20	-18,5%	2,20	2,40	-8,3%	3,91	4,30	-9,1%		
42	4	1,58	1,80	-12,3%	3,55	3,40	4,4%	6,31	6,00	5,2%		
Gem. afwijking		21,7%			Gem. afwijking			18,5%			Gem. afwijking	16,6%

Tabel 61: Berekening putproducties verticaal zuigen – 450 $\mu$ m zand.

Bij de berekening van de walsnelheid werd hier rekening gehouden met de correctiefactor  $\chi_\phi$  omdat de inwendige wrijvingshoek van het 450 $\mu$ m zand 34° bedraagt. Uiteindelijk krijgen we een gemiddelde afwijking van 26% op de berekening van de walsnelheid – wat in dezelfde grootteorde ligt als de afwijking bij de twee dimensionale proeven. Voor de berekening van de zuigput producties met de gemeten waarden van de walsnelheid en de taludhelling krijgen we de volgende gemiddelde afwijkingen:

Diepte B	Afwijking
30cm	18,0%
45cm	20,4%
60cm	21,2%

Tabel 62: Afwijkingen bij berekening met meetwaarden.

Deze afwijkingen zijn dus van dezelfde grootteorde als de afwijkingen die we krijgen met de berekende waarden. Algemeen kunnen we dus stellen dat ook bij het 450 $\mu$ m zand de putproducties kunnen berekend worden.

#### 10.2.4. Berekeningsresultaten 620 $\mu$ m zand

Bij het 620 $\mu$ m zand werden de debieten opgemeten bij twee verschillende dieptes van de zuigput: 15cm en 30cm.

$n_0$ (%)	$k_0$ (mm/s)	$v_w$ (calc)	$v_w$ (mm/s)	Vershil	$v_v$ (mm/s)	$\beta$ (calc)	$\beta$ (°)	Vershil
36	1,301	24	63	-62,4%	20	57	44	28,8%
36	1,301	24	29	-18,4%	10	48	45	5,9%
36	1,301	24	24	-1,4%	20	57	76	-25,5%
36	1,301	24	23	2,9%	20	57	73	-22,4%
36	1,301	24	22	7,5%	20	57	70	-19,1%
42	3,282	42	34	22,5%	20	49	51	-3,7%
42	3,282	42	70	-40,5%	10	42	35	21,3%
Gemiddelde afwijking				22,2%	Gemiddelde afwijking			18,1%

Tabel 63: Berekening van  $v_w$  en  $\beta$  – 620 $\mu$ m zand.

$n_0$ (%)	$v_v$	B = 0,15m			B = 0,30m		
		$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil
36	20	0,61	0,90	-32,0%	2,45	4,00	-38,8%
36	10	0,59	0,84	-30,1%	2,35	3,20	-26,6%
36	20	0,61	0,46	33,0%	2,45	1,70	44,0%
36	20	0,61	0,60	2,0%	2,45	2,00	22,4%
36	20	0,61	0,50	22,4%	2,45	1,64	49,3%
42	20	1,06	0,80	32,6%	4,24	3,00	41,4%
42	10	0,85	0,92	-8,1%	3,38	3,70	-8,6%
Gem. afwijking		22,9%		Gem. afwijking		33,0%	

Tabel 64: Berekening putproducties verticaal zuigen – 620 $\mu$ m zand.

Ook bij het 620 $\mu$ m zand moeten we rekening houden met de correctiefactor  $\chi_\phi$  omdat de inwendige wrijvingshoek terug 34° bedraagt. Uiteindelijk krijgen we een gemiddelde afwijking van 22% op de berekening van de walsnelheid – wat in dezelfde grootteorde ligt als de afwijking bij de twee dimensionale proeven. Voor de berekening van de zuigputproducties met de gemeten waarden van de walsnelheid en de taludhelling krijgen we de volgende gemiddelde afwijkingen:

Diepte B	Afwijking
30cm	32,8%
45cm	26,8%

Tabel 65: Afwijkingen bij berekening met meetwaarden.

### 10.2.5. Besluiten bij verticale zuigputten

Bij het 80 $\mu$ m zand leverden de berekeningen van de putproducties geen bevredigende resultaten op. Ook de berekening van de walsnelheid verliep niet goed. Bij gelijke pakkingen maten we duidelijk verschillende waarden van de walsnelheid. Hieruit kunnen we besluiten dat hoogstwaarschijnlijk de proefcondities verre van correct waren.

Bij de zanden van 210 $\mu$ m, 450 $\mu$ m en 620 $\mu$ m slagen we er daarentegen wel in de putproducties te berekenen. Bij deze drie zanden schommelde de gemiddelde afwijking op de putproducties rond de 23%. Bij deze zanden leverden de berekening van de walsnelheid dezelfde gemiddelde afwijkingen op dan bij de twee dimensionale proeven. Omdat – eenmaal de walsnelheid gekend is – de putproductie geen functie van de granulometrie is, kunnen we besluiten dat het mogelijk is de productie van een verticale zuigput te berekenen.

### 10.3. Horizontale zuigputten

Hier wordt de zuigbuis, nadat die reeds een bepaalde diepte de grond is ingebracht, horizontaal voortbewogen met een snelheid  $v_h$ . In het hoofdstuk 8 bewezen we dat de zandproductie van dit type put gegeven wordt door:

$$P_B = \frac{v_h}{\tan \varphi} \cdot B^2$$

We merken dat we hier de walsnelheid niet nodig hebben om de putproductie uit te rekenen.

#### 10.3.1. 80 $\mu$ m zand

De horizontale putten werden uitgevoerd met een verschillende horizontale snelheid en een verschillende putdiepte. We vinden:

$n_0$ (%)	$v_h$ (mm/s)	B (m)	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil
48	1,00	0,60	0,58	0,40	44,0%
42	0,90	0,50	0,36	0,46	-21,7%
42	0,32	0,50	0,13	0,22	-41,8%
42	0,50	0,56	0,25	0,24	4,6%
42	1,50	0,52	0,65	0,48	35,2%
42	0,18	0,53	0,08	0,10	-19,1%
42	0,25	0,58	0,13	0,12	12,2%
42	1,00	0,50	0,40	0,32	25,0%
48	0,32	0,58	0,17	0,24	-28,2%
48	1,50	0,55	0,73	0,40	81,5%
48	0,50	0,55	0,24	0,24	0,9%
Gemiddelde afwijking					25,4%

Tabel 66: Berekening van  $v_w$  en  $P_B$  – 80 $\mu$ m zand.

**10.3.2. 210 $\mu$ m zand**

$n_0$ (%)	$v_h$ (mm/s)	B (m)	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil
37	3	0,50	1,20	1,90	-36,8%
37	5	0,50	2,00	N/A	N/A
37	4	0,50	1,60	1,80	-11,1%
37	7	0,50	2,80	2,56	9,4%
37	6	0,50	2,40	2,20	9,1%
37	4	0,60	2,30	1,86	23,9%
41	3	0,50	1,20	1,00	20,0%
41	3	0,58	1,62	1,60	0,9%
41	5	0,50	2,00	2,30	-13,0%
42	1	0,50	0,40	0,40	0,0%
42	2	0,52	0,87	0,90	-3,8%
42	3	0,50	1,20	1,60	-25,0%
Gemiddelde afwijking					13,1%

Tabel 67: Berekening van  $v_w$  en  $P_B$  – 210 $\mu$ m zand.**10.3.3. 450 $\mu$ m zand**

$n_0$ (%)	$v_h$ (mm/s)	B (m)	$P_B$ (calc)	$P_B$ (l/s)	Vershil
37	1,7	0,60	0,9	1,4	-35,2%
37	4,0	0,65	2,5	3,4	-26,3%
37	6,0	0,60	3,2	3,8	-15,7%
37	2,0	0,60	1,1	14,0	-92,4%
37	1,0	0,58	0,5	0,5	-0,3%
37	8,0	0,60	4,3	4,2	1,7%
37	10,5	0,60	5,6	4,6	21,8%
37	12,0	0,60	6,4	3,8	68,5%
42	1,0	0,60	0,5	0,8	-33,3%
42	2,0	0,60	1,1	1,2	-11,0%
42	4,0	0,60	2,1	2,1	1,7%
42	6,0	0,60	3,2	4,8	-33,3%
42	8,0	0,60	4,3	4,5	-5,1%
Gemiddelde afwijking					31,5%

Tabel 68: Berekening van  $v_w$  en  $P_B$  – 450 $\mu$ m zand.**10.3.4. Besluiten bij horizontale zuigputten**

De putproductie van een horizontale put kan berekend worden en de gemiddelde afwijkingen die hier gevonden werden zijn:

Diepte B	Afwijking
80 $\mu$ m	25,4%
210 $\mu$ m	13,1%
450 $\mu$ m	31,5%

Tabel 69: Afwijkingen bij berekening met meetwaarden.

Bij de berekeningen werd geen rekening gehouden met de mors. Hierdoor zouden de berekende waarden steeds hoger moeten liggen dan de gemeten waarden. Dit wordt echter niet vastgesteld want de meetwaarden wijken zowel in de positieve als negatieve zin af. Door de kleine diepte van de putten was het mogelijk dat alle zandkorrels snel genoeg beneden waren zodat er geen mors was.

## **Hoofdstuk 11: Opmerkingen, aantekeningen & bedenkingen**

### **11.1. Inleiding**

Aan de hand van de meetresultaten bekomen door een proefcampagne van WL | Delft Hydraulics hebben we formules om de walsnelheid te berekenen opgesteld en gecontroleerd. De bekomen resultaten waren op het eerste zicht bevredigend. Toch zijn er bij het onderzoek enkele – fundamentele – zaken over het hoofd gezien. Dit hoofdstuk is een verzameling van opmerkingen, aantekeningen en bedenkingen met betrekking tot de tien vorige hoofdstukken.

### **11.2. Vorm van de korrels**

De vorm van de korrels is een parameter die in deze studie systematisch verwaarloosd wordt. Het enige wat in de documentatie van WL | Delft Hydraulics hierover werd terug gevonden was, dat de korrels van het metselzand – 300 $\mu$ m – hoekiger waren dan de korrels van de andere zanden. De verwaarlozing van deze parameter is hoogst onterecht. Ze zal de walsnelheid namelijk op verschillende vlakken beïnvloeden.

Op de grafieken van Youd zien we duidelijk de grote invloed die de vorm van de korrels hebben op het minimaal en maximaal poriëngehalte van de gronden. Het is duidelijk dat deze verschillen hun terugslag zullen hebben op de dilatantie, die dan terug een onbetwistbare invloed op de walsnelheid zal hebben. Het is onmogelijk conclusies te trekken aan de hand van de metingen op het metselzand omdat in tegenstelling tot alle andere zanden het metselzand tevens een niet uniform zand is. Aan de hand van één enkel geval is het onmogelijk de effecten van deze beide afwijkingen te quantifieren. Uiteindelijk moesten we voor dit zand een speciale tak in het berekeningsschema invoegen. De bekomen afwijkingen werden weggewerkt door een andere doorlaatbaarheidswet te gebruiken en dit wegens de niet uniformiteit. Maar misschien ligt de afwijkende korrelvorm aan de basis van de afwijkingen en niet de niet-uniformiteit.

De vorm van de korrels zullen ook een grote invloed hebben op de inwendige wrijvingshoek van het zand – hierop werd verder ingegaan in paragraaf 11.3. – en op de vorming van afschuivende schollen – dit wordt besproken in de paragraaf 11.5.

### **11.3. Inwendige wrijvingshoek**

Ook de inwendige wrijvingshoek wordt in het onderzoek nogal stiefmoederlijk behandeld. De uiteindelijke hoek die het talud zal aannemen, wordt – gemakshalve – gelijkgesteld met de inwendige wrijvinghoek van het zand in gesatureerde toestand. Men vermeldt echter wel dat de hoek van het talud in werkelijkheid iets kleiner is.

In de paragraaf over de correctiefactoren hebben we gezien dat de invloed van deze hoek op de walsnelheid echter niet kan verwaarloosd worden. Deze hoek zal tevens de finale toestand, waarin we terug een onvoorwaardelijke stabiele grond krijgen, bepalen. Indien we – door middel van een horizontale zuigput – een profiel op de bodem wensen te baggeren, dan zien we dat we nooit een hoek steiler dan  $\phi$  kunnen krijgen. Bij zanden met lage waarden van de inwendige wrijvingshoek zal  $\phi$  dus het volume te baggeren grond bepalen en niet het gewenste profiel.

Het is de duidelijk dat om zowel technische als economische redenen de kennis van de hoek  $\phi$  belangrijk is. Er wordt geen enkele methode gegeven om deze hoek te berekenen of om ze zelfs maar te schatten. Alle waarden voor de hoek  $\phi$ , die in deze studie gebruikt werden, waren tijdens de zuigproeven experimenteel gemeten. Het is echter ook onmogelijk met de voorhandzijnde gegevens enige berekeningscriteria op te stellen omdat hier terug de onontbeerlijke gegevens over

de vorm van de korrels ontbreken. De vorm en ruwheid van de korrels zullen de belangrijkste parameters zijn voor de bepaling van de hoek  $\phi$ . We zien trouwens dat we voor de gladde en ronde glasparels zeer lage waarden van deze hoek vinden.

#### 11.4. Pakking

Bij de empirische methode komt de pakking voor als parameter die de doorlaatbaarheid bepaalt, wat logisch is wegens de grote invloed van de pakking op de doorlaatbaarheid. Maar op figuur 35 – hoofdstuk 3, pagina 45 – zien we duidelijk dat er ook een rechtstreekse invloed van de pakking op de walsnelheid is. Bij gronden met een gelijke doorlaatbaarheid zal de grond met de dichtste pakking de laagste walsnelheid hebben. En dit omdat er in de dicht gepakte grond een grotere dilatantie zal zijn, wat het toestromen van een grotere hoeveelheid water vergt wat in een lagere walsnelheid resulteert. Op de figuur 35 zien we ook dat deze invloed niet verwaarloosbaar is.

Bij de resultaten van de twee dimensionale proeven was dit effect minder duidelijk zichtbaar. Indien we veronderstellen dat bij de empirische formule dit effect uitgevlakt werd door uitmiddeling, dan zouden we bij berekening een systematische overschatting van de walsnelheid bij vast gepakte gronden en een systematische onderschatting bij licht gepakte gronden moet krijgen. Dit werd echter niet waargenomen, waardoor de invloed van dit fenomeen dan ook niet in rekening gebracht kon worden.

#### 11.5. Afschuivingen

In paragraaf 8.5. werd reeds kort gewezen op het probleem van de afschuivingen. Deze afschuivingen moeten ten alle prijze voorkomen worden. Ze kunnen de zuigput doen dichtslaan, hetgeen enorme economische gevolgen kan hebben. Om gevreesde afschuivingen te voorkomen wordt een criterium voor de verhouding van de verplaatsingssnelheid van de buis ten opzichte van de walsnelheid gegeven. En zeer belangrijke parameter in dit probleem, de vorm van de korrels, wordt terug verwaarloosd. Wegens de afwezigheid van deze parameter in het criterium, is de betrouwbaarheid ervan dan ook twijfelachtig. We moeten duidelijk de bewegingssnelheid van de zuigbuis beperken om het dichtklappen van de put te voorkomen. Maar op de figuur 92 – pagina 100 – zien we echter dat een beperking van deze bewegingssnelheid een grote daling van de productie van de put kan teweeg brengen. Er is dus duidelijk een noodzaak aan een correcter criterium voor de beperking van de bewegingssnelheid van de buis omdat zowel een te grote als te kleine beperking een groot economisch verlies betekent.

#### 11.6. Stromingen

In de ganse studie wordt er ook nooit over grondwater stromingen gesproken. Deze stromingen kunnen waarschijnlijk een grote invloed op de walsnelheid hebben. Hoogstwaarschijnlijk kunnen stromingen in tegengestelde zin van de walsnelheid, de walsnelheid duidelijk verhogen omdat ze zal helpen de onderdrukken te annuleren. Waarschijnlijk zal een stroming in deze zin ook het negatieve effect hebben dat ze de afschuivingen zal bevorderen.

Naast grondwaterstromingen kunnen er ook in de watermassa stromingen aanwezig zijn. Ook deze zullen – tot nu toe – onbekende invloed hebben op de walsnelheid, en de uiteindelijk aangenomen helling.

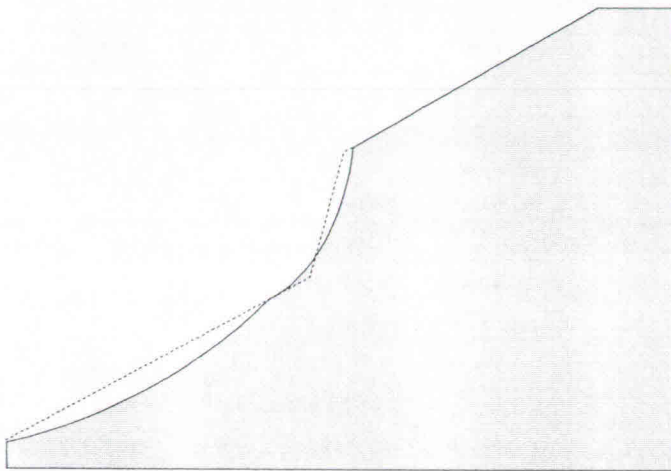
#### 11.7. Schaaleffecten

Tijdens deze studie werden de proeven steeds uitgevoerd op zeer kleine schaal. Bij de twee dimensionale proeven hadden de taluds hoogtes van ongeveer 25cm, de zuigputten bij de drie



dimensionale proeven hadden maximaal een diepte van 60cm. In werkelijkheid wordt een zuigput slechts economisch rendabel als ze een diepte van een tiental meter heeft. Tijdens zuigproeven in het Veersche meer heeft men enkele effecten waargenomen die op de kleine schaal van de laboproeven niet werden waargenomen.

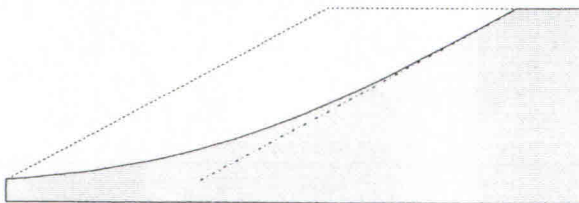
Het zand dat via de actieve walletjes van de rand van de zuigput afregent, stroomt via deze wand naar beneden. Dit gebeurt in een fijne laag juist boven de wand van de zuigput. Tijdens het naar beneden schuiven zal het zand de wand van de zuigput gaan eroderen met als gevolg dat er extra zand wordt losgemaakt. Op de figuur stellen de volle lijnen de toestand met erosie voor, de streeplijnen de toestand die zou bekomen worden door strikte toepassing van de walletjes theorie.



*Figuur 98: De gevolgen van erosie verschijnselen op de wallen.*

Hoe dieper men in de put komt hoe meer zand er door deze erosie zal losgemaakt worden. Vanaf een bepaalde diepte werd deze erosie zelfs de grootste leverancier van zand – in plaats van de walletjes.

We kunnen dus besluiten dat om de productie van een zuigput te berekenen we de put in twee delen moeten opsplitsen. In het bovenste deel van de put zal de dichtheid van de zandstroom die over put rand schuurt laag zijn. In deze zone moet de zandproductie van de put aan de hand van de walletjes theorie berekend worden. Hoe dieper we in de put komen, hoe dichter de densiteit van de zandstroom wordt omdat, het zand van een groter aantal wallen aanwezig is, en omdat de diameter van de put kleiner wordt waardoor het zand steeds over een kleiner wordend oppervlak moet stromen. In deze zone moet de productie van de put bepaald worden door de erosie van de zandstroom. De putproductie moet dus berekend worden aan de hand van een erosietheorie. Het is duidelijk dat de walletjestheorie hier niet meer geldig zal zijn.



*Figuur 99: De gevolgen van erosie verschijnselen op de finale vorm van de put.*

Op figuur 99 zien we in volle lijn de uiteindelijke putvorm, indien er erosieverschijnselen optreden, in stippellijn zien we de putvorm indien we alleen walletjes beschouwen. We zien dat de erosie voor een duidelijke verhoging van het volume geproduceerde zand zal zorgen.

### 11.8. Mors

In de paragraaf 8.3.2. wordt het begrip mors geïntroduceerd. De mors is het verlies aan productie in een horizontale zuigput omdat de buis zich verplaatst. Het zand dat te laat de bodem van de put bereikt wordt niet opgezogen. Om de mors te beperken wordt een criterium gegeven dat de verhouding van de translatiesnelheid van de buis tot de walsnelheid beperkt. In het criterium zouden eigenlijk ook de diepte van de put, de uiteindelijke helling van de wanden van de put en de ruwheid van de korrels moeten tussenkomen. In deze studie was het onmogelijk de invloed van deze parameters na te gaan wegens het ontbreken van eender welk gegeven in verband met de mors.

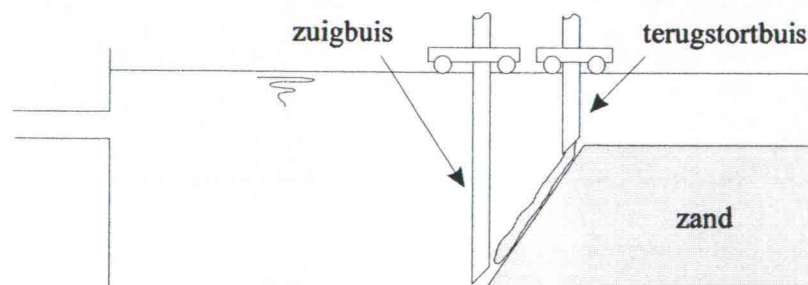
### 11.9. Berekeningsschema

In het berekeningsschema voor de walsnelheid – paragraaf 7.10., pagina 80 – worden alle zanden in drie groepen ingedeeld. De grenzen tussen deze verschillende groepen zijn zeer arbitrair getrokken. Het gebrek aan gronden die zich rond deze grenzen bevonden maakte het onmogelijk deze grenzen nauwkeurig te trekken. De gebruikte waarden in het schema moeten niet als absolute waarden maar eerder als richtwaarden geïnterpreteerd worden.

De empirische formules die gevonden werden blijken goede waarden te leveren voor uniforme zanden. Om deze formules ook bruikbaar te maken voor niet uniforme zanden moest eraan gesleuteld worden met een correctiefactor  $\chi_d$ . Omdat de meeste zandgronden die in de natuur voorkomen niet-uniform zijn, zouden de bekomen resultaten op hun veralgemeenbaarheid moeten getest worden. Zeker wat de uitdrukking van de correctiefactor  $\chi_d$  betreft.

### 11.10. Richtlijnen voor verder onderzoek

Hoewel deze studie tot aanvaardbare resultaten komt bij de berekening van de walsnelheid blijven vele vragen nog onbeantwoord. Het probleem met – waarschijnlijk – het grootste economische belang is dat van de erosie van de putwanden. Momenteel is hierover nog niets bekend. Het onderzoek naar de effecten van de erosie kan in twee grote domeinen worden onderverdeeld. Ten eerste moet worden onderzocht vanaf welke dichtheid van de zandstroom over het talud de walletjestheorie niet meer geldig is. Aan de hand van dit criterium kan men dan de zuigput in twee delen opsplitsen: bovenaan het gedeelte waar de zandproductie van de walletjes komt, onderaan het gedeelte waar de productie door erosie tot stand wordt gebracht. Ten tweede moet er onderzocht worden welke zandproductie de erosie geeft, zodat de totale productie van de put kan berekend worden.



Figuur 100: De terugstort opstelling.

Dit zou kunnen onderzocht worden met een twee dimensionale opstelling waar men bovenaan het talud een hoeveelheid zand stort om zo een dichtheidsstroom boven het talud tot stand te brengen. De voorgestelde opstelling is afgebeeld op de figuur 100.

Een tweede – en tevens economisch zeer belangrijk – niet echt opgelost probleem, is dit van het ontstaan van afschuivingen. Voor dit probleem moet een criterium opgesteld worden dat zeker met de volgende parameters rekening houdt:  $v_v$ ,  $v_w$ ,  $\varphi$ ,  $\beta$  en de vorm van de korrels. Het zou kunnen opgesteld worden door twee dimensionale proeven uit te voeren waarbij de translatiesnelheid van de buis stapsgewijs wordt verhoogd, zodat men bij een bepaalde snelheid afschuivingen realiseert. Tussen de verschillende versnellingen van de buis laat men genoeg tijd zodat het volledige talud dezelfde helling kan aannemen.

Tijdens deze reeks proeven zou men ook uitdrukkingen voor de berekening van de hoek  $\varphi$  kunnen opstellen, aangezien men de gegevens bezit omtrent de korrelvormen. Op het einde van elke proef kan de buis iets voor het einde van de bak gestopt worden zodat men een talud met hoek  $\varphi$  creëert.

In de andere paragrafen van het elfde hoofdstuk kunnen nog andere mogelijke onderwerpen voor onderzoek gevonden worden maar de drie hierboven vermelde – erosie, afschuivingen en wrijvingshoek – zijn degene die het grootste economisch voordeel kunnen opleveren.

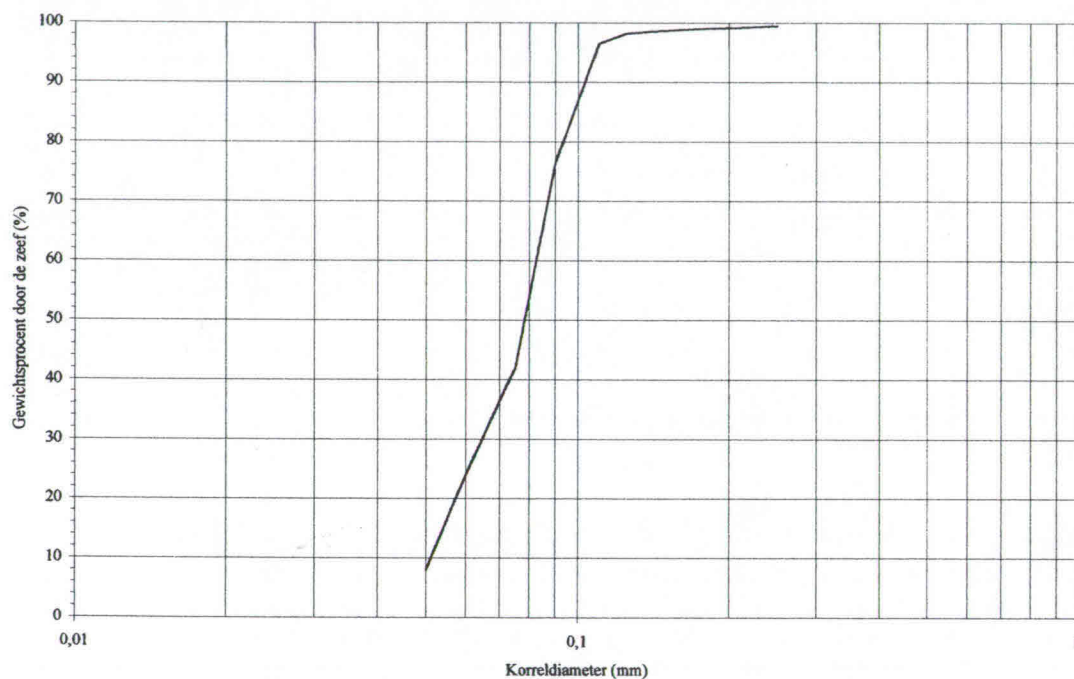
## Hoofdstuk 12: Geotechnische gegevens

### 12.1. Gezeefd zand 80µm

d (mm)	% door zeef
0,05	8
0,06	24
0,075	42
0,09	76,5
0,11	96,5
0,125	98,2
0,15	98,7
0,175	99
0,21	99,2
0,25	99,5

$d_{10}$	51 µm
$d_{40}$	73 µm
$d_{50}$	78 µm
$d_{60}$	83 µm
$d_{90}$	104 µm
$k^*$	0,07 mm/s
$n^*$	48 %
$\varphi$	32 °
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	1,63 -

Tabel 70: Geotechnische gegevens – 80µm zand.

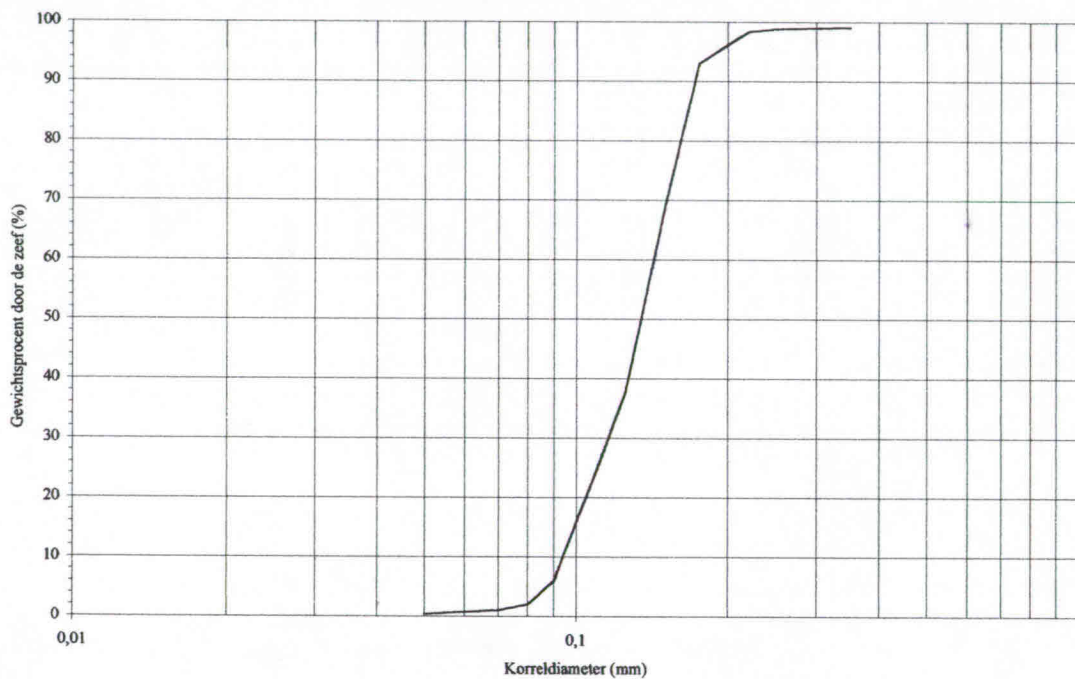


Figuur 101: Granulometrische curve – 80µm zand.

12.2. Duinzand 140 $\mu\text{m}$ 

d (mm)	% door zeef
0,05	0,4
0,07	1
0,08	2
0,09	6
0,11	25
0,125	38
0,15	69
0,175	93
0,22	98,3
0,25	98,8
0,35	99,1

$d_{10}$	94 $\mu\text{m}$
$d_{40}$	127 $\mu\text{m}$
$d_{50}$	135 $\mu\text{m}$
$d_{60}$	143 $\mu\text{m}$
$d_{90}$	172 $\mu\text{m}$
$k^*$	0,18 mm/s
$n^*$	45,3 %
$\varphi$	32 °
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	1,52 -

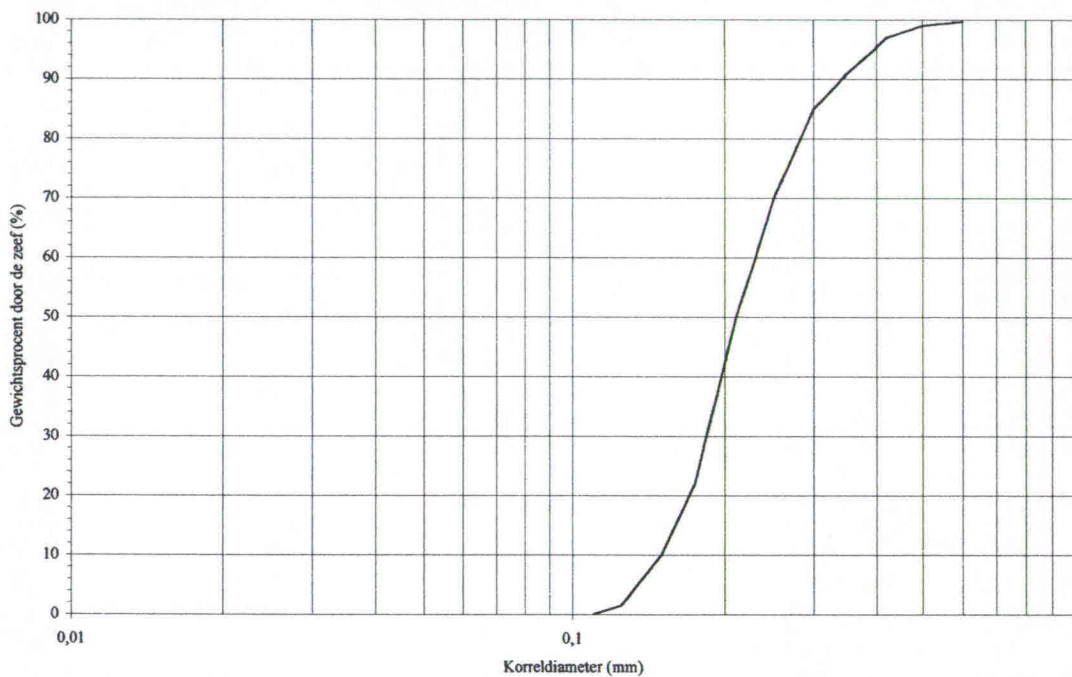
Tabel 71: Geotechnische gegevens – 140 $\mu\text{m}$  zand.Figuur 102: Granulometrische curve – 140 $\mu\text{m}$  zand.

**12.3. Duinzand 210 $\mu$ m**

d (mm)	% door zeef
0,11	0,11
0,125	1,5
0,15	10
0,175	22
0,21	50
0,25	70
0,3	85
0,35	91
0,42	97
0,5	99
0,6	99,7

$d_{10}$	150 $\mu$ m
$d_{40}$	198 $\mu$ m
$d_{50}$	210 $\mu$ m
$d_{60}$	230 $\mu$ m
$d_{90}$	342 $\mu$ m
$k^*$	0,38 mm/s
$n^*$	43,7 %
$\phi$	32 °
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	1,53 -

Tabel 72: Geotechnische gegevens – 210 $\mu$ m zand.



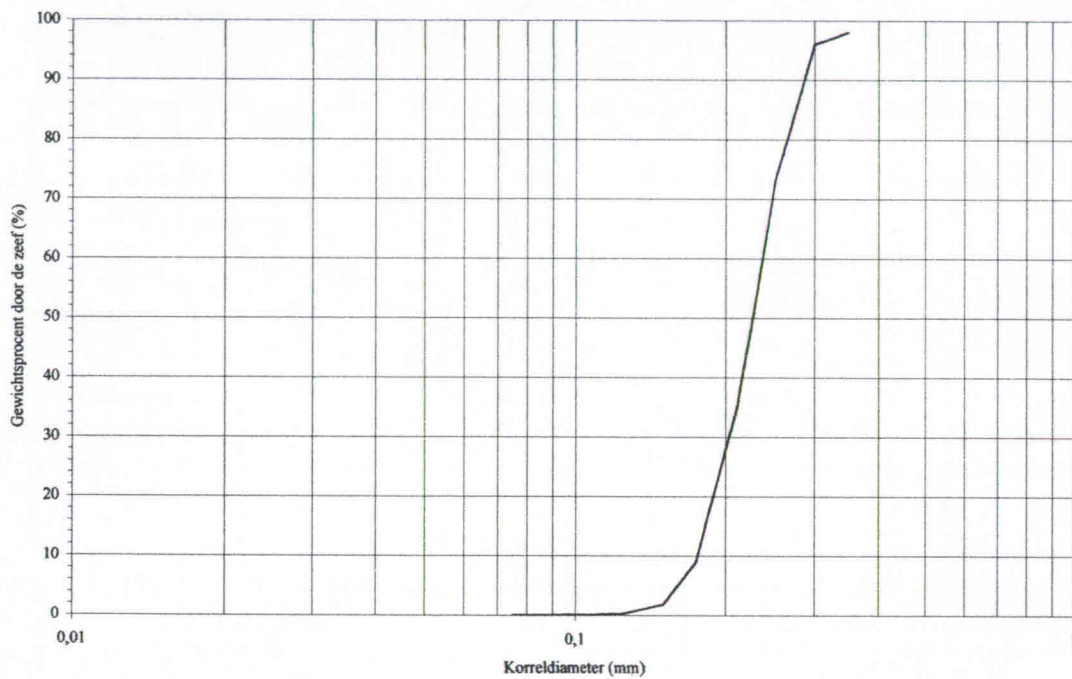
Figuur 103: Granulometrische curve – 210 $\mu$ m zand.

12.4. Glasparels 230µm

d (mm)	% door zeef
0,075	0,075
0,09	0,08
0,11	0,2
0,125	0,3
0,15	1,8
0,175	9
0,21	35
0,25	73
0,3	96
0,35	98

$d_{10}$	176 µm
$d_{40}$	215 µm
$d_{50}$	226 µm
$d_{60}$	236 µm
$d_{90}$	287 µm
$k^*$	0,5 mm/s
$n^*$	43,5 %
$\varphi$	22 °
$\gamma_s$	19,4 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	1,34 -

Tabel 73: Geotechnische gegevens – 230µm glasparels.



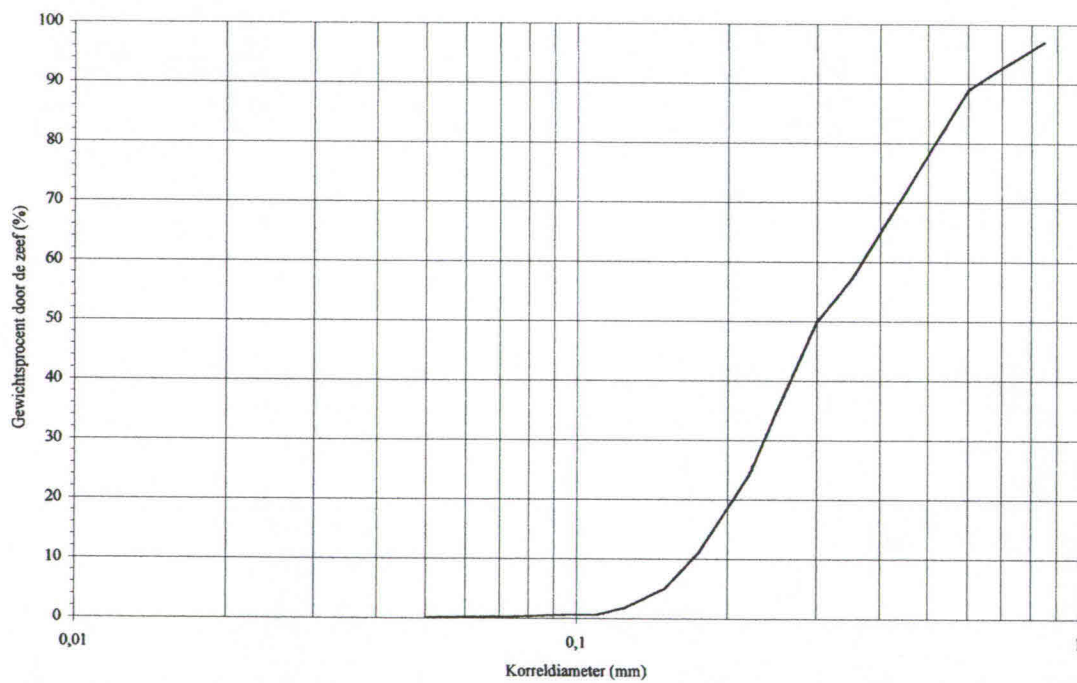
Figuur 104: Granulometrische curve – 230µm glasparels.

**12.5. Metselzand 300µm**

d (mm)	% door zeef
0,05	0,15
0,075	0,3
0,09	0,6
0,11	0,7
0,125	1,8
0,15	5
0,175	11
0,22	24
0,25	35
0,3	50
0,35	57
0,42	68
0,5	78
0,6	89
0,71	93
0,85	97

$d_{10}$	171 µm
$d_{40}$	267 µm
$d_{50}$	300 µm
$d_{60}$	369 µm
$d_{90}$	628 µm
$k^*$	0,7 mm/s
$n^*$	43,3 %
$\varphi$	32 °
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	2,16 -

Tabel 74: Geotechnische gegevens – 300µm zand.



Figuur 105: Granulometrische curve – 300µm zand.

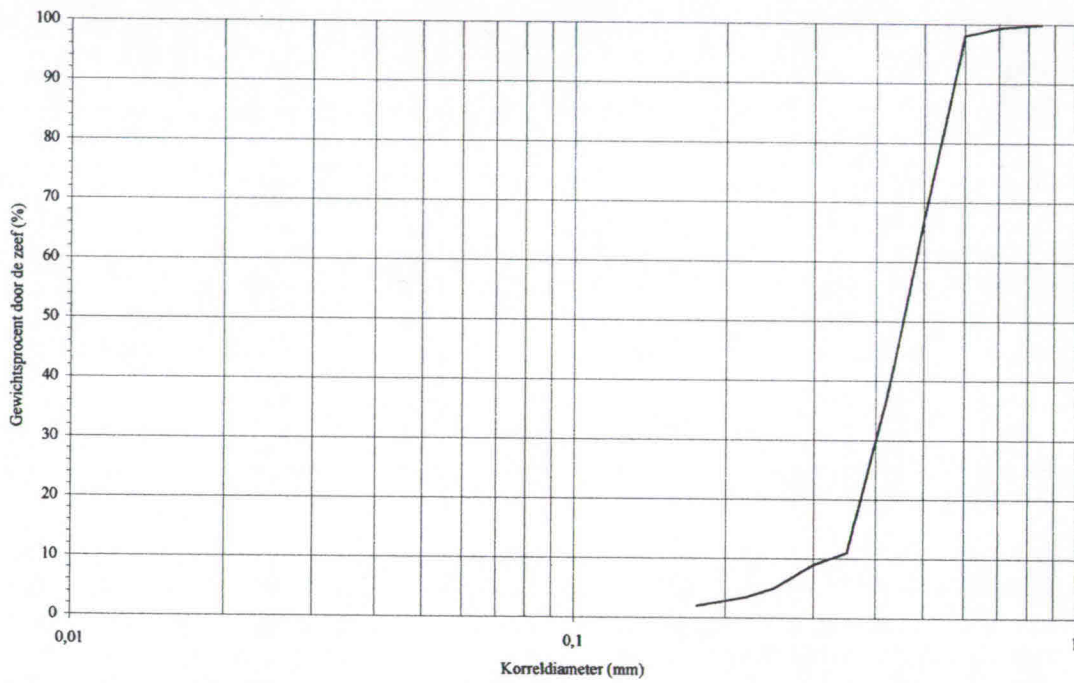


12.6. Rivierzand 450µm

d (mm)	% door zeef
0,175	2
0,22	3,5
0,25	5
0,3	9
0,35	11
0,42	37
0,5	67
0,6	98
0,71	99,4
0,85	99,9

$d_{10}$	325 µm
$d_{40}$	428 µm
$d_{50}$	455 µm
$d_{60}$	481 µm
$d_{90}$	574 µm
$k^*$	1,94 mm/s
$n^*$	42,4 %
$\phi$	34 °
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	1,48 -

Tabel 75: Geotechnische gegevens – 450µm zand.



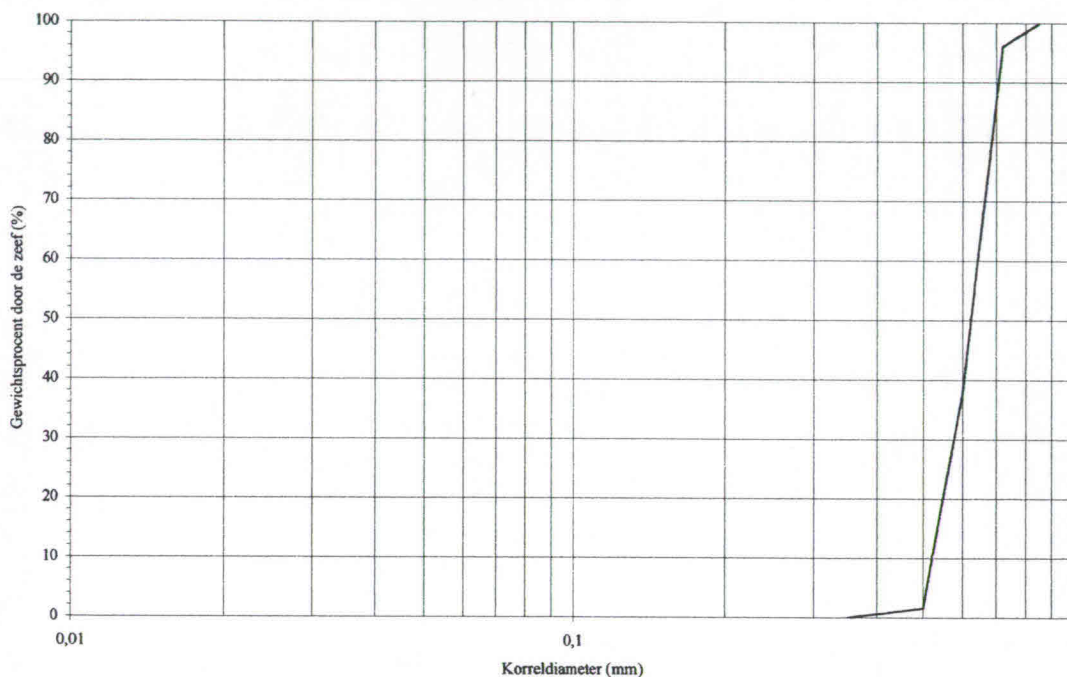
Figuur 106: Granulometrische curve – 450µm zand.

**12.7. Rivierzand 620 $\mu$ m**

d (mm)	% door zeef
0,35	0,05
0,42	0,8
0,5	1,6
0,6	38
0,72	96
0,85	99,9

$d_{10}$	523 $\mu$ m
$d_{40}$	604 $\mu$ m
$d_{50}$	620 $\mu$ m
$d_{60}$	646 $\mu$ m
$d_{90}$	708 $\mu$ m
$\phi$	34 $^{\circ}$
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	1,24 -

Tabel 76: Geotechnische gegevens – 620 $\mu$ m zand.



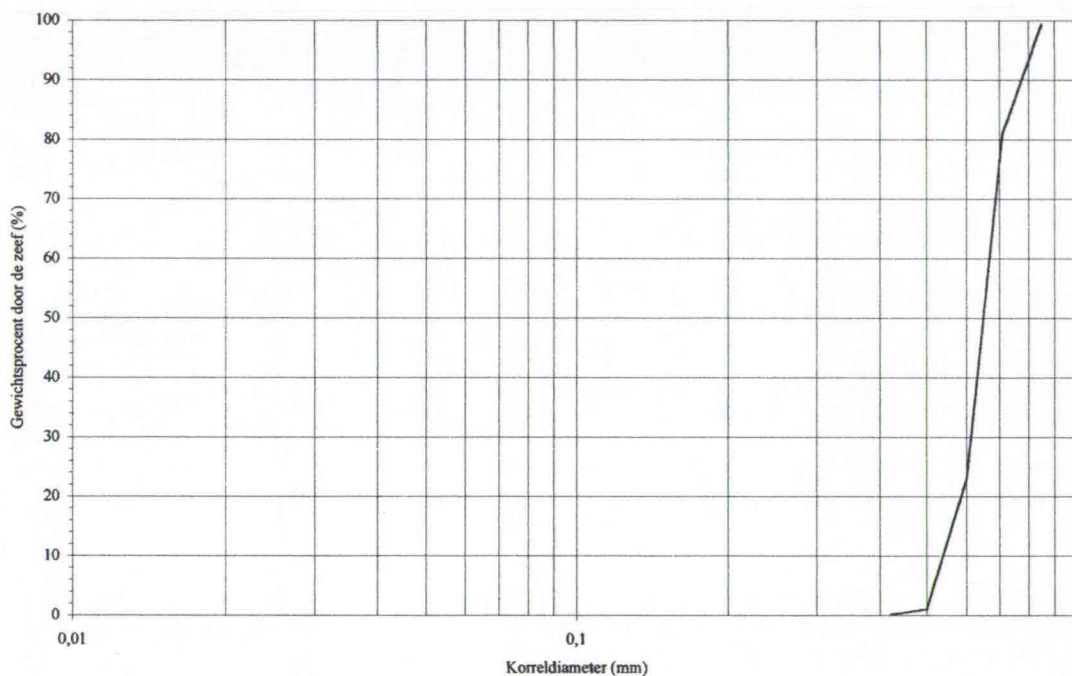
Figuur 107: Granulometrische curve – 620 $\mu$ m zand.

**12.8. Rivierzand 650 $\mu$ m**

d (mm)	% door zeef
0,42	0,2
0,5	1
0,6	23
0,71	81
0,85	99,4

$d_{10}$	541 $\mu$ m
$d_{40}$	632 $\mu$ m
$d_{50}$	651 $\mu$ m
$d_{60}$	670 $\mu$ m
$d_{90}$	778 $\mu$ m
$k^*$	4,5 mm/s
$n^*$	42 %
$\varphi$	34 °
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
$U_c$	1,24 -

Tabel 77: Geotechnische gegevens – 650 $\mu$ m zand.

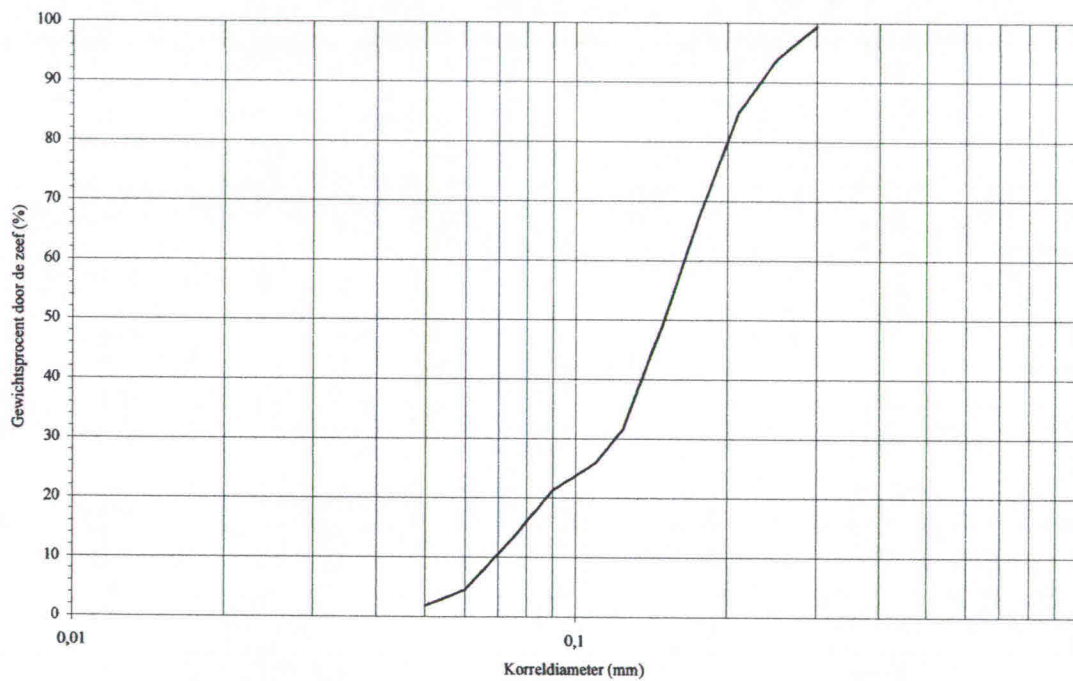


Figuur 108: Granulometrische curve – 650 $\mu$ m zand.

12.9. Gemengd zand 75% (210 $\mu\text{m}$ ) – 25% (80 $\mu\text{m}$ )

d (mm)	% door zeef	$d_{10}$	69 $\mu\text{m}$
0,05	1,8	$d_{40}$	137 $\mu\text{m}$
0,06	4,5	$d_{50}$	150 $\mu\text{m}$
0,075	13,3	$d_{60}$	165 $\mu\text{m}$
0,09	21,3	$d_{90}$	233 $\mu\text{m}$
0,11	26	$k^*$	0,2 mm/s
0,125	31,6	$n^*$	45,0 %
0,15	49,7	$\phi$	32 °
0,175	66,9	$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
0,21	84,9	$U_c$	2,39 -
0,25	93,9		
0,3	99,4		

Tabel 78: Geotechnische gegevens – 75-25 gemengd zand.

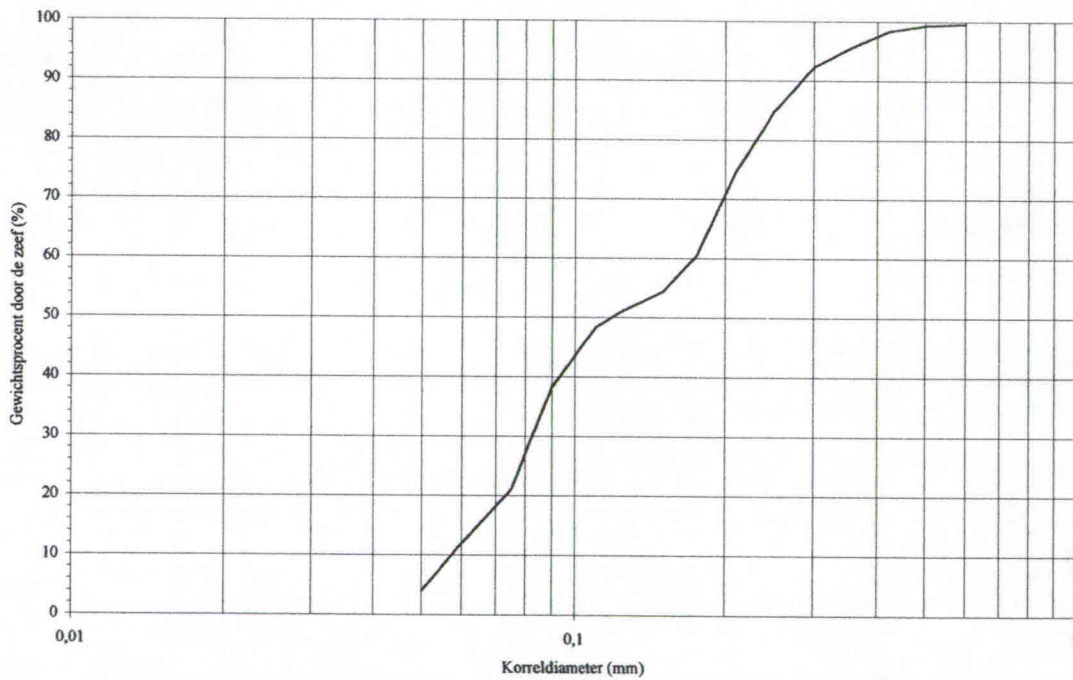


Figuur 109: Granulometrische curve – 75-25 gemengd zand.

12.10. Gemengd zand 50% (210 $\mu\text{m}$ ) – 50% (80 $\mu\text{m}$ )

d (mm)	% door zeef	$d_{10}$	58 $\mu\text{m}$
0,05	4	$d_{40}$	93 $\mu\text{m}$
0,06	12	$d_{50}$	119 $\mu\text{m}$
0,075	21	$d_{60}$	173 $\mu\text{m}$
0,09	38,3	$d_{90}$	285 $\mu\text{m}$
0,11	48,3	$k^*$	0,12 mm/s
0,125	51,2	$n^*$	46,5 %
0,15	54,4	$\varphi$	32 °
0,175	60,5	$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
0,21	74,6	$U_c$	2,98 -
0,25	84,8		
0,3	92,3		
0,35	95,3		
0,42	98,3		
0,5	99,3		
0,6	99,6		

Tabel 79: Geotechnische gegevens – 50-50 gemengd zand.

Figuur 110: Granulometrische curve – 50-50 $\mu\text{m}$  gemengd zand.

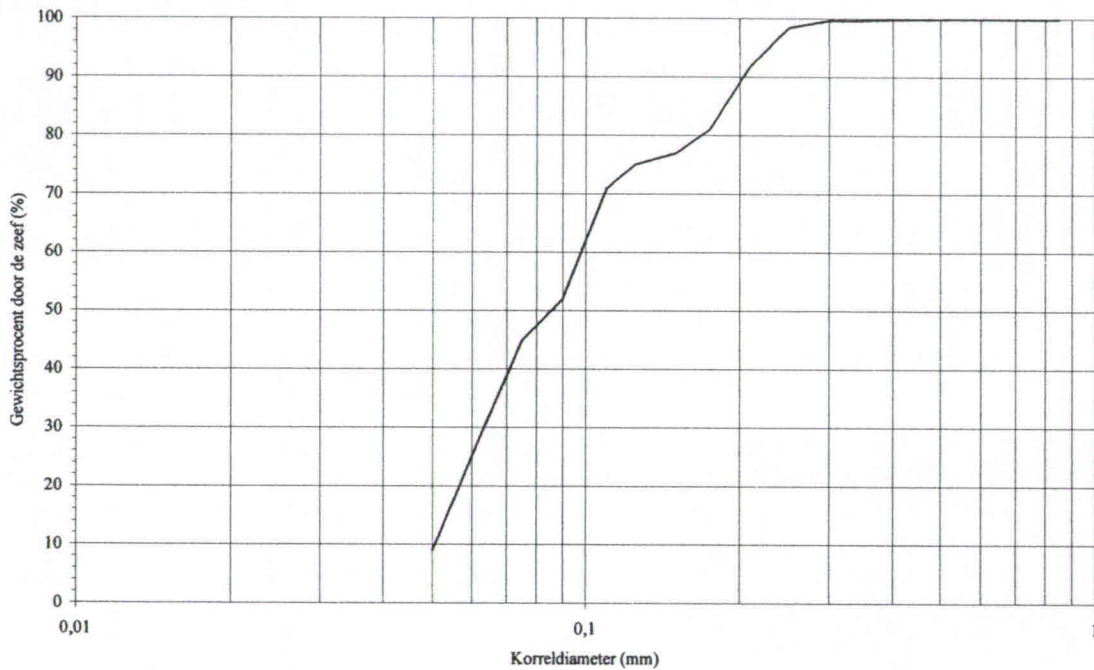
12.11. Gemengd zand 25% (210 $\mu$ m) – 75% (80 $\mu$ m)

d (mm)	% door zeef
0,05	9
0,075	45
0,09	52
0,11	71
0,125	75
0,15	77
0,175	81
0,21	92
0,25	98,4
0,3	99,6
0,35	99,7
0,42	99,9
0,85	99,95

d <sub>10</sub>	51 $\mu$ m
d <sub>40</sub>	72 $\mu$ m
d <sub>50</sub>	86 $\mu$ m
d <sub>60</sub>	107 $\mu$ m
d <sub>90</sub>	204 $\mu$ m
k <sub>s</sub> *	0,2 mm/s
n <sub>s</sub> *	45 %
$\phi$	32 °
$\gamma_s$	26,5 kN/m <sup>3</sup>
U <sub>c</sub>	2,10 -

x 10<sup>0</sup>

Tabel 80: Geotechnische gegevens – 25-75 gemengd zand.



Figuur 111: Granulometrische curve – 25-75 $\mu$ m zand.

**Hoofdstuk 13: Bibliografie**

Auteur	Jaar	Titel	Editie	Plaats	Uitgever
Adihardjo R.	1971	Zuigbaarheid van Zand, Rapport twee dimensionale proeven	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Biamond C. Verbeek A.	1966	Het zuigproces	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Booy N.	1970	Over zandzuigen	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Breusers H.	1969	Zuigbaarheid van Zand, Rapport modelonderzoek	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Breusers H.	1971	Zuigbaarheid van zand, Rapport drie dimensionale proeven	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Breusers H.	1971	Zuigbaarheid van zand, Rapport bresproeven	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Breusers H.	1965	Proeven met zand en glasparels	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Breusers H.	1967	Zuigputvorm en productie bij verticaal zuigen	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Breusers H.	1968	Doorlaatbaarheidsproeven	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Rhee C., Van	1988	Bresprocessen tijden het zuigen van zand, experimenteel verslag	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Groot M., De	1988	Grondmechanisch verslag van bresproeven	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Grondmecha nica Delft
Rhee C., Van	1989	Bresprocessen tijdens het zuigen van zand	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Groot M., De	1989	Grondmechanisch meetverslag van bresproeven op middelgrof zand	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Breusers, H. Heijnen W. Posthumus L.	1970	Enkele noties over bressen	1 <sup>ste</sup>	Delft	Delft Hydraulics
Nagaraj T.S.	1993	Principles of testing soils, rocks and concrete	2 <sup>de</sup>	New York	Wiley & Sons
Goris T.	1996	Toegepaste hydraulica in de burgerlijke bouwkunde	1 <sup>ste</sup>	Brussel	K.M.S.
Bray R.N. Bates A.D. Land J.M.	1997	Dredging, a handbook for engineers	2 <sup>de</sup>	London	Arnold
Powrie W.	1997	Soil mechanics: concepts and applications	1 <sup>ste</sup>	London	Chapman & Hall
Atkinson J.	1993	An introduction to the mechanics of soils and foundations	1 <sup>ste</sup>	London	McGraw-Hill





