

WIT 13

VERSLAG AFSTUDEERWERK

VAKGROEP KUSTWATERBOUWKUNDE

ONTGRONDING ONDER PIJP

E.F.P. JANSEN

JULI 1981

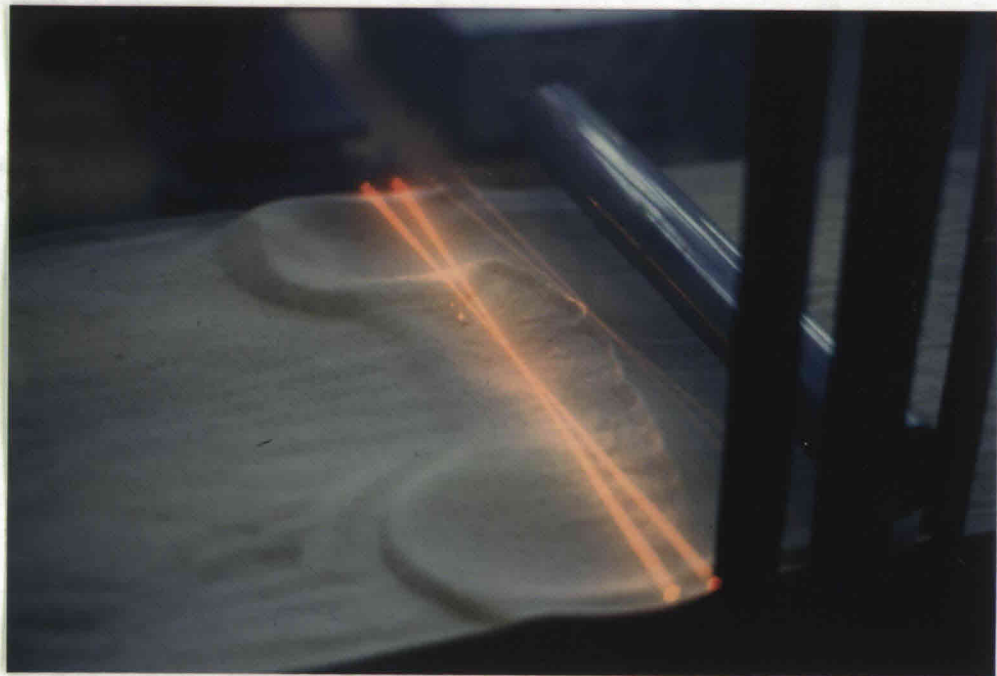
VERSLAG AFSTUDEERWERK

VAKGROEP KUSTWATERBOUWKUNDE

Modelonderzoek naar stroming en ontgroning in de omgeving van een pijp, gesitueerd nabij de zandbodem en geplaatst dwars op de stroomrichting.

E.F.P. Jansen  
augustus 1981







INHOUDSOPGAVE

Hst		blz
1.	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	1
2.	INLEIDING	2
3.	UITGANGSPUNTEN	4
4.	DOEL ONDERZOEK	7
5.	ONDERZOEK - ALGEMEEN	9
6.	ONDERZOEK - EERSTE GEDEELTE	25
7.	ONDERZOEK - TWEEDE GEDEELTE - POTENTIALAALSTROMING	35
8.	ONDERZOEK - DERDE GEDEELTE	40
9.	ALGEMENE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	49
	LITERATUURLIJST	51

### Lijst van gebruikte symbolen

a	- afstand tot hart van pijp op stroom en as pijp
A	- M-S
C	- Chezy-ruwheidswaarde
df	- frinch afstand
D	- diameter pijp
D-PIJP	- diameter pijp
D-INIT	- afstand onderkant pijp tot oorspronkelijke bodem
D50	- korreldiameter waarvoor geldt dat 50% van de korrels kleiner is
g	- zwaartekrachtsversnelling (9,81 m/s )
h	- waterdiepte
k	- equivalente bodenruwheid
M	- afstand referentievlak tot hart van pijp
$q_0$	- debiet onder pijp
$q_H$	- debiet in ongestoorde profiel afgesneden door hart van pijp
$q_{rep}$	- debiet bepaald uit gemeten snelheidsprofiel
S	- afstand referentievlak tot scheidingsvlak
v	- stroomsnelheid
$\bar{v}$	- gemiddelde stroomsnelheid
$\bar{v}_0$	- gemiddelde snelheid onder de pijp
$v_1$	- snelheid aan pijp wand - onderkant van pijp
$v_2$	- snelheid aan pijp wand - bovenkant pijp
$v_a$	- snelheid als functie van a
$v_z$	- snelheid als functie van z
$v_*$	- bodemschuifspanningsnelheid
z	- afstand tot bodem
$z_0$	- $k/33$
$z_b$	- $k.e/33$
K	- constante van Von Karman (=0.4)
$\gamma$	- spleethoogte



## HOOFDSTUK 1

### SAMENVATTING EN CONCLUSIES

#### 1.1 Samenvatting

Dit ontwerp omvat een model onderzoek naar het stroombeeld rond een pijp, die horizontaal is opgesteld nabij een zandbed en die dwars op de stroomrichting geplaatst is.

Het stroombeeld is eenparig. *of permanent?*  
Onderzocht is in hoeverre de potentiaalstromingstheorie toepasbaar is en of het resultaat hiervan bruikbaar is om een ontgrondingsdiepte te berekenen.

Tevens is onderzocht of er verband bestaat tussen de diverse parameters die het stroombeeld beheersen enerzijds en de resulterende grootheden zoals debiet onder de pijp, ontgrondingsdiepte, gemiddelde snelheid onder de pijp en de maximale snelheden aan de pijpwand boven en onder de pijp. Met name de hoogteligging van het scheidingsvlak van de debieten boven en onder de pijp in het ongestoorde snelheidsprofiel heeft hierbij bijzondere aandacht gekregen.

#### 1.2 Conclusies

Het onderzoek naar het stroombeeld heeft een vrij gedetailleerd beeld opgeleverd van zaken zoals equidebietbanen, loslaatpunten, neren en de turbulente verschijnselen van de stroming.

De toepassing van de potentiaalstromingstheorie leidt tot snelheden onder een vlak boven de pijp die een orde twee keer zo groot zijn als de snelheden die gemeten zijn in de goot.



Uit de resultaten die naar voren zijn gekomen uit het gedeelte van het onderzoek die erop gericht was empirische verbanden te leggen, zijn geen harde conclusies te trekken. Wel zijn er tendensen aan te wijzen, maar het is gebleken dat het aantal parameters die een rol spelen zo groot is, dat een uitgebreider onderzoek vereist is om te komen tot grafieken of empirische formules die de hoogte van het scheidingsvlak en/of de ontgrondingsdiepte geven als functie van deze parameters.

## HOOFDSTUK 2

### INLEIDING

De komst van de zeemijnbouw, en de sterke ontwikkeling die de offshore-techniek dientengevolge heeft doorgemaakt, heeft onder andere tot gevolg dat er behoefte is ontstaan naar inzicht en kennis van de problematiek die zich voordoet bij het leggen van pijpen op de zeebodem.

Aanvankelijk zijn de pijpen zo goed mogelijk volledig ondersteund op het zandbed aangebracht en zodanig verzwaard en verankerd dat verwacht kan worden dat deze situatie zich zou handhaven.

De laatste jaren zijn echter ook technieken ontwikkeld die het mogelijk maken de pijp in een gegraven sleuf te leggen.

De pijp kan daarna weer afgedekt worden met zand, ofwel door natuurlijke aanzanding of op kunstmatige wijze.

Zowel bij pijpen gelegd op de zeebodem als bij pijpen vlak onder de zeebodem kan het volgende probleem zich voordoen.

Door het verplaatsen van megaribbels op de zeebodem kan een gedeelte van de pijp volkomen vrij te komen hangen.

De pijp gaat zich gedragen als een aan twee zijden scharnierend opgelegde of ingeklemde balk.

De stroming van het water kan dan vat krijgen op het gat onder de pijp waardoor het gat gaat uitschuren (fig. 1).



fig. 1

Dit heeft tot gevolg dat de vrije hoogte onder de pijp groter wordt, maar het kan tevens tot gevolg hebben dat de inklemmingen verder van elkaar af te komen liggen.

Dit heeft tot gevolg dat de overspanning groter wordt, zelfs zo groot dat de pijp gaat doorhangen.

Hierdoor wordt de vrije hoogte onder de pijp verkleind waardoor het sediment transport weer toeneemt.

Dit proces kan zich doorzetten en kan er uiteindelijk toe leiden (vaak in combinatie met trillingsverschijnselen) dat de betonmantel van de pijp kapot gaat of zelfs dat de pijp breekt.

Indien er scheuren in de betonmantel ontstaan zullen korrosieprocessen zich in versneld tempo voltrekken en valt de betonmantel van de pijp af dan kan de pijp gaan opdrijven met alle gevolgen vandien.

In 1973 is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica door de afstudeerders Van Ast en De Boer onderzoek verricht naar de ontgronding die ontstaat t.g.v. stroming, golven en een combinatie van beiden.

Dit onderzoek was er onder andere op gericht een berekeningswijze voor de ontgrondingsdiepte te toetsen.

Deze berekeningswijze is onder meer gebaseerd op de aanname dat de stroming rond de pijp te beschrijven valt met de potentiaalstromingstheorie.

De geldigheid van deze aanname zal in dit verslag aan de orde komen en de resultaten van het onderzoek van 1973 zullen worden vergeleken met de resultaten van dit onderzoek.

Van het ontgrondingsverschijnsel is weinig bekend.

Mede door de aanwezigheid van de Laser-Doppler-apparatuur, waarmee men in staat is zowel in grootte als wat de plaats betreft snelheden met grote nauwkeurigheid te meten, is binnen de vakgroep besloten het verschijnsel fundamenteel en uitgebreid te onderzoeken.



Dat het onderzoek zich over verscheidene afstudeerperioden zou uitstrekken, was met het oog op de complexe aard van het probleem min of meer bekend. Het is dan ook zeker niet zo, dat dit verslag het verschijnsel volledig verklaart of beschrijft, of een berekeningsmethode verschaft.

Dit rapport doet verslag van de onderzoeken en activiteiten die eerste aanzet vormen tot verder onderzoek en moet vooral licht werpen op zaken zoals in welke richting het onderzoek moet worden gestuurd, waar de knelpunten zitten bij het modelonderzoek, welke theorieën het best op het fysisch model aansluiten e.d. De resultaten zijn een richtlijn voor welke wegen moeten worden ingeslagen en ook, voor welke niet moeten worden ingeslagen.

### HOOFDSTUK 3

#### UITGANGSPUNTEN

Uitgangspunten zijn geweest de pijp vlak boven de zeebodem en de potentiaalstromingstheorie.

Hierbij tekenen de eerste moeilijkheden zich al af.

Vooraf in het geval dat de bodem gaat bewegen en een ontgroning optreedt, wordt de beschrijving met potentiaalstromingstheorie niet alleen aanzienlijk ingewikkelder, ook de geldigheid van de potentiaalstroming kan in twijfel worden getrokken. Het hele ontgrondingsproces speelt zich immers af in het gebied waarbij het ongestoorde aanstroingsnelheidsprofiel sterke gradienten vertoont.

Naarmate de stroomsnelheid lager is wordt de potentiaalstromingsoplossing beter benaderd, maar wat betreft de laboratoriumopstelling en stellig ook het prototype zal de stroomsnelheid onder de pijp dan zo laag zijn, dat helemaal geen ontgroning meer optreedt.

De literatuur verschaft op dit onderwerp zeer weinig informatie. Praktisch al het onderzoek op dit gebied is gedaan in de richting van de krachten en trillingen, de ontgroning is veelal buiten beschouwing gelaten.

Alleen rond 1973 is er onderzoek in deze richting verricht. De afstudeerders Van Ast en De Boer van de vakgroep Kustwaterbouwkunde hebben in hun afstudeerwerk /1/ een methode ontwikkeld om de ontgrondingsdiepte te berekenen.

Bij deze methode zijn echter drie aannamen gedaan, waarvan bij dit onderzoek al snel bleek, dat deze slechts in uitzonderingsgevallen geldig zijn.



Deze aannamen zijn :

1. In de buurt van de bodem bij het ongestoorde profiel heeft de gradient van de snelheidsvertikaal  $\frac{dv}{dz}$  dezelfde waarde als in de buurt van de bodem onder de pijp op dezelfde hoogte.
2. Op de helft van de hoogte van het boven de bodem uitstekende deel van de pijp wordt bij het ongestoorde profiel dat deel van het debiet afgesneden wat onder de pijp doorgaat.
3. Bij het bepalen van de snelheidsvertikaal onder de pijp in de buurt van de pijpwand mag gebruik worden gemaakt van de potentiaalstromingstheorie.

Anderson?

Zeker bij kleine waarden van spleethoogte onder de pijp zijn de gradienten onder de pijp kleiner dan bij het ongestoorde profiel. Ook blijkt het scheidingsvlak zelden precies op de hoogte van het hart van de pijp te liggen.

Ten eerste was de geldigheid van de aannamen van Van Ast en De Boer tijdens hun onderzoek, waarvan een gedeelte zich in het laboratorium heeft afgespeeld, moeilijk na te gaan, omdat men toen nog niet beschikte over de Laser-Doppler apparatuur.

Ondanks hun minder sterke uitgangspunten echter, zijn hun resultaten redelijk te noemen.

Wat betreft het scheidingsvlak rijst natuurlijk snel de vraag waar dit dan wel ligt en wat de invloed van de variabelen hierop is.

Na een eerste oriënterende fase zijn de volgende punten naar voren gekomen :

1. In de literatuur is weinig te vinden op het gebied van ontgroning en stroming rond pijp.
2. De nauwkeurigheid van de potentiaalstromingstheorie is niet groot omdat wrijvingsinvloeden een te grote rol spelen.
3. Beschrijving van het probleem met de vergelijkingen van Navier Stokes zou leiden tot een computerprogramma van zodanige omvang, dat hier vooralsnog vanaf werd gezien.
4. Er is gedacht aan toepassing van de impulsvergelijking om de gemiddelde snelheid onder de buis te bepalen. Hiervoor moet echter de uitwendige reactiekracht op de pijp bekend zijn.  
Bovendien is het de vraag of het drukverloop onder de pijp hydrostatisch is, hetgeen voorwaarde is voor het opstellen van de vergelijking.
5. Mede met het oog op de beschikbaarheid van goot en apparatuur leek het verstandig eerst een inleidend laboratoriumonderzoek te verrichten om een beter inzicht van het geheel te krijgen.

Hoe het onderzoek zich in grote lijn heeft, wordt in het volgende hoofdstuk uiteengezet.

## HOOFDSTUK 4

### OVERZICHT VAN HET ONDERZOEK

Het onderzoek, zowel wat betreft de laboratoriumproeven als de verwerking van de resultaten heeft zich in grote lijn als volgt afgespeeld :

#### EERSTE DEEL

1. vastleggen ongestoorde snelheidsprofielen,  
 $\bar{v} = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$  m/s, vaste bodem.
2. vastleggen snelheidsvertikaal door hart van pijp  
 $\bar{v} = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$  m/s, vaste bodem ; pijpdiameter 40 en 50 mm, drie verschillende afstanden pijp - oorspronkelijk bodem.
3. vastleggen algemeen stroombeeld in de omgeving van de pijp,  $\bar{v} = 0.20$  m/s, zandbodem, drie verschillende afstanden pijp - oorspronkelijke bodem.

#### TWEEDE DEEL

1. modelonderzoek met elektrische analogen voor potentiaalstroming.
2. vergelijking met gemeten snelheidsprofiel.

#### DERDE DEEL

1. vastleggen snelheidsprofiel onder en vlak boven de pijp in vertikaal door hart van pijp,  $\bar{v} = 0.20$  en  $0.25$  m/s, zandbodem, afstand pijp - oorspronkelijke bodem met kleine stapjes verkleind, verschillende pijpruwheid.
2. onderzoek naar verbanden tussen de variabelen.



Als variabelen die bij dit probleem een rol spelen komen naar voren :

1. zandsoort, D50, spreiding
2. stroomsnelheid, bodemruwheid
3. pijpdiameter
4. pijpruwheid
5. afstand pijp tot bodem
6. tijd

Binnen het kader van dit onderzoek zijn onderzocht de effecten die zich onder invloed van constante stroomsnelheid voordoen.

In een volgend onderzoek zou specifiek het effect van golven en aansluitend de combinatie van stromingen en golven moeten worden onderzocht.

## HOOFDSTUK 5

### HET ONDERZOEK - ALGEMEEN

#### 5.1 Inleiding

Het onderzoek binnen dit afstudeerwerk, is gedaan in de Leidse goot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica, TH Delft.

De snelheden op de verschillende punten binnen het gebied van interesse zijn gedaan met behulp van de beschikbare Laser-Doppler apparatuur, eerste volgens de "forward scatter"-methode, later met de "reference beam"-methode.

Geruime tijd en aandacht zijn besteed aan een goede bedieningsmethodiek en de gevoeligheidsproblematiek van deze apparatuur.

Hierbij moet worden aangetekend dat het wat de ervaring met de Laser-Doppler aanvankelijk nogal te kort schoot. Gebrekkig werkende electronica en gevoeligheid voor minder voor de hand liggende factoren hebben tot vertragingen geleid.

Bij het opstellen van het onderzoekprogramma leek het voor de hand te liggen een zo groot mogelijk aantal variabelen in te brengen en de verschillende combinaties door te meten.

Aanvankelijk is gedacht aan :

1. pijpdiameters  $D$  30 mm, 40 mm en 50 mm.
2. stroomsnelheden  $\bar{v} = 0.1, 0.5, 0.20$  en  $0.25$  m/s.
3. initiele afstand onderkant pijp tot bodem :  
 $D, 1/2 D$  en  $0$  ( $D =$  diameter pijp).
4. eventueel nog verschillende gemiddelde korreldiameter.



De punten 1 t/m 3 leiden tot 36 combinaties. Hierop is tijdens het onderzoek aanzienlijk ingekort, want het door-meten van alle situaties bleek veel tijdrovender dan aanvankelijk werd gedacht.

Alleen het punt van de verschillende stroomsnelheden is binnen dit kader redelijk aan bod gekomen. Later is afstand pijp - bodem met kleine stapjes verkleind met vaste pijp-diameter en slechts bij twee stroomsnelheden. Tenslotte is het geval bekeken waarbij de pijp ruw is gemaakt.

Het onderzoek in het laboratorium heeft zich in twee fasen afgespeeld :

1. Ongestoorde snelheidsprofielen en snelheidsprofielen van pijp en vaste bodem zijn vastgelegd. Snelheidsprofielen in verschillende raaien met gevarieerde pijp-bodem afstand en zandbed zijn vastgelegd met het oog op het gewenste inzicht in het stroombeeld.
2. Ongestoorde profielen zijn vastgelegd en met een zand-bodem, aansluitend snelheidsvertikalen door het hart van de pijp vastgelegd, waarbij de initiele afstand pijp-bodem stapsgewijs is verkleind.  
Hierbij is beoogd informatie te krijgen over scheidingsvlak- en ontgrondingsdiepte-ontwikkeling.

Alle gegevens zijn in tabelvorm vastgelegd en later in grafieken uitgewerkt. Tevens zijn van vele situaties foto's gemaakt, waarvan enkele zijn terug te vinden in het verslag. De foto's verschaffen geen grootheden, maar geven informatie over ribbelvorm, ontgrondingsvorm e.d.

De originele grafieken van de snelheidsmetingen opgesteld aan de hand van de meetwaarden zijn in een aparte map beschikbaar, die zich bevindt in de bibliotheek van de Vakgroep Kustwaterbouwkunde.

5.2 Definitie-schets

In fig. 2 is een definitie-schets gegeven waarin de grootheden vermeld zijn zoals ze in de tekst en later in de bewerkingen gebruikt zijn.

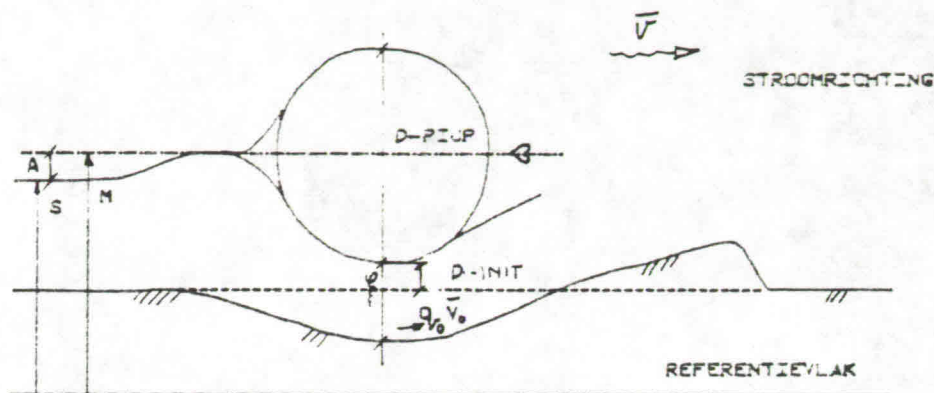


fig. 2

Hierin stellen de symbolen voor :

- D-PIJP - pijpdiameter.
- D-INIT - afstand onderkant pijp-oorspronkelijke bodemhoogte.
- $\phi$  - afstand onderkant pijp-ontgrondingsbodenniveau.
- q - debiet onder de pijp.
- v - gemiddelde snelheid onder de pijp.
- M - afstand referentievlak - hart van pijp.
- S - afstand referentievlak - scheidingsvlak debieten.
- A - M-S
- v - gemiddelde stroomsnelheid in goot.

### 5.3 De goot

De modelproeven van het pijp-ontgrondingsonderzoek zijn gedaan in de Leidse goot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica, TH Delft.

Deze goot is ca. 14 m lang heeft een breedte van 50 cm en een maximale diepte van 40 cm. Het maximale debiet waarbij bij deze diepte nog een redelijk snelheidsprofiel ontstaat is ca. 60 liter per seconde hetgeen overeenkomt met een gemiddelde snelheid van 0.3 m/s.

De goot heeft glazen wanden, de ruiten zijn 1 m lang en is rondom goed vrij, hetgeen van belang is i.v.m. het gebruik van de Laser-Doppler snelheidsmeting. Wel moesten bij de voorbereiding ter hoogte van waar gedacht werd de pijp te plaatsen vier schone ruiten (twee aan weerskanten) geplaatst worden, omdat het gebruik van de Laser-Doppler dit vereist. Ook is de bodem van de goot opgehoogd om de vaste bodem boven de onderkant van de ruit uit te krijgen. Met dit doel is er een gladde betonlaag van 5 cm ingestort over de hele lengte van de goot. Zodoende konden snelheden tot vlak boven de bodem gemeten worden.

Debieten zijn eerst op globale wijze m.b.v. een stopwatch vastgelegd, later met meetflens - manometer combinatie hetgeen betere controle op constantheid mogelijk maakt. De klep aan het eind van de goot is ook min of meer willekeurig ingesteld, maar mocht daarna niet meer versteld worden, omdat dit niet het debiet maar wel de gemiddelde stroomsnelheid beïnvloedt (en tevens waterdiepte).



5.4

Het snelheidsprofiel

Er is bij het werken in de goot vanuit gegaan, dat ook bij grotere stroomsnelheid, het snelheidsprofiel zich over  $2/3$  lengte van de goot zodanig heeft ontwikkeld, dat het niet meer zal veranderen. Het is echter niet zo dat een gemeten snelheidsprofiel in het midden van de goot geïntegreerd precies het ingestelde debiet per eenheid van breedte oplevert. Dit komt door de wandwrijvingsinvloeden. Er is dan ook alleen gerekend met de debieten bepaald uit snelheidsprofielen gemeten in het midden van de goot, terwijl het ingestelde debiet als grootte in de berekening niet terugkomt.

De snelheid verloopt in de breedte ongeveer als in fig. 3 is aangegeven.

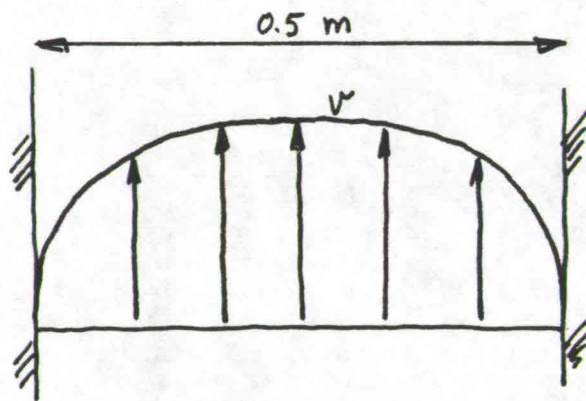


fig. 3

Alle metingen zijn zo goed mogelijk in het midden van de goot uitgevoerd, waarbij werd verondersteld dat er over tenminste 10 cm geen snelheidsverloop over de breedte t.g.v. de wanden is. Veelal is het verloop van de snelheidsprofielen een afname van de snelheid te zien in de buurt van het oppervlak. Dit is een verschijnsel wat zich ook bij rivieren voordoet. De meningen over het ontstaan hiervan lopen nogal uiteen.

Er is geopperd dit te verklaren uit de luchtwrijving maar dit lijkt erg onwaarschijnlijk.

De meest voor de hand liggende verklaring voor het verschijnsel is het ontstaan van wervels in de hoeken bij de bodem van de goot als aangegeven in fig. 4.

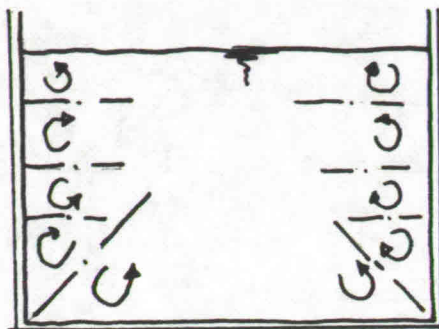


fig. 4

De wervels zetten zich in zgn. cellen door naar het oppervlak, maar aan het oppervlak wordt deze celwerking onderbroken. Hierdoor treedt een verandering in de schuifspanning op waardoor de snelheid aan het oppervlak terugloopt.

#### 5.5 De pijp

Bij het modelonderzoek is pvc-pijp met een diameter van 30, 40 en 50 mm gebruikt. Indien op juiste lengte afgezaagd, valt de pijp klemvast te plaatsen tussen de glaswanden.

De hoogte van de pijp en de gewenste horizontale ligging loodrecht op de stroomrichting zijn gesteld met behulp van de zichtbare lichtbundel van de Laser-Doppler.

De hoogte van de lichtbundel t.o.v. het referentievlak (betonvloer van de goot) is voor dit doel geijkt en kan op ieder moment worden afgelezen.



Tot serieuze metingen met pijp van 30 mm is het niet gekomen, omdat bij deze diameter de ontgrondingen zo klein zijn dat het werken met de Laser-Doppler moeilijkheden oplevert. Het merendeel der metingen is met 40 mm pijp gedaan, na aanvankelijk met 50 mm te hebben gewerkt. De pijpdiameter mag in verhouding tot de waterdiepte niet te groot gekozen worden omdat dan het hele stroombeeld boven en vooral voor de pijp te veel verstoord wordt. Dit is de reden voor de reductie van de pijpdiameter van 50 naar 40 mm.

De in de laatste fase toegepaste ruwe pijp is opgeruwd door hetzelfde zand als dat voor de bodem op de pijp te lijmen.

#### 5.6 Het zand

Nadat de waarnemingen met vaste bodem zijn beëindigd is er een zandlaag van 5 mm dikte in de goot gelegd. Het zand had een  $D_{50}$  van *190  $\mu\text{m}$* . De korrelverdeling is weergegeven in de tabel van bijlage 1.

Is het zand in een gladde laag aangebracht, dan geldt als waarde voor de bodemruwheid de  $D_{50}$  zijnde *190  $\mu\text{m}$* . Omdat als maximum snelheid 0.3 m/s in de goot moet worden aangehouden, kan geen grotere  $D_{50}$  worden toegepast omdat dan van transport nauwelijks sprake zou zijn. Een te kleine  $D_{50}$  zou weer snel een te groot transport te weeg brengen, waardoor het werken met de Laser-Doppler zeer bemoeilijkt wordt. De korrelverdeling als variabele invoeren blijkt dus uit praktische overwegingen een moeilijk te realiseren zaak.

Onderzocht is hoe de ribbelhoogte zich ontwikkeld uitgaande van een vlakke bodem als de gemiddelde snelheid vanaf 0.10 m/s stapsgewijs wordt opgevoerd.

Tot en met 0.20 m/s blijft de bodem volkomen vlak, geen transport en dientengevolge een bodemruwheid van  $k \approx 0.2$  m. Bij een snelheid van 0.25 m/s echter is het transport al zo groot, dat na verloop van tijd de ribbelhoogte is aangegroeid tot 2 - 4 cm. In een klein omslag-gebied treedt een grote bodemruwheidsverandering op.

In het prototype zijn echter vele tussenvormen denkbaar die op de gebruikte schaal moeilijk te onderzoeken zijn.

De beste oplossing voor dit probleem is de proeven uit te voeren in een diepere goot, waarin een geleidelijkere toename van de bodemschuifspanning kan worden bewerkstelligd.

#### 5.7 De Laser-Doppler

Voor het meten van snelheden en turbulente schuifspanningen in water staan in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica twee systemen ter beschikking, het TSI-systeem vervaardigd in de Verenigde Staten en het TPD-systeem dat in Delft bij TNO is ontwikkeld.

Voor uitgebreide informatie over de werking en de bediening van de systemen wordt verwezen naar het afstudeerverslag /2/.

Hier zal worden volstaan met een korte uitleg van de opstelling en het meetprincipe.

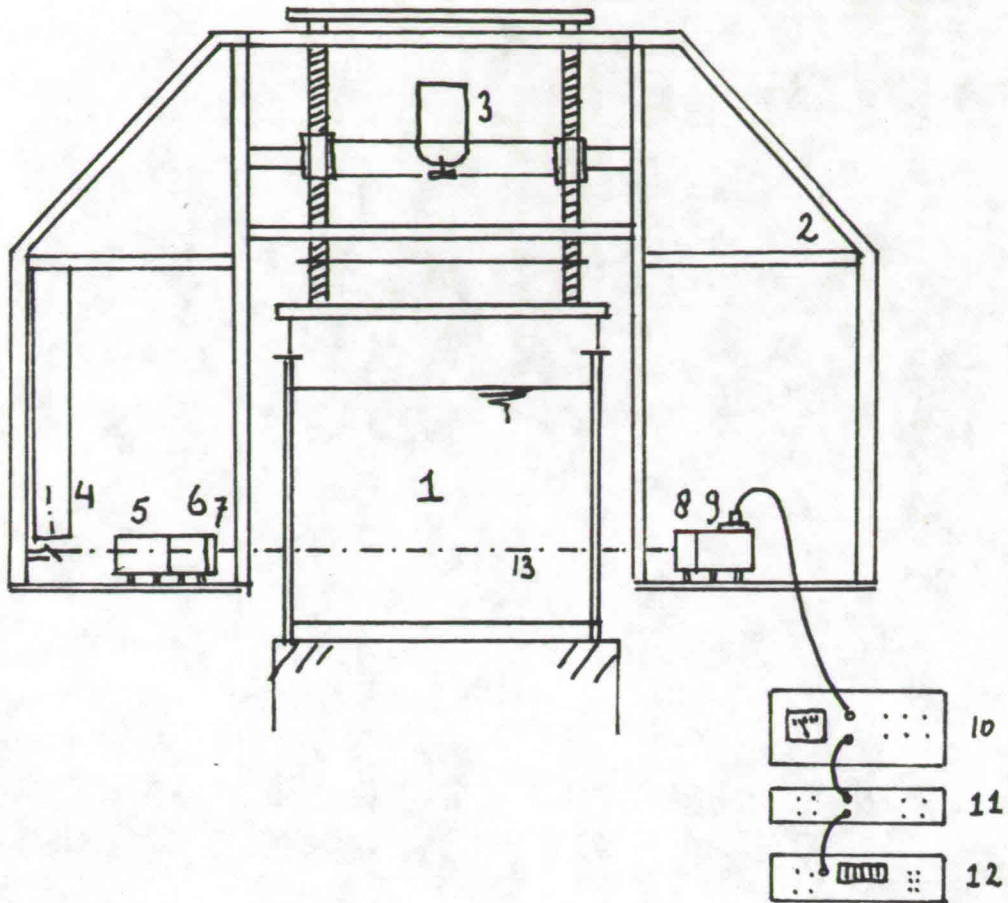


fig. 5

- |                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| 1. goot in dwarsdoorsnede      | 7. lens            |
| 2. meetbrug                    | 8. lens            |
| 3. motor voor hoogteinstelling | 9. photomultiplier |
| 4. laserlamp met spiegel       | 10. tracker        |
| 5. beamsplitter                | 11. filter         |
| 6. bragcel                     | 12. counter        |
|                                | 13. lichtstraal    |



Getekend in fig. 5 is de opstelling van het TSI-systeem met "forward scatter"-methode.

De beweegbare meetbrug waarop de apparatuur is bevestigd maakt het mogelijk in ieder gewenst punt in de goot de snelheid te meten.

Het werkingsprincipe is als volgt.

De laserlamp 4 zendt een nauwe bundel licht uit waarvan de frequentie constant en bekend is. De straal wordt door een spiegeltje van vertikale in horizontale richting omgebogen en gaat dan "beamsplitter" 5 binnen. Hier wordt de straal omgezet in twee sterke evenwijdige (op bekende afstand) lichtstralen. Deze stralen worden door de "bragcel" gevoerd (toelichting volgt). De twee stralen worden door objectief 7 weer naar elkaar toegebogen en in hun snijpunt kan de snelheid worden bepaald. De twee snijdende stralen zullen een interferentie patroon met lichte en donkere gebieden opwekken hetgeen in figuur 6 schetsmatig is aangegeven.



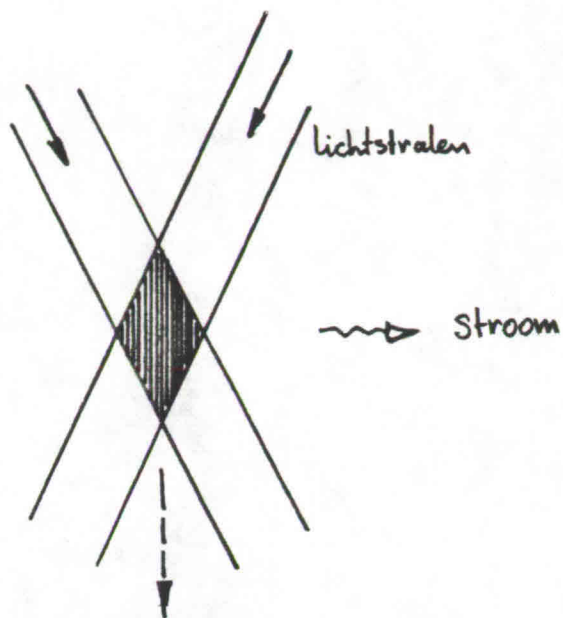


fig. 6

De afstand tussen twee lichte gebieden, de "frinch-afstand"  $df$ , is bekend.

Schiet er nu een vuil of vet deeltje in het water door dit interferentie gebied dan zal dit deeltje met de ontmoetingsfrequentie, d.w.z. de frequentie waarbij het deeltje beurtelings licht en donker wordt, licht gaan uitzenden in alle richtingen, en ook in de richting van de gestreepte pijl in fig. 6, hetgeen de richting is van objectief 8.

Objectief 8 wordt zo ingesteld dat het brandpunt precies op het meetpunt valt. Het licht van het deeltje wordt opgevangen en in de photomultiplier 9 omgezet in een elektrisch signaal en versterkt. Dit signaal wordt doorgegeven aan de "tracker" 10, die er een sinus naast ocsileert.

Dit gegenereerde signaal kan worden afgelezen en de grootte hiervan is direct een maat voor de snelheid van het water in het meetvolume. Als het water echter stilstaat bewegen de deeltjes nauwelijks en er wordt zeer weinig licht uitgezonden omdat de ontmoetingsfrequentie te laag is. Om dit probleem op te lossen is de "bragcel" na de "beamsplitter" geplaatst. Deze geeft het interferentie patroon een faseverschuiving, d.w.z. het loopt tegen de stroomrichting in. Nu wordt dus ook in stilstaand water een waarde afgelezen, waarop de positieve snelheden worden gesuperponeerd. Ook is men in staat in beperkte mate negatieve snelheden af te lezen. Door het vlak van de stralen vertikaal te zetten, kunnen verticale snelheden worden gemeten en tevens kunnen horizontale en verticale snelheden tegelijk worden gemeten. Bij dit onderzoek zijn alleen horizontale snelheden vastgelegd.

5.8 Gevoeligheid van de Laser-Doppler

Zoals al eerder is vermeld hebben zich tijdens het onderzoek nogal wat moeilijkheden voorgedaan.

Ten eerste bleek een van de twee aanwezige TSI-trackers onbruikbaar. Het uitlijnen van de lenzen en lichtstralen was tijdrovend en tijdens het onderzoek moest de uitlijning vaak worden bijgesteld. Bij een verkeerde uitlijning en ook in de situaties dat bepaalde reflecties optreden, heeft de tracker snel de neiging om op ruis te gaan "tracken", hetgeen zeer verwarrend en vaak vertragend werkt.

Om de invloed van ongewenste reflecties zoveel mogelijk te beperken zijn de ruiten aan beide zijden zodanig afgeplakt dat alleen de gewenste stralen doorgelaten werden.

Een absoluut schone ruit (binnen en buiten) blijkt noodzakelijk. Verder vormt het zwevend transport een probleem. Als er zich te veel zand in het vlak van de Laserstralen bevindt, kan de tracker het signaal verliezen, omdat het steeds onderbroken wordt. Een zekere mate van signaalonderbreking is toelaatbaar, maar als er dichtbij de bodem gemeten wordt kan dit tot onjuiste afleeswaarden leiden.

De hoogte-instelnauwkeurigheid is ca. 0.5 mm. Vooral dicht bij de bodem is een kleinere stapgrootte wenselijk.

In bepaalde gevallen kan niet geheel tot aan de bodem gemeten worden. In het geval van een zandbodem met ribbels kan men slechts zolang zakken totdat men op de ribbelhoogte komt. Nu is het afhankelijk van waar ribbeltop en dal zich bevinden t.o.v. de stralen of men de stralen verder kan laten zakken of niet, hetgeen verschillende registraties geeft. Het gemiddelde snelheidsverloop tussen ribbelhoogte en gemiddelde bodem moet dus worden geschat. Een andere moeilijkheid is dat de ontgronding onder de pijp een holle vorm heeft.



Kiest men het meetvolume vlak boven het midden van deze ontgraving, dan is registratie niet mogelijk, omdat de stralen dan door de zandbodem worden onderbroken.

In fig. 7 wordt een ruimtelijke schets gegeven hetgeen een en ander verduidelijkt.

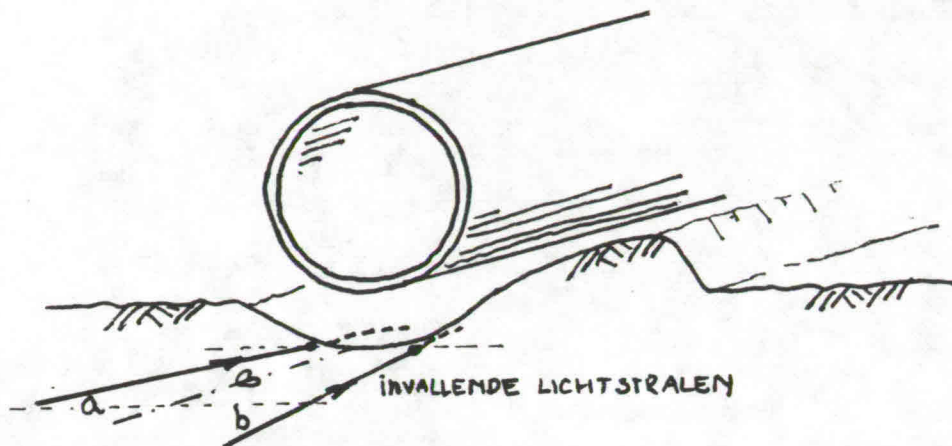


fig. 7

In fig. 7 zijn a. en b. invallende stralen in het horizontale vlak en het meetvolume zal altijd enige hoogte boven de bodem blijven. Ook hier moet dus het laatste (zeer belangrijke) deel van de snelheidskromme geschat worden. De ribbels en de relatief hoge stroomsnelheid in bepaalde gevallen hebben tot gevolg dat de snelheid in een bepaald punt van de goot niet erg constant is. Vooral bij de bodem is het stroombeeld en het transport vrij turbulent. Er moest dus naar een mogelijkheid worden gezocht de gemiddelde snelheid af te lezen.



In de tracker bevindt zich reeds een filter, waardoor de pieken en dalen gedempt werden.

Verder is het signaal hoog en laag frequent gefilterd met een externe filter. Hierna is de afgegeven spanning m.b.v. een integrator over een van te voren ingestelde tijd gesommeerd. Met de verkregen waarde kan dan de snelheid in m/s berekend worden.

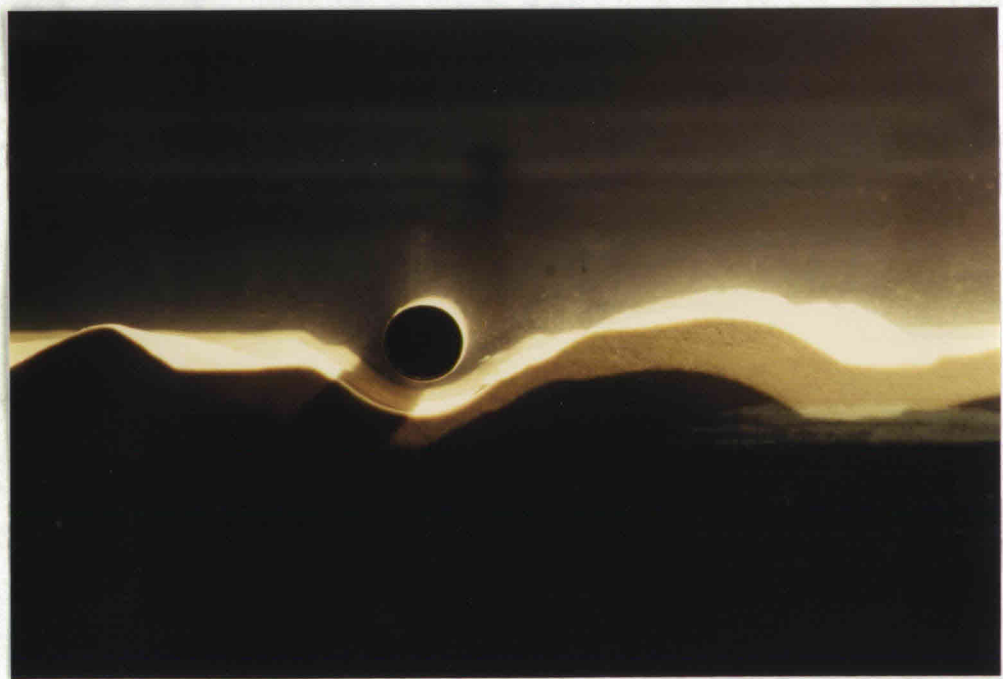
Bij een integratietijd van 90 sec. blijkt dat na elkaar gedane snelheidsmetingen bij stationaire stromingstoestand minder dan 10% van elkaar verschillen. Alleen dicht bij de bodem verschillen na elkaar gedane metingen meer van elkaar. Het is niet waarschijnlijk dat dit aan de integratietijd ligt, maar aan het hoge zandtransport wat een te hoge mate van lichtonderbreking veroorzaakt.

Over het geheel genomen blijkt het TSI-systeem matig te voldoen. Voor het laatste deel van het eerste onderzoek is gebruik gemaakt van het TPD-systeem met de "reference-beam"-methode. Bij deze methode gaat een hoofdstraal (referentie straal) recht door de goot. Een tweede zwakkere straal gaat er schuin doorheen en wordt aan de andere kant van de goot opgevangen. De verandering in frequentie is een maat voor de snelheid in het snijpunt van de twee stralen.

Dit systeem is veel minder gevoelig voor effecten als reflectie, ruis en voor de uitlijning en er valt veel vlotter mee te werken. Helaas bleek het TPD-systeem gereserveerd voor andere onderzoeken en was het moeilijk langere tijd aaneen de apparatuur te gebruiken.

Het is gebleken dat de gebruikte integrator enige afwijking vertoont en niet geheel lineair op het aangeboden signaal reageert. Het verdient aanbeveling dit stuk electronica te verbeteren of over te gaan op een "time-domain analyser."

Deze middelt automatisch het signaal over laatste 1, 10 of 100 seconden en laat deze waarde ieder moment zien. Na een bepaalde inspeeltijd zijn de grootste fluctuaties eruit en kan de spanning worden afgelezen die direct lineair met de snelheid correspondeert.





## HOOFDSTUK 6

### HET ONDERZOEK - EERSTE DEEL

#### 6.1 Het scheidingsvlak bij vaste bodem

Het laboratoriumonderzoek is begonnen met het vastleggen van een aantal ongestoorde snelheidsprofielen met een vaste bodem. De snelheden zijn met behulp van een stopwatch ingesteld. Op de bijlagen 2 t/m 5 zijn de snelheidsprofielen weergegeven behorende bij een gemiddelde snelheid ingesteld op respectievelijk 0.10, 0.15, 0.20 en 0.25 m/s.

Het blijkt dat de gemiddelde snelheden van de vier profielen afwijken van de ingestelde snelheden (0.108, 0.160, 0.209, 0.258 m/s). Dit vindt zijn oorzaak in het verloop van de snelheid over de breedte van de goot.

De afzonderlijke gevallen zullen verder aangeduid worden met 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 m/s hoewel dit dus niet exact de gemiddelde waarde vormt.

Er is van uit gegaan dat het snelheidsprofiel in het midden van de goot representatief is voor het stroombeeld dat zou zijn opgetreden in een oneindig brede goot. Dat de snelheden bij de verticale wanden teruglopen is in de beschouwingen genegeerd.

Het exacte debiet is niet geregistreerd, maar t.g.v. de invloed van de verticale wanden ook niet van belang.

Als er van wordt uitgegaan dat het snelheidsprofiel met enige nauwkeurigheid is vastgelegd dan wordt het "representatieve debiet" voor het midden van de goot vastgesteld uit integratie van het snelheidsprofiel (q-rep).

Dit is het debiet per eenheid van breedte indien in een oneindige brede goot een stroming zou zijn met het zelfde snelheidsprofiel als dat wat is gemeten.

De ongestoorde profielen zijn opgemeten om de volgende redenen :

- om inzicht te krijgen in het ongestoorde snelheidsverloop bij een vaste bodem,
- om vertrouwd te raken met de werking van de Laser-Doppler,
- om in staat te zijn naderhand de positie van het scheidingsvlak van de debieten boven en onder de pijp te bepalen.

De snelheidsprofielen van bijlage 2 t/m 5 zijn vergeleken met de theoretische snelheidsprofielen die bepaald zijn uit het representatieve debiet en de schatting van de equivalente bodemruwheid ( $k = 1$  mm).

Deze theoretische profielen zijn weergegeven in bijlage 6. Indien gemeten en berekende profielen met elkaar vergeleken worden blijkt dat tussen de bodem en een afstand van 15 cm van de bodem de gemeten en berekende profielen redelijke overeenkomsten vertonen.

Fig 7  
maat tot  
 $z = 10$  cm.

De afname van de snelheid naar het oppervlak is in het voorgaande reeds besproken in de beschouwing over de celwerking.

De gemeten snelheidsprofielen zijn tevens uitgezet op grafiekpapier met logaritmische schaalverdeling op de x-as (bijlage 7).

De Prandtl-Von Karman logaritmische schaalverdeling luidt :

$$v_z = v_* \ln \frac{z}{z_0} \quad (6.01)$$



waarin  $v_*$  de bodemschuifspanning voorstelt :

$$v_* = \frac{\bar{v} \sqrt{g}}{C} \quad (6.02)$$

en verder geldt :

$$z_0 = \frac{k}{33} \quad (6.03)$$

$$\text{en } C = 18 \log \frac{12h}{k} \quad (6.04)$$

waarin  $k$  de equivalente bodemruwheid voorstelt.

De lijnen van bijlage 7 snijden de x-as op de waarde die gelijk is aan  $z_0$ .

Met de gevonden waarde voor  $z_0$  kan nu een waarde voor  $k$  worden bepaald.

Het blijkt dat voor  $v = 0.10$  en  $0.15$  m/s de gevonden  $k$ -waarde goed overeenkomt met de geschatte ruwheidswaarde voor de goot ( $0.001$  m), die tevens toegepast is voor het bepalen van de grafiek van bijlage 6.

Voor de snelheden  $0.20$  en  $0.25$  m/s lopen de waarden voor  $z_0$  echter terug naar orde  $0.000005$  m.

Strikt genomen mag hier dus de logaritmische snelheidsverdeling niet meer mogen worden toegepast. De oorzaak van de afwijking is de toenemende invloed van de zijwand wrijving met toenemende gemiddelde snelheid, en wellicht is ook een oorzaak dat de stroming door de goot vanwege zijn beperkte lengte nog niet een evenwichtstoestand heeft bereikt wat betreft het snelheidsprofiel.

Hierop aansluitend zijn verscheidene situaties vastgelegd waarbij een gladde pijp boven de vaste bodem is aangebracht.



Iedere combinatie van pijpdiameter en afstand van pijp tot bodem is wederom gemeten met dezelfde vier gemiddelde stroomsnelheden (debieten) als bij de ongestoorde stromingsgevallen (bijlage 2 t/m 5).

De situaties zijn in de bijlagen vastgelegd volgens volgend schema :

Bijlage	Pijpdiameter		Snelheden
	D-PIJP	D-INIT	
8 t/m 11	50 mm	50 mm	10,15,20 en 25 cm/s
12 t/m 15	40 mm	20 mm	idem
16 t/m 19	40 mm	14 mm	idem

In het stukje snelheidsprofiel onder de pijp is telkens aangegeven wat het representatieve debiet per strekkende meter onder de pijp is. De waarde hiervan is bepaald d.m.v. integratie van het snelheidsprofiel over de diepte ( $q$ ).

Deze waarden zijn vergeleken met dat debiet van het ongestoorde snelheidsprofiel dat zich bevindt onder het niveau van het hart van de pijp, hetgeen verkregen wordt door onder dit niveau te integreren in de grafiek van ongestoorde stroom ( $q$ ).

Het resultaat hiervan is weergegeven in tabel 1.

D-PIJP (mm)	D-INIT (mm)	v (m/s)	q <sub>o</sub> (m/s)	q <sub>H</sub> (m/s)	q <sub>o</sub> /q <sub>H</sub> (m/s)
50	50	0.10	5.40	7.35	0.73
50	50	0.15	7.25	10.50	0.69
50	50	0.20	9.75	13.90	0.70
50	50	0.25	12.85	17.60	0.73
40	20	0.10	2.40	3.60	0.67
40	20	0.15	3.60	5.40	0.66
40	20	0.20	4.60	6.80	0.68
40	20	0.25	5.80	9.00	0.65
40	14	0.10	1.65	3.00	0.55
40	14	0.15	2.50	4.30	0.58
40	14	0.20	3.30	5.70	0.58
40	14	0.25	4.10	7.50	0.55

TABEL I

In tabel I stelt  $q_o$  het debiet onder de pijp voor en stelt  $q_H$  het debiet voor wat zich onder de hartlijn van de pijp in het ongestoorde snelheidsprofiel bevindt.

Uit de tabel blijkt dat  $q_o$  consequent een kleinere waarde heeft dan  $q_H$ . Verder blijkt dat  $q_o/q_H$  een redelijk constante waarde heeft voor de afzonderlijke combinatie van D-PIJP en D-INIT. Over het snelheidsverloop binnen zulk een combinatie is geen duidelijke tendens te ontdekken, hoewel hierbij dient worden opgemerkt dat indien het mogelijk zou zijn de waarden van de debieten op nauwkeuriger wijze vast te leggen op basis van nauwkeuriger snelheidsprofielen deze tendens waarschijnlijk wel zou blijken.

Vooralsnog lijkt de aanname dat  $q_o/q_H$  constant is voor een combinatie van D-PIJP en D-INIT redelijk.

Waarom?

Aan de tabel kunnen nog twee waarden worden toegevoegd. Indien D-INIT nul is wordt de waarde van  $q_0/q_H$  ook nul, onafhankelijk van D-PIJP, want er kan geen water meer onder de pijp door, terwijl  $q_H$  bij bepaalde pijpdiameter altijd een bepaalde waarde zal blijven behouden, (0.5 D).

Verder geldt dat, indien de wand zich op grote afstand bevindt (D-INIT wordt zeer groot t.a.v. D-PIJP),  $q_0/q_H$  de waarde 1 krijgt. Men zou kunnen stellen dat het stroombeeld in de buurt van de pijp de wand niet meer voelt en het water verdeelt zich gelijkmatig aan weerszijden van de pijp.

Zeer belangrijk is de opmerking dat het hier gaat om een vaste vlakke wand, er treedt dus geen ontgronding op.

Indien nu wordt verondersteld dat de waarde van  $q_0/q_H$  onafhankelijk is van de gemiddelde stroomsnelheid bij een bepaalde combinatie van D-PIJP en D-INIT, dan kan een grafiek worden samengesteld zoals is weergegeven in figuur 8.



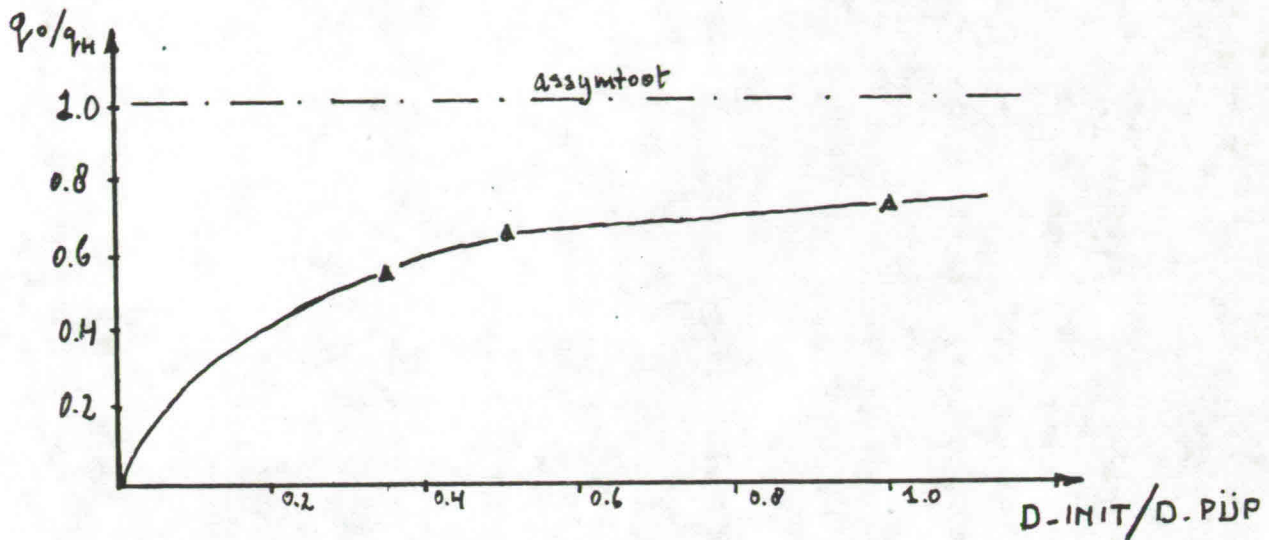


fig. 8

Het is waarschijnlijk gezien de vorm van de lijn die ontstaat dat deze lijn in punt (0,0) een vertikale assymtoot heeft.

*Het en de Boer :  
geen stellen met  
ontgronding ?*

Uit de grafiek blijkt dat bij vaste bodem een vrij grote waarde van  $D-INIT/D-PIJP$  vereist is eer men kan aannemen dat het debiet onder de pijp bepaald wordt door dat deel dat wordt afgesneden door het niveau van de hartlijn van de pijp.

## 6.2 Algemeen stroombeeld met zandbed

Na de metingen met vaste (betonnen) vlakke bodem is een zandbed ter dikte van 5 cm in de goot gebracht. Het zand heeft een gemiddelde korreldiameter van  $190 \mu m$  en de korrelverdeling is weergegeven op bijlage 1.

In het eerste gedeelte van de proevenserie zijn alle proeven met een zandbed verricht met een gemiddelde stroomsnelheid van 0.20 m/s.

Allereerst is met deze stroomsnelheid het ongestoorde snelheidsprofiel vastgelegd (bijlage 20). Bij deze snelheid treedt bij het gebruikte zand geen transport op.

Het snelheidsprofiel is tevens uitgezet op log-papier (bijlage 20a).

Hieruit volgt een  $z_0$  waarde (zie sectie 6.1) van

$0.017 \cdot 10^{-2}$  m. Dit geeft met formule 6.03 een  $k$  waarde van  $0.00056^m$ , hetgeen betekent dat er zand op de bodem zou liggen (geen ribbels) van  $\approx 100$  mm. Het zand heeft een  $D_{50}$  van  $\approx 200$  ~~mm~~ dus het profiel van bijlage 20 vormt een redelijk logaritmisch snelheidsprofiel over de onderste helft van de waterdiepte, dat goede overeenkomst vertoont met het theoretische snelheidsprofiel.

?  
met  $k = \frac{1}{2} D$ .  
??

Hierop aansluitend zijn een drietal stromingsgevallen onderzocht, allen met dezelfde pijpdiameter (40 mm) en stroomsnelheid (0.20 m/s), waarbij D-INIT (de afstand pijp-wand tot oorspronkelijk bodemniveau) achtereenvolgend de waarde had van 10 mm, 5 mm en 0 mm. Alvorens met stroming is begonnen is de bodem eerst geheel vlak gemaakt en is de pijp op nauwkeurige wijze op hoogte gesteld.

Hierna is gestroomd en snelheidsprofielen zijn pas vastgelegd nadat de ontgroning onder de pijp zich op zijn evenwichtswaarde heeft ingesteld.

In bijlagen 21 t/m 25 zijn de snelheidsprofielen weergegeven behorende bij de uitgangssituatie waarbij de spleet tussen pijp en oorspronkelijke bodem 10 mm bedroeg (D-INIT).



De plaats van de raaien waarin de snelheidsprofielen zijn vastgelegd is weergegeven in bijlage 37, waarbij tevens de afstanden tussen de respectievelijke raaien zijn weergegeven. De bijlagen 26 t/m 30 geven de snelheidsprofielen weer die horen bij de uitgangssituatie waarbij D-INIT 5 mm bedroeg. De plaats van deze raaien is aangegeven in bijlage 38. Tenslotte geven de bijlagen 31 t/m 36 de snelheidsprofielen behorende bij de uitgangssituatie waarbij de pijpwand een fractie boven de bodem lag (D-INIT = 0 mm). De plaats van deze raaien is aangegeven in bijlage 39.

Uit de profielen in de raaien vlak achter de pijp blijkt dat er negatieve snelheden optreden ter hoogte van het hart van de pijp en in raaien na de wal die wordt opgebouwd achter de ontgronding treden negatieve snelheden bij de bodem op.

Dit laatste is een gevolg van de neer die achter de wal ontstaat.

Op de bodem is tot het punt waar de stroom weer gaat aanliggen bij de bodem een permanente negatieve snelheid aanwezig.

De negatieve snelheid achter de pijp heeft echter een andere oorzaak.

Uit proefjes met kaliumpermanganaat-oplossing is gebleken dat er achter de pijp bij een stroomsnelheid van gemiddeld 0.20 m/s wervels ontstaan die loslaten en beurtelings bovenwaarts en onderwaarts draaien. Dat er in de snelheidsprofielen een negatieve snelheid verschijnt komt doordat in ieder punt waarin de snelheid bepaald is, de snelheid over 90 seconden gemiddeld is, terwijl momentaan t.g.v. het turbulente stroombeeld en de loslaatwervels afwisselend positieve en negatieve snelheden optreden.



De "stroomlijnen" die zijn aangegeven in de figuren van bijlage 37 t/m 39 zijn derhalve geen echte stroomlijnen maar netto equi-debietlijnen.

Deze lijnen zijn bepaald door een bepaald debiet in een raai aan te nemen en dan d.m.v. integratie in de andere raaien te bepalen over welke hoogte dit debiet zich doorzet stroomafwaarts.

Uit dit deel van het onderzoek is gebleken dat het geheel beheerst wordt door een zeer turbulent stroombeeld en dat de beschrijving met behulp van potentiaalstromingstheorie een zeer grove schematisatie vormt.

Verder blijkt dat ook bij een zandbodem het scheidingsvlak lager ligt dan het hart van de pijp (bijlage 20).

bijlage 37

HOOFDSTUK 7

POTENTIALAALSTROMING - TWEEDE DEEL

7.1 Aanpak berekeningswijze

In het afstudeerverslag van Van Ast en De Boer (1) wordt een berekeningswijze uiteengezet voor het bepalen van de ontgrondingsdiepte onder de pijp.

Voor het geval van de eenparige stroming luidt de globale aanpak als volgt. Het debiet dat onder de pijp doorgaat wordt gelijk gesteld aan het debiet dat in het ongestoorde profiel wordt afgesneden ter hoogte van het midden van het boven de bodem uitstekende deel van de pijp.

De snelheid aan de onderkant van de pijp dichtbij de pijp-wand is dezelfde als de snelheid die volgt uit de potentiaalstromingstheorie in het geval van een pijp in eenparige stroming met de wanden op oneindige afstand.

Door Lamb (3) is afgeleid hoe de potentiaalstroming rond een pijp kan worden berekend.

In figuur 9 is de situatie schetsmatig weergegeven.

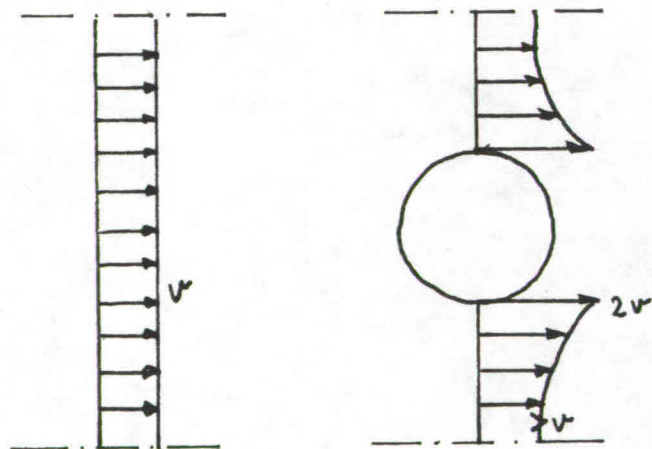


fig. 9

De snelheid kan worden weergegeven als functie van de afstand tot het hart van de pijp. Dit leidt tot de formule :

$$v_a = v \left( 1 - \frac{D^2}{4a^2} \right) \quad (7.01)$$

Dit levert aan de pijpwand een snelheid van  $2v$  en op oneindige afstand van de pijp een snelheid van  $v$ .

Een verdere aanname van Van Ast en Boer is dat de waarde van de gradient van de snelheid in het gebied tussen de bodem en de hoogte  $z_t$ , zijnde de hoogte waar de rechte door de oorsprong aan het ongestoorde logaritmischesnelheidsprofiel raakt (fig. 10) tevens de waarde is van de gradient dicht bij de bodem recht onder de pijp.

Gegeven deze drie zaken, debiet, snelheid aan pijpwand en de gradient van de snelheid bij de bodem, kan een snelheidsprofiel worden opgesteld waaruit de totale hoogte van het snelheidsprofiel (=spleethoogte) volgt. Hieruit volgt dus de ontgrondingsdiepte.

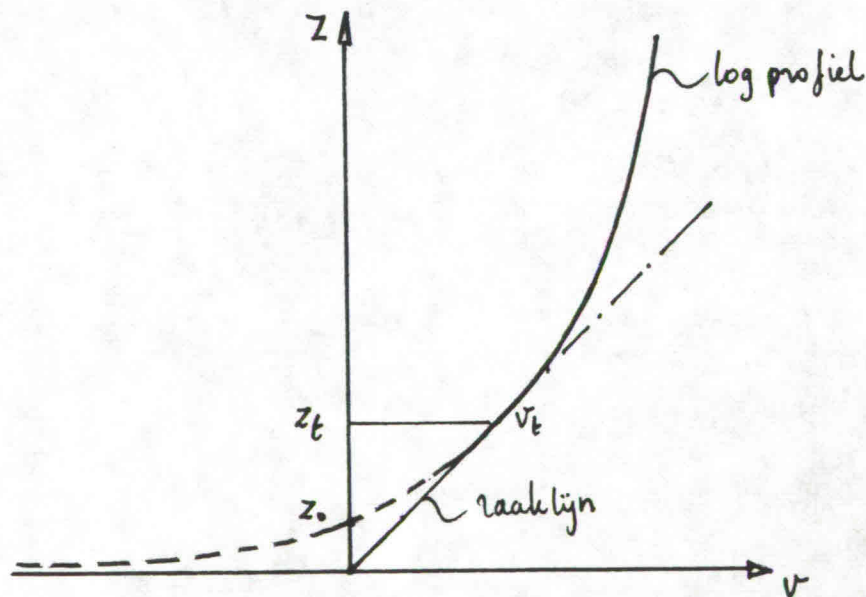


fig. 10



## 7.2 Snelheid aan pijpwand

Met het doel te onderzoeken in hoeverre de aanname van de snelheid aan de pijpwand realistisch is, is de pijp (pvc - 40 mm diameter) halverwege de gootdiepte in de goot geplaatst en is aangestroomd met een gemiddelde stroomsnelheid van 0.15 m/s.

Meetpunten

In de raai die door het hart van de pijp gaat is het snelheidsprofiel vastgelegd, dat is weergegeven in de figuur van bijlage 40 (vaste bodem). Uit de figuur blijkt dat de snelheid aan de pijpwand nauwelijks 45% hoger is dan de aanstroomsnelheid, dus dat dit aspect van toepassing van potentiaalstromingstheorie de juistheid in twijfel moet worden getrokken.

## 7.3 Electrisch analogon

Omdat in de benadering van Van Ast en De Boer de toepassing van de potentiaaltheorie nogal overheersend is, is met behulp van een electrisch analogon een model gemaakt van de situatie die is weergegeven in de figuur van bijlage 39. Het resulterende stroombeeld is weergegeven in de figuur van bijlage 41.

Uit deze figuur kunnen verschillende snelheidsprofielen worden samengesteld.

Van Ast en De Boer stellen voor de gelijkmatige aanstroomsnelheid gelijk te nemen aan de waarde van de snelheid in het ongestoorde profiel ter hoogte van het hart van de pijp.

Uit bijlage 20 volgt dat deze waarde 0.183 m/s bedraagt. Wordt met deze aanstroomsnelheid het snelheidsprofiel samengesteld in de vertikaal door het hart van de pijp aan de hand van bijlage 41, dan resulteert het profiel dat in bijlage 42 I genoemd is.

Tevens is in bijlage 42 het gemeten profiel weergegeven (lijn III).

Uit deze figuur blijkt dat deze aanpak leidt tot snelheden aan de pijpwand die meer dan twee maal te groot zijn.

Een iets andere aanpak is te veronderstellen dat de potentiaalstroming een benadering geeft van de stroombanen. Met dit doel is het logaritmisch snelheidsprofiel van bijlage 20 gekoppeld aan het stroombeeld van bijlage 41. Tussen de stroombanen wordt het debiet constant verondersteld en de grootte hiervan wordt bepaald door dat gedeelte wat door de aankomende stroombanen in het ongestoorde debiet (bovenstrooms van het invloedsgebied van pijp) wordt afgesneden.

Dit leidt tot profiel II van bijlage 41.

Ook hier blijkt dat de resulterende snelheden veel groter zijn dan de werkelijk optredende snelheden.

Dit viel reeds te verwachten aangezien het scheidingsvlak van de debieten boven en onder de pijp in de potentiaalstroming praktisch op de hoogte van het hart van de pijp ligt (bijlage 41) terwijl in werkelijkheid in deze situatie het scheidingsvlak 8 mm lager ligt (bijlage 20).

De snelheid op de werkelijke hoogte van het scheidingsvlak in het ongestoorde profiel is 0.16 m/s.

Ook met deze snelheid kan een snelheidsprofiel worden samengesteld, aangegeven in bijlage 42 door lijn IV.

Het blijkt dat deze benadering nog steeds een snelheid aan de onderkant van de pijp oplevert die ongeveer 40% te groot is.



7.4 Conclusies potentiaalstroming

Gebleken is dat de toepassing van de potentiaalstroming te grote snelheden onder de pijp en in de omgeving van de pijpwand oplevert.

Het resulterende stroombanenbeeld is niet reëel omdat de potentiaalstroming een veel groter debiet toelaat onder de pijp dan in werkelijkheid optreedt.

De invloed van de bodemweerstand op het snelheidsprofiel is groter dan in de benadering van Van Ast en De Boer naar voren komt.

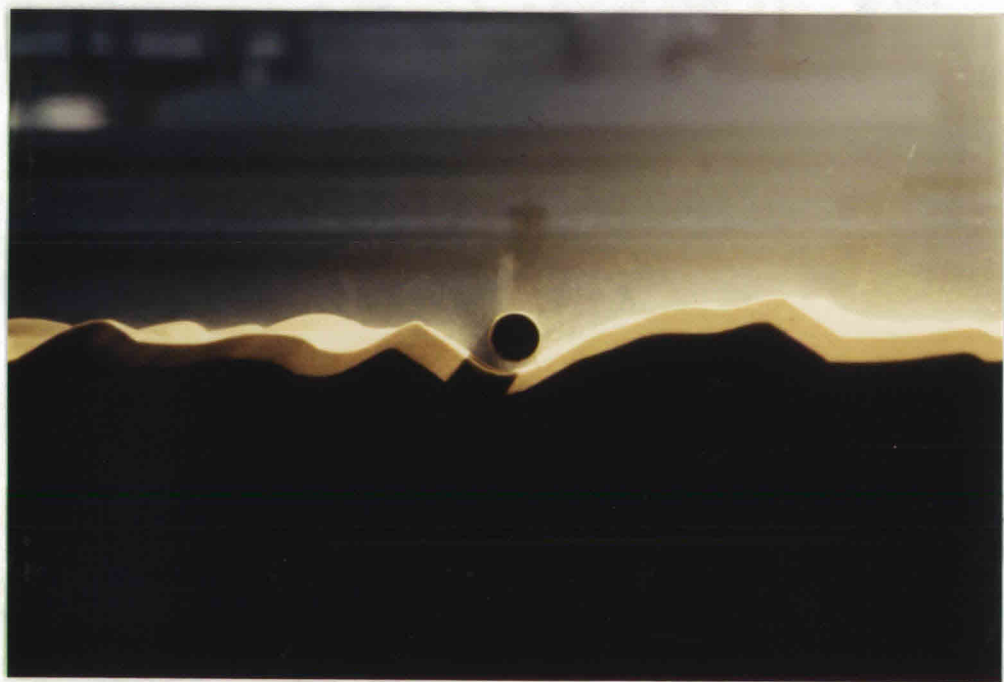
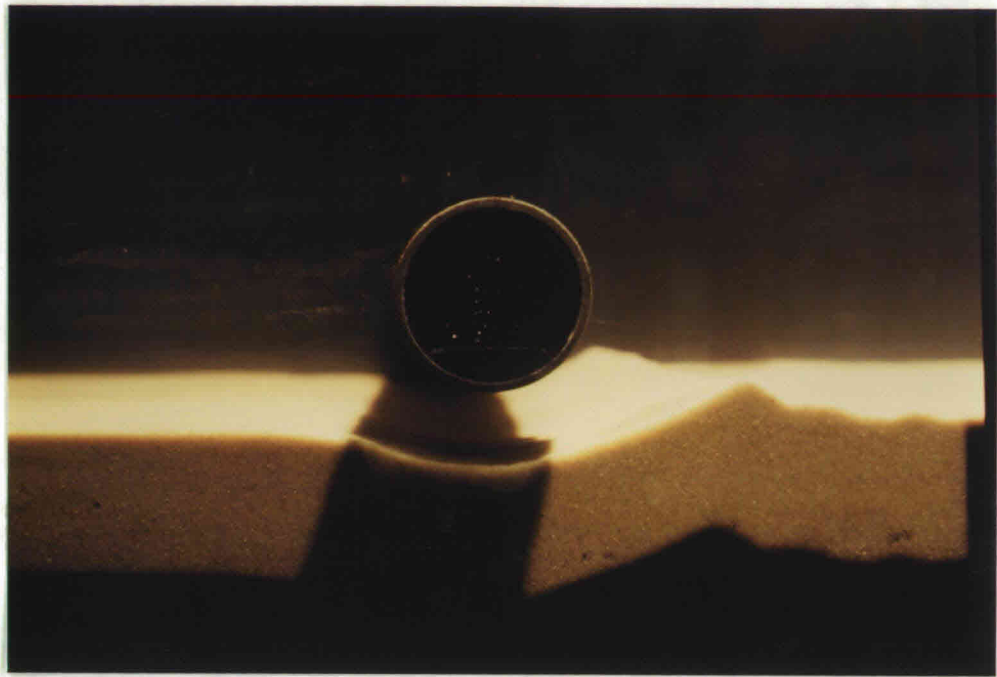
De ligging van het scheidingsvlak is in werkelijkheid anders dan uit de potentiaaltheorie blijkt.

Het koppelen van de ongestoorde snelheid op de hoogte van het scheidingsvlak levert nog steeds te hoge snelheden op.

In het algemeen kan worden gezegd dat de weerstandsinvloeden zo overheersend zijn dat het twijfelachtig is of een of andere toepassing van de potentiaaltheorie tot een bruikbaar resultaat leidt.

*Plaats scheidings-  
vlak met zandbodem?  
Ouderscheid < fig 8?  
> begin van beweging  
> begin van beweging.*





## HOOFDSTUK 8

### ONDERZOEK - DERDE DEEL

#### 8.1 Inleiding

In dit deel van het laboratoriumonderzoek zijn een aantal combinaties van pijpruwheid en stroomsnelheid onderzocht, waarbij de afstand tussen de onderkant van de pijp en het oorspronkelijk niveau van de bodem ( $C_{-INIT}$ ) voor iedere combinatie stapsgewijs is verkleind.

In het prototype kan de situatie zich voordoen dat een pijgedeelte, waaronder ontgronding heeft plaatsgevonden, gaat zakken ten gevolge van ontgronding bij de opleggingen of door het feit dat de pijp doorhangt. Indien de pijp over een bepaalde afstand zakt zullen zich een nieuwe ontgrondingsdiepte en een nieuw snelheidsprofiel onder de pijp instellen.

De vraag kan nu gesteld worden hoe lang deze ontgronding zal blijven bestaan indien met de pijp, bij een constante gemiddelde stroomsnelheid geleidelijk zakt.

Ook is het interessant te onderzoeken hoe verschillende parameters zoals ontgrondingsdiepte, gemiddelde snelheid onder de pijp, debiet onder pijp een hoogteligging van het scheidingsvlak der debieten, zich als functie van de hoogteligging van de pijp ontwikkelen.

De metingen in dit deel van het onderzoek zijn erop gericht geweest deze verbanden grafisch weer te geven en te onderzoeken of er voor verschillende pijp ruwheid en stroomsnelheid tendensen aan te geven zijn.

Aangezien het aantal parameters groot is en het vastleggen van een situatie nogal wat tijd vergt, is er in het scala van mogelijkheden die vastgelegd kunnen worden een ~~zware~~ <sup>streuge</sup> selectie aangebracht.

In deze fase van het onderzoek leek het verstandig eerst op zo efficiënt mogelijke wijze een beperkte hoeveelheid resultaten op papier uit te werken alvorens over te gaan tot een uitgebreid meetprogramma af te werken.

## 8.2 Beschrijving meetseries

De combinaties volgens welke de meetseries zijn afgewerkt zijn in onderstaand schema weergegeven.

Diameter pijp gem. stroomsnelheid afst. pijp-oorspr. bodem

40 mm glad	0.20 m/s	stapsgewijs verkleind met stapjes van
40 mm glad	0.25 m/s	10 - 5 - 2.5 mm
40 mm ruw	0.25 m/s	

De snelheden in iedere situatie zijn vastgelegd in de raai door het hart van de pijp en alleen in de directe omgeving van de pijp, d.w.z. in de spleet onder de pijp en vlak erboven.

Bij dit gedeelte van het laboratoriumonderzoek zijn de debieten in de goot ingesteld m.b.v. een meetflens - manometer combinatie.

De gemiddelde snelheid in het verticale vlak waarin de snelheden zijn gemeten moet bepaald worden uit het snelheidsprofiel.



In bijlage 43 t/m 49 zijn de snelheidsprofielen gegeven voor de combinatie DIAM-PIJP-40 mm glad,  $\bar{v} = 0.20$  m/s, waarbij de D-INIT de afstand onderkant pijp tot oorspronkelijke bodem voorstelt en de afstand onderkant pijp tot ontgrondingsbodem oppervlak. Het verschil in D-INIT waarde tussen twee opeenvolgende grafieken is de stapgrootte waarover de pijp naar beneden is gebracht.

Naarmate de spleethoogte kleiner wordt is het steeds moeilijker onder de pijp te meten en dientengevolge moest steeds een stukje meer van het snelheidsprofiel bij de bodem geschat worden.

Bij een ingesteld debiet op basis van  $\bar{v} = 0.20$  m/s treedt geen bodemtransport op, de bodem blijft vlak.

Bij een gemiddelde snelheid van 0.25 m/s treedt wel transport op en ontstaan ribbels van 2 tot 4 cm hoog.

In bijlage 50 t/m 54 zijn op dezelfde wijze als bij  $\bar{v} = 0.20$  m/s de snelheidsprofielen weergegeven voor de combinatie DIAM-PIJP 40 mm glad,  $\bar{v} = 0.25$  m/s en in bijlage 55 t/m 59 zijn weergegeven de profielen behorende bij de combinatie DIAM-PIJP 40 mm ruw,  $\bar{v} = 0.25$  m/s.

Uit deze grafieken valt een aantal grootheden te bepalen. Ten eerste volgt direct zoals reeds is aangegeven de spleethoogte  $\xi$ . Verder kan uit het snelheidsprofiel onder de pijp d.m.v. integratie het debiet onder de pijp worden afgeleid, hetgeen in combinatie met de  $\xi$ -waarde de gemiddelde snelheid onder de pijp geeft.

De maximale waarden voor de snelheden bij de pijpwand boven en onder volgen direct uit de grafiek.

Tenslotte kan worden afgelezen de reële ontgrondingsdiepte.

8.3 Samengestelde grafieken

In bijlage 60 is weergegeven het verloop van het debiet onder de pijp als functie van D-INIT.

Bij toename van de gemiddelde snelheid van 0.20 m/s naar 0.25 m/s bij de gladde pijp is <sup>er een</sup> aanmerkelijke toename van het debiet onder de pijp, hoewel de maximale ontgrondingsdiepte hetzelfde is. Wordt de pijp ruw gemaakt dan neemt de ontgrondingsdiepte toe. Echter toen de D-INIT waarde nog groot was bij de ruwe pijp is het debiet onder de pijp kleiner dan bij de gladde pijp bij dezelfde snelheid.

Waaruit  
blijkt  
dat?

In bijlage 61 is de spleethoogte  $\xi$  uitgezet als functie van D-INIT. Voor alle combinaties zullen de krommen die ontstaan voor grote waarden van D-INIT aan de assymtoot (streep-stip lijn onder  $45^\circ$ ) raken. Dit is verklaarbaar want voor grote waarden van D-INIT treedt geen ontgroning op en zijn  $\xi$  en D-INIT gelijk.

De grotere ontgrondingsdiepte bij de ruwe pijp was al bekend uit de vorige grafiek.

Verder valt op dat een grotere gemiddelde stroomsnelheid een grotere  $\xi$ -waarde tot gevolg heeft hetgeen ook te verwachten valt, en dat de pijpruwheid voor  $D-INIT < 0$  de  $\xi$ -waarde nauwelijks beïnvloedt.

Wordt het debiet onder de pijp door de  $\xi$ -waarde gedeeld dan volgt de gemiddelde snelheid onder de pijp,  $v_0$ .

Het verloop van  $\bar{v}_0$  is uitgezet in de figuur van bijlage 62. Als gevolg van de assymtoot voor  $\xi$  zullen de waarden van  $\bar{v}_0$  bij grote waarden van D-INIT elkaar ontlopen in dezelfde orde als de aanstroomsnelheid indien de pijpruwheid gelijk blijft. Voor kleinere waarden van D wijken de  $v_0$  nogal van elkaar af, maar dit met name grillige verloop zou een gevolg kunnen zijn van fouten in de registratie omdat hier zeer kleine afstanden gemeten zijn.

fig 60.  
61



Over het gebied van  $D\text{-INIT} = 20 \text{ mm}$  tot  $D\text{-INIT} = -10 \text{ mm}$  ontlopen de  $\bar{v}_0$  waarden elkaar echter niet veel. Het is niet zo dat gemiddelde snelheid in de goot van 25% ook een toename van 25% in de gemiddelde snelheid onder de pijp betekent.

#### 8.4 De scheidingshoogte van de debieten

In bijlage 63 is het gemeten ongestoorde snelheidsprofiel weergegeven behorende bij een gemiddelde stroomsnelheid van 0.20 m/s en een zandbed van zand met  $D_{50} = 190 \mu\text{m}$ .

Dit is het zelfde profiel als gegeven is in bijlage 20, dat in sectie 6.2 aan een nadere theoretische beschouwing is onderworpen.

Dit profiel komt vrij goed overeen met het theoretische snelheidsprofiel behorende bij dezelfde bodemruwheid.

In bijlage 64 staat weergegeven het gemeten snelheidsprofiel behorende bij  $v = 0.25 \text{ m/s}$  en hetzelfde zand op de bodem. Vanaf het punt waar de stralen van de Laser-Doppler de tophoogte van de ribbels naderden (aangegeven met een \* in de bijlage) is het verloop van de kromme op geschatte wijze doorgetrokken naar nul op het gemiddeld bodemniveau.

In bijlage 65 is het theoretische snelheidsprofiel weergegeven bij gemiddelde snelheid en ribbelhoogte van de vorige bijlage.

Het blijkt dat de krommen van bijlage 64 en 65 nogal van elkaar verschillen. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk dat het gemeten profiel zich in de goot werkelijk zo heeft voorgedaan ten gevolge van de wisselwerking tussen turbulentie bij de bodem t.g.v. ribbels en invloed van de verticale wanden.

*Vergelykt  
moeilijk*

*is wel gebruikelijk.*



Daarom is bij het bepalen van de hoogte van het scheidingsvlak de berekening uitgevoerd zowel met het gemeten als met het theoretisch snelheidsprofiel.

Er is nu onderzocht of het mogelijk is uit de gedane metingen een verband te leggen tussen de hoogte van het scheidingsvlak in het ongestoorde profiel en de opstelhoogte D-INIT.

Als karakteristieke parameter van het scheidingsvlak is genomen de waarde A (zie definitieschets, sectie 5.2) in mm, zijnde de afstand tussen werkelijk scheidingsvlak en de hoogteligging van de pijp.

*Snap er  
nichts van*

7

Deze waarde is in bijlage 66 uitgezet tegen D-INIT waarbij voor de bepaling van A gebruik is gemaakt van de gemeten snelheidsprofielen (bijlage 63 en 64).

Dezelfde grafiek is weergegeven in bijlage 67 maar nu met gebruik van het theoretische snelheidsprofiel voor de gevallen met  $v = 0.25$  m/s (bijlage 65).

De enige overeenkomst in bijlage 66 is de dubbele knik die voorkomt in de beide gevallen van de gladde pijp.

De absolute waarden echter van die drie onderzochte gevallen ontlopen elkaar zodanig dat hier geen conclusies aan verbonden mogen worden.

Uit bijlage 67 blijkt dat de waarden van A wel goede overeenkomsten vertonen, vooral in het gebied waar D-INIT zich bevindt tussen 20 en -10 mm.

De beide lijnen behorende bij situaties met de gladde pijp blijken in relatief geringe mate van elkaar te verschillen.

Toch moet men ook hier voorzichtig zijn harde conclusies te trekken, want deze grafiek is samengesteld uit een snelheidsprofiel dat naar alle waarschijnlijkheid niet is opgetreden.

*raar*

Een conclusie die wel getrokken kan worden is dat de pijpruwheid voor kleine en grote waarden van D-INIT belangrijke invloed heeft op de ligging van het scheidingsvlak, omdat dit zowel in bijlage 66 als bijlage 67 naar voren komt.

Hieruit blijkt nogmaals dat de weerstandsinvloed een overheersende factor is in het stroombeeld.

#### 8.5 Snelheden aan pijpwand

In de bijlagen 68, 69 en 70 zijn de maximale snelheden aan de pijpwand boven een  $\odot$  ander aan de pijp ( $v_1$  en  $v_2$ ) weergegeven in relatie tot de opstelhoogte D-INIT.

Tevens is in dezelfde grafiek het quotient van deze snelheden weergegeven.

Uit deze grafieken blijkt dat beide snelheden over een groot bereik van D-INIT nauwelijks van elkaar verschillen. Alleen voor lage waarde van D-INIT, dus als de spleet erg klein wordt gaan de snelheden elkaar in relatieve zin erg ontlopen, omdat de snelheid onder de pijp ( $v_1$ ) naar nul toe gaat, terwijl  $v_2$  altijd een bepaalde waarde behoudt. Opvallend is dat  $v_1$  over een groot bereik van D-INIT in alle gevallen een grotere waarde heeft dan  $v_2$ , ofschoon de pijp zich altijd op een hoogte-gebied bevindt waarin het aanstromende snelheidsprofiel een sterke gradient vertoont.

*doch niet zo raar!*



8.6 Vergelijking gemeten waarden van vroegere proeven

Tenslotte zijn ter illustratie de resultaten van van van Ast en de Boer, voor zover mogelijk, vergeleken met de resultaten van de metingen van dit onderzoek.

De enige situatie die zich hiervoor leende was die, waarbij een gladde pijp, bij een gemiddelde stroomsnelheid van 0.25 m/s, stapsgewijs dichterbij de bodem is gebracht. Dit is de situatie die in bijlage 61 weergegeven is door de gestreepte lijn. Hierbij is de spleethoogte  $\varphi$  uitgezet tegen de opstelhoogte D-INIT.

Een grafiek met dezelfde betekenis is ten behoeve van de vergelijking weergegeven in bijlage 71.

In deze grafiek zijn de waarden van D-INIT en  $\varphi$  dimensieloos gemaakt door ze te delen door de pijpdiameter.

In dit onderzoek was de D50 van het zand op de bodem  $190\mu\text{m}$  terwijl het zand dat van Ast en de Boer gebruikten een D50 had van  $220\mu\text{m}$ . De proeven zijn uitgevoerd in dezelfde goot.

Van Ast en de Boer vermelden niet hoe hun gemiddelde stroomsnelheid is gedefinieerd, maar het is waarschijnlijk dat deze evenals bij dit onderzoek, is ingesteld m.b.v. de meetflens-manometer combinatie en is bepaald uit het debiet.

Ondanks de verschillende D50 komen de lijnen in de grafiek van bijlage 71 goed overeen.

Het enige verschil is dat van Ast en de Boer een grotere uiteindelijke ontgrondingsdiepte vonden doordat in hun geval de pijp verder kon zakken. De reden hiervoor is niet duidelijk.

Opgemerkt dient te worden dat van Ast en de Boer een minder nauwkeurige methode hadden om de ontgrondingsdiepte te bepalen.

hoe zo?



8. 7 Conclusies

De besproken proeven hebben inzicht gegeven in de relaties tussen de parameters  $q_0$ ,  $\sqrt{v_0}$ ,  $A$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ , en  $v_1/v_2$  enerzijds en D-INIT anderzijds.

De complexe aard van de onderlinge afhankelijkheid van parameters die een rol spelen is duidelijk.

Om op de gevolgde wijze van aanpak tot harde conclusies te komen zouden veel meer metingen verricht moeten worden. De ligging van het scheidingsvlak moet een nader onderzoek worden onderworpen.

Tevens is bij de verwerking van de resultaten gebleken dat de meetnauwkeurigheid voor dit soort behandeling van de gegevens niet bijzonder groot is.

Dit zou kunnen worden verbeterd door de metingen op een grotere schaal te verrichten, d.w.z. een diepere goot, grotere stroomsnelheid en een grotere pijpdiameter.

## HOOFDSTUK 9

### ALGEMENE CONCLUSIES EN AANBEVELING

#### 9.1 Algemene conclusies

Een gedetailleerd beeld is ontstaan van het stroombeeld in de buurt van de pijp. Met name is inzicht verkregen over equidebietbanen, neren en turbulente verschijnselen.

Relaties zijn verkregen tussen het debiet onder de pijp, de gemiddelde snelheid onder de pijp, hoogteligging van het scheidingsvlak en de snelheden aan de pijpwand enerzijds en de opstelhoogte van de pijp D-INIT anderzijds.

Uit deze relaties vallen geen harde conclusies te trekken maar er zijn wel tendensen aan te wijzen.

De gradient van de snelheid aan de bodem onder de pijp is kleiner dan die van het ongestoorde profiel.

|| Het scheidingsvlak ligt niet op de halve hoogte van het boven de bodem uitstekende deel van de pijp.

Het scheidingsvlak ligt altijd onder het niveau van de halve hoogte van het boven de bodem uitstekende deel van de pijp.

Er is een zeer grote opstelhoogte vereist om het scheidingsvlak met het hart van de pijp samen te laten vallen. Dan treedt geen ontgroning meer op.

De potentiaalstromingstheorie geeft aan de pijpwand en in de buurt van de pijp een snelheid die orde twee keer zo groot is als de werkelijk optredende snelheid.

Uit de potentiaalstromingstheorie volgt een veel te groot debiet onder de pijp omdat het scheidingsvlak in werkelijkheid hoger ligt.

*is nieuw  
element  
m.i.*

9.2 Aanbevelingen

Verder onderzoek is vereist om betere conclusies te trekken t.a.v. de relaties tussen de parameters.

Kee

(Hierbij zouden ook de golven betrokken moeten worden.

Met name naar de hoogteligging van het scheidingsvlak moet uitgebreid onderzoek worden verricht.

De snelheden bij de bodem in de ontgroning moeten met grote nauwkeurigheid worden vastgelegd.

De proeven zouden in een diepere goot moeten worden verricht.

Het werken met de Laser-Doppler kan snel problemen opleveren. Het is aanbevelenswaardig te werken met het in Delft ontwikkelde TPD-systeem.



LITERATUURLIJST

1. Van Ast en De Boer.  
Ontgroning onder een pijpleiding door stroming en of  
golven.  
Afstudeerverslag Vakgroep Kustwaterbouwkunde - Delft.
2. *W. de Vries*  
*Handleiding laser Doppler snelheidsmeting*  
*Afstudeerverslag Vakgroep Kustwaterbouwkunde.*
3. Lamb, H.  
Hydro dynamics  
Chapter IV, art. 68  
Sixth edition 1945  
Dover Publications  
New York.

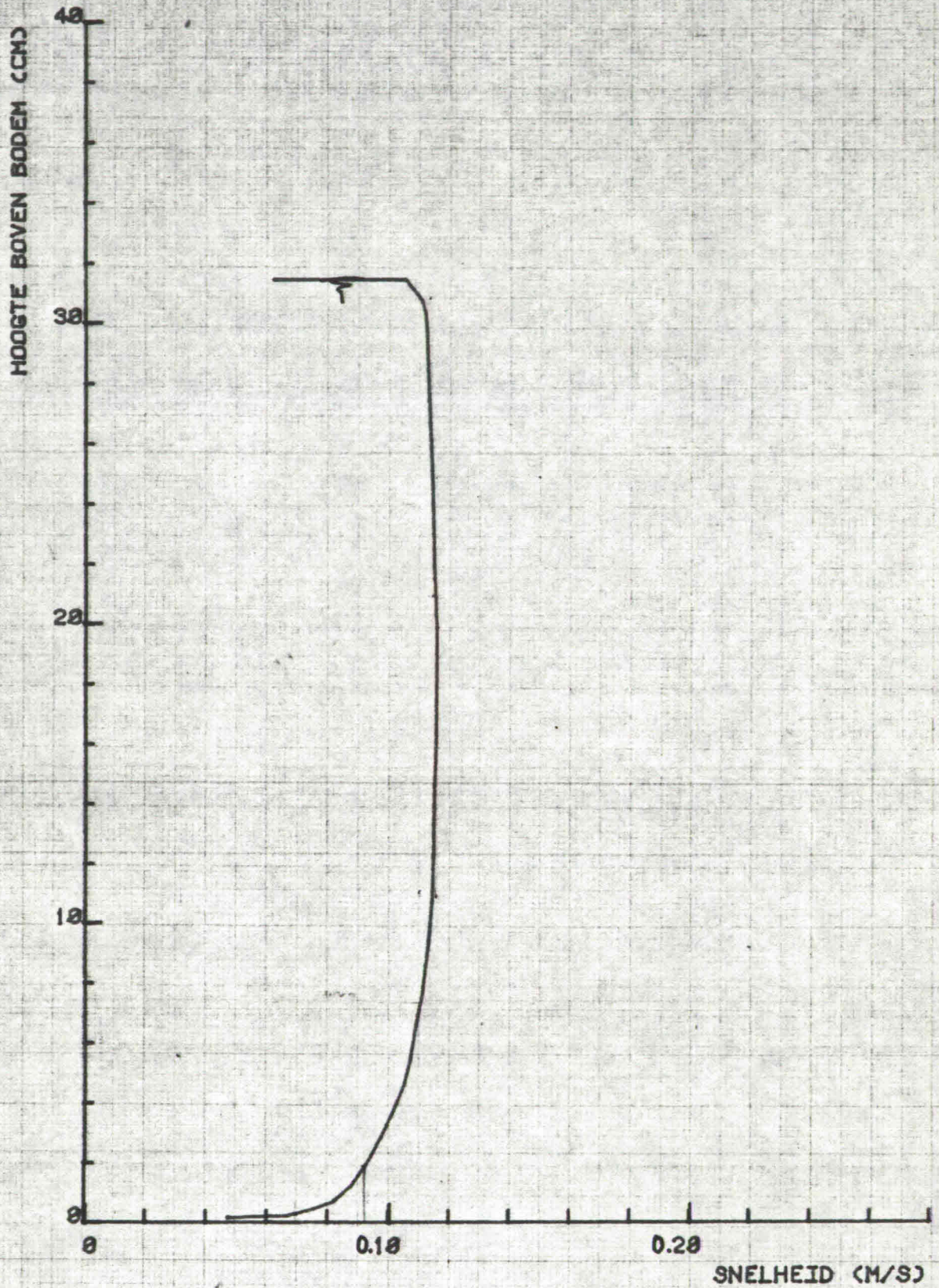




ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.10 \text{ m/s}$   
D-PIJP =  
D-INIT. =  
D50 =  
 $q(\text{rep}) = 34.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^1$

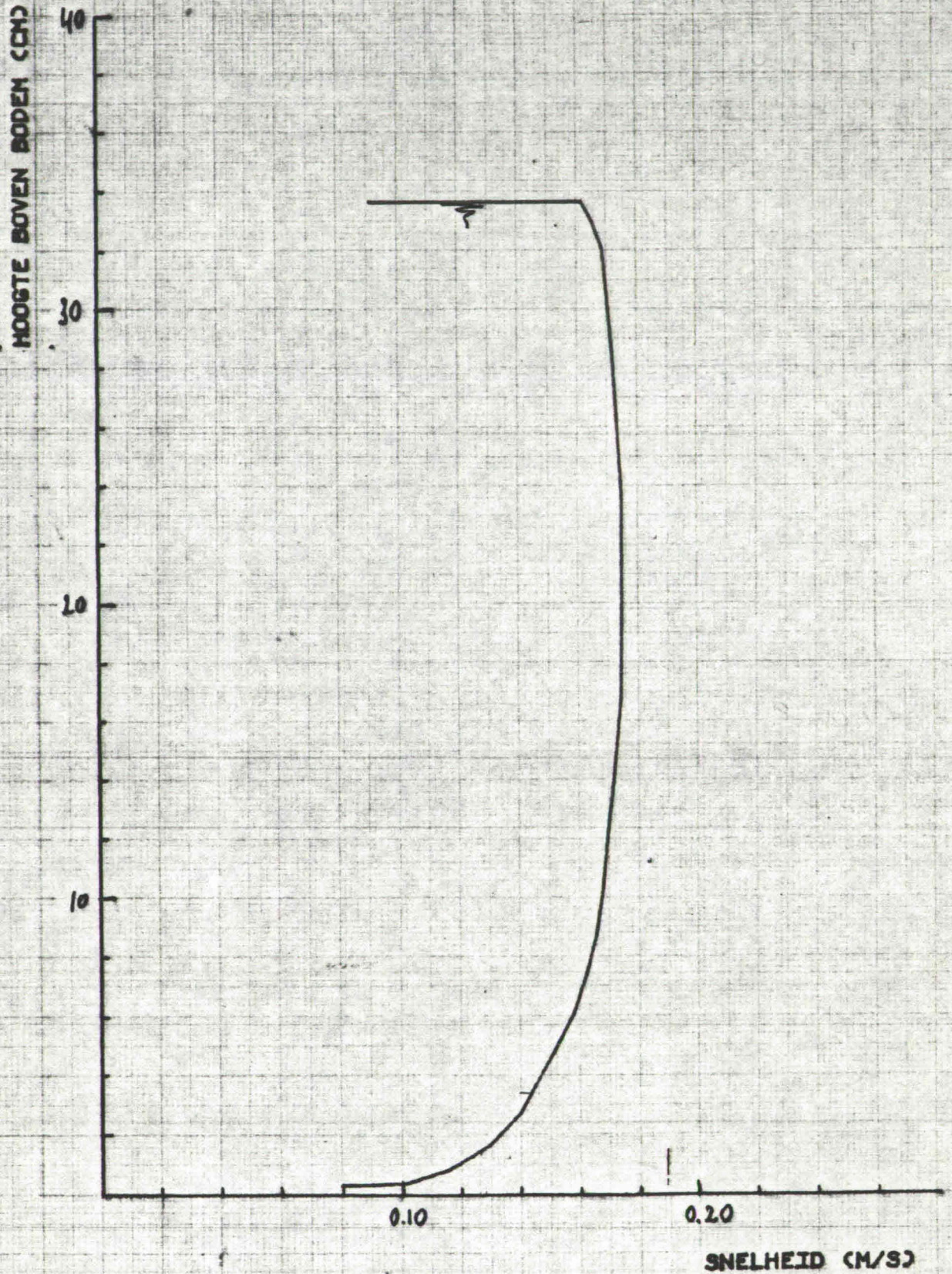




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.15 \text{ m/s}$   
D-PIJP =  
D-INIT. =  
D50 =  
 $q(\text{rep}) = 53,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2$

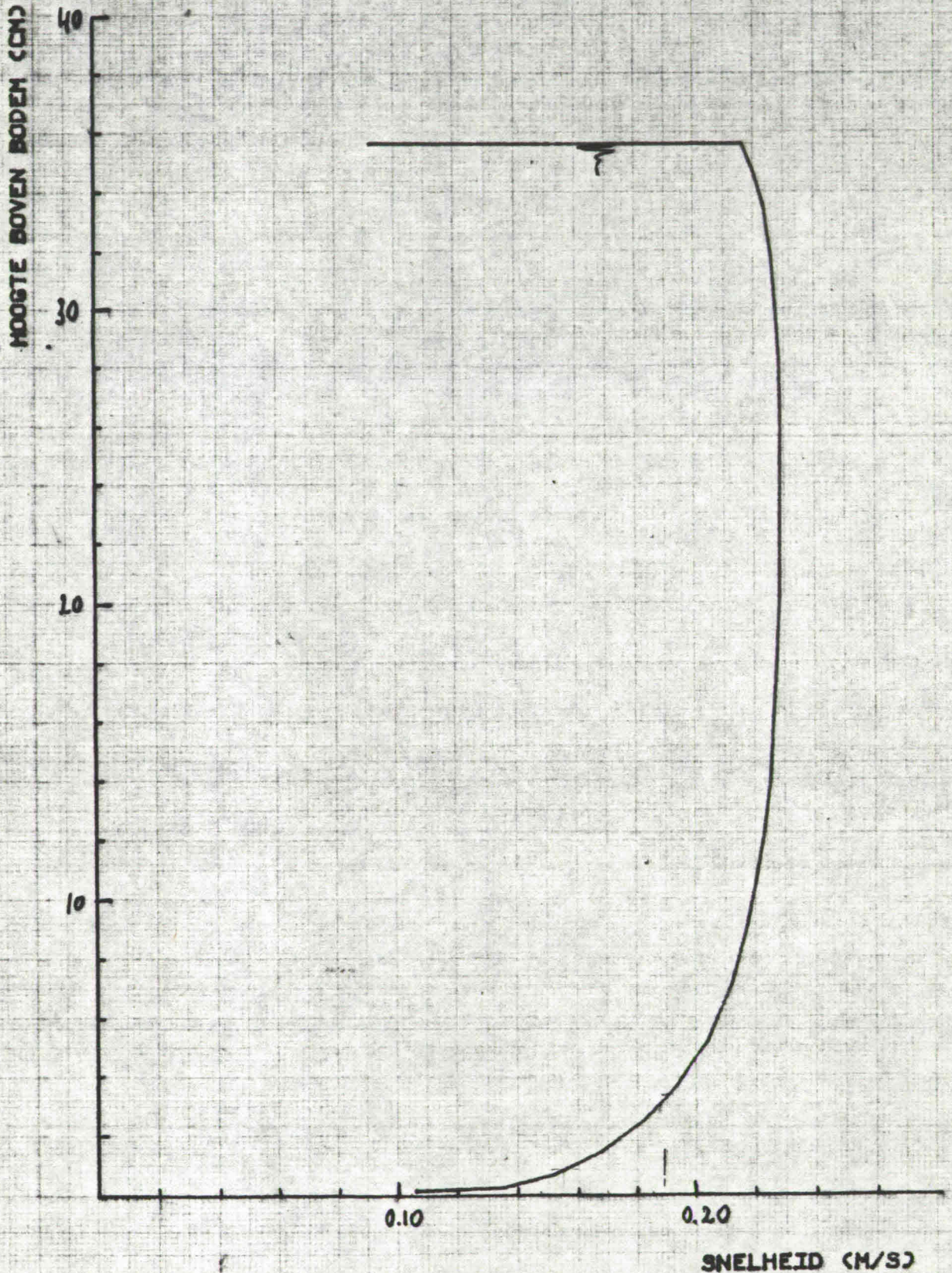




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP =  
D-INIT. =  
D50 =  
 $q(\text{rep}) = 75,6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}^2$





# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.25 \text{ m/s}$   
D-PIJP =  
D-INIT. =  
D50 =  
 $q(\text{rep}) = 98,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^1$

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

20

10

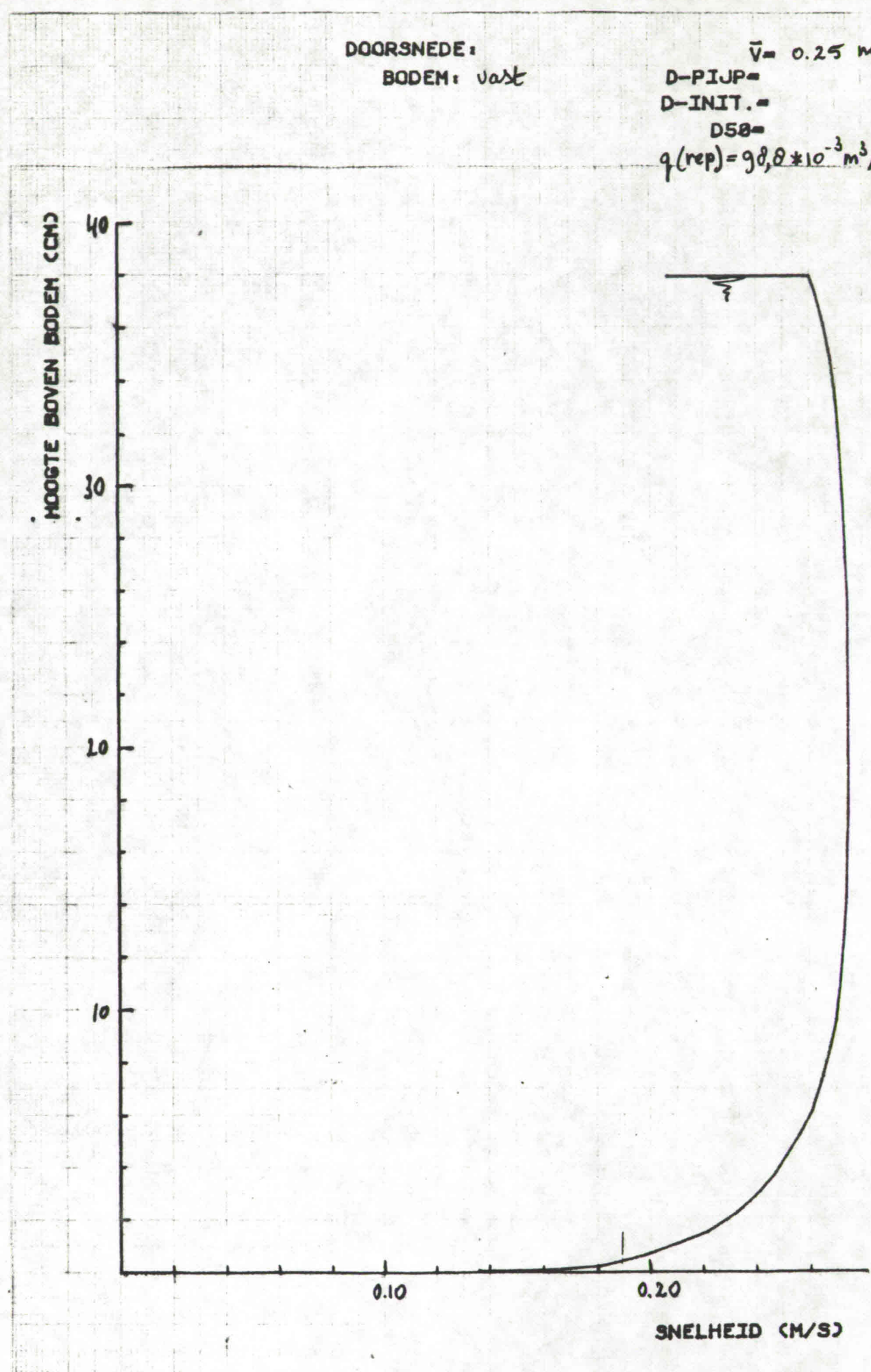
0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

BIJLAGE:

5





BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

- a - 0.10 m/s
- b - 0.15 m/s
- c - 0.20 m/s
- d - 0.25 m/s

bodemruwheid: k-waarde 0.001mm  
 vaste bodem

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

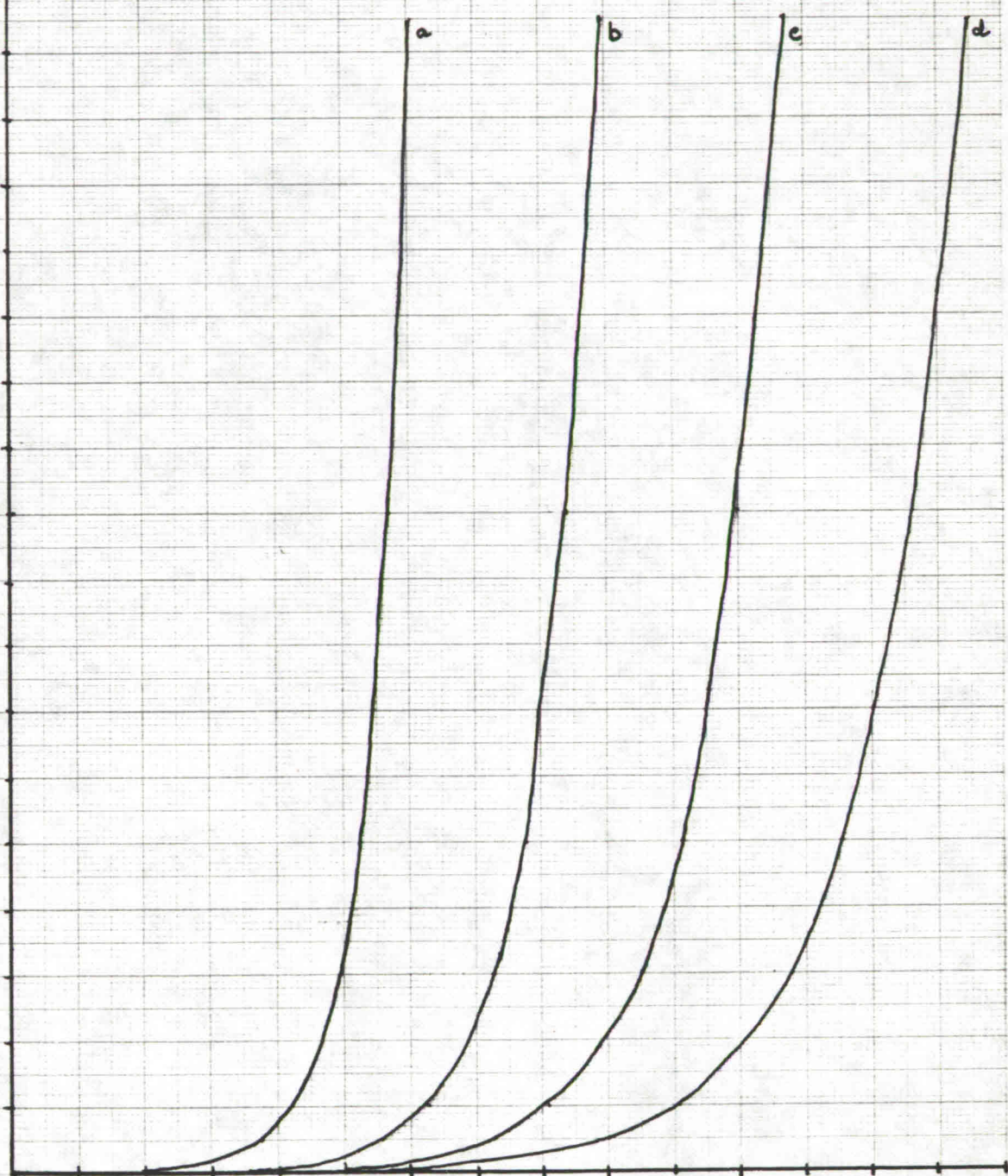
20

10

10

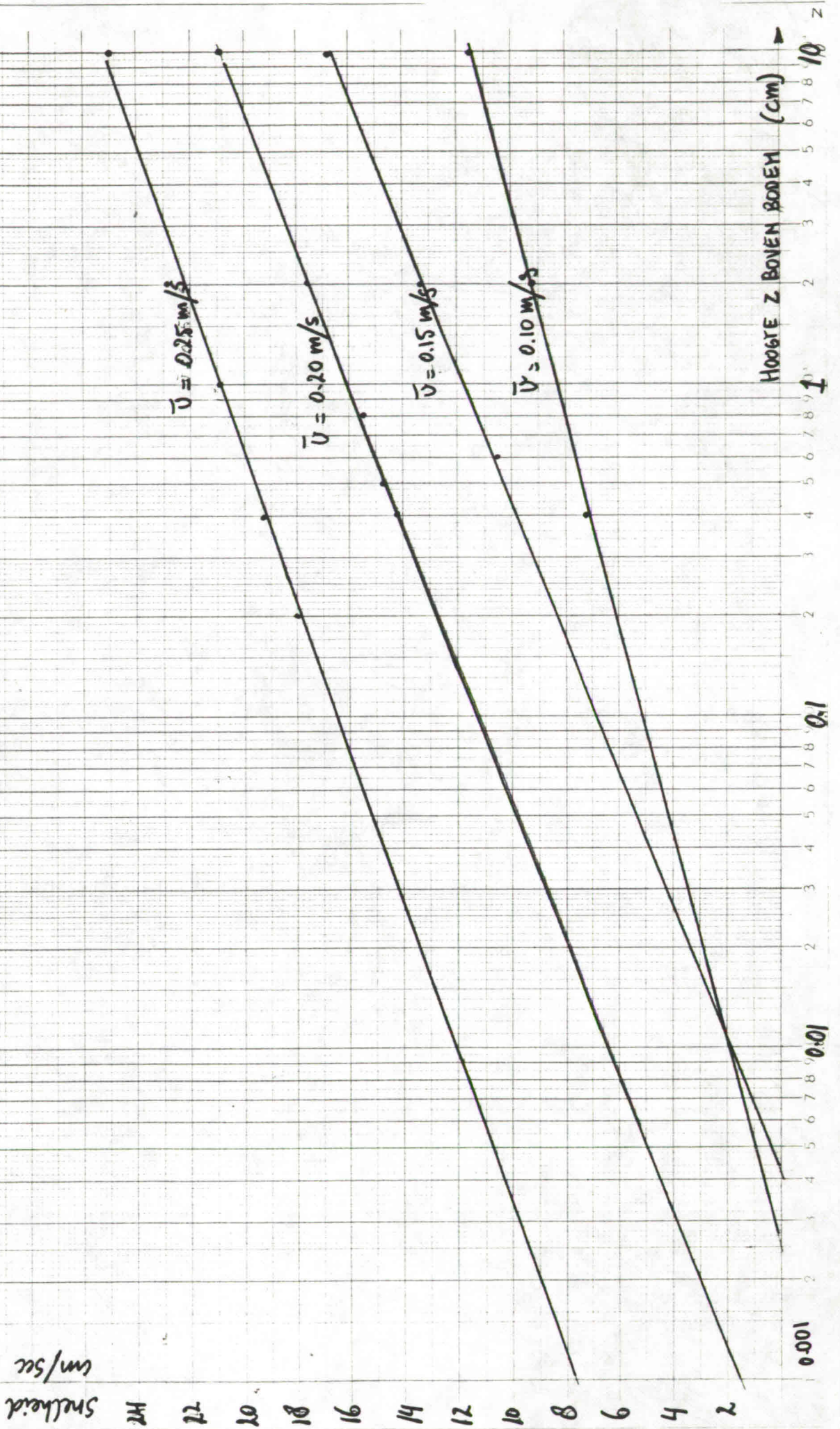
20

SNELHEID m/s





ONTGRONDING ONDER PIJP

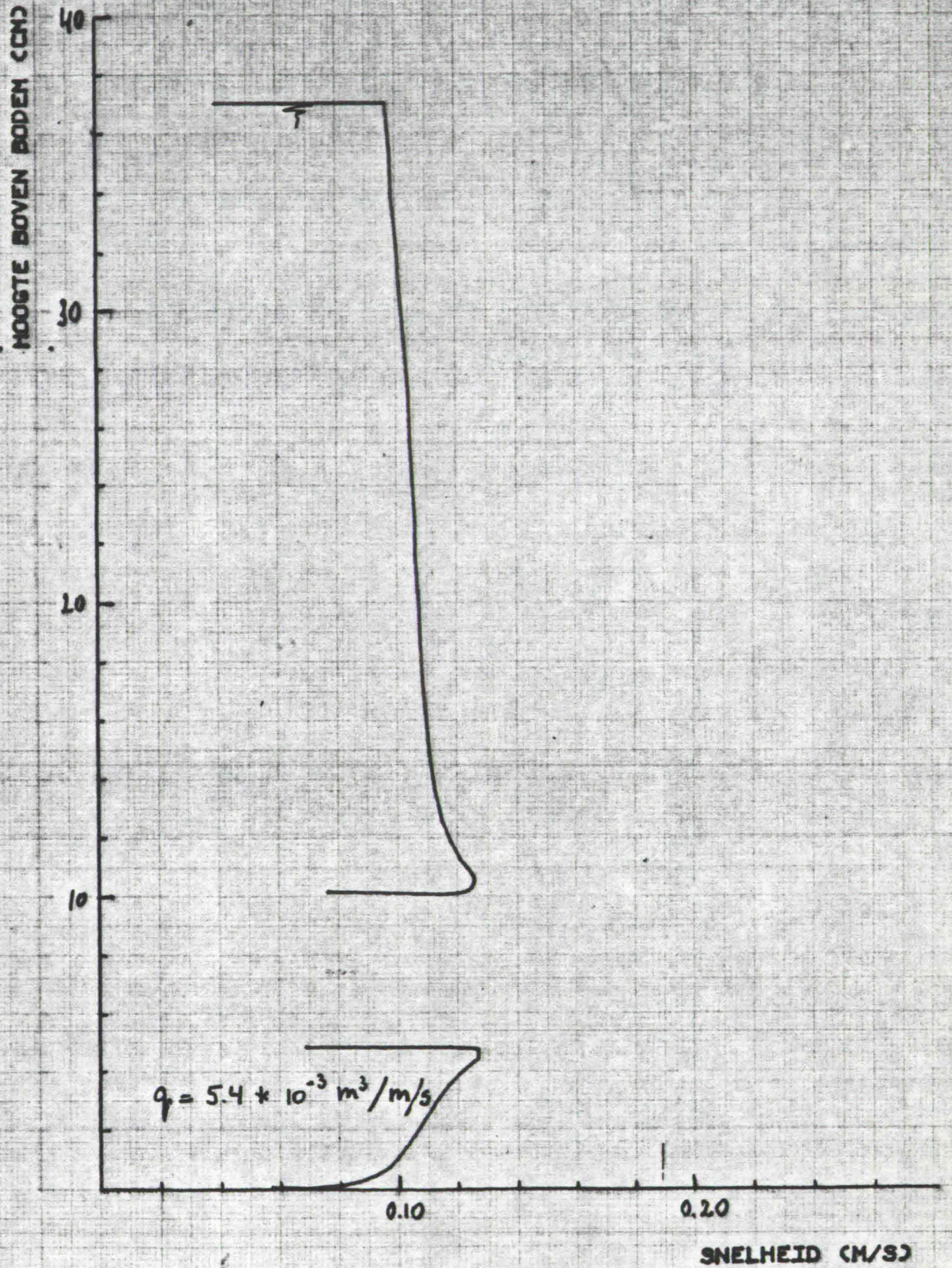




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.10 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 50 mm  
D-INIT. = 50 mm  
D50 =



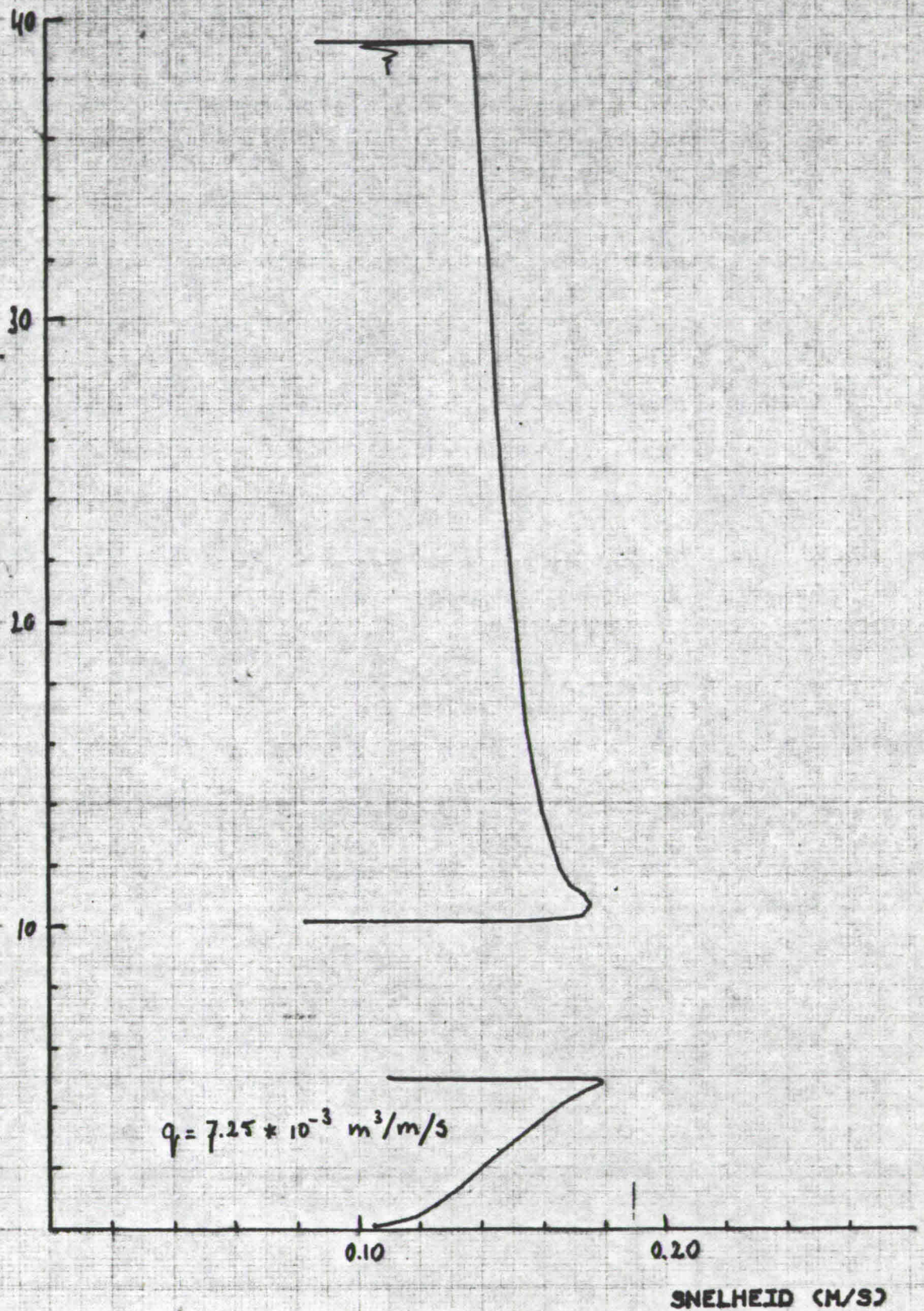


# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.15 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 50 mm  
D-INIT. = 50 mm  
D50 =

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

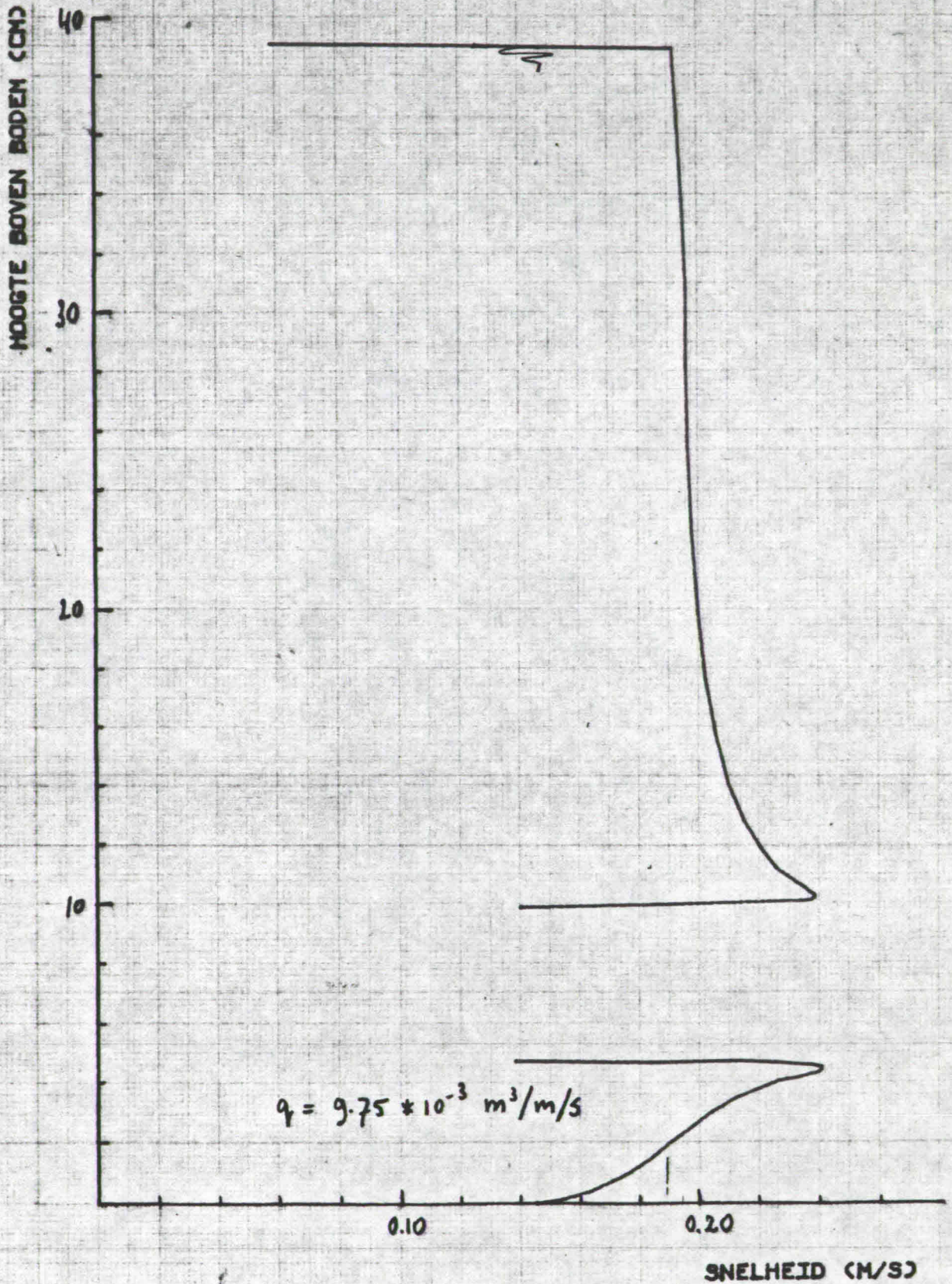




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 50 mm  
D-INIT. = 50 mm  
D50 =

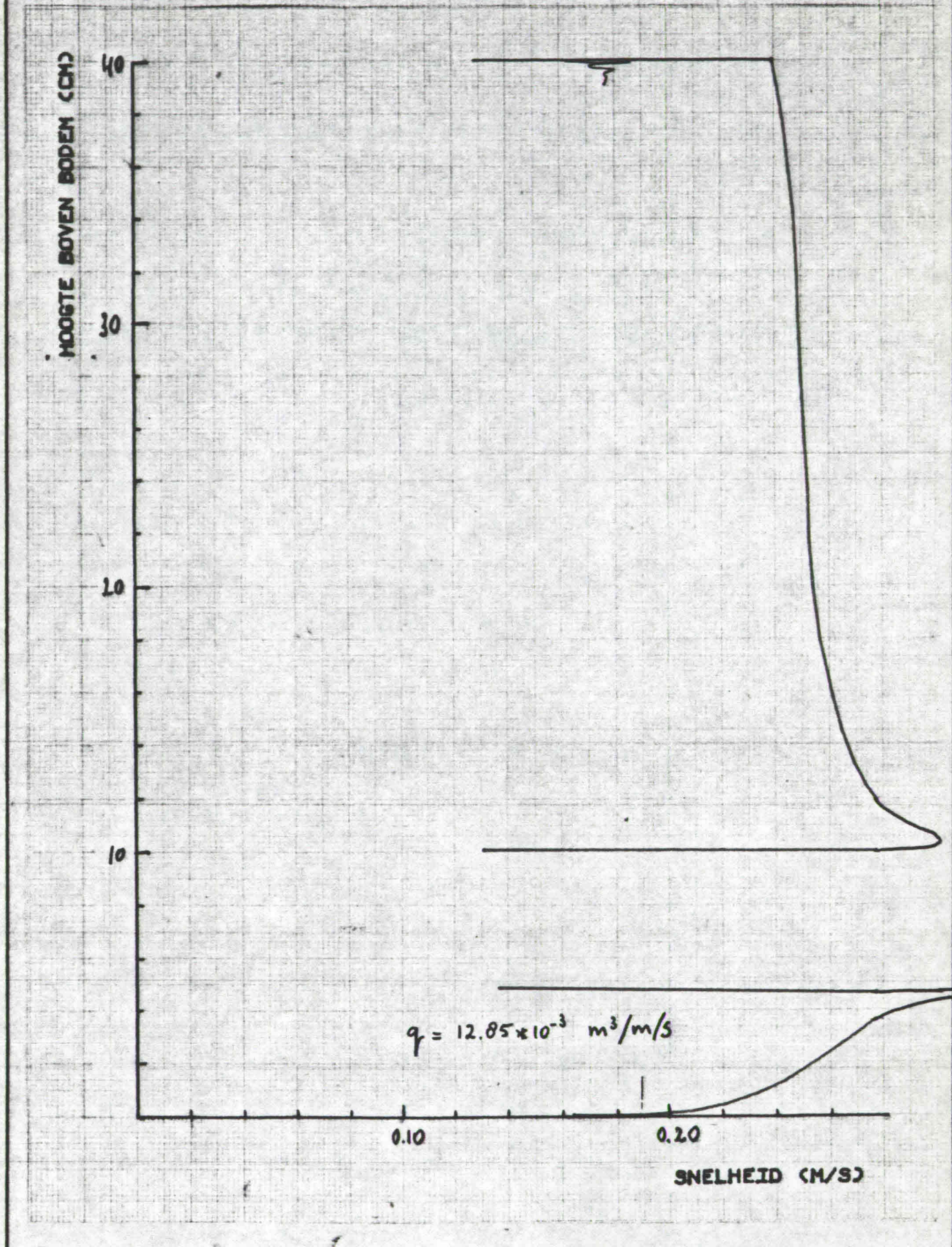




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.25 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 50 mm  
D-INIT. = 50 mm  
D58 =



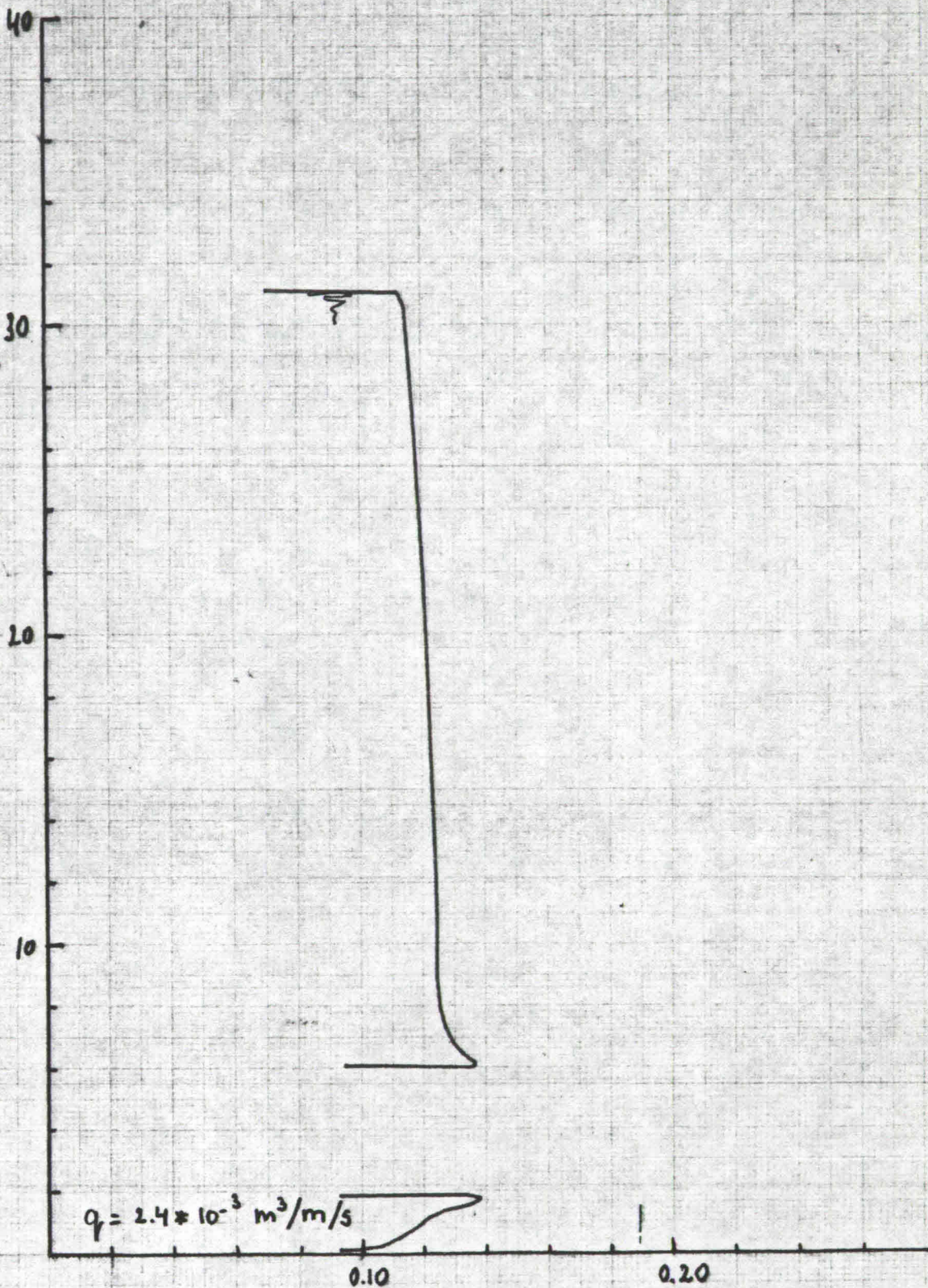


ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: VASE

$\bar{v} = 0.10 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 20 mm  
D50 =

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)



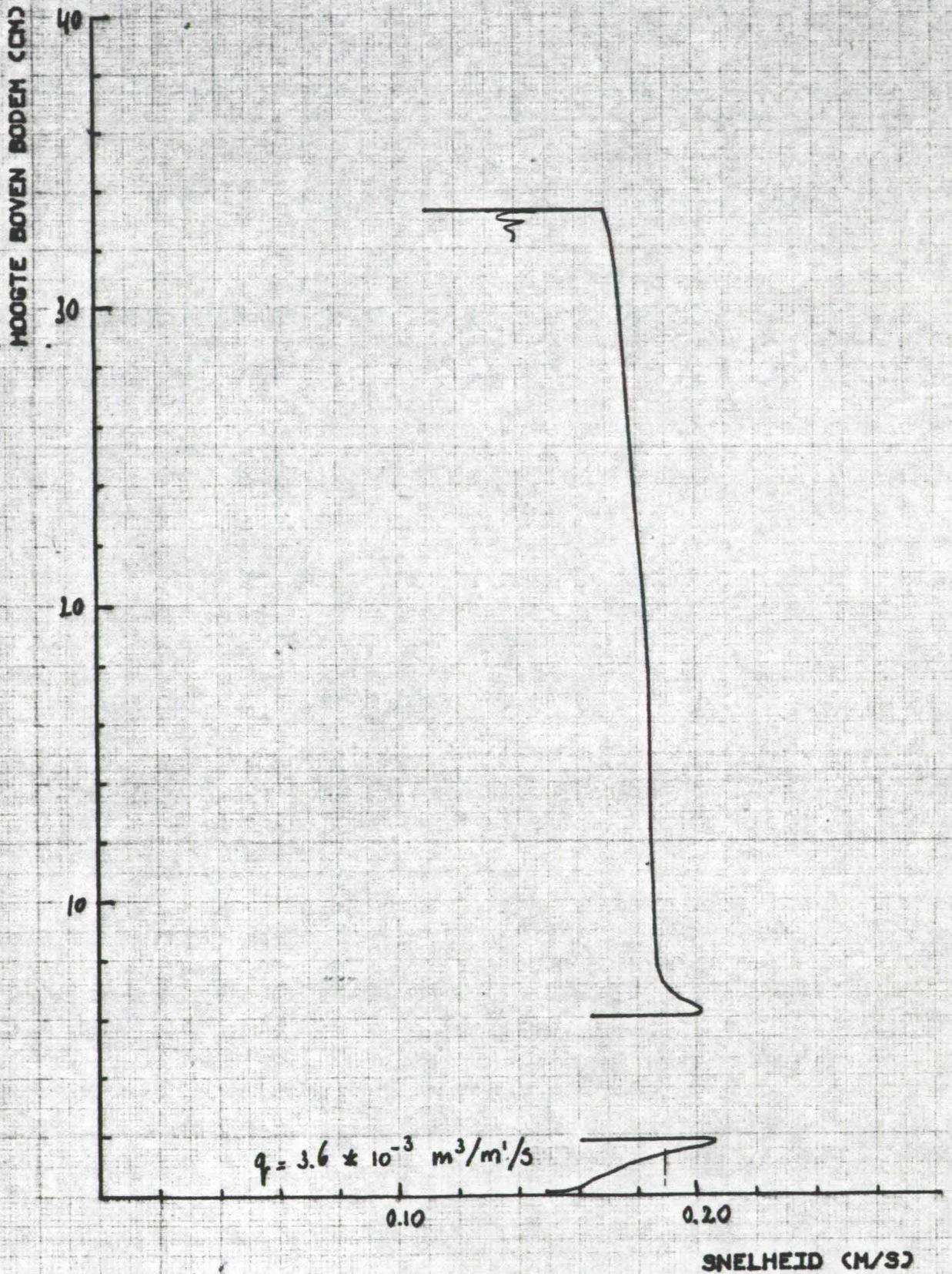
SNELHEID (CM/S)



ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.15 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 20 mm  
D50 =





ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 20 mm  
D50 =

HOOGTE BOVEN BODEN (CM)

40

30

20

10

$q = 4.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s}$

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)



# ONTGRONDING ONDER PIJF

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.25 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 20 mm  
D50 =

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

20

10

$$q = 5.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s}$$

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

max 0.341 m/s →

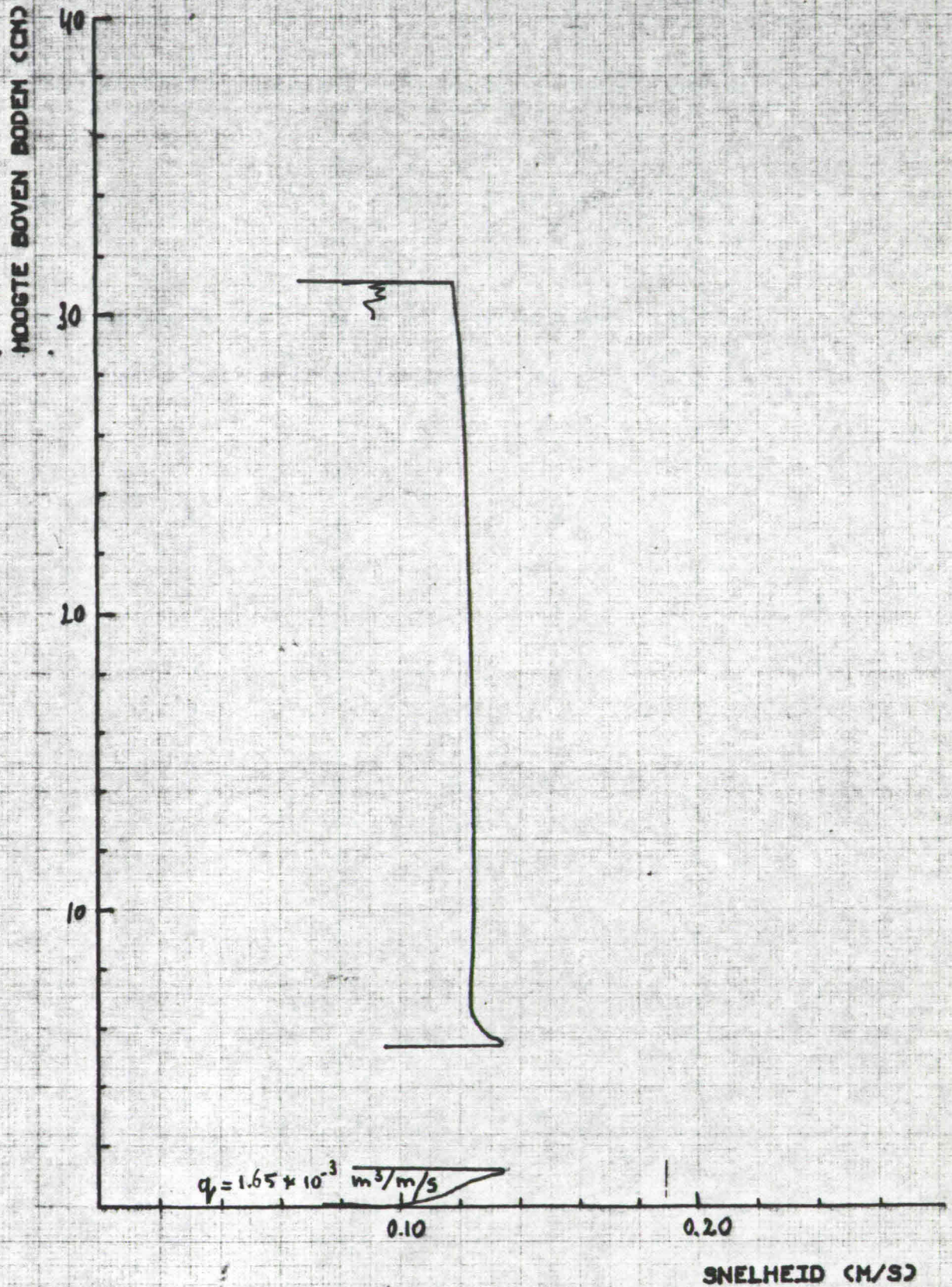
max 0.342 m/s →



ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vaste

$\bar{v} = 0.10 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 14 mm  
D50 =





# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.15 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 14 mm  
D50 =

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

20

10

$q = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{s}$

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

BIJLAGE:

17



# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 14 mm  
D50 =

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

20

10

$q = 3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{s}$

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

BIJLAGE:

18



ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  
BODEM: vast

$\bar{v} = 0.25 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 14 mm  
D58 =

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

20

10

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

$$q = 4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s}$$

max 0.329 m/s →

max 0.339 m/s →

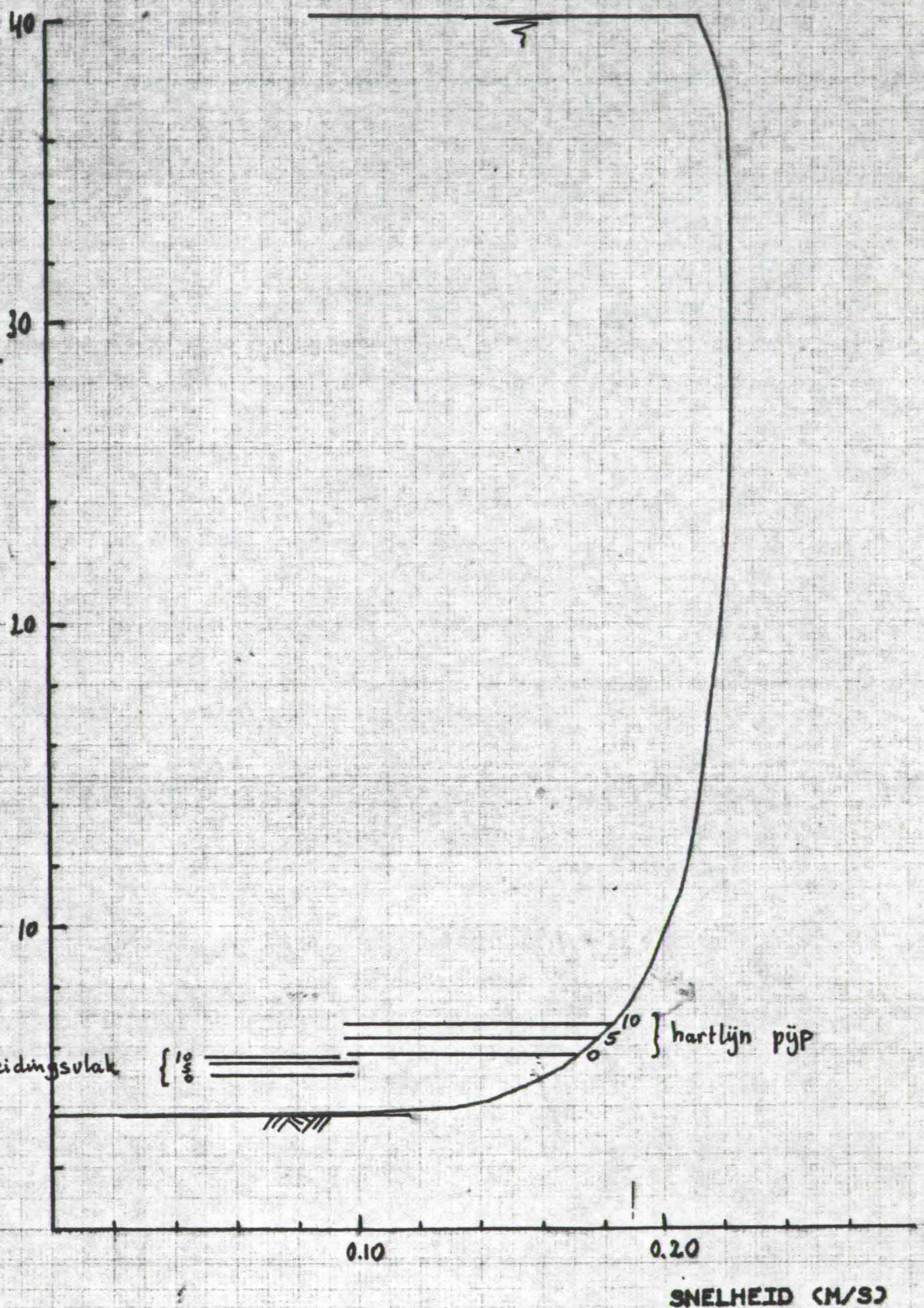


ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: ongestoord  
BODEM: Land

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP =  
D-INIT. =  
D50 =  $190 \mu\text{m}$

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)



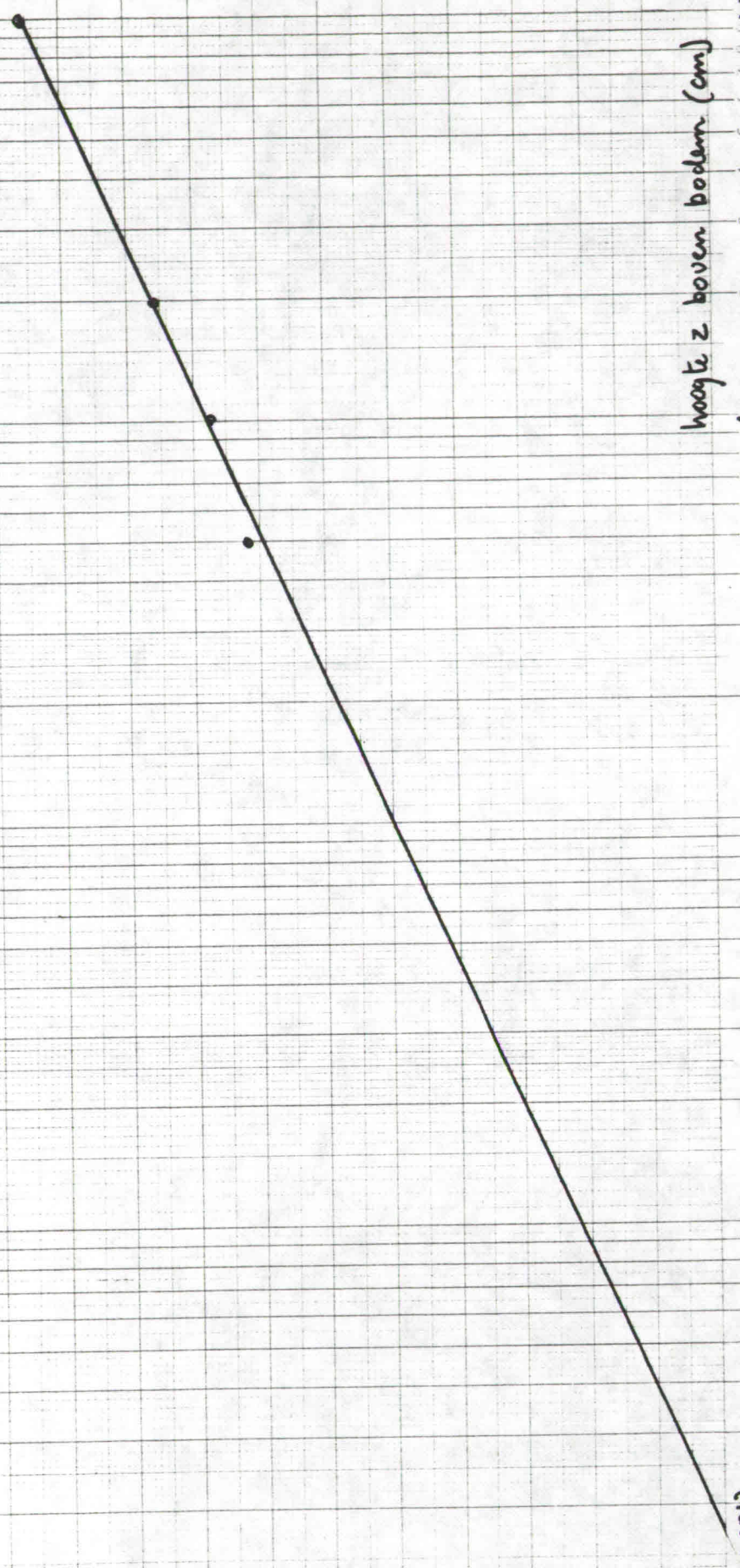


$\bar{U} = 0.10 \text{ m/s}$   
 $D_{50} = 190 \mu\text{m}$

logarit. misch. snelheidsprofiel

snelheid (cm/s) 22 20 18 16 14 12 10 8 6 4 2

hoogte z boven bodem (cm) 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0.1 0.01





ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: I  
BODEM: *zand*

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 10 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

20

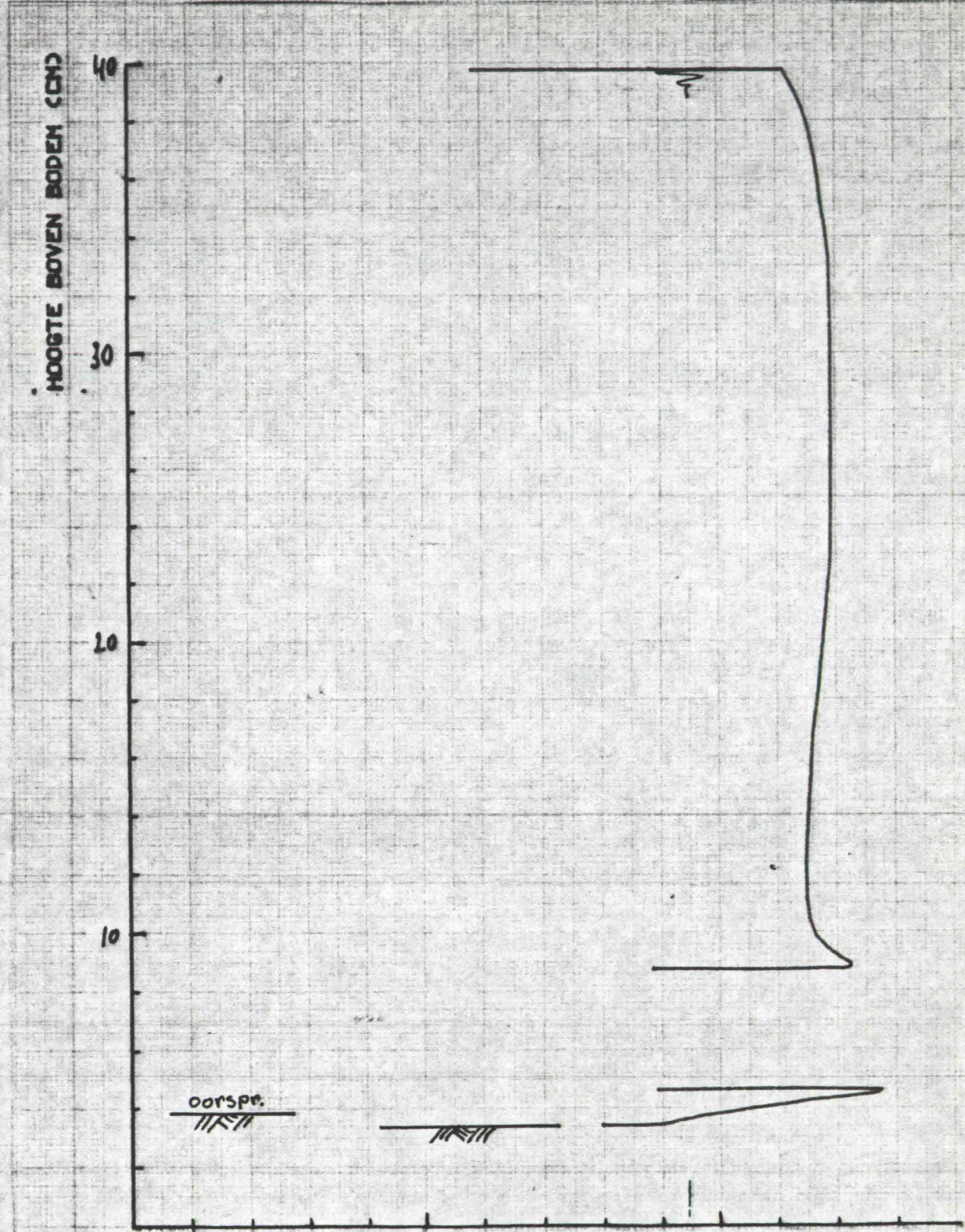
10

oorspr. 

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

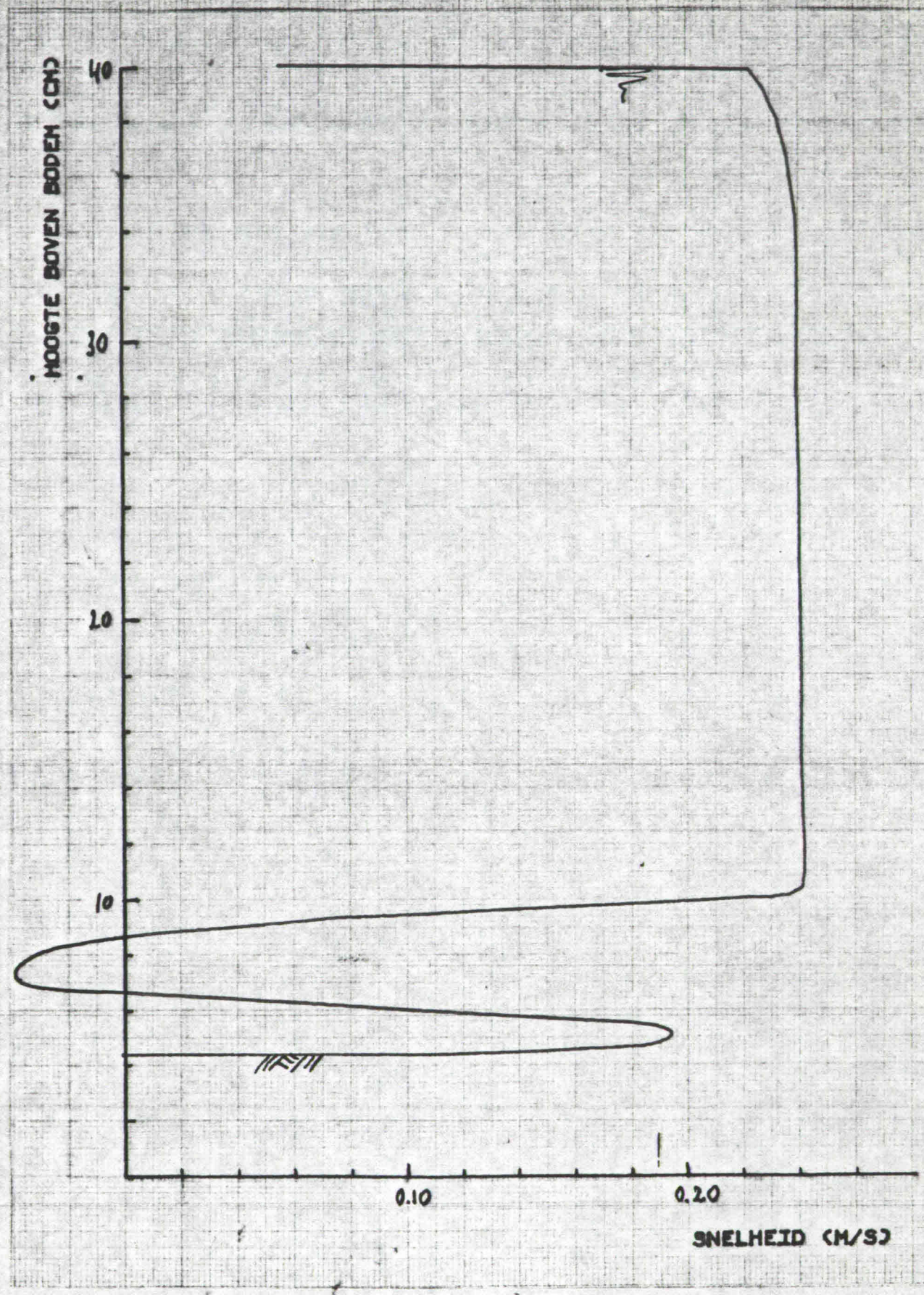




ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: II  
BODEM: land

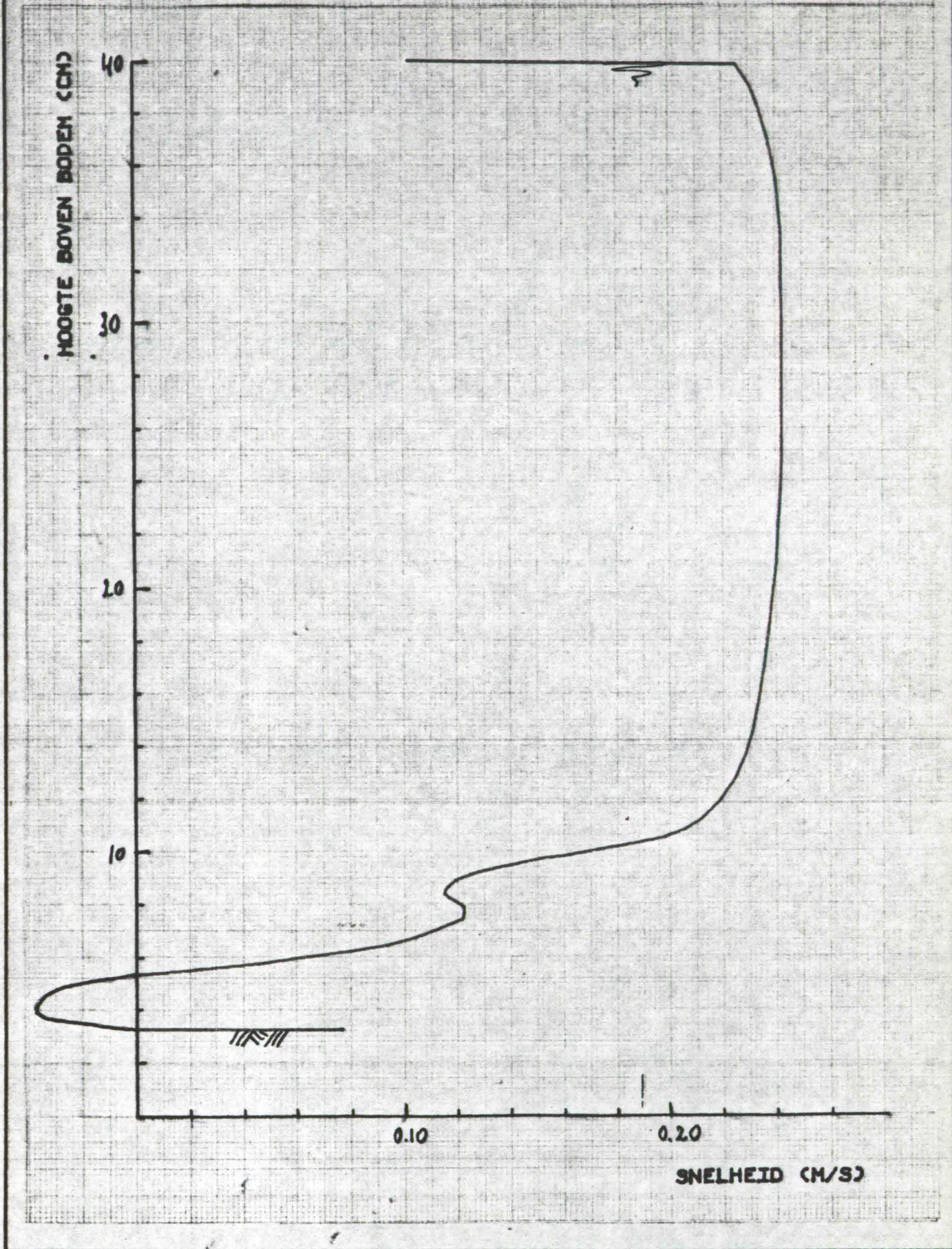
$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 10 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$





DOORSNEDE: III  
BODEM: zand

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 10 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

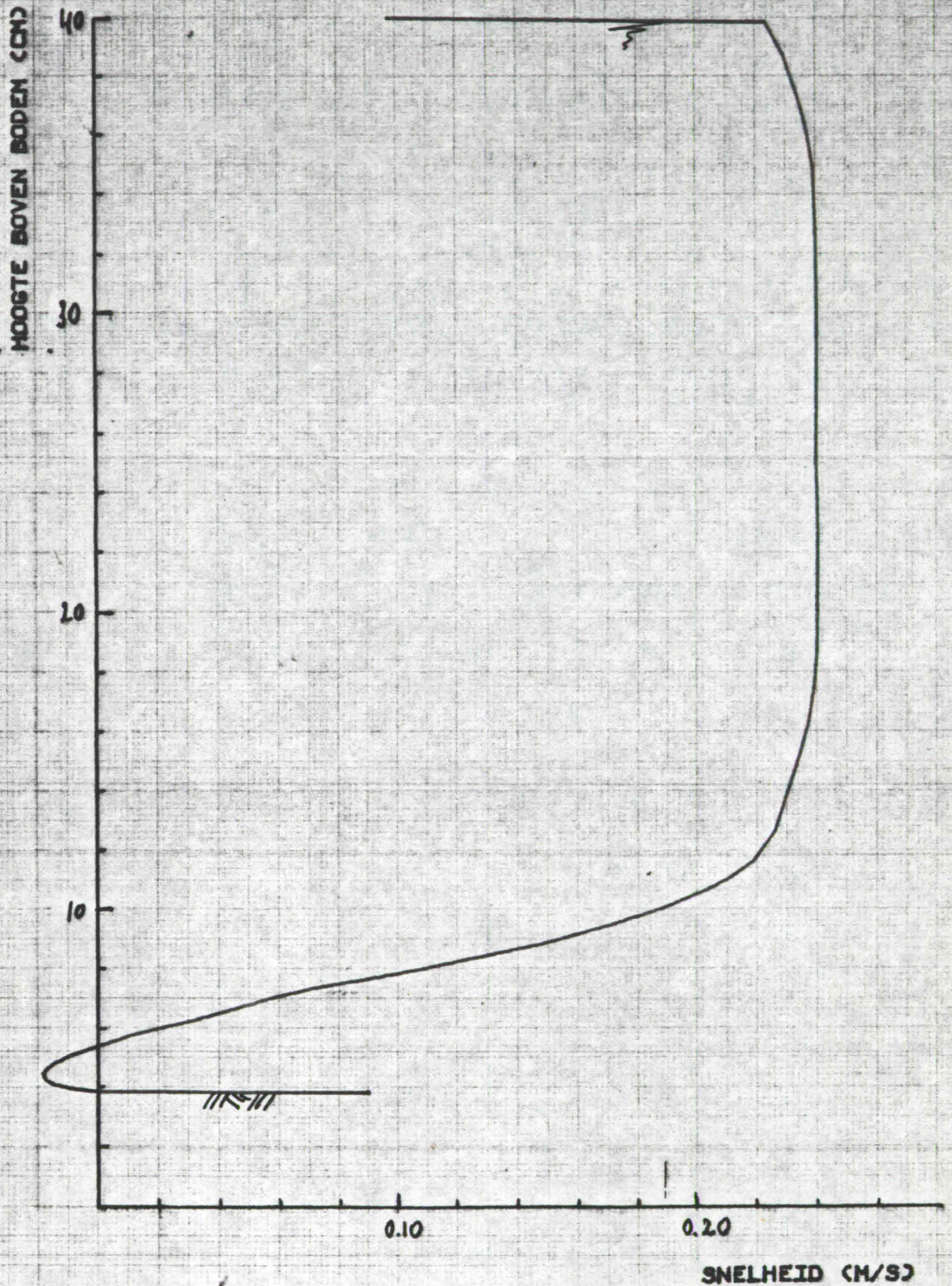




ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: IV  
BODEM: land

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 10 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

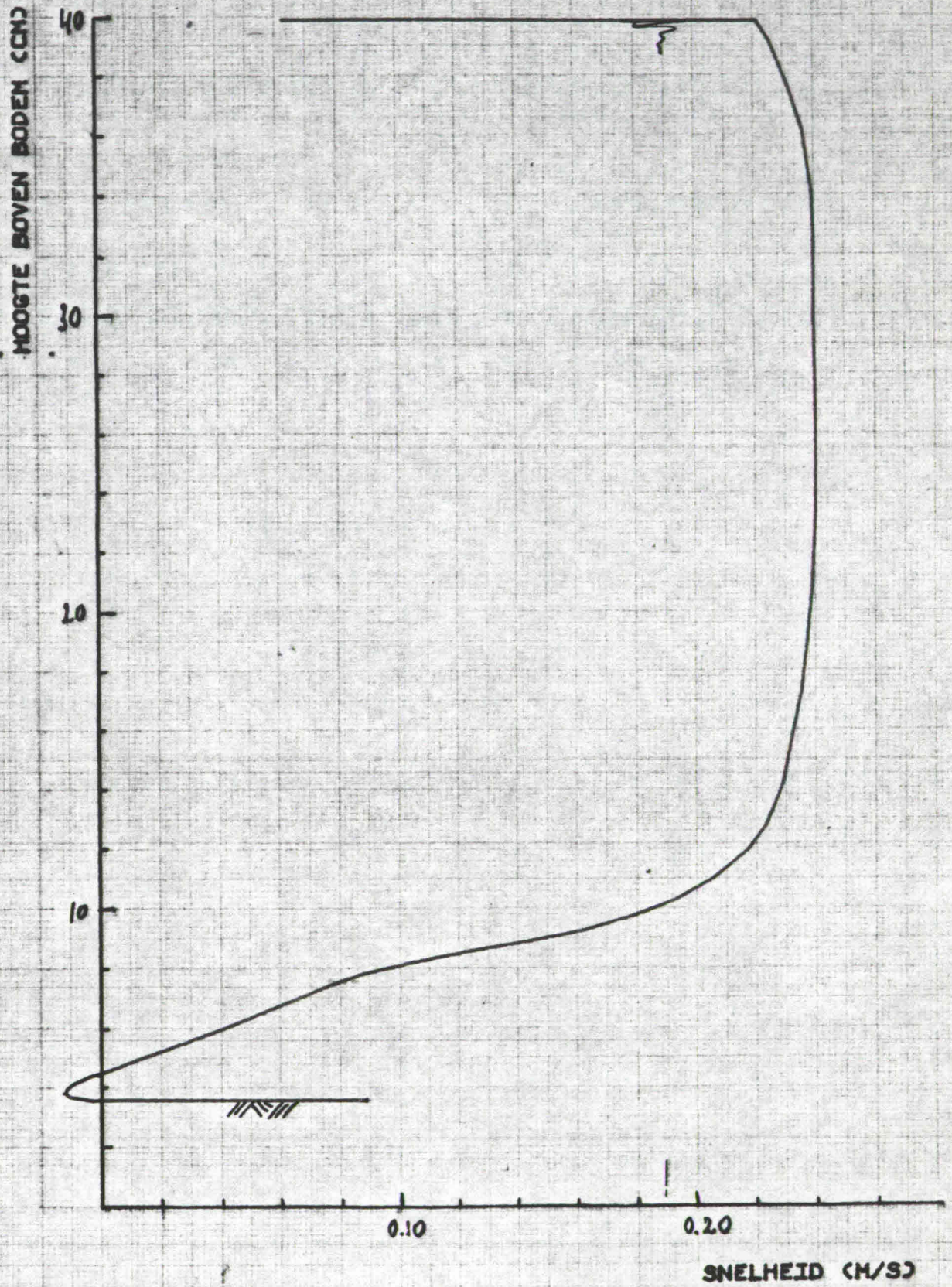




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  $\nabla$   
BODEM: *zand*

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 10 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

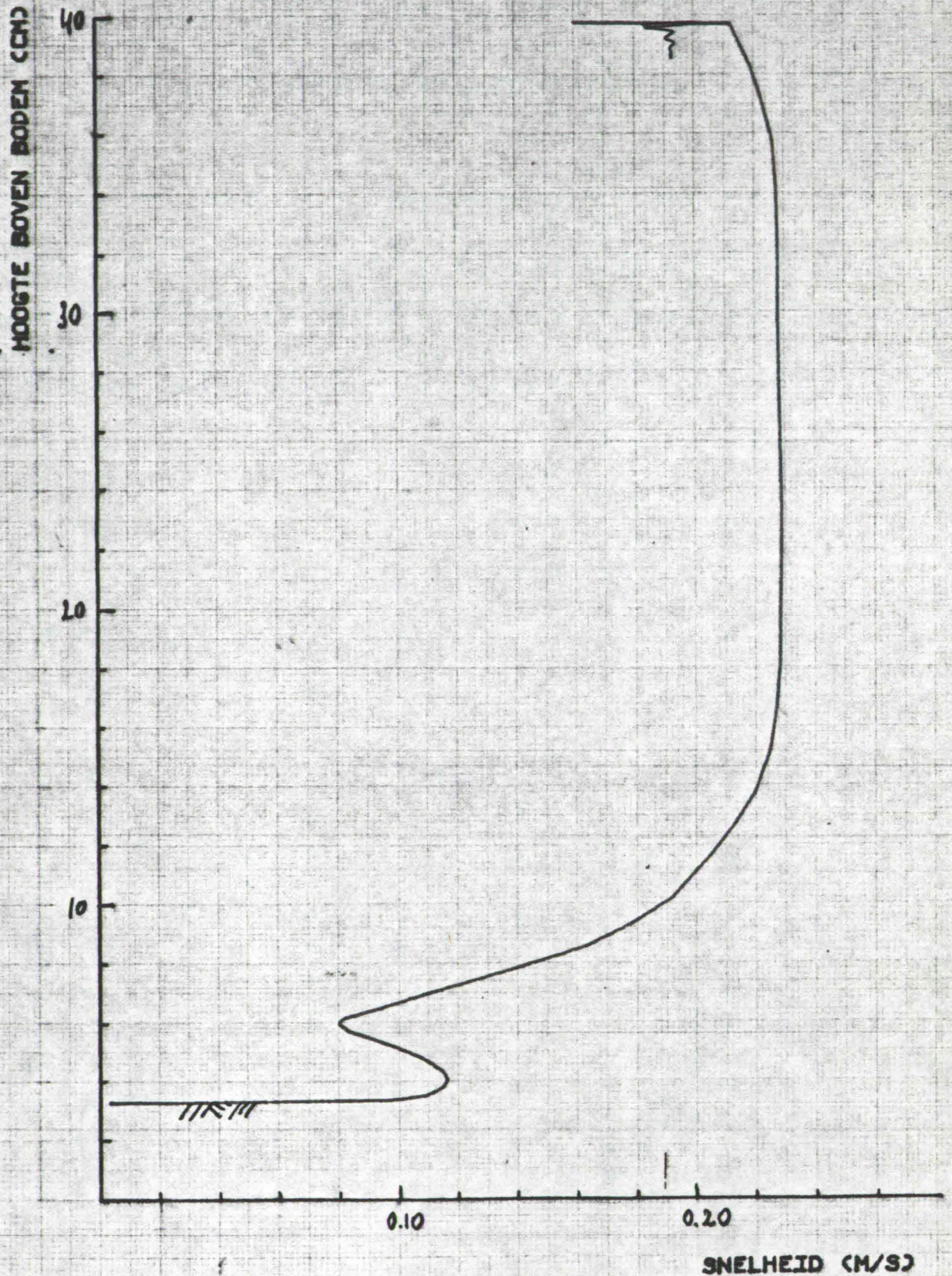




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: I  
BODEN: Land

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 5 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$





ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: I  
BODEM: zand

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 5 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

HOOGTE BOVEN BODEM (CM)

40

30

20

10

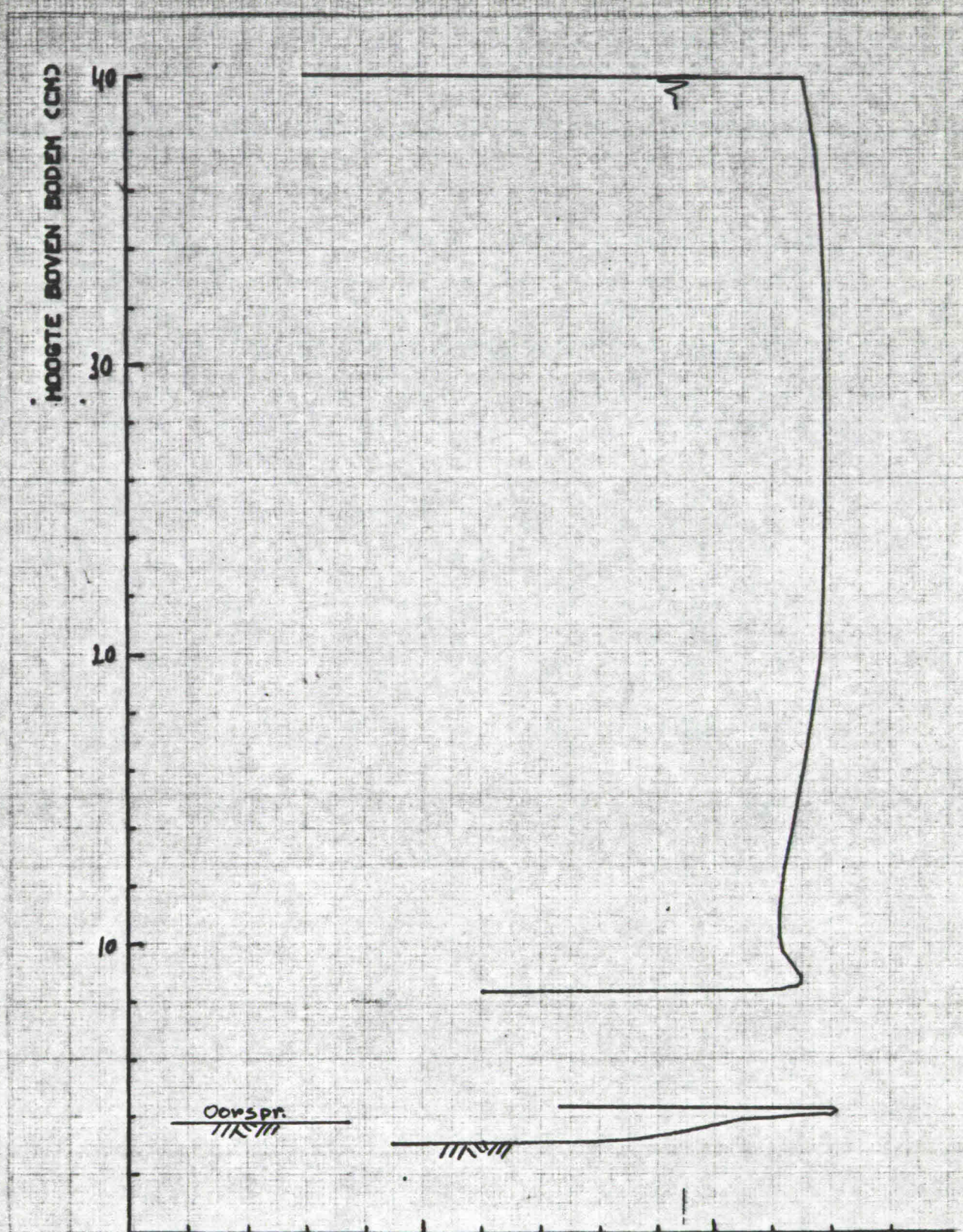
005 pr.  
///

///

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

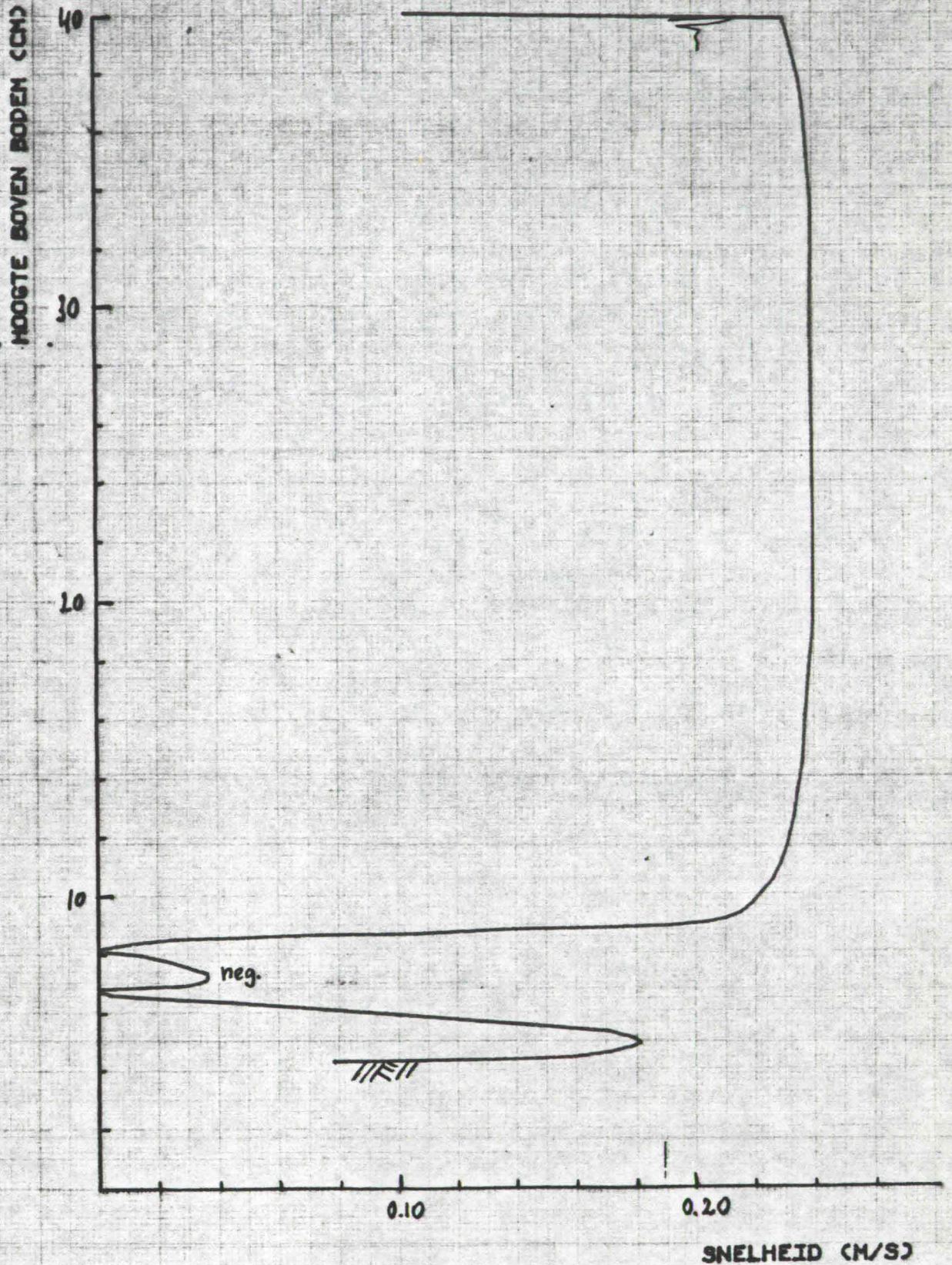




ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: III  
BODEM: land

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 5 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

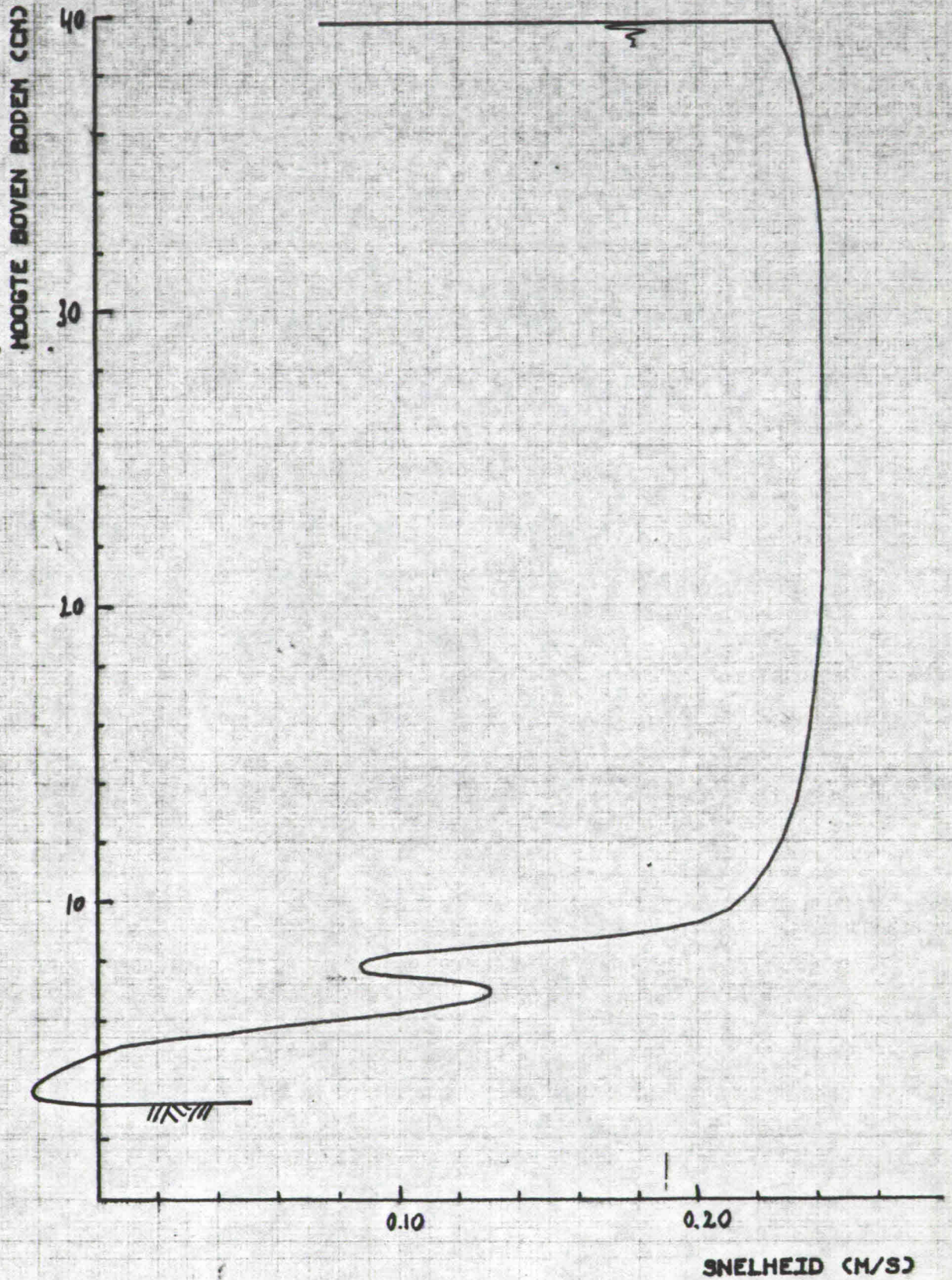




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: IV  
BODEN: land

$\bar{v} = 0.10 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 5 mm  
D50 =  $190 \mu\text{m}$

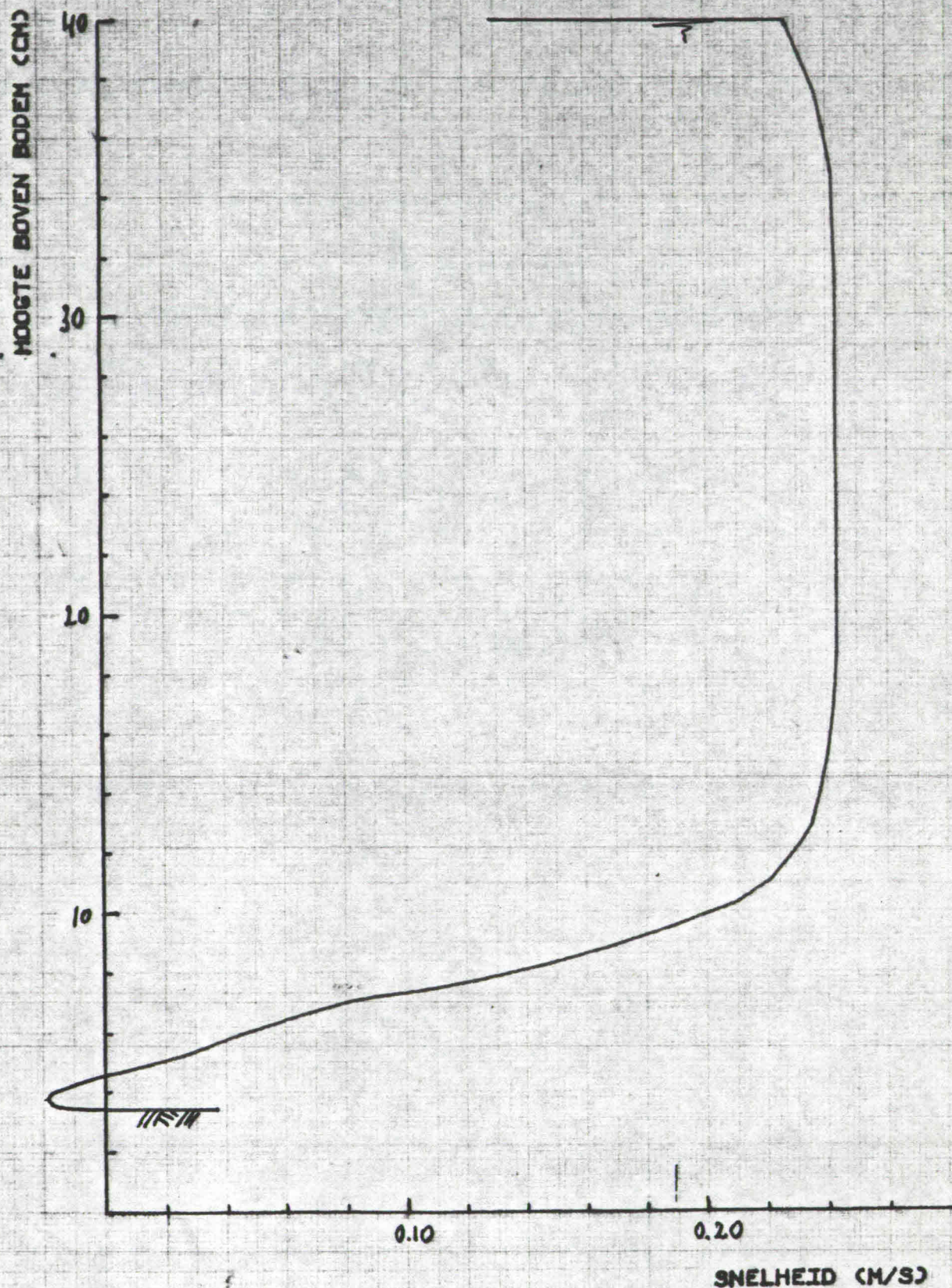




# ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE:  $\nabla$   
BODEM: *zand*

$\bar{v} = 0.20$  m/s  
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 5 mm  
D50 = 190  $\mu$ m

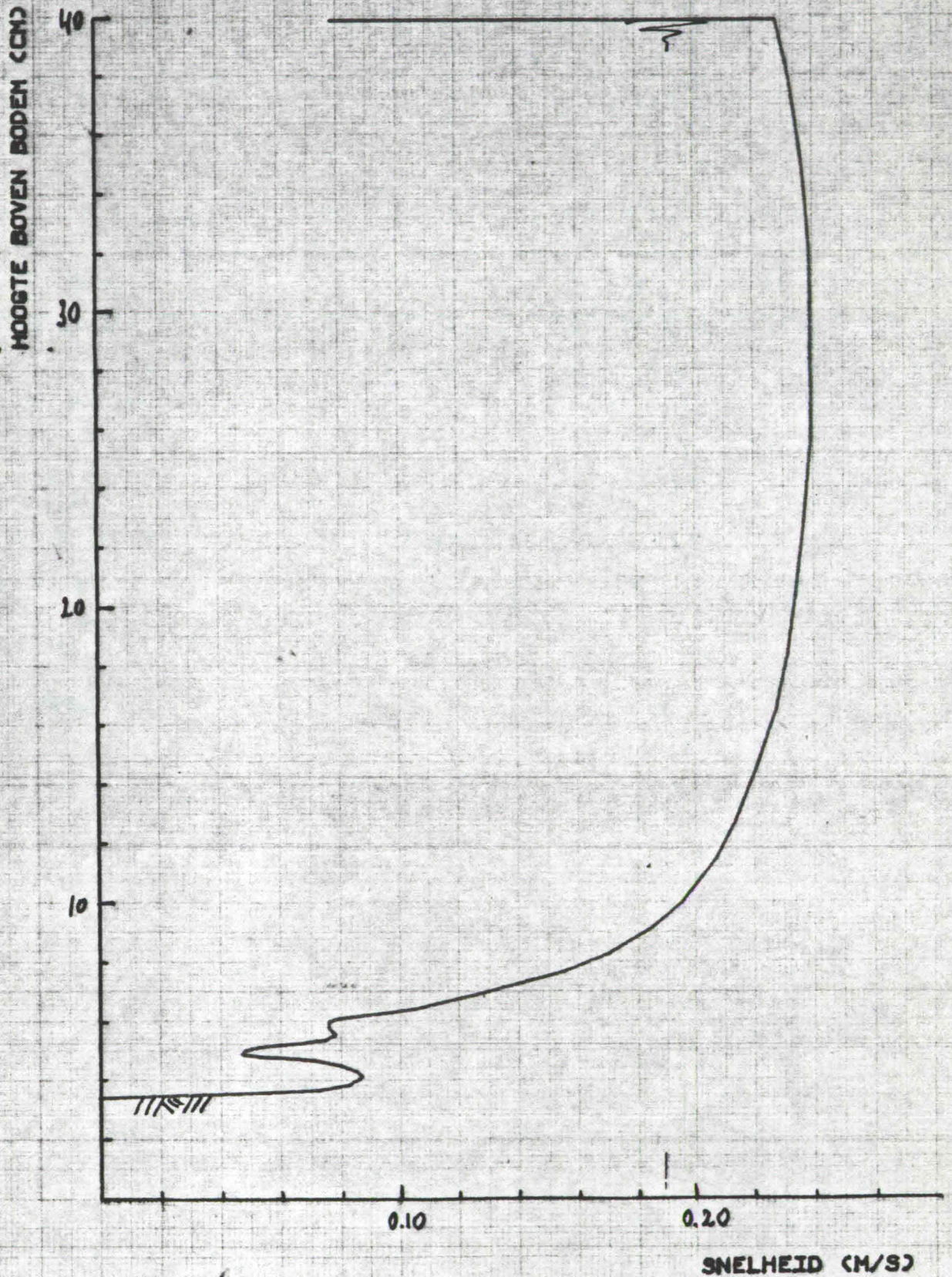




ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: I  
BODEM: *land*

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 0 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$





ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: II  
BODEM: land

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 0 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

HOOGTE BOVEN BODEN (CM)

40

30

20

10

DOORSN.  
I/III

I/III

0.10

0.20

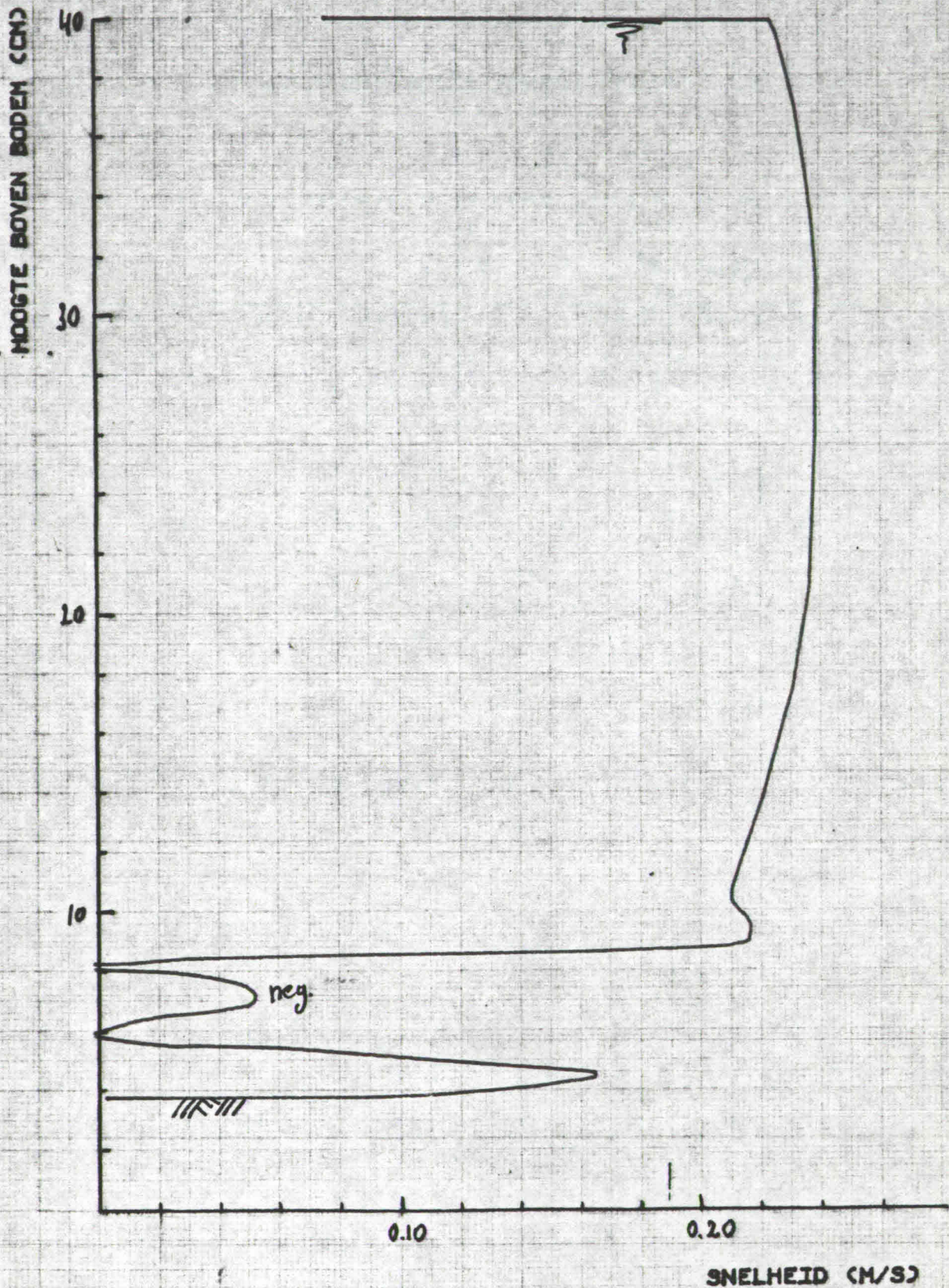
SNELHEID (M/S)



ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: III  
BODEM: Land

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 0 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$





ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: IV  
BODEN: land

$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 0 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$

HOOGTE BOVEN BODEN (CM)

40

30

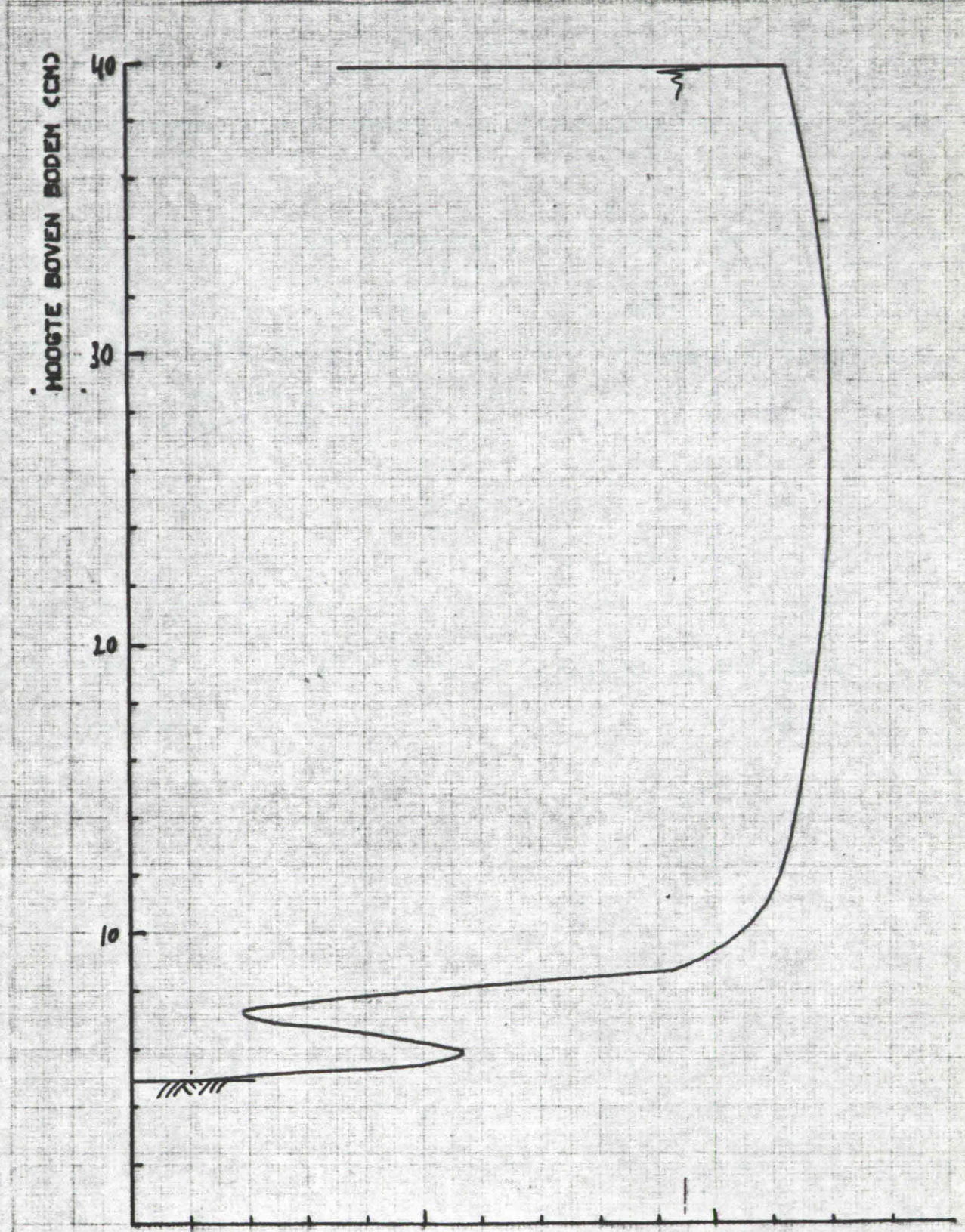
20

10

0.10

0.20

SNELHEID (M/S)

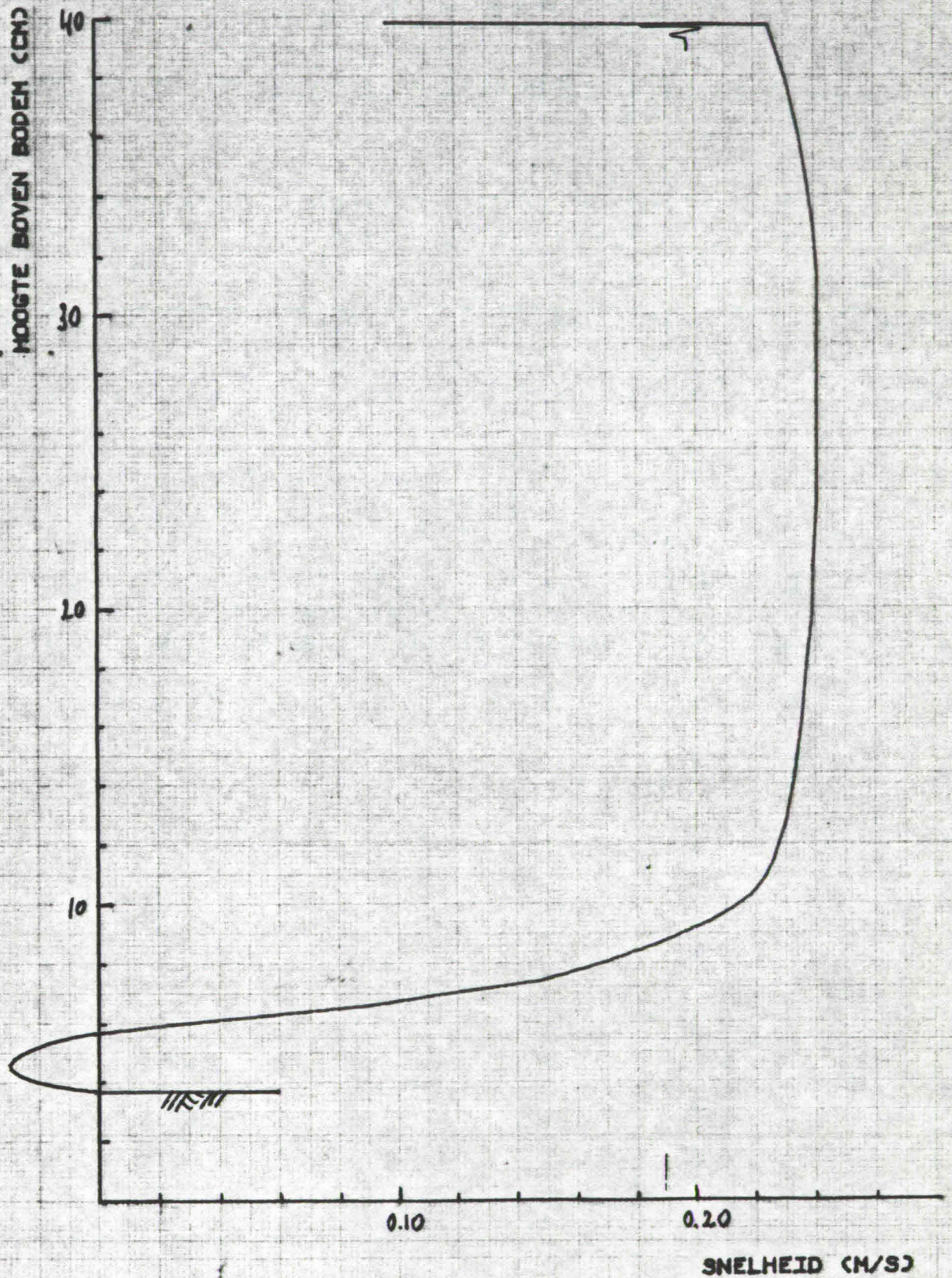




ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: V  
BODEM: land

$\bar{v} = 0.20$  m/s  
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 0 mm  
D50 = 190  $\mu$ m

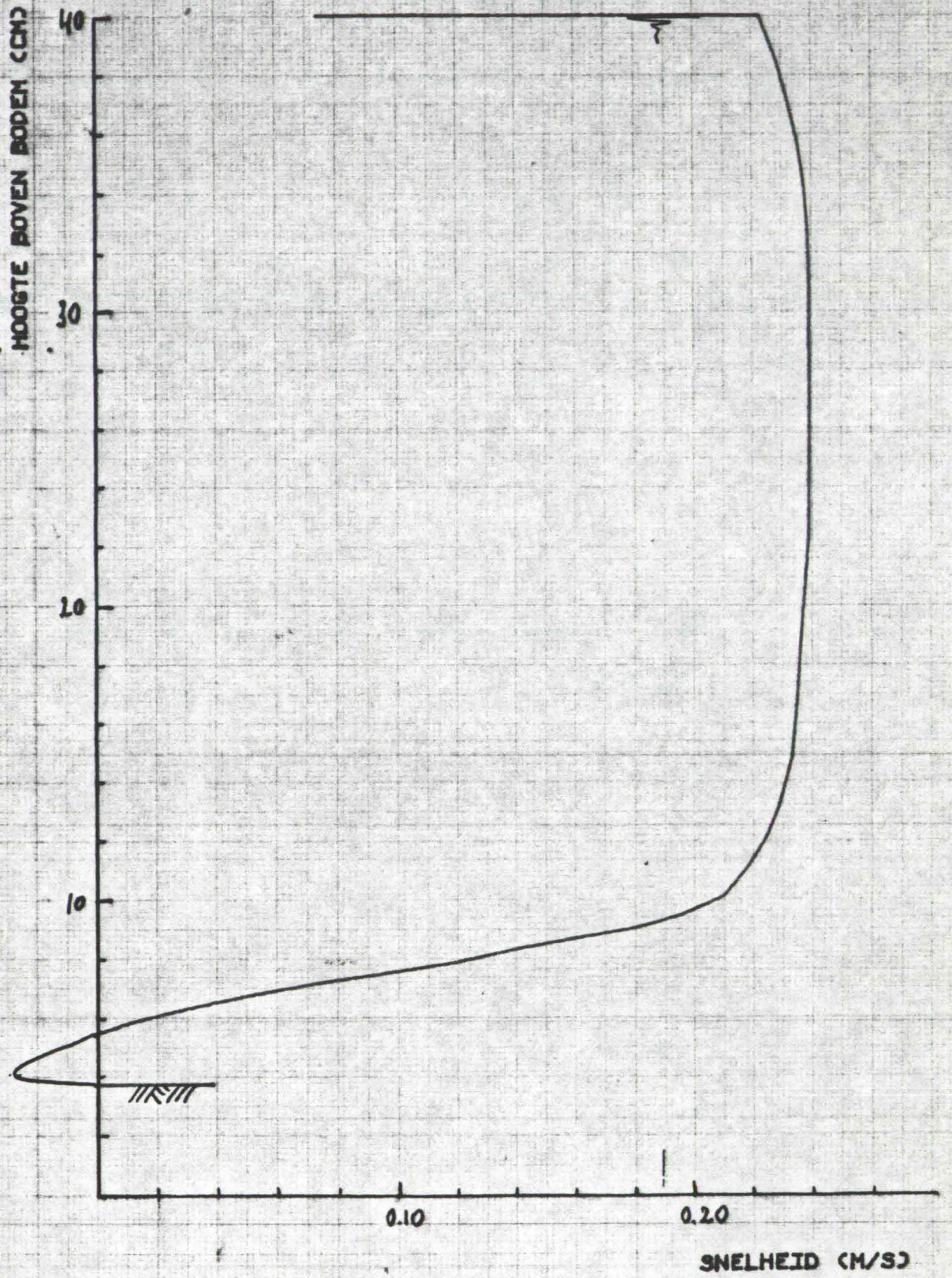




ONTGRONDING ONDER PIJP

DOORSNEDE: VI  
BODEN: Zand

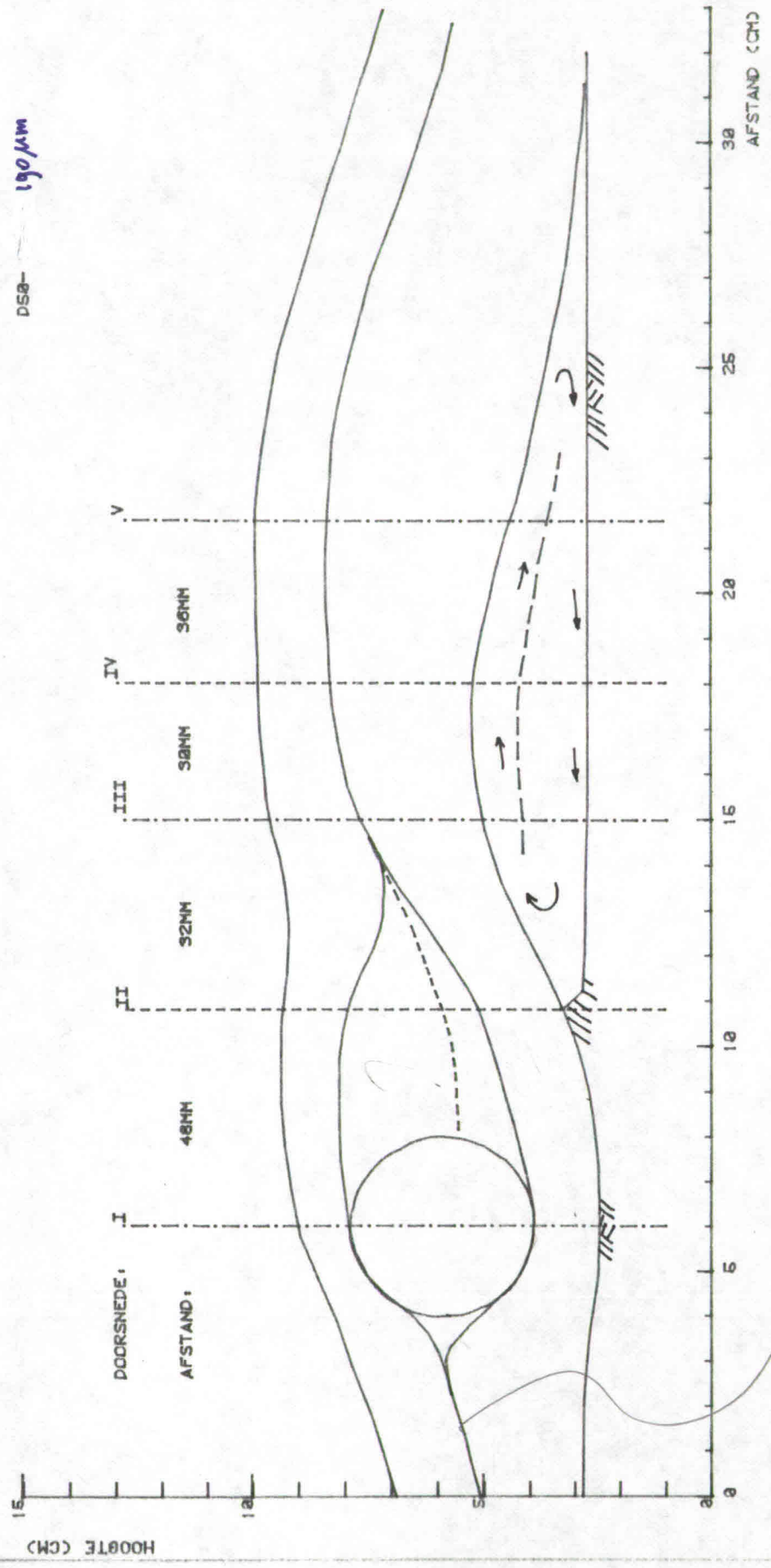
$\bar{v} = 0.20 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 0 mm  
D50 = 190  $\mu\text{m}$





ONTGRONDING ONDER PIJP

$\bar{v} = 0.28 \text{ M/S}$   
 DIAM. PIJP = 48MM  
 D-INIT. = 18MM  
 DSB = 190MM



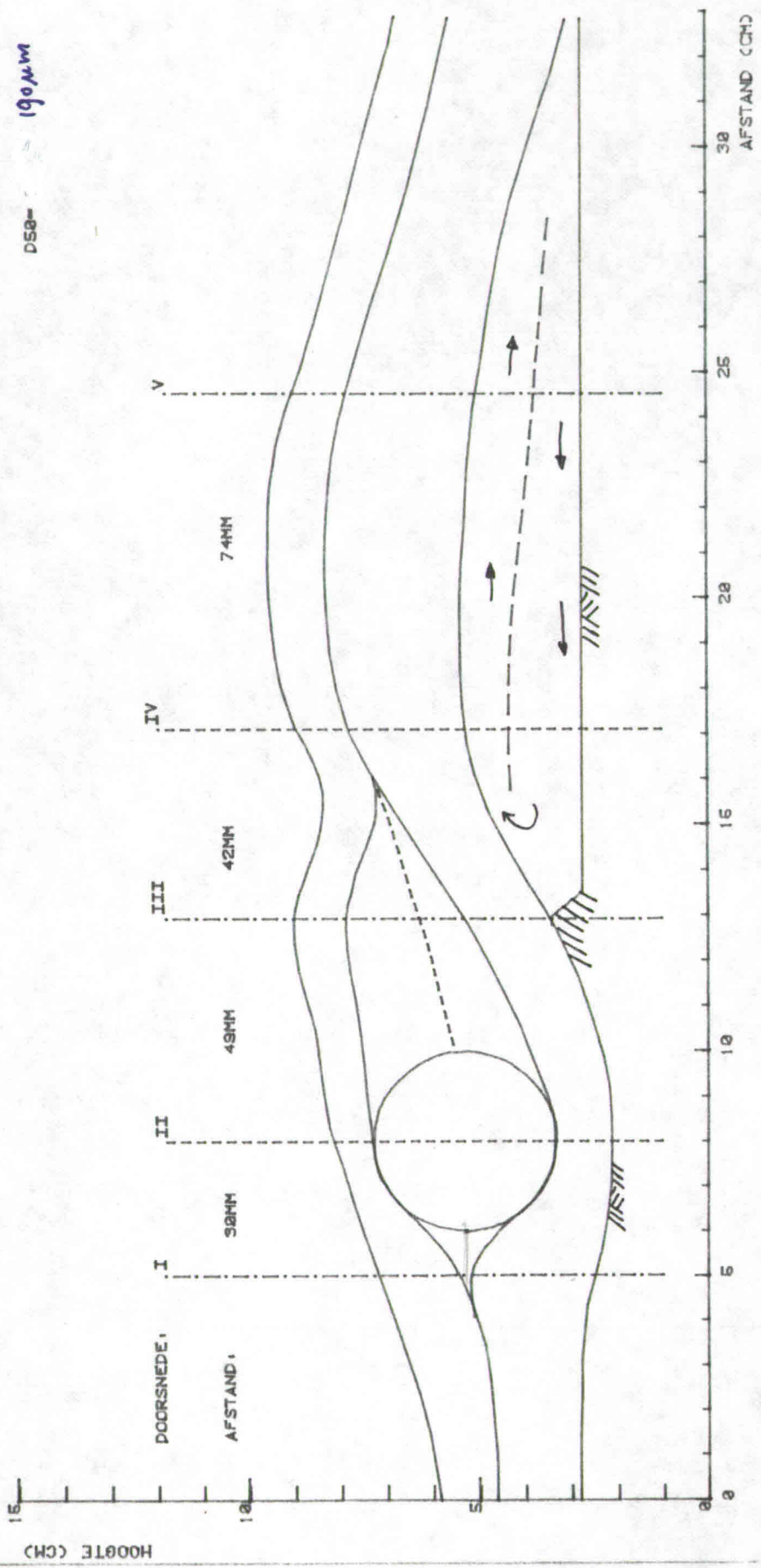
GEMIDDELD STROOMBEELD 'DEBIET-BANEN'

*omhoog stromen?*



ONTGRONDING ONDER PIJP

$\bar{v} = 0.28 \text{ M/S}$   
 DIAM. PIJP = 42MM  
 D-INIT. = 5MM  
 DSB = 190µm

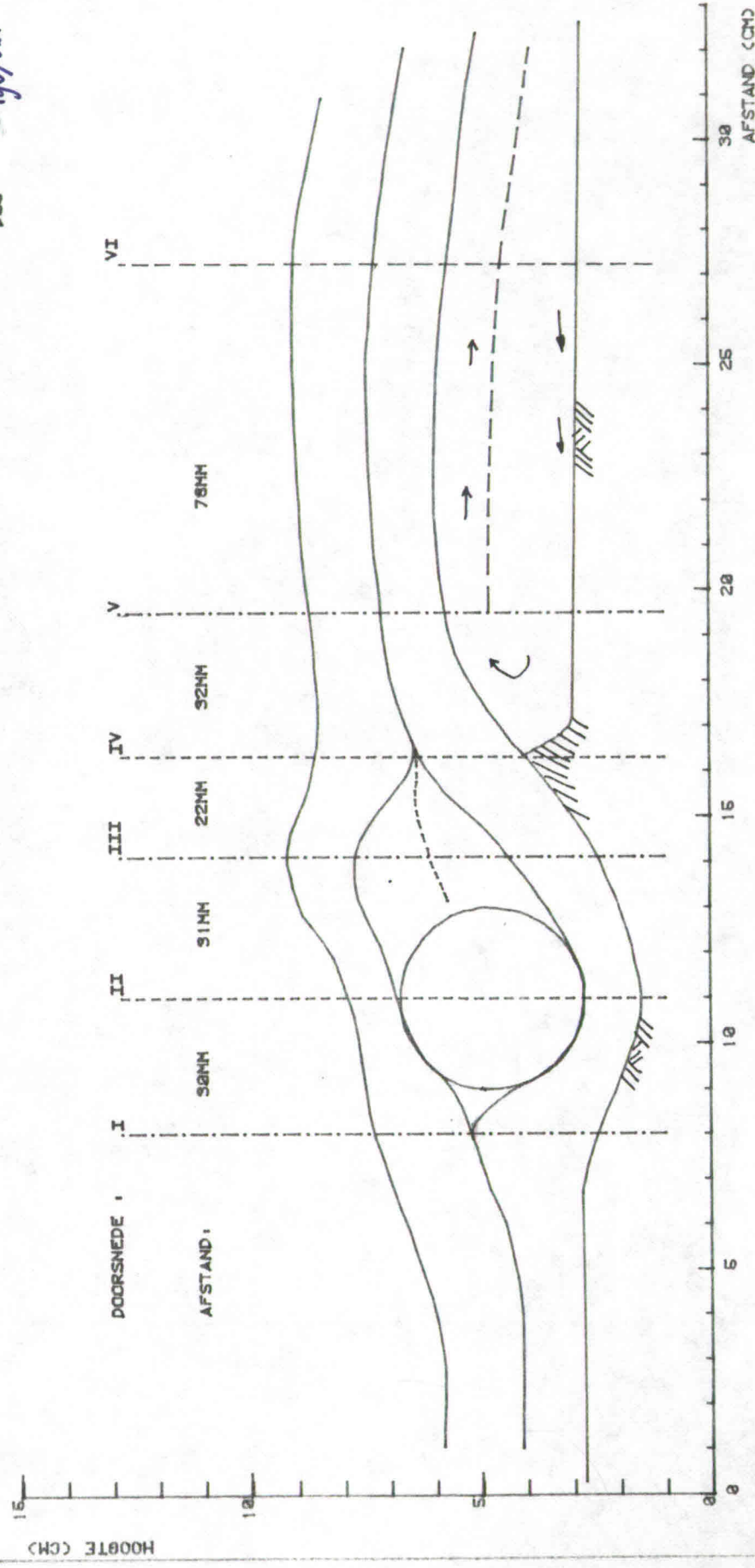


GENIDDELD STROOMBEELD 'DEBIET-BANEN'



ONTGRONDING ONDER PIJP

$\bar{V} = 0.28 \text{ M/S}$   
 DIAM. PIJP = 42MM  
 D-INIT. = 8MM  
 DSG = 190µm



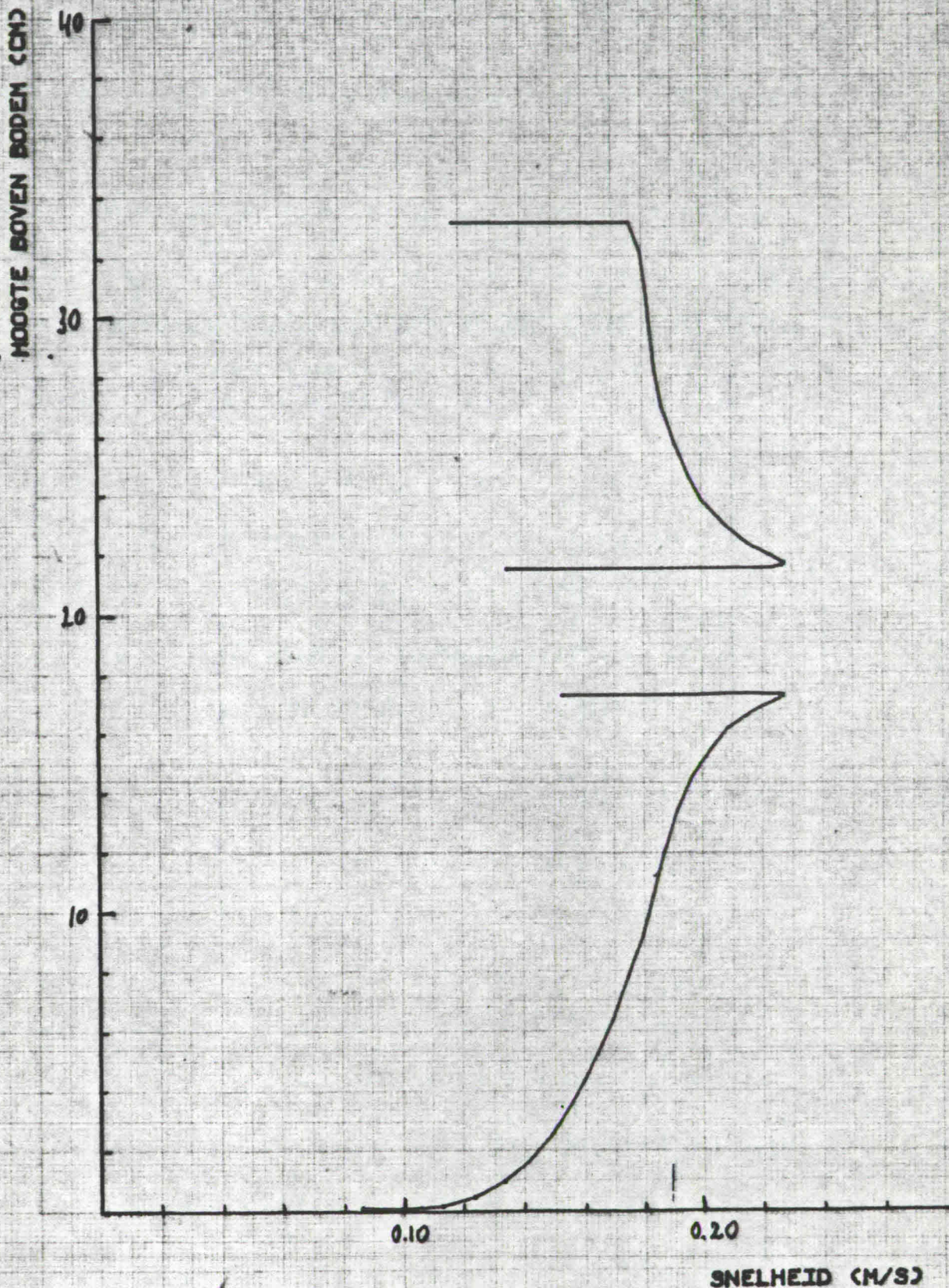
GEMIDDELD STROOMBEELD 'DEBIET-BANEN'



ONTGRONDING ONDER PIJP

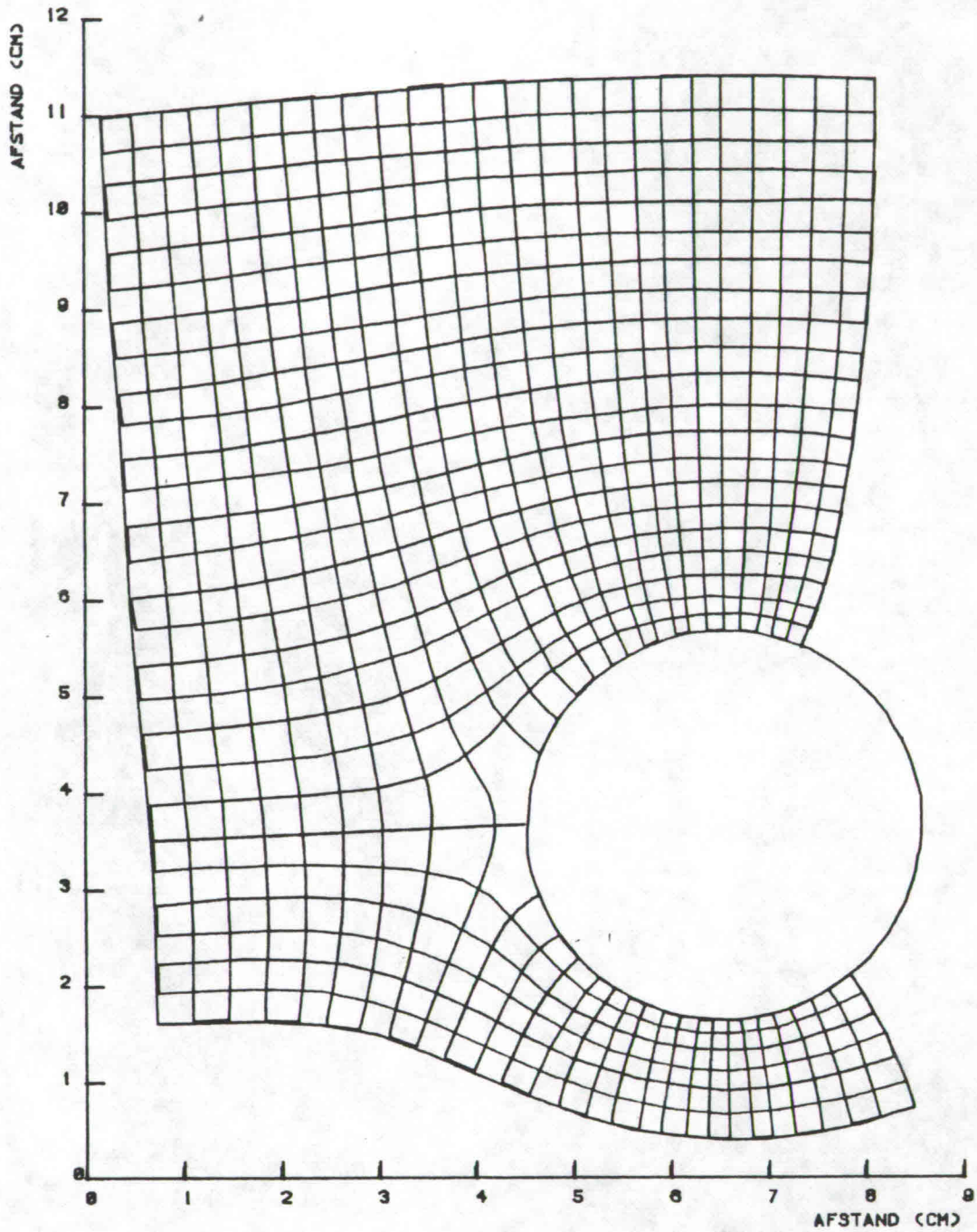
DOORSNEDE:  
BODEM: VAST

$\bar{v} = 0.15 \text{ m/s}$   
D-PIJP = 40 mm  
D-INIT. = 173 mm  
D50 =





D-INIT= 8 MM  
V= 0.28 M/S  
D-PIJP= 48 MM  
D50= 200 190 μm



POTENTIALSTROMING BEPAALD MET  
ELECTRISCH ANALOGON

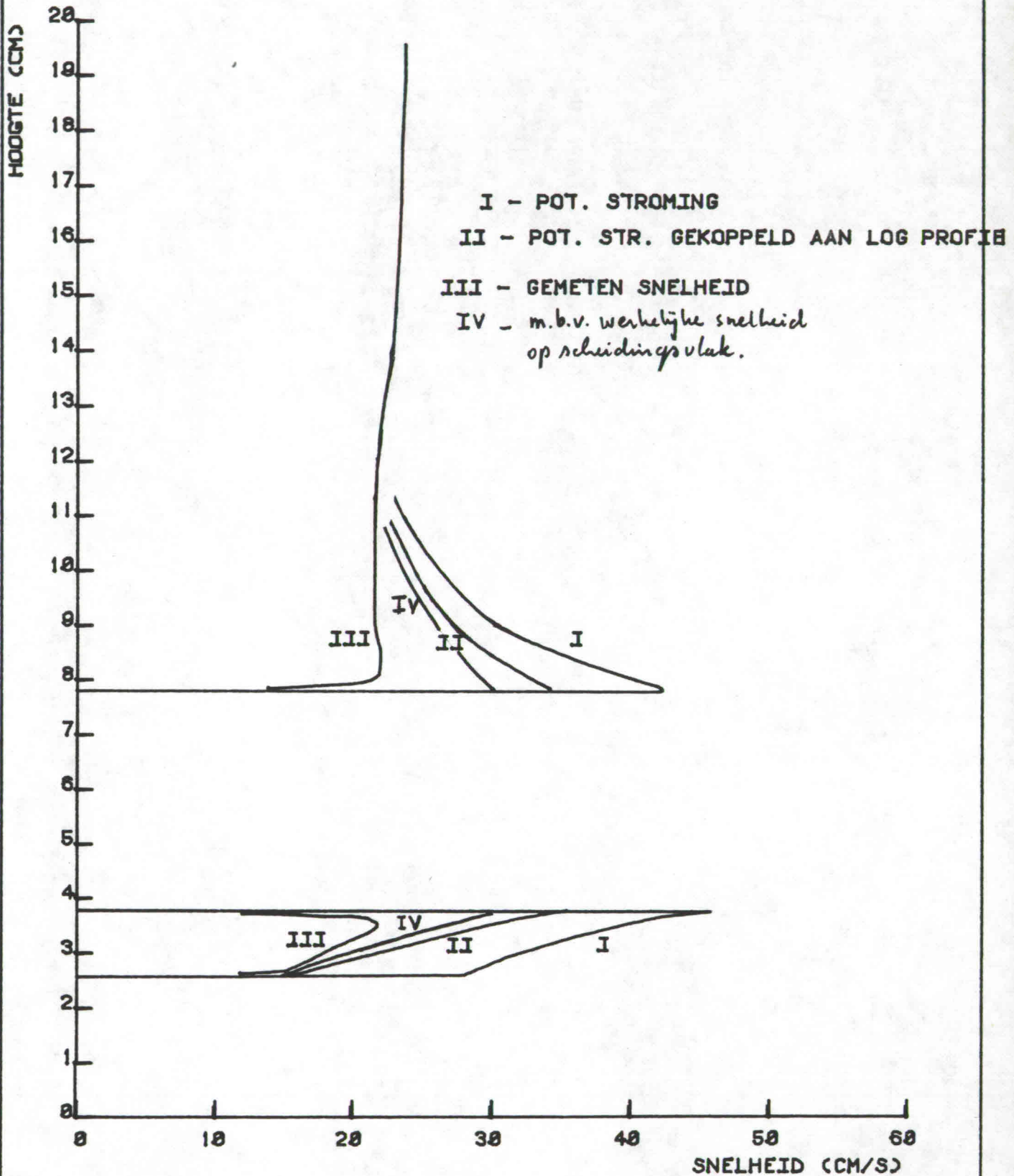


ONTGRONDING ONDER PIJP

D-INIT = 0 MM

D-PIJP = 40 MM

V = 0.20 M/S



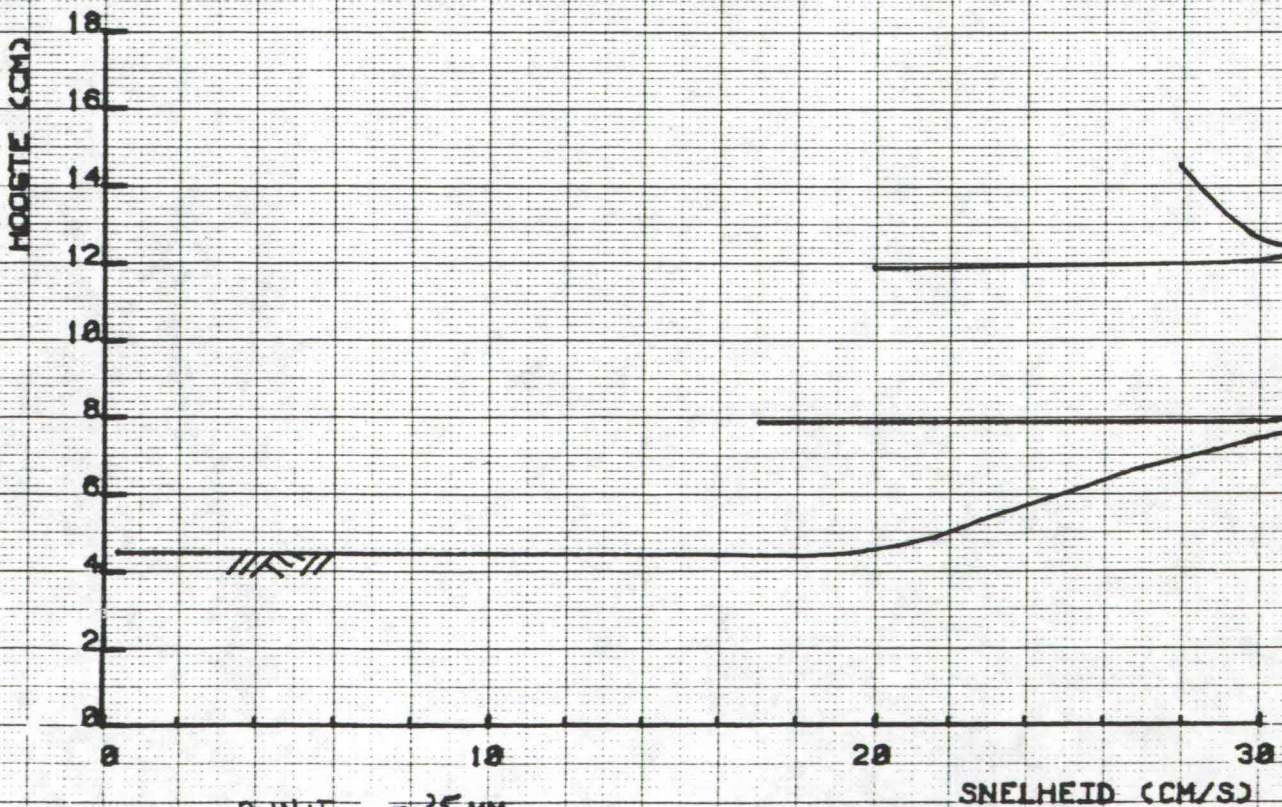
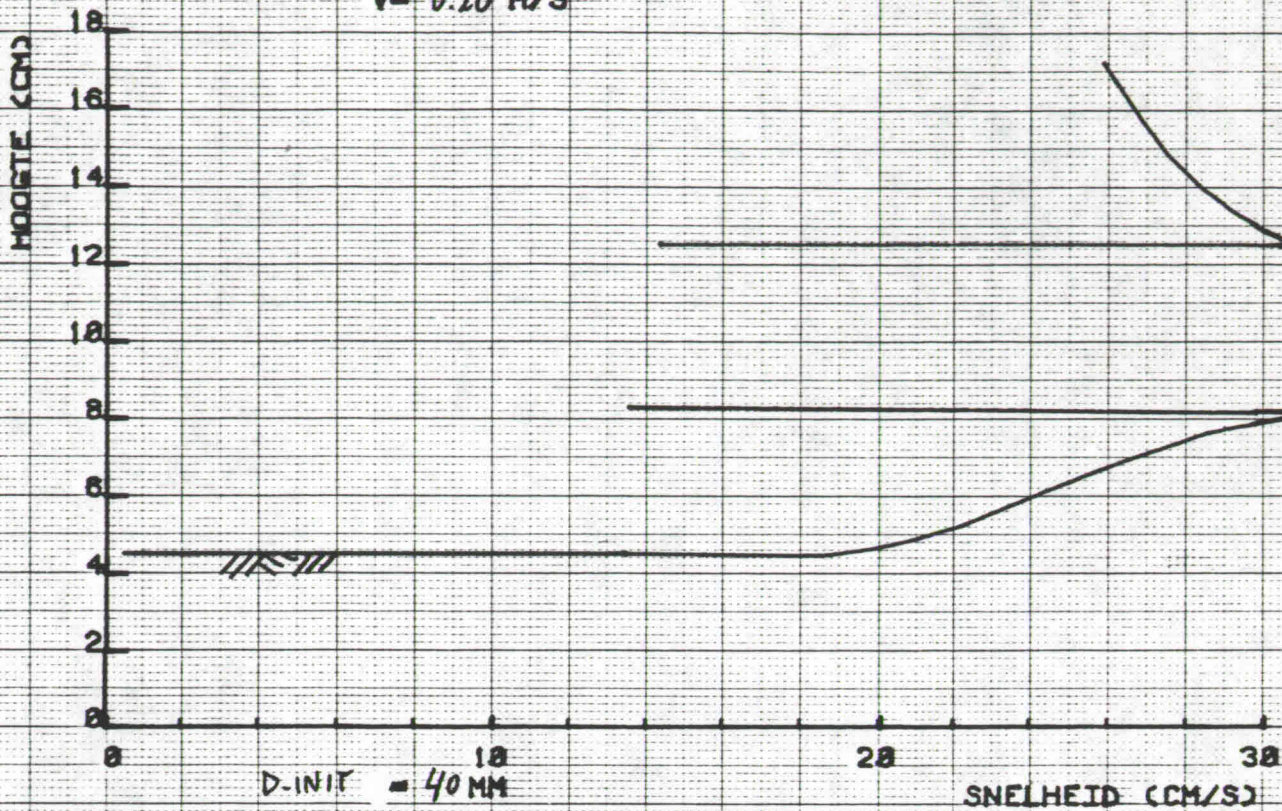
VERGELIJKING GEMETEN STOOMSNELHEID MET SNELHEID  
UIT POTENTIALSTROMINGSTHEORIE



ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 40 MM glad

$\bar{v} = 0.20 \text{ M/S}$

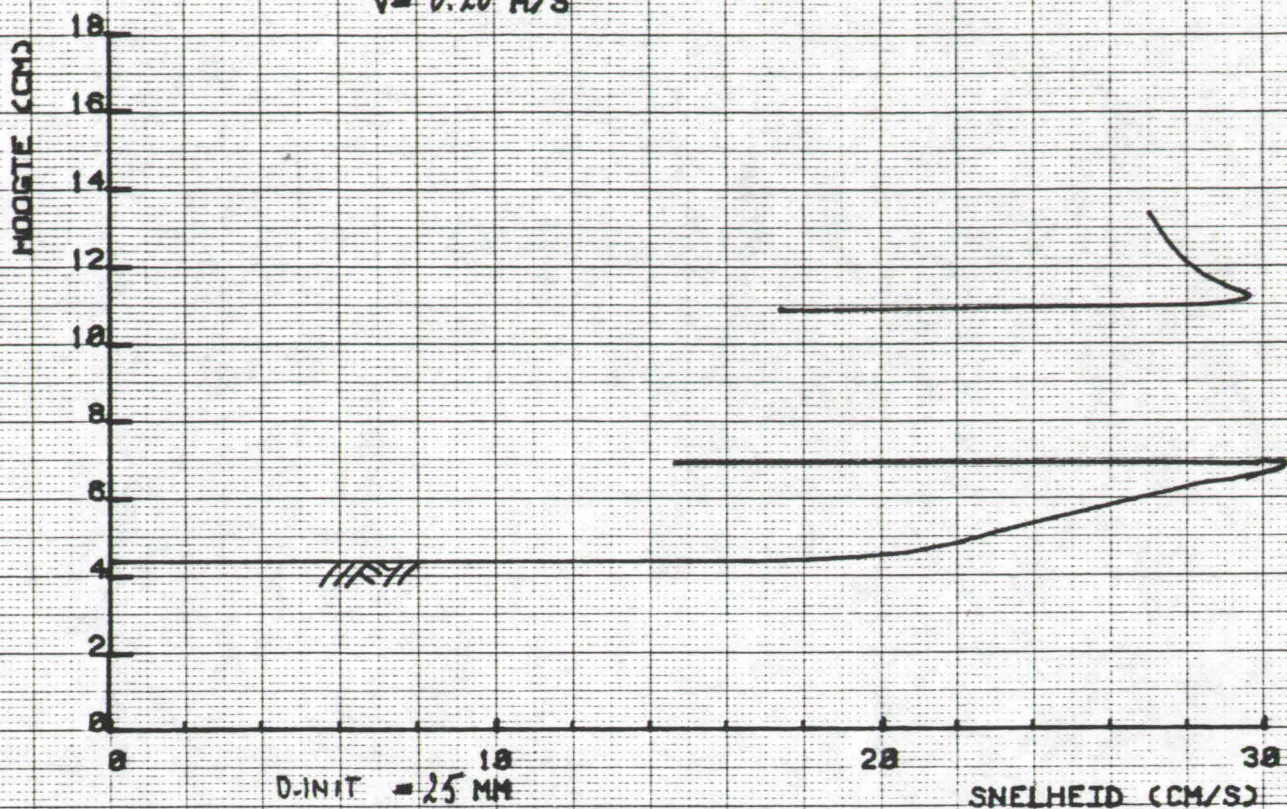


SNELHEDEN VLAK BOVEN  
 EN ONDER DE PIJP



ONTGRONDING ONDER PIJP

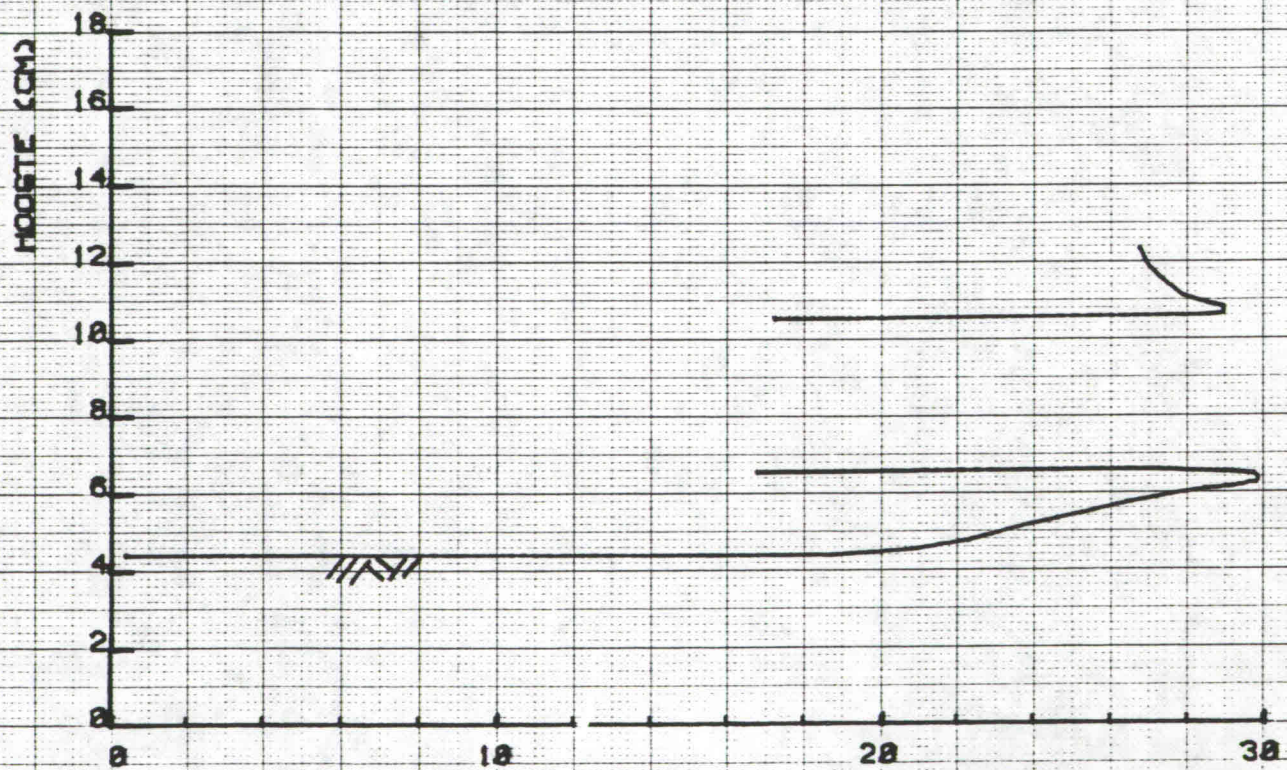
DIAM. PIJP=48 MM glad  
 $\bar{v} = 0.20 \text{ M/S}$



D-INIT = 25 MM

$\rho = 25.5 \text{ MM}$

SNELHEID (CM/S)



D-INIT = 20 MM

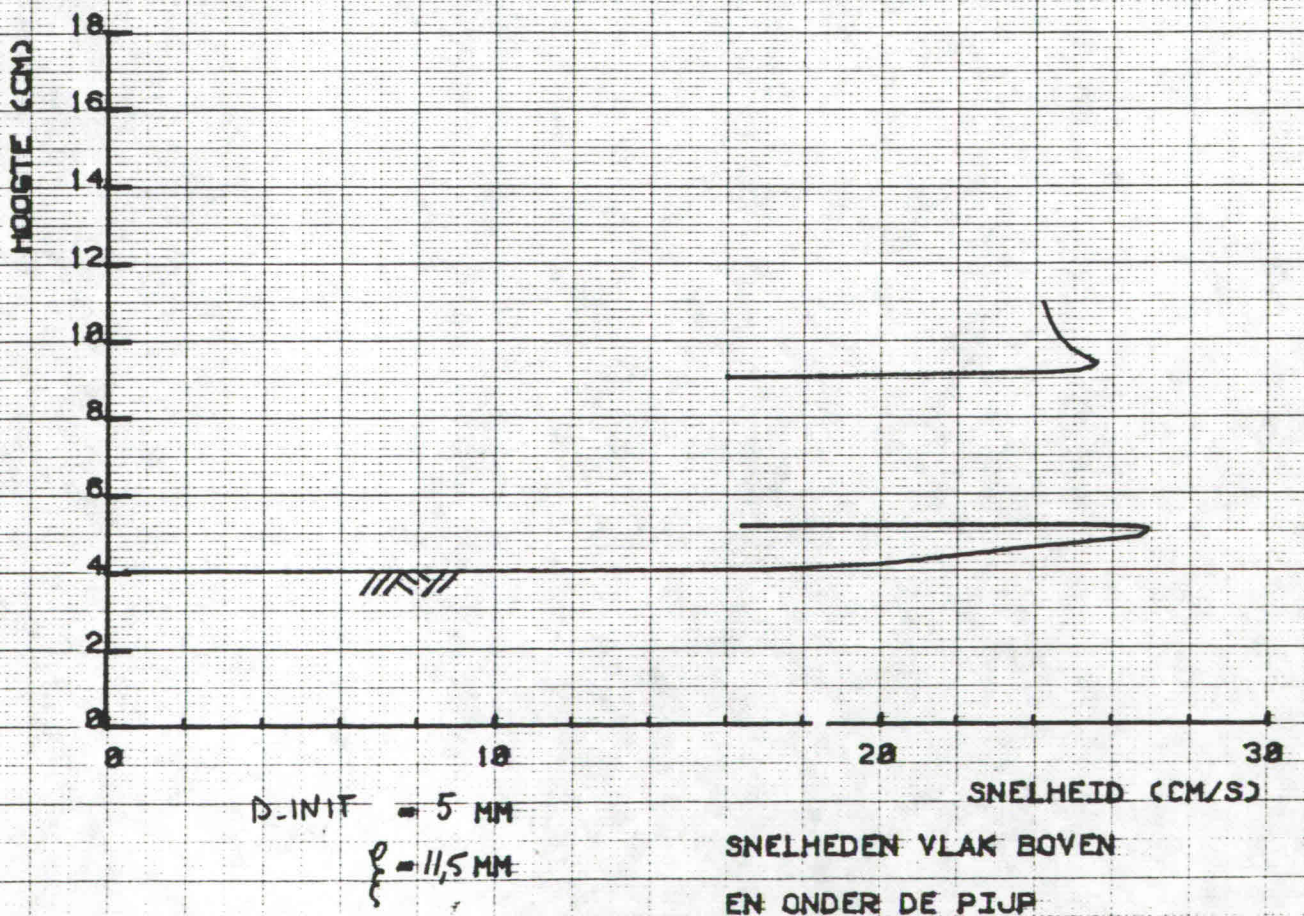
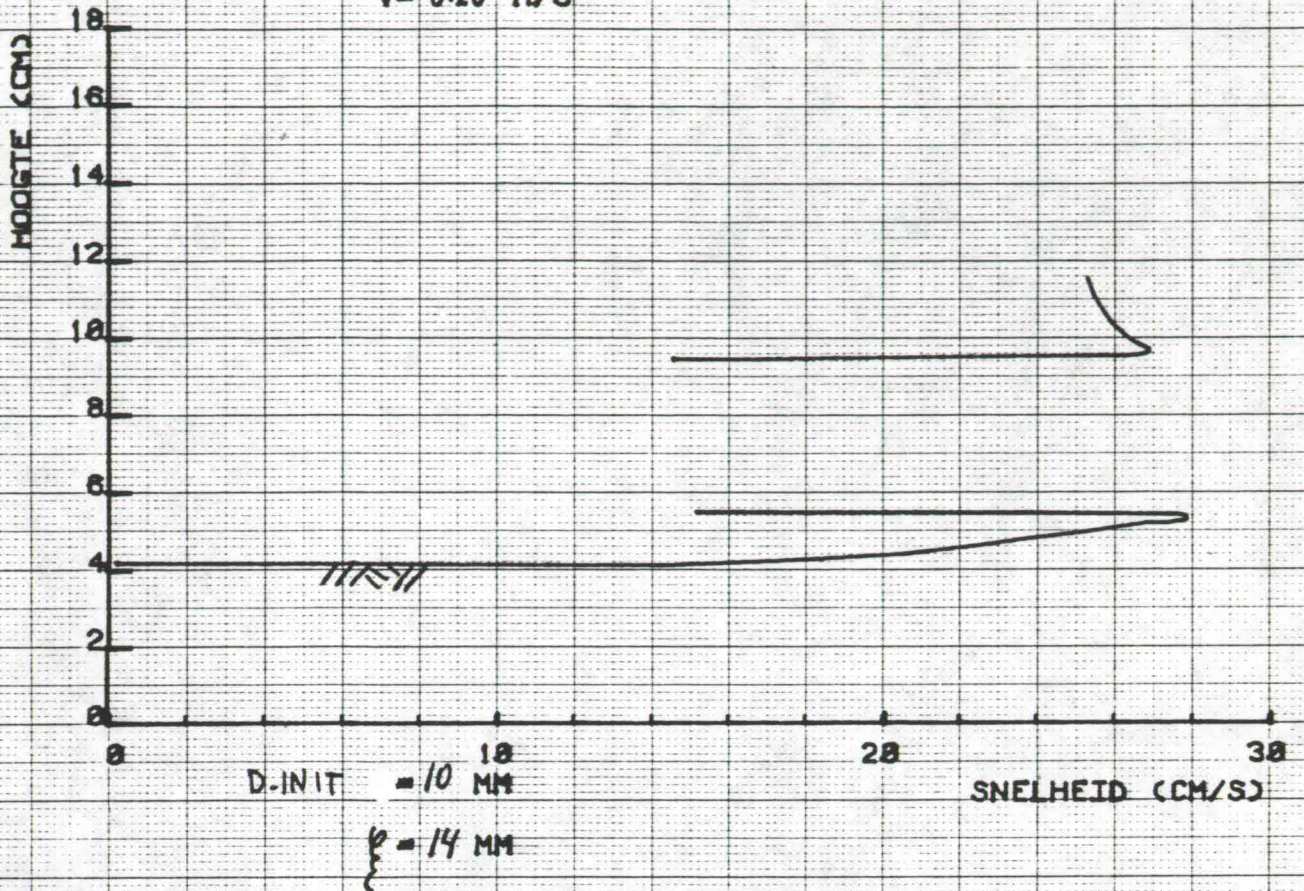
$\rho = 21.5 \text{ MM}$

SNELHEDEN VLAK BOVEN  
 EN ONDER DE PIJP



ONTGRONDING ONDER PIJP

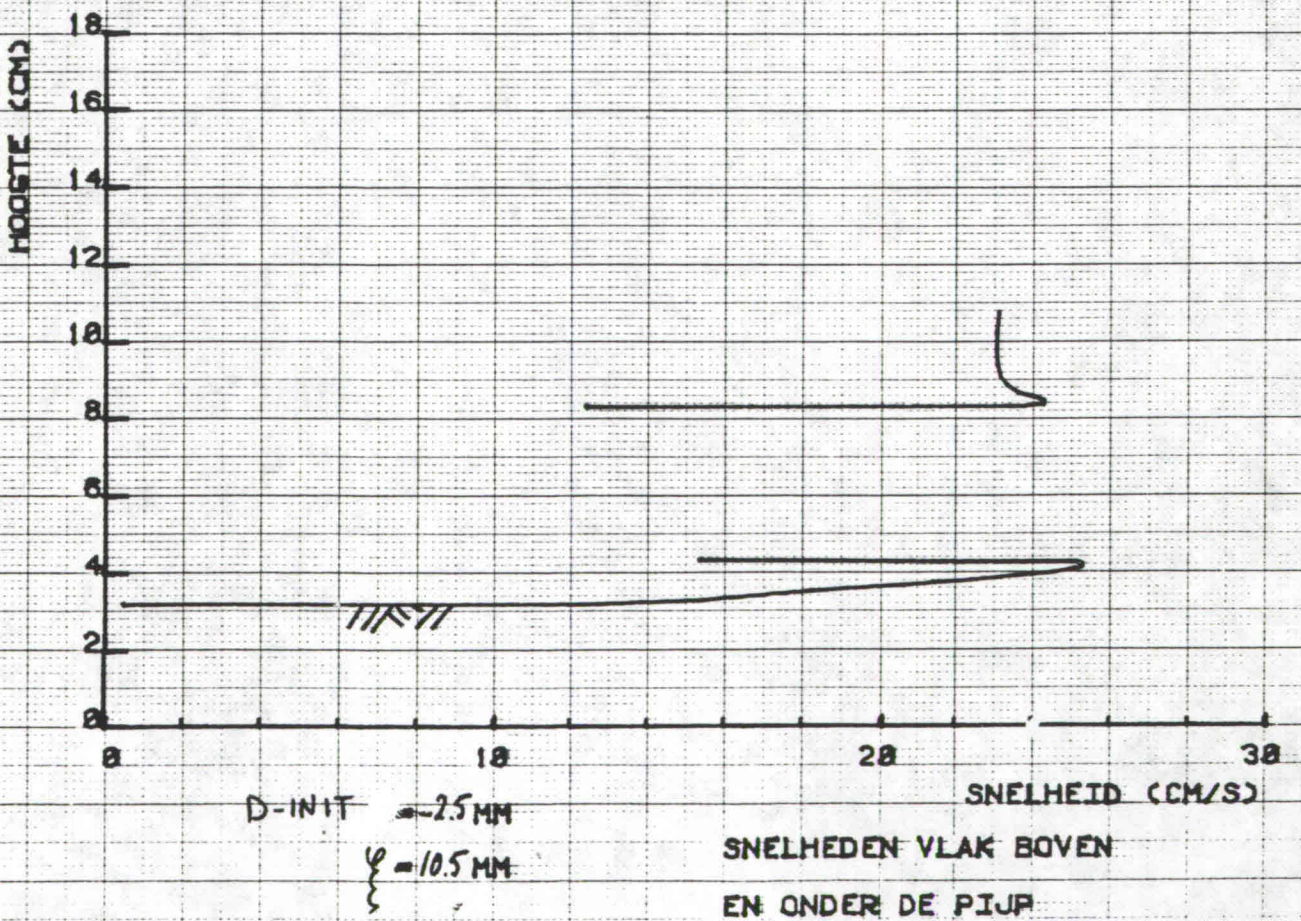
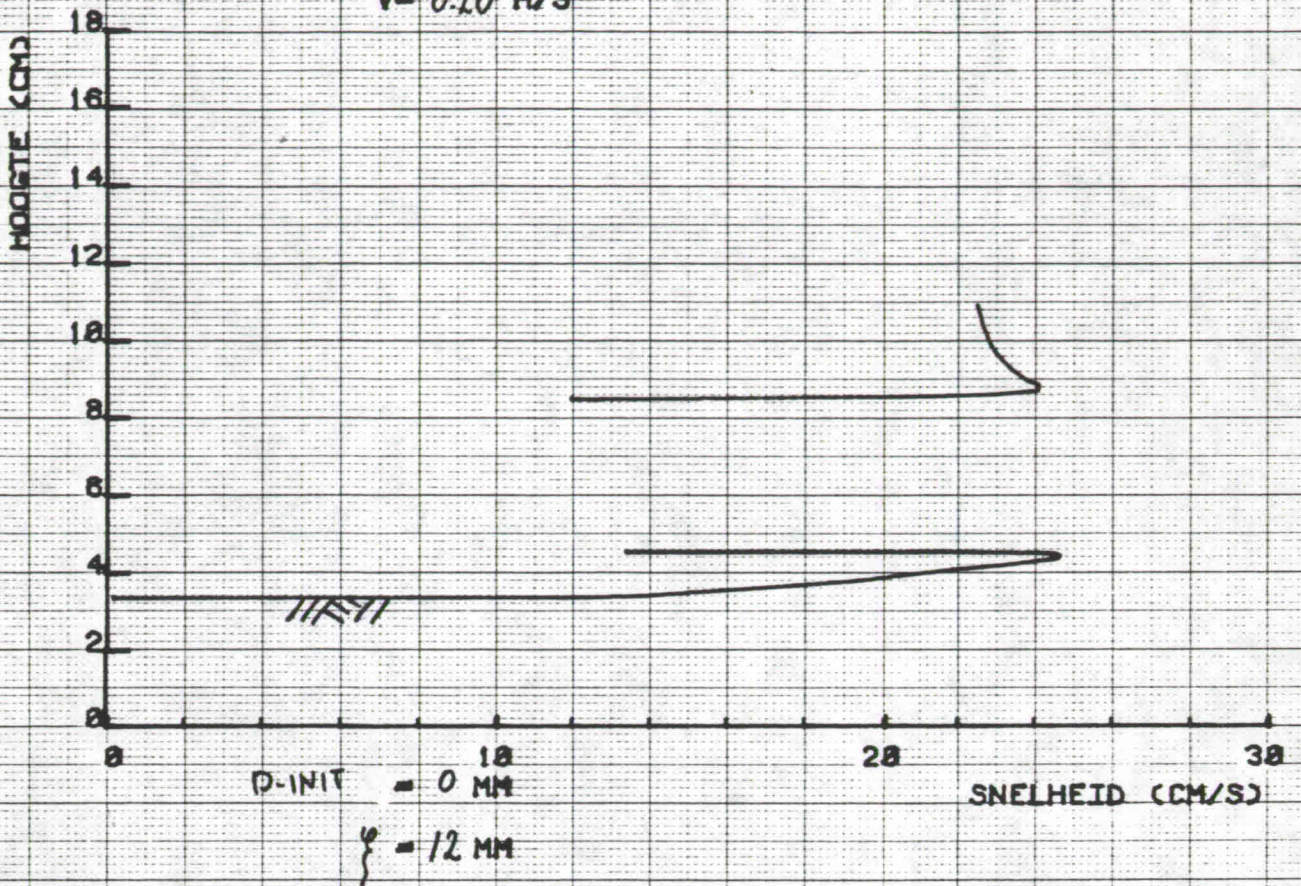
DIAM. PIJP = 40 MM glad  
 $\bar{v} = 0.20$  M/S





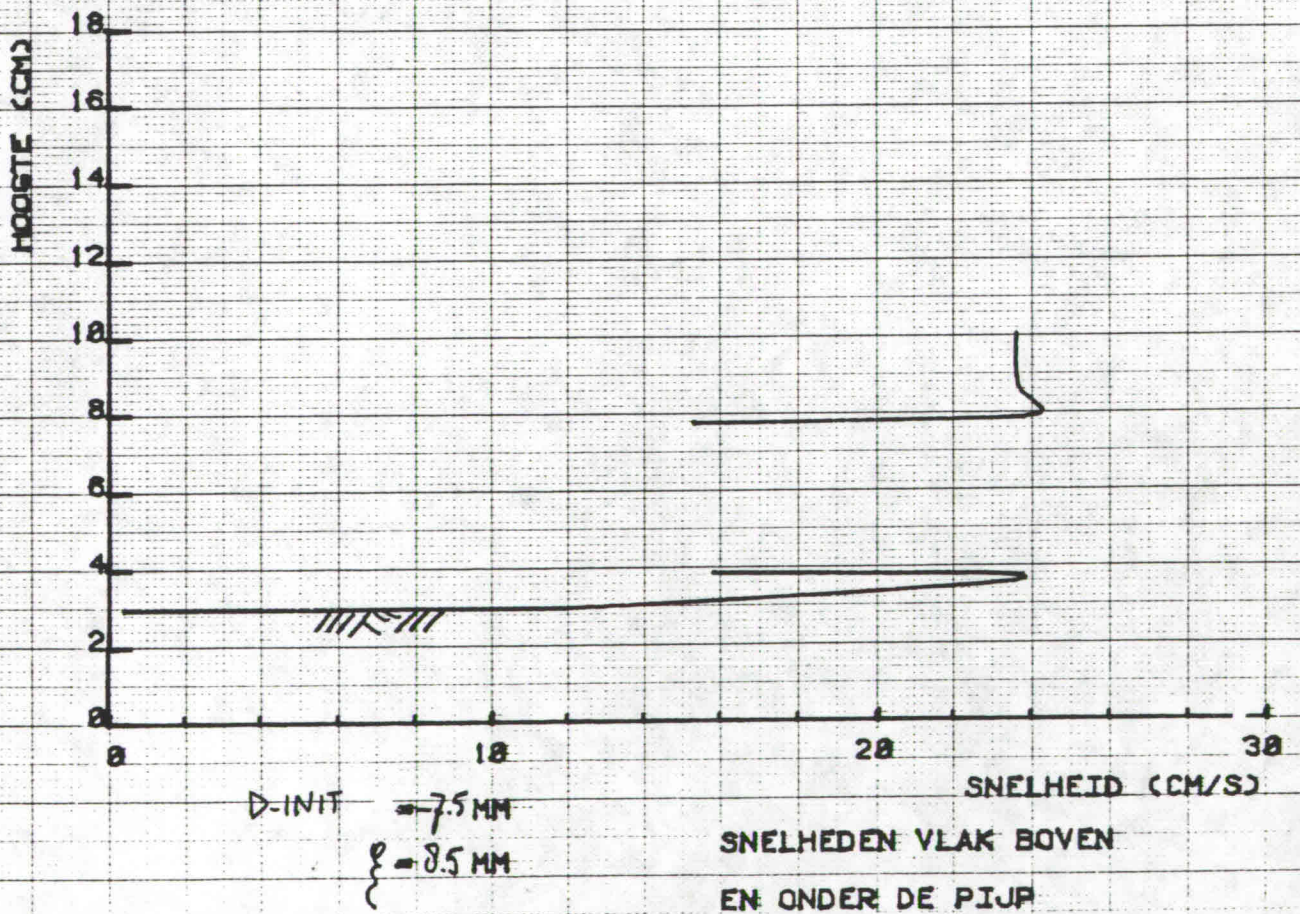
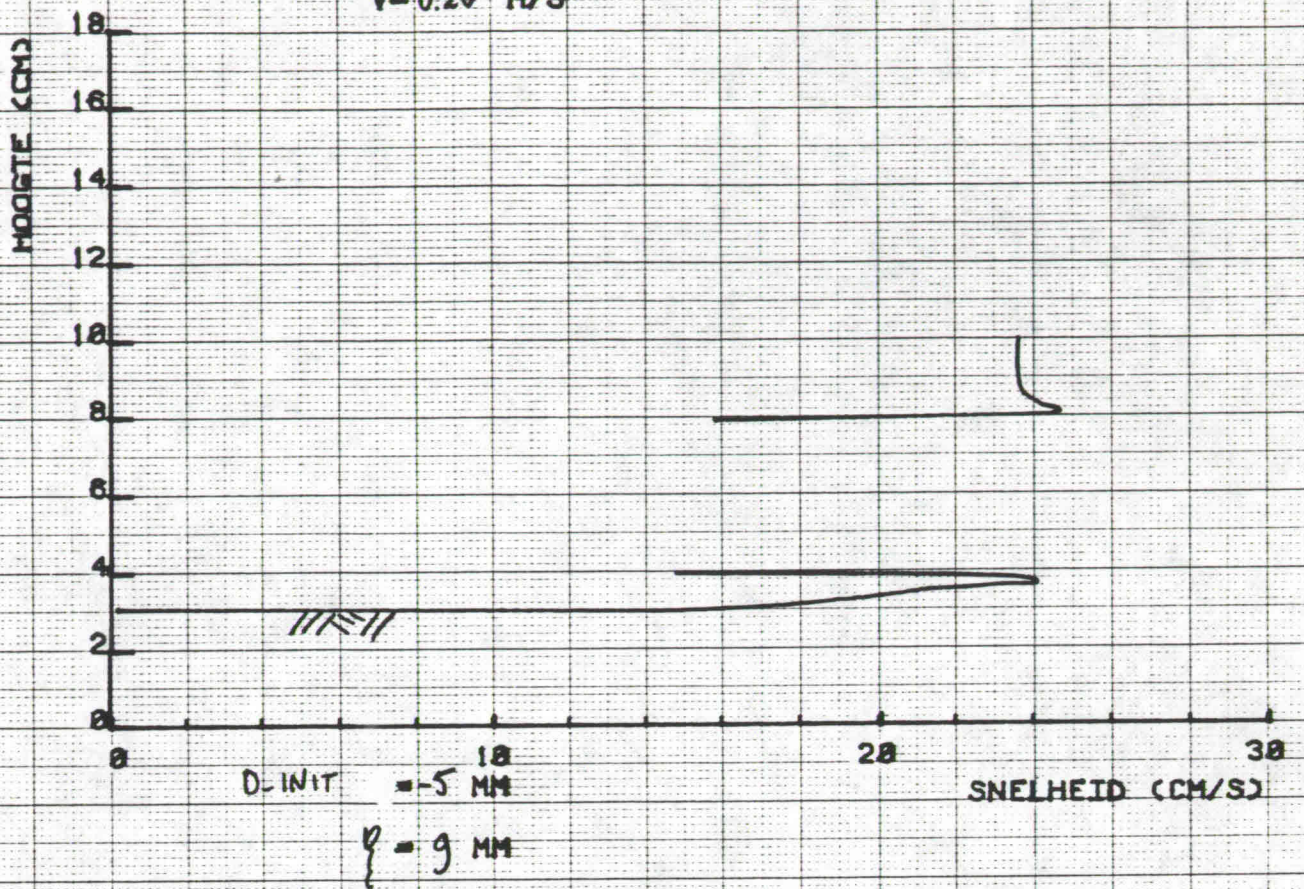
ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 48 MM glad  
 $\bar{v} = 0.20$  M/S





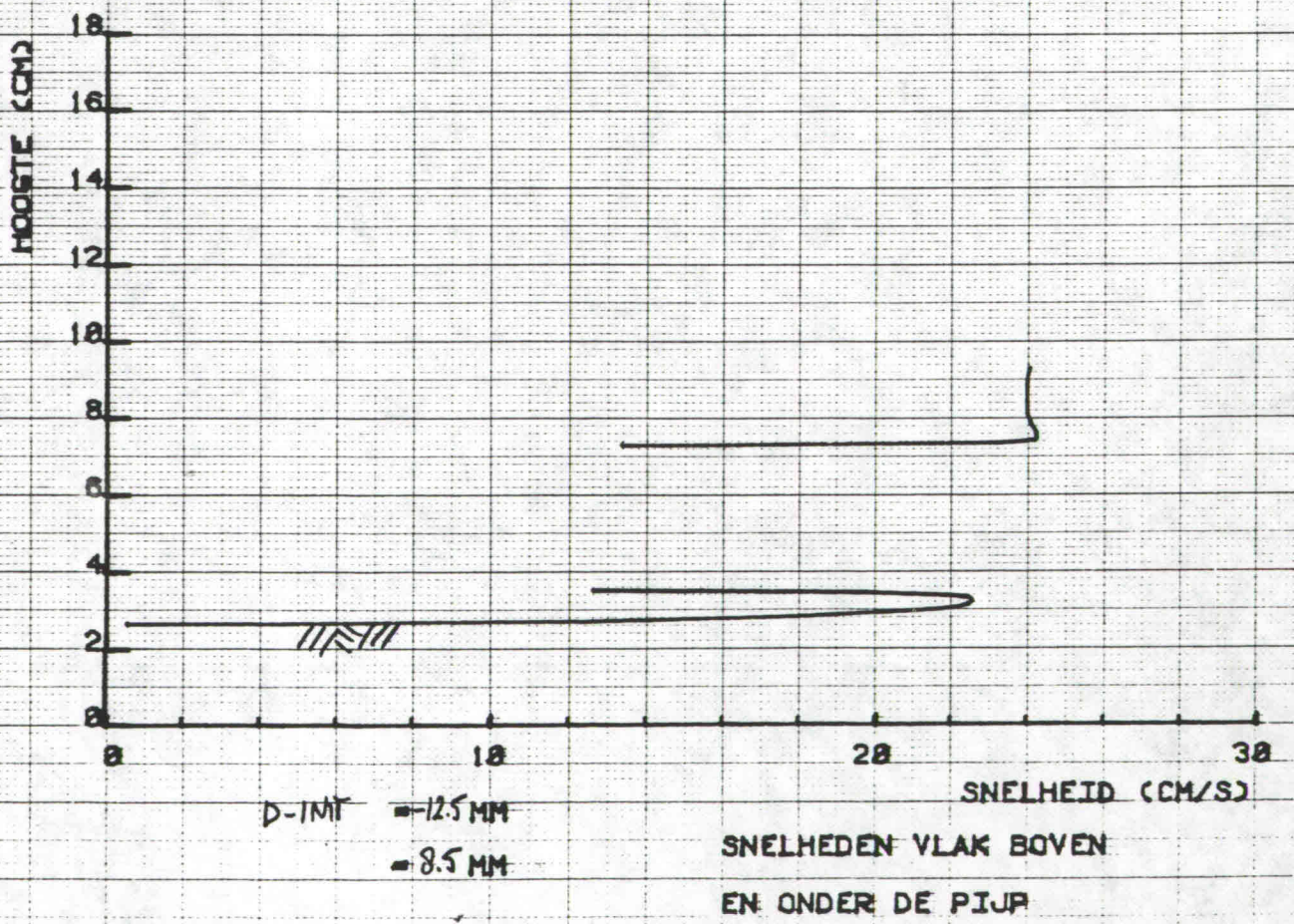
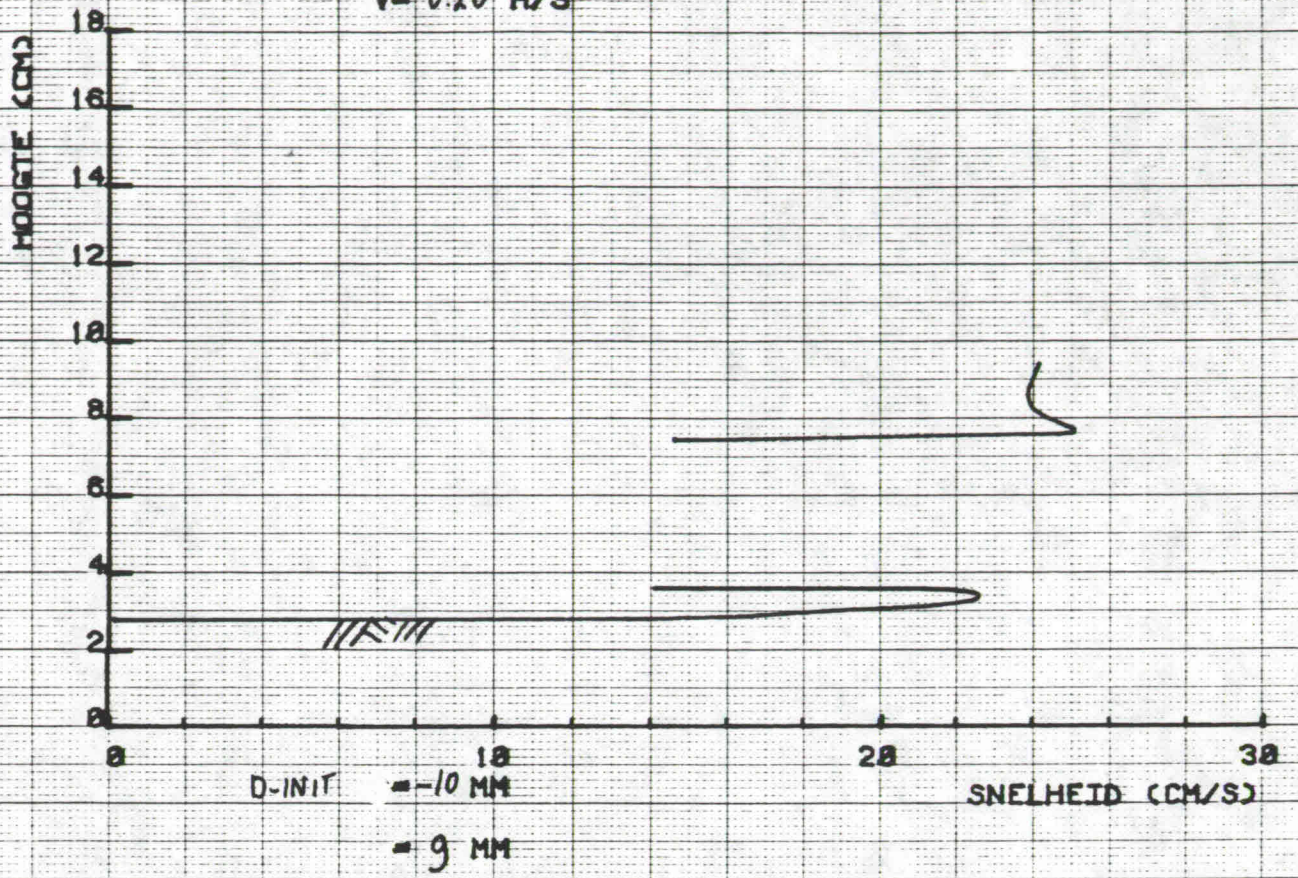
DIAM. PIJP = 40 MM glad  
 $\bar{v} = 0.20$  M/S





ONTGRONDING ONDER PIJP

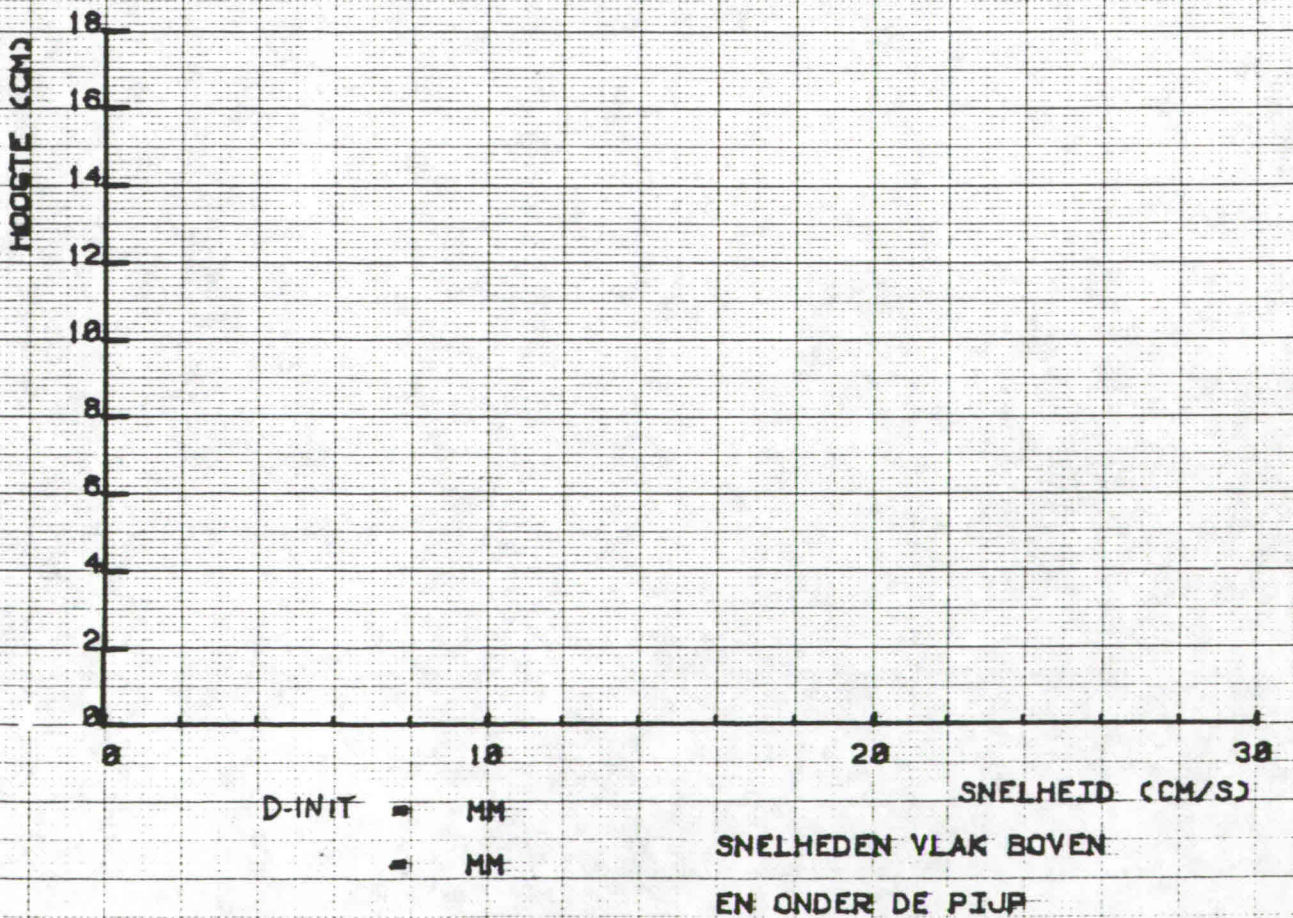
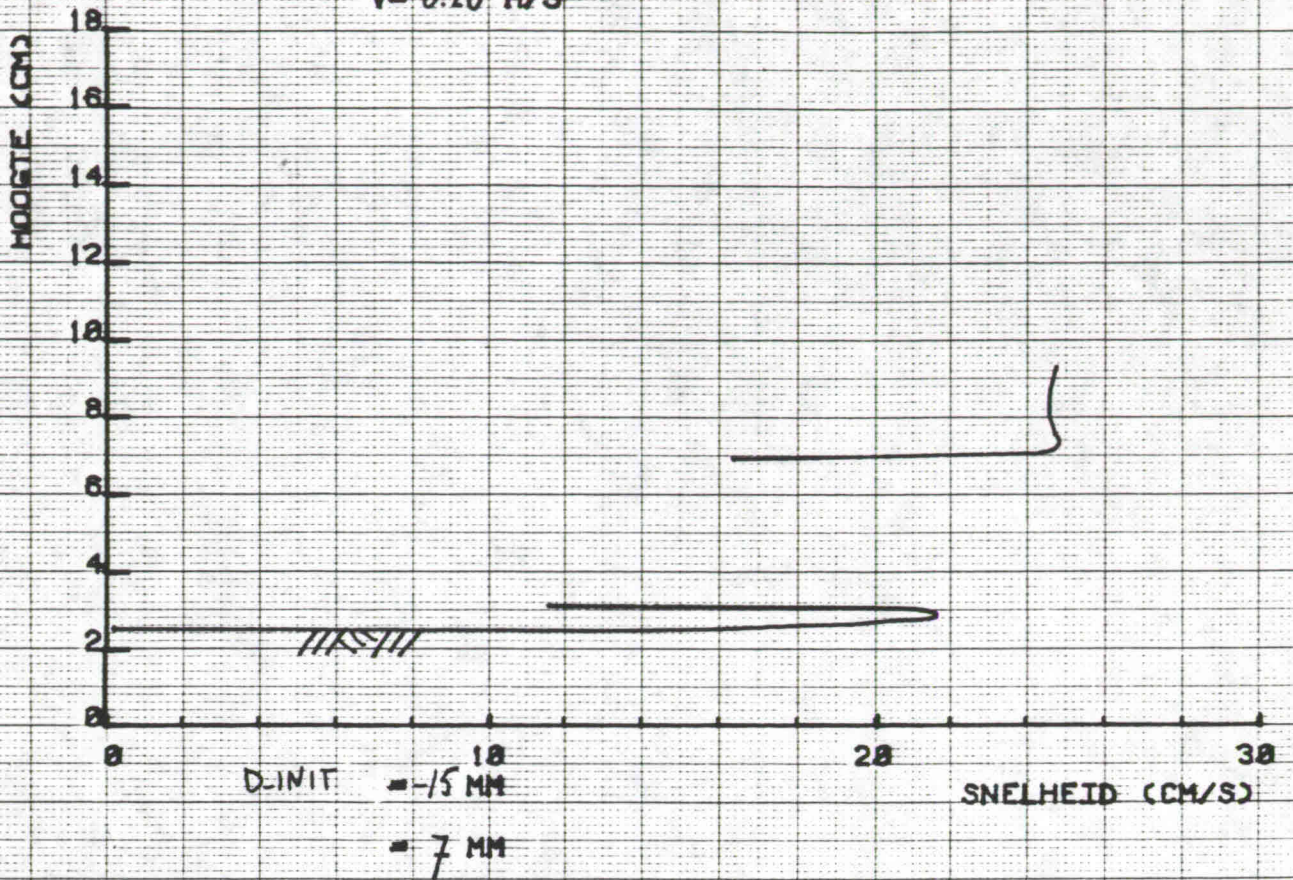
DIAM. PIJP = 48 MM glad  
 $\bar{v} = 0.20$  M/S





ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 48 MM glad  
 v = 0.20 M/S

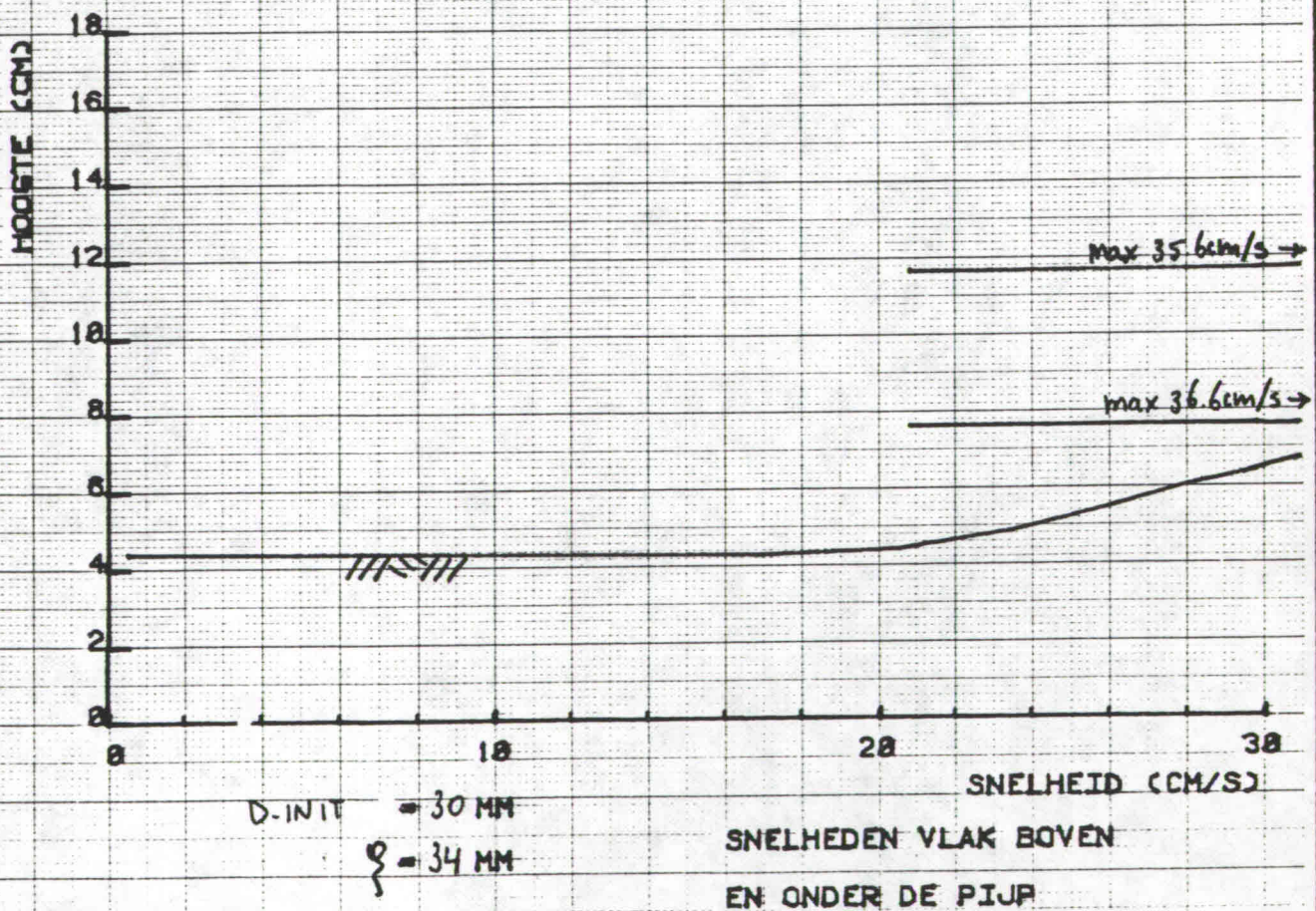
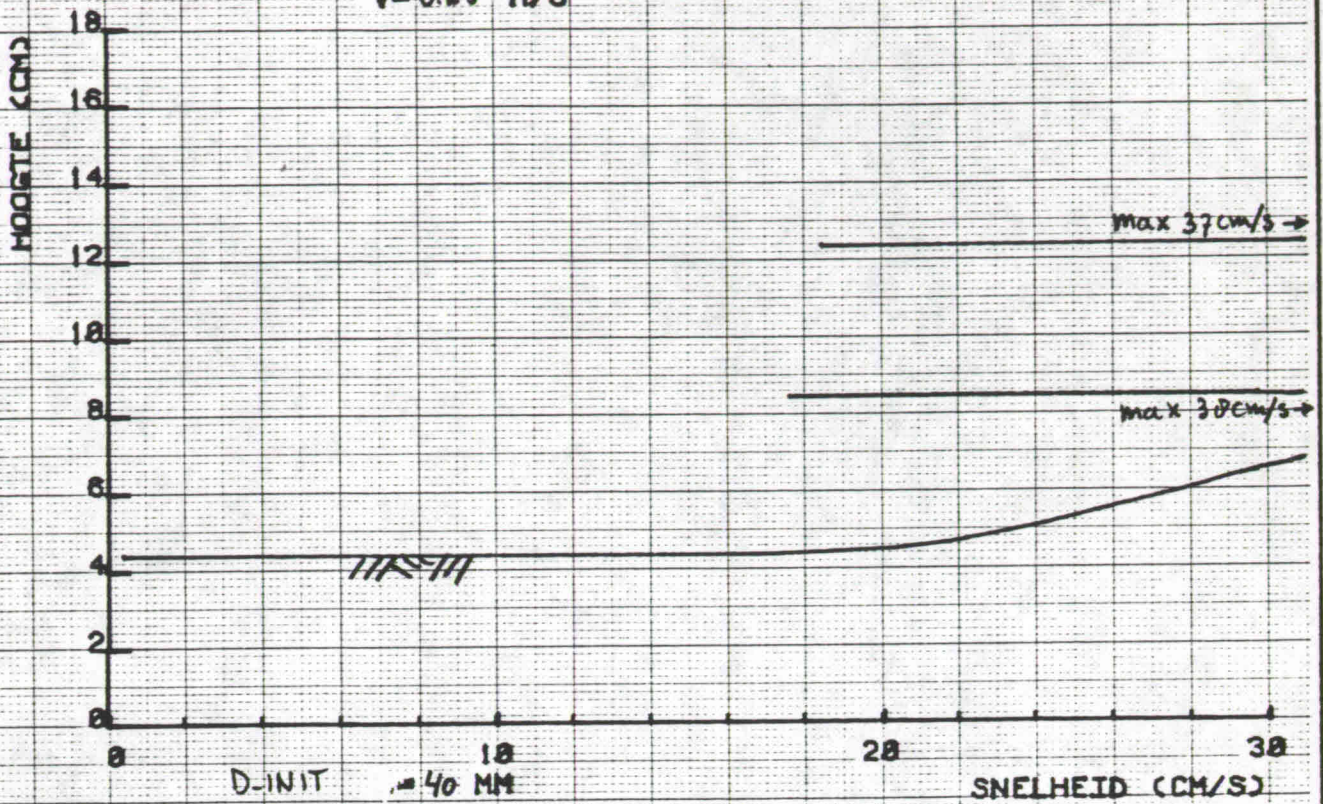




ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 48 MM glad

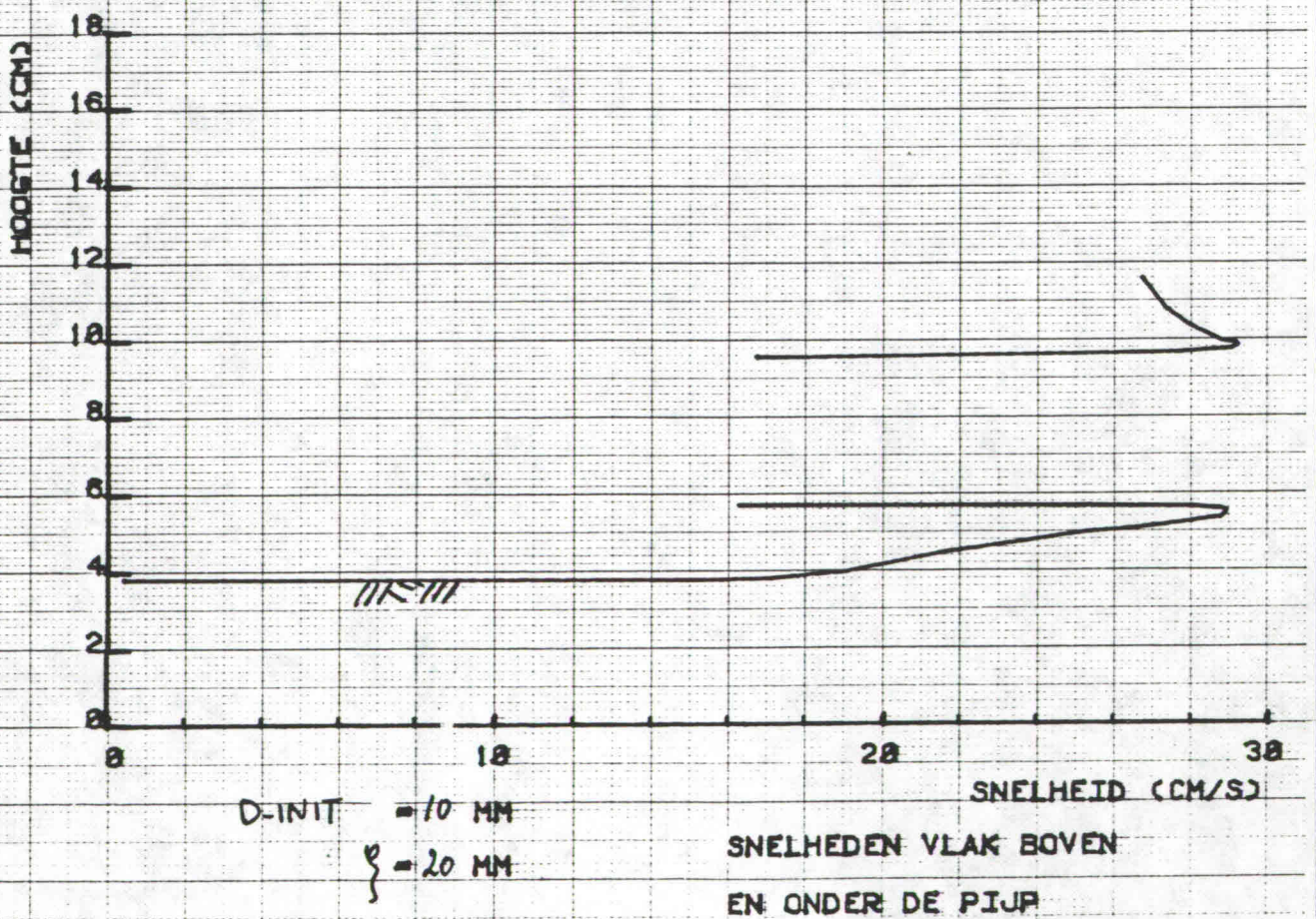
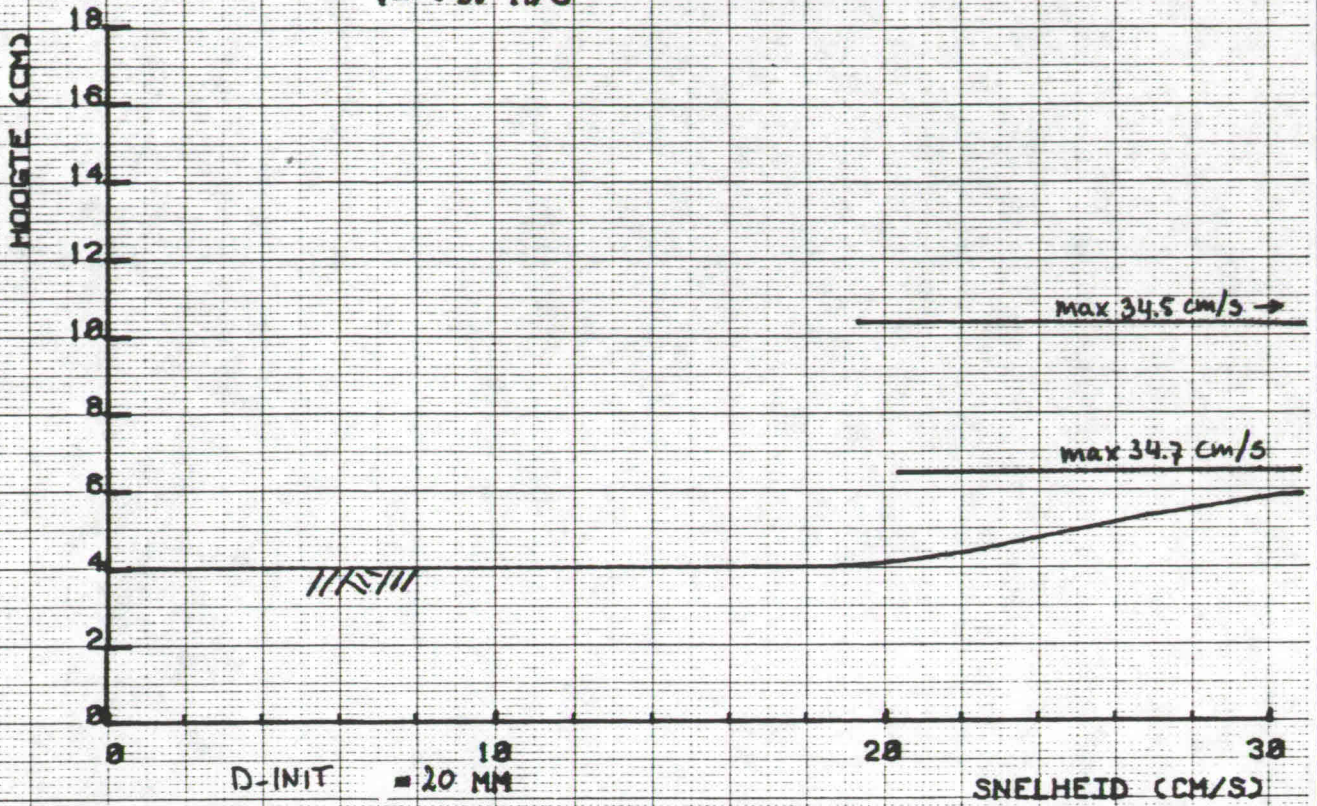
$\bar{v} = 0.25$  M/S





ONTGRONDING ONDER PIJP

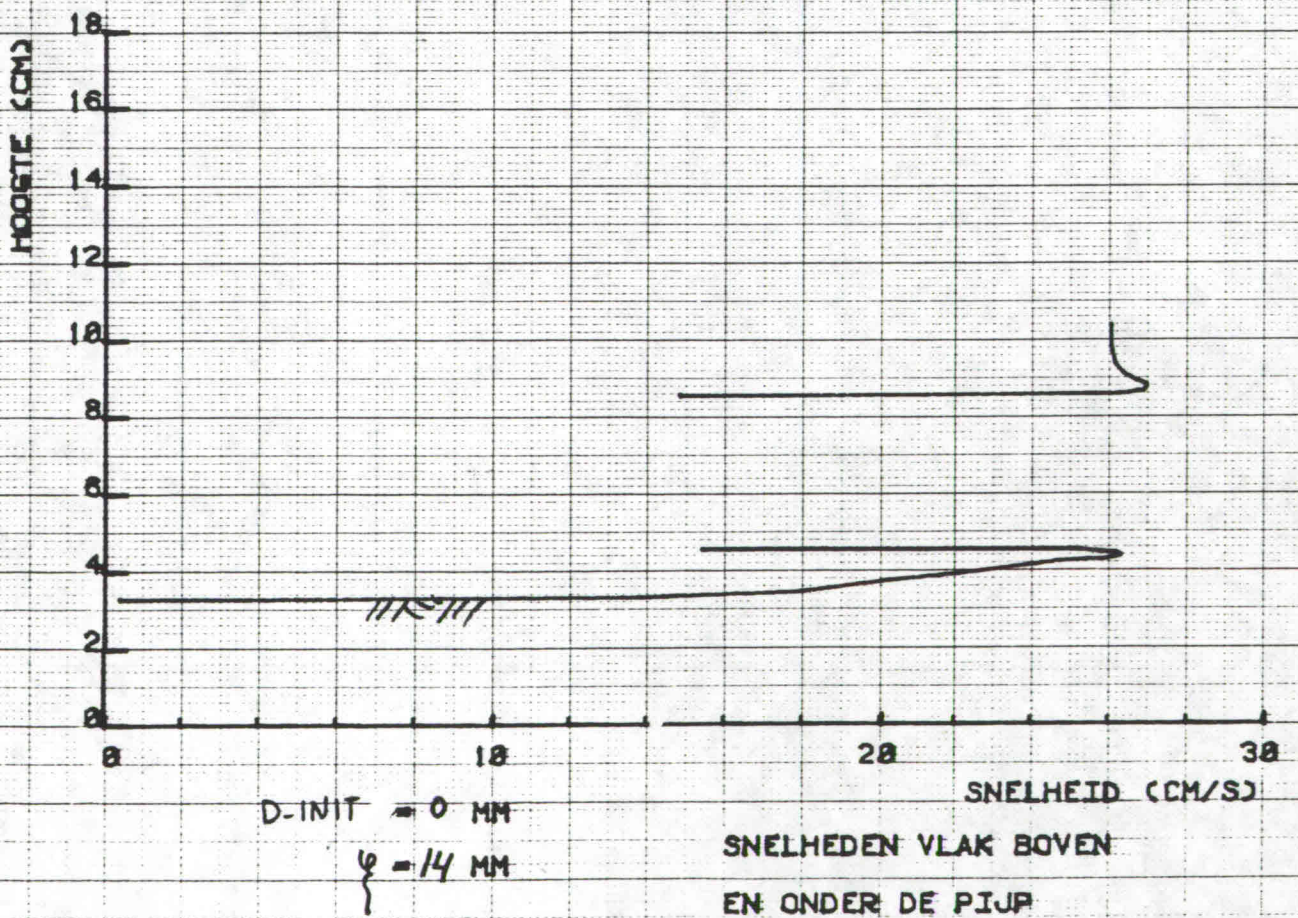
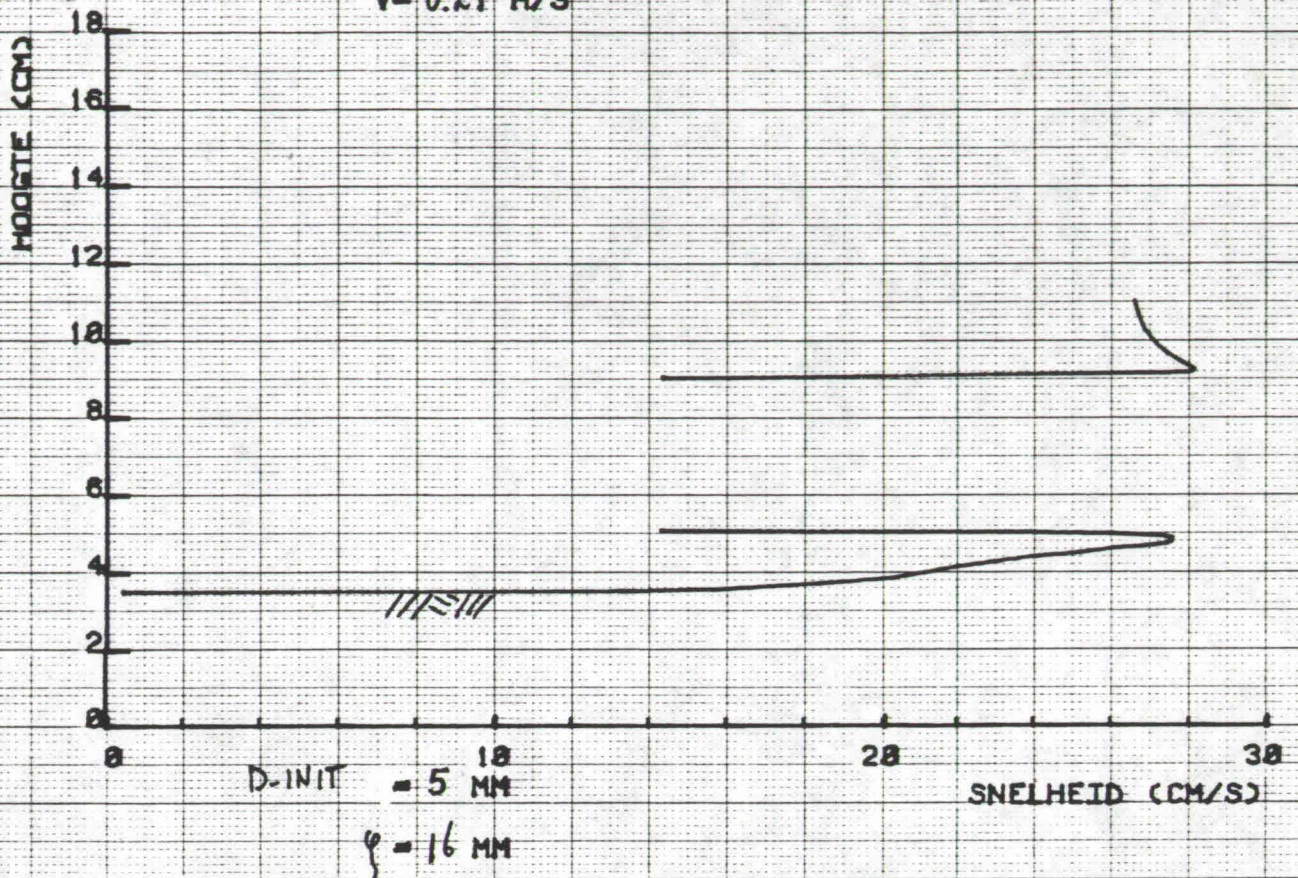
DIAM. PIJP = 48 MM glad  
 $\bar{v} = 0.25 \text{ M/S}$





ONTGRONDING ONDER PIJP

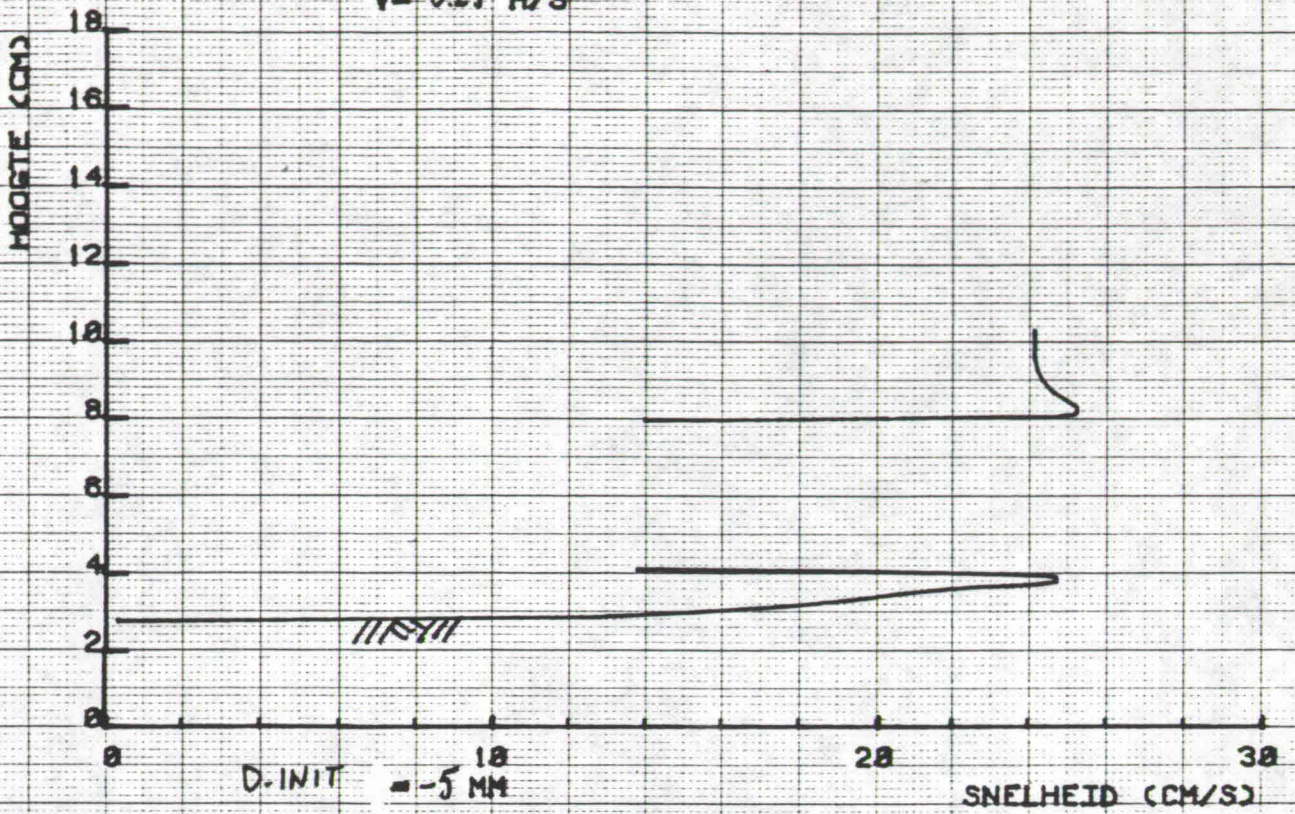
DIAM. PIJP = 40 MM glad  
 $\bar{v} = 0.25$  M/S



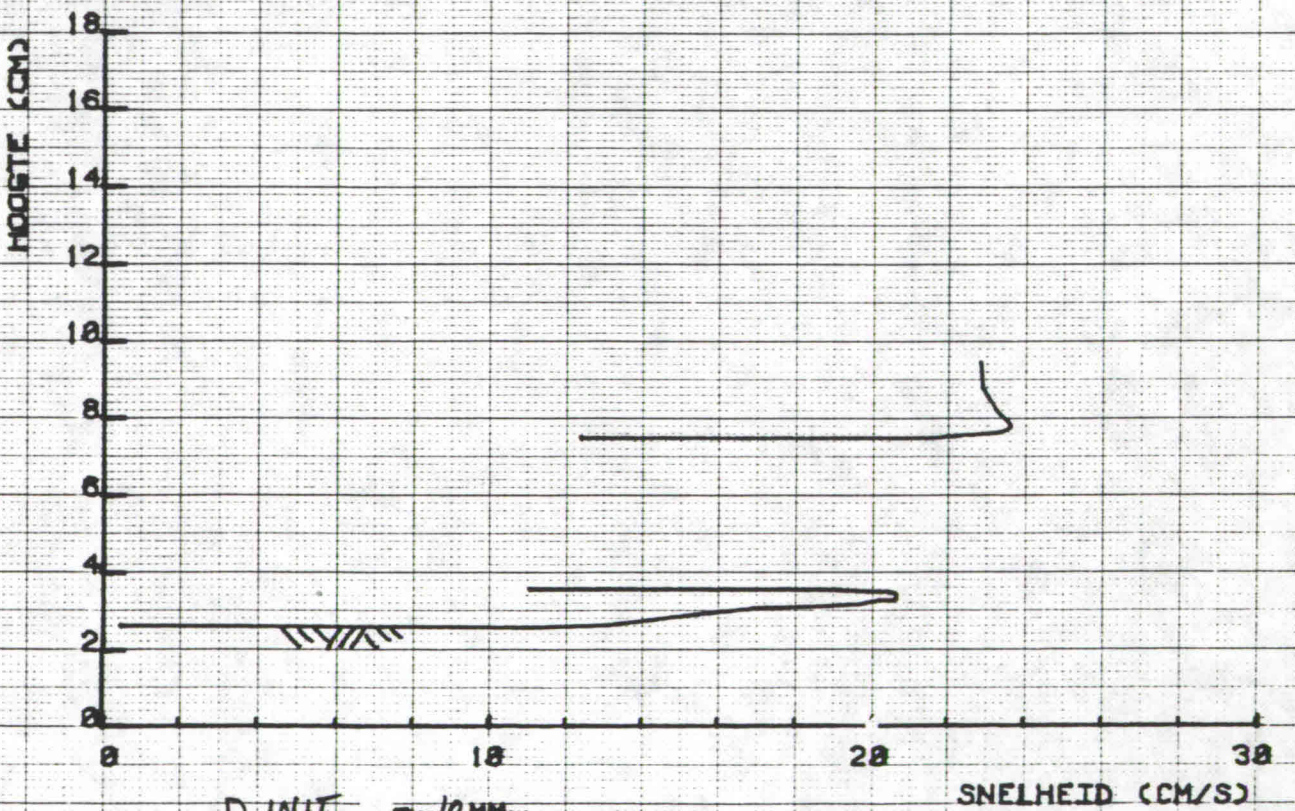


ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 40 MM glad  
 $\bar{v} = 0.25$  M/S



$\varphi = 13$  MM



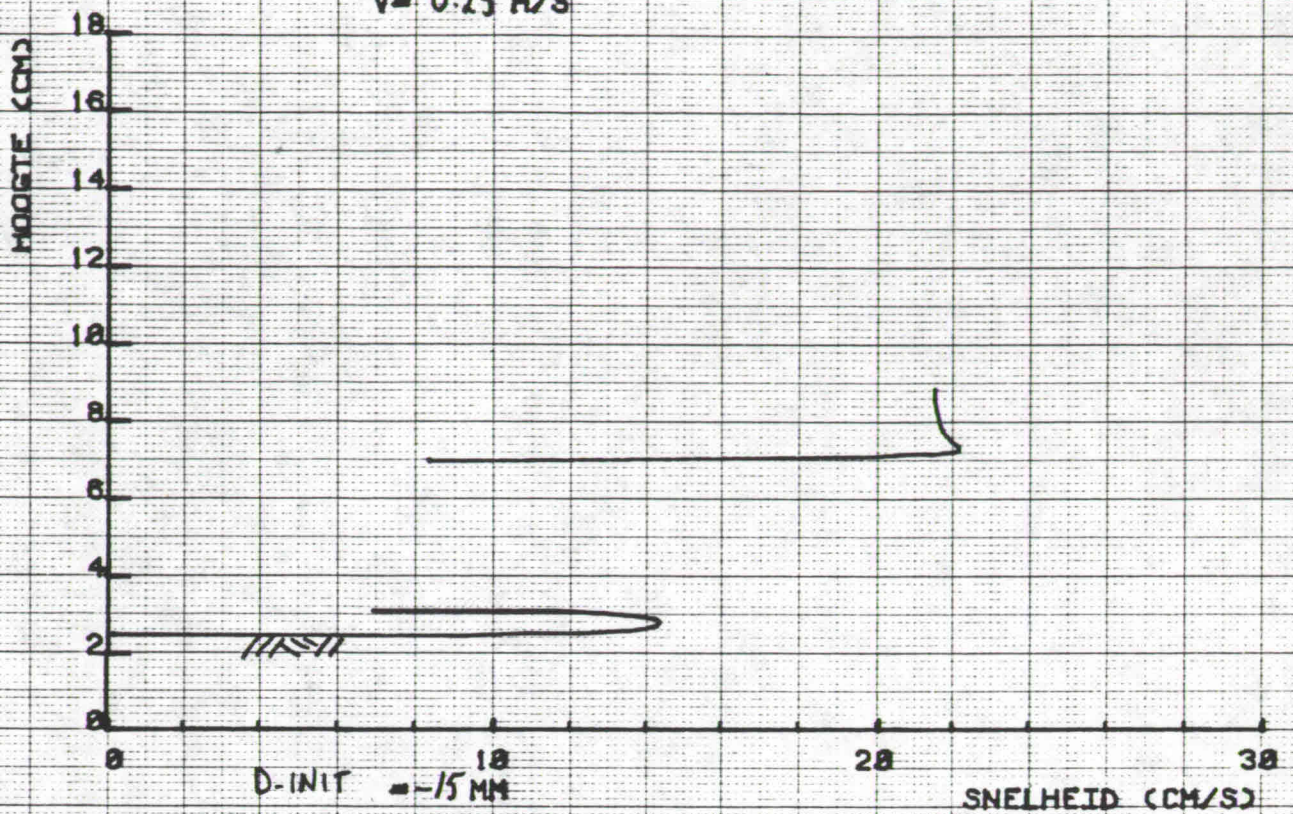
SNELHEDEN VLAK BOVEN  
 EN ONDER DE PIJP



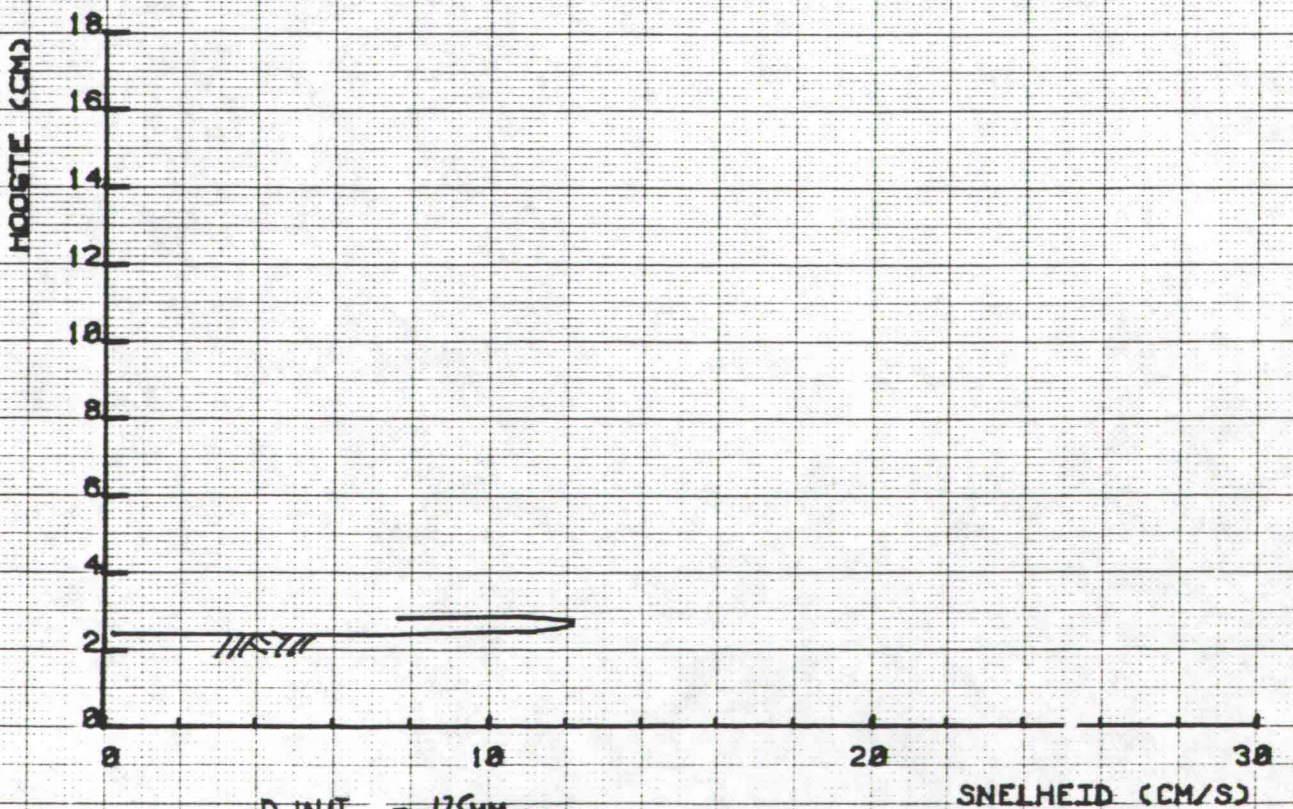
ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 48 MM glad

$\bar{v} = 0.25 \text{ M/S}$



$\varphi = 7 \text{ MM}$



= 2.5 MM

SNELHEDEN VLAK BOVEN

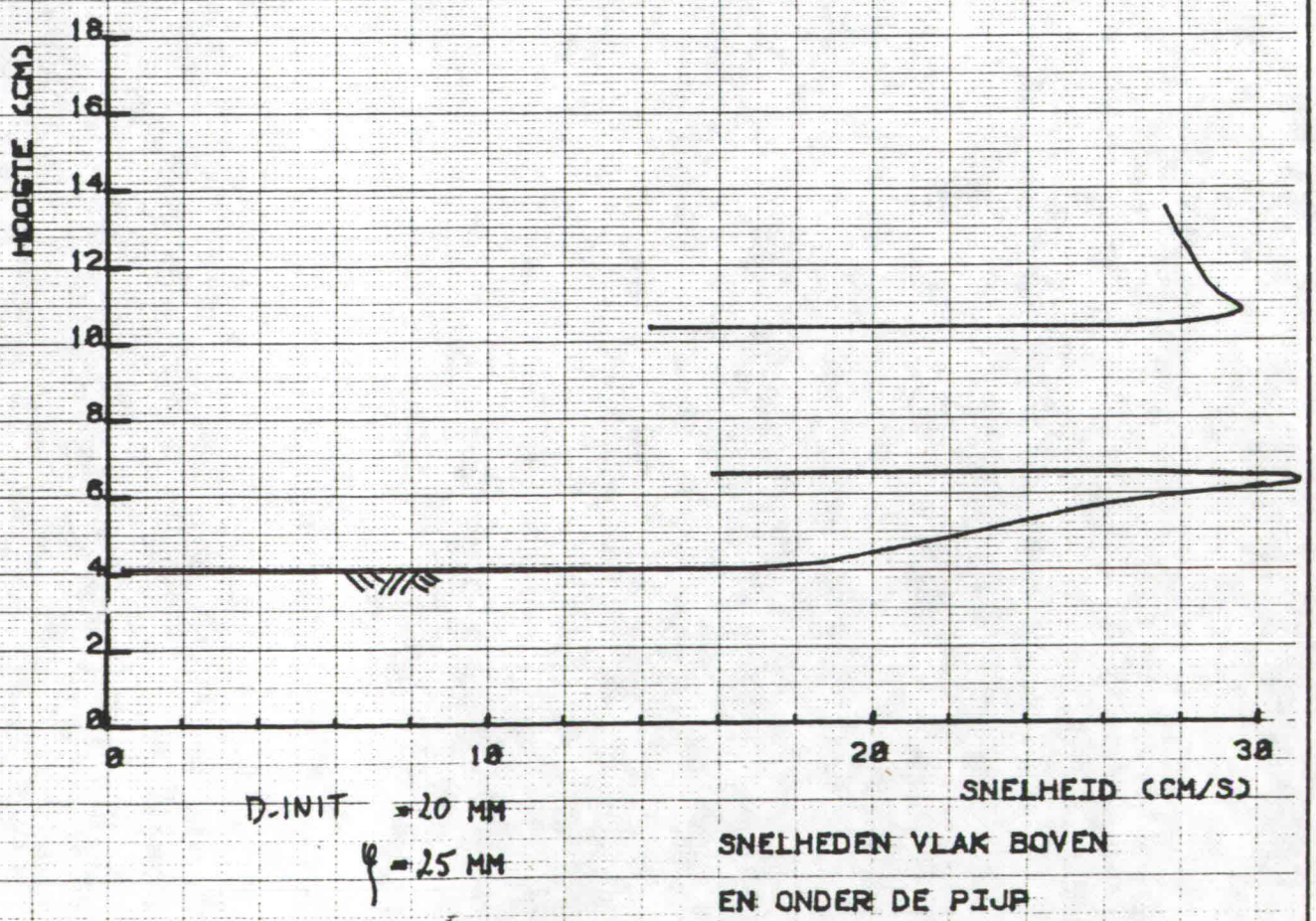
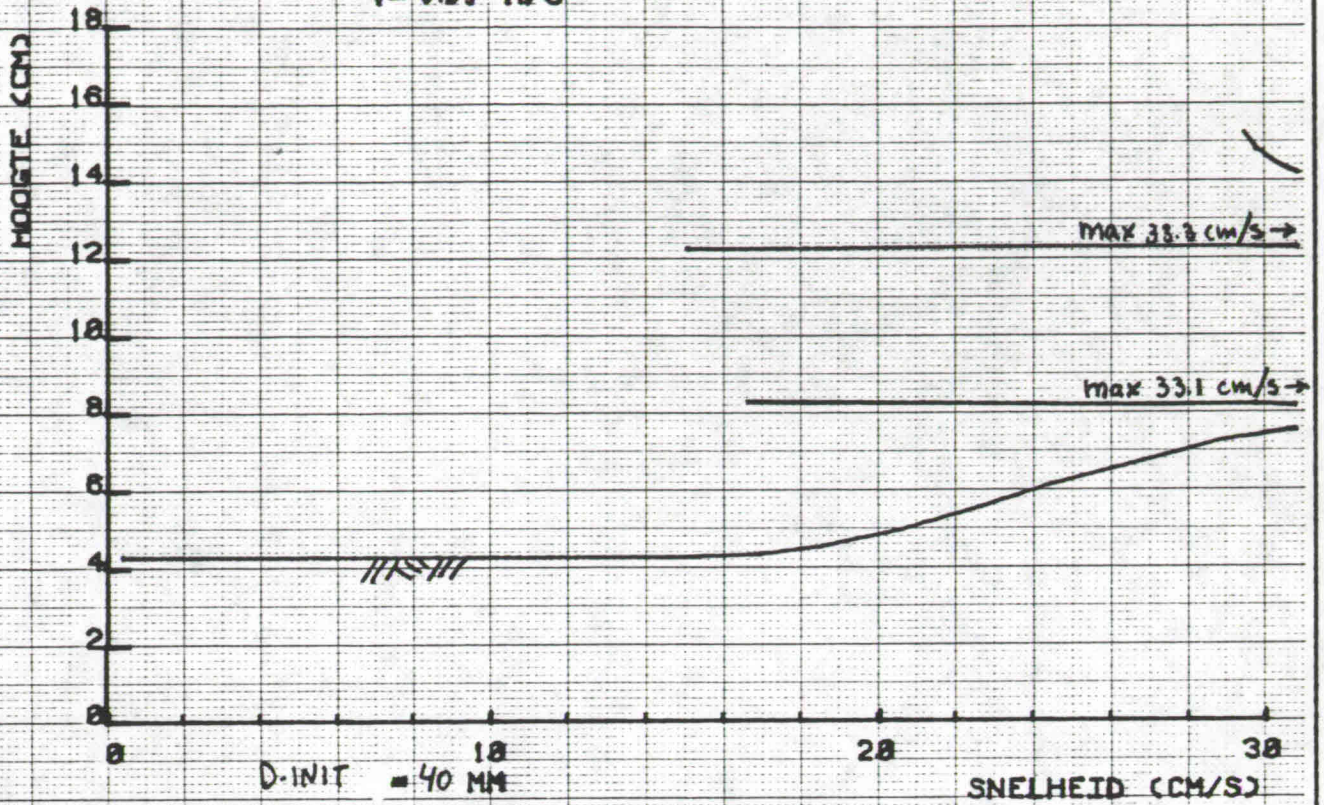
EN ONDER DE PIJP



ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 48 MM ruw

$\bar{v} = 0.25$  M/S

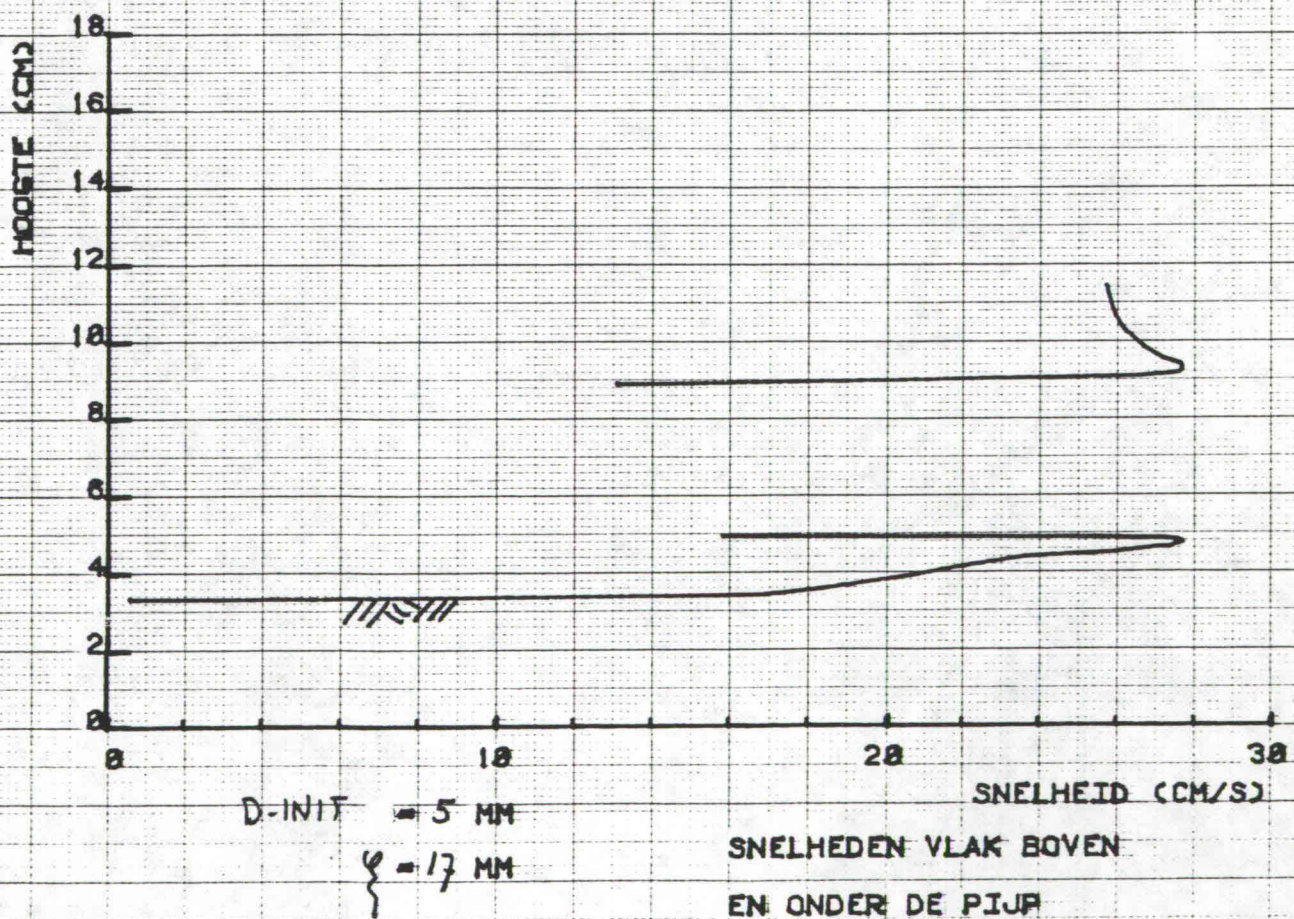
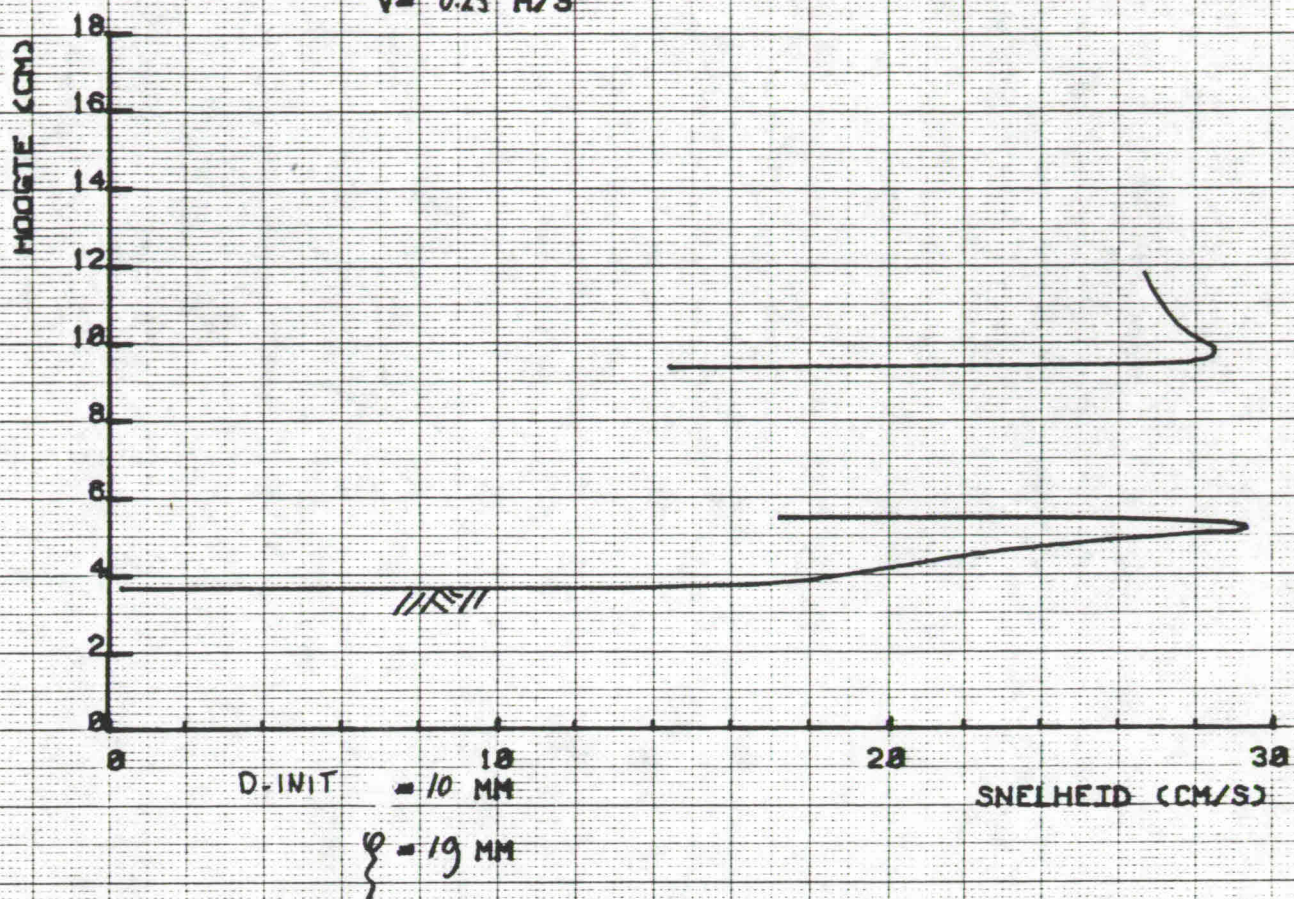




ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP=48 MM ruw

$\bar{v} = 0.25$  M/S

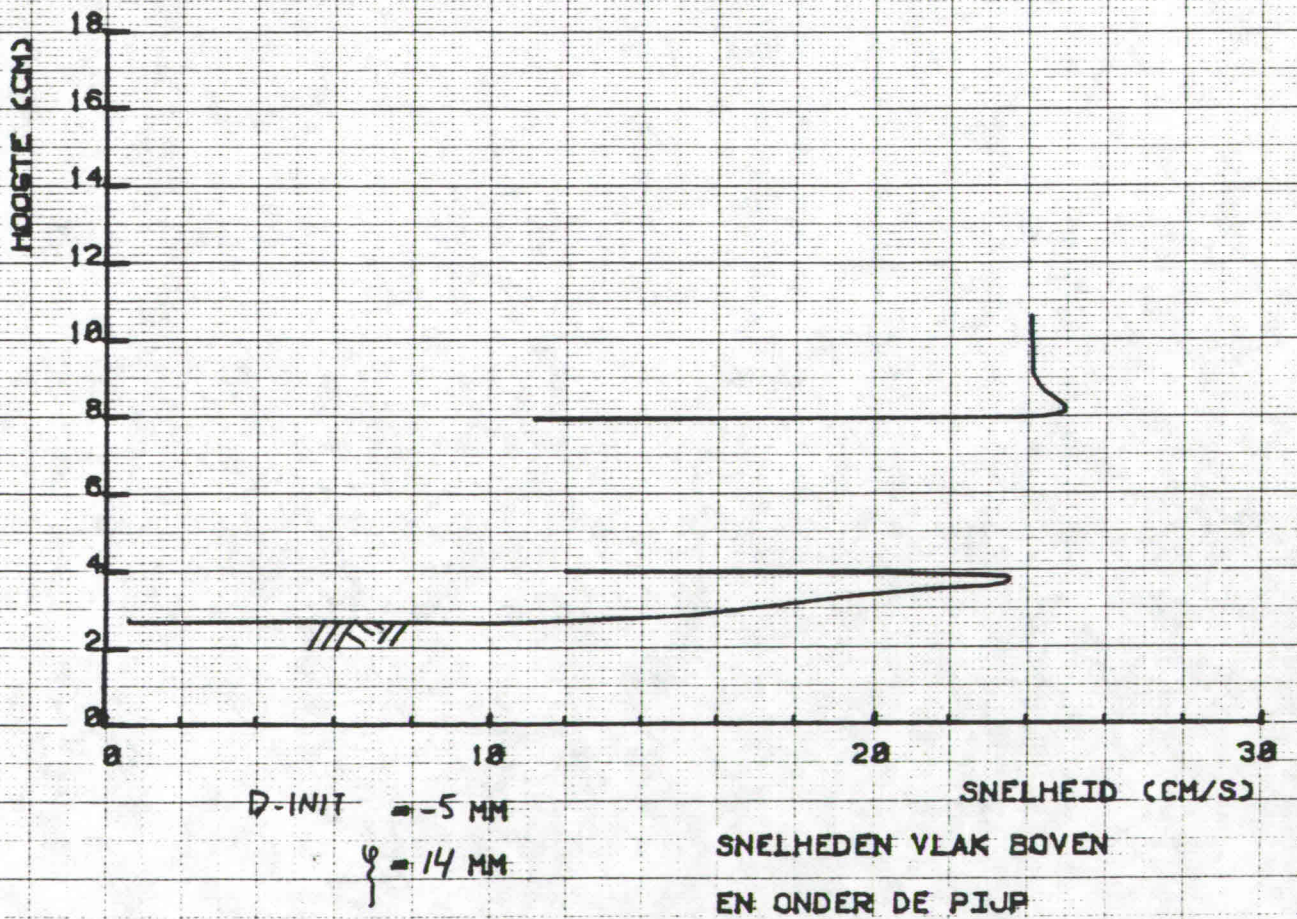
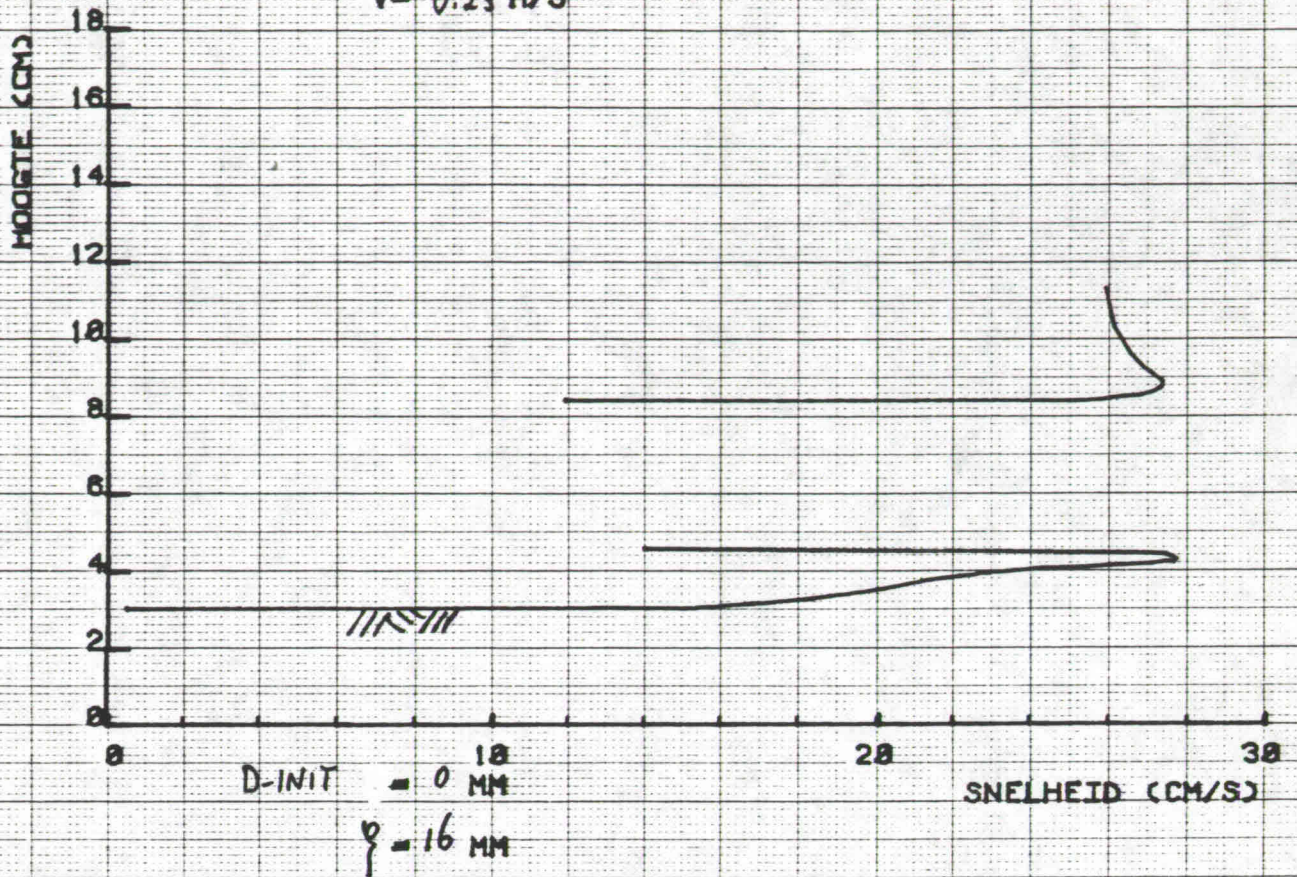




ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP=48 MM RUW

$\bar{v} = 0.25$  M/S

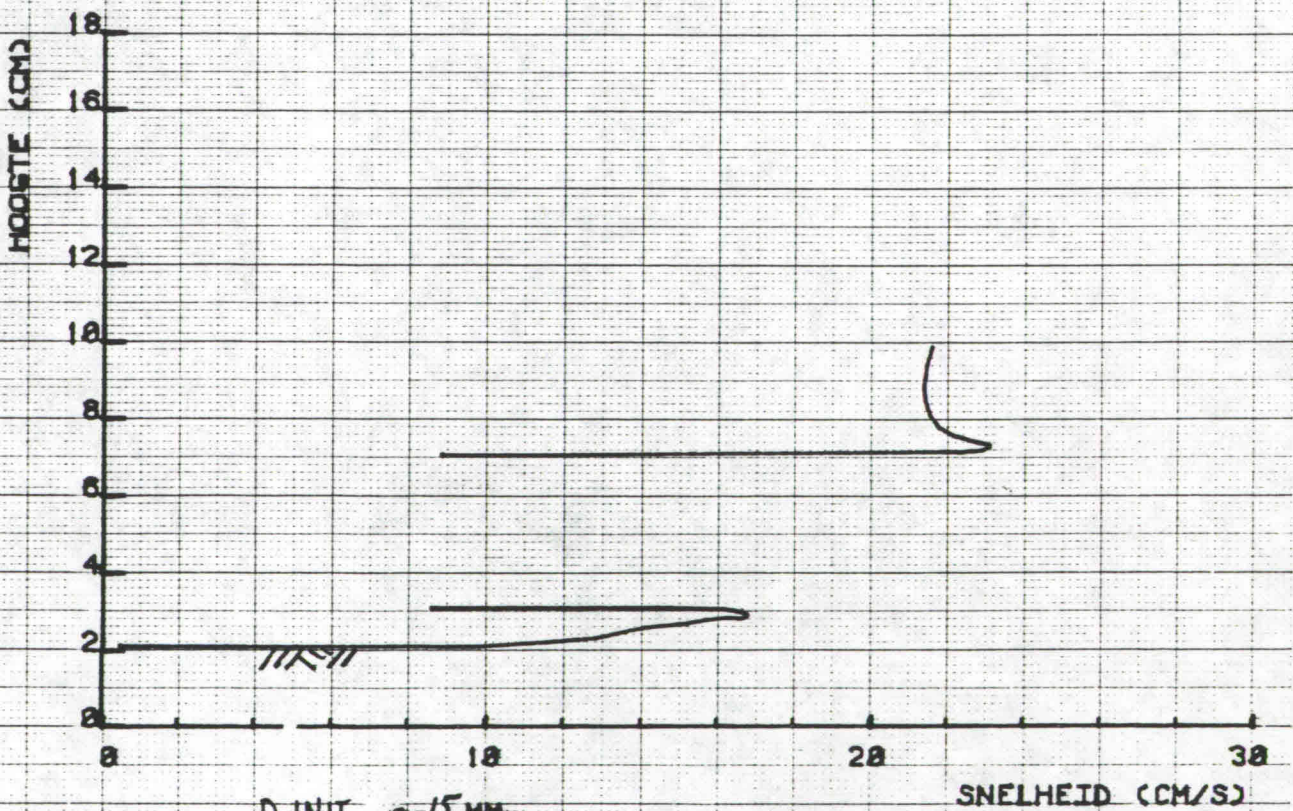
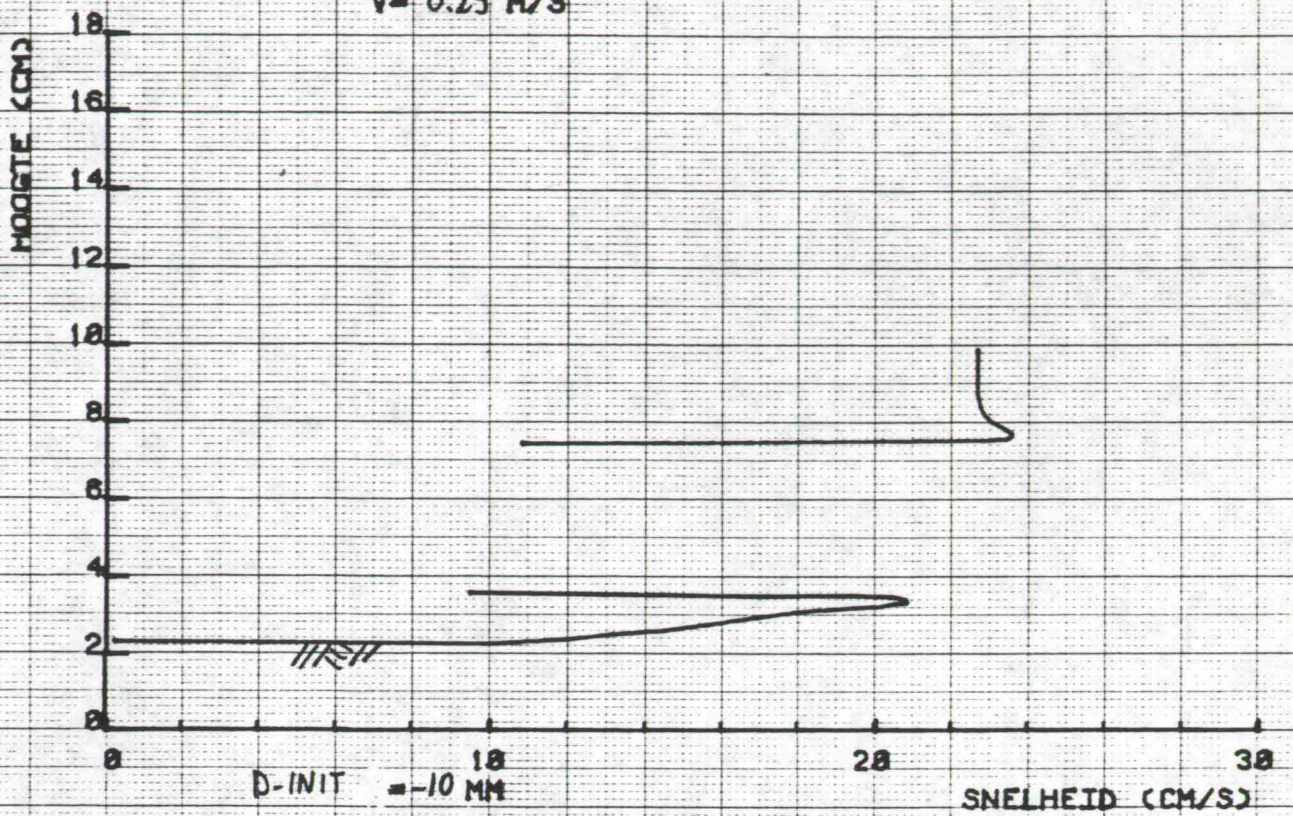




ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP = 48 MM ruw

$\bar{v} = 0.25 \text{ M/S}$



SNELHEDEN VLAK BOVEN

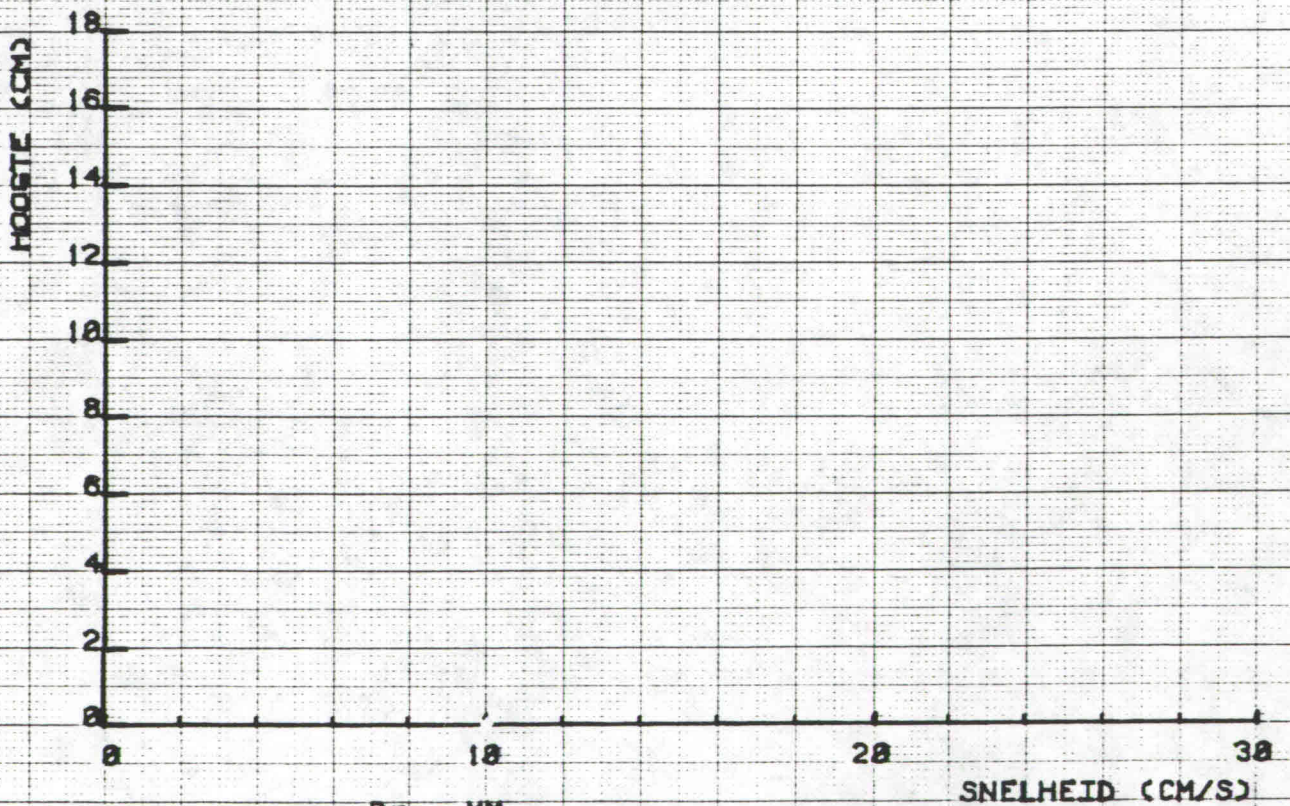
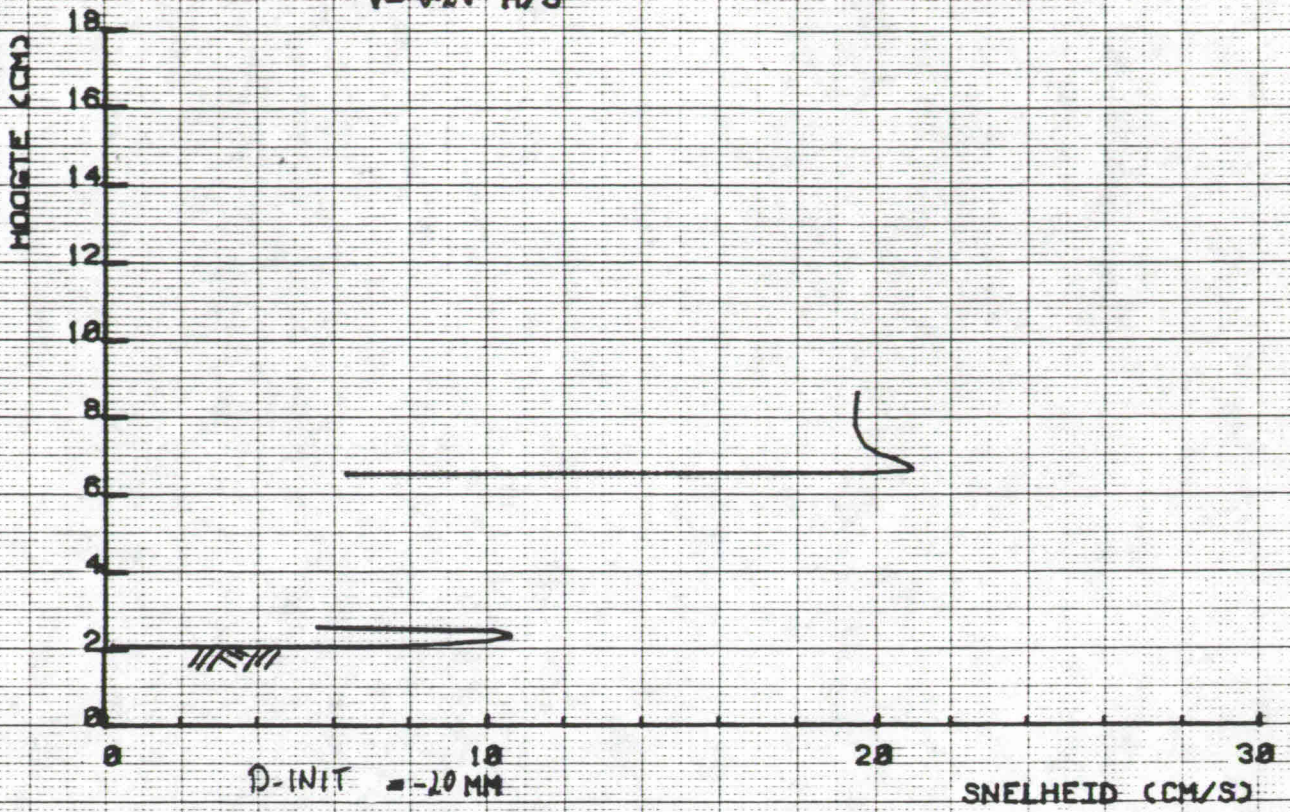
EN ONDER DE PIJP



ONTGRONDING ONDER PIJP

DIAM. PIJP=48 MM RUW

$\bar{v} = 0.25$  M/S



D = MM

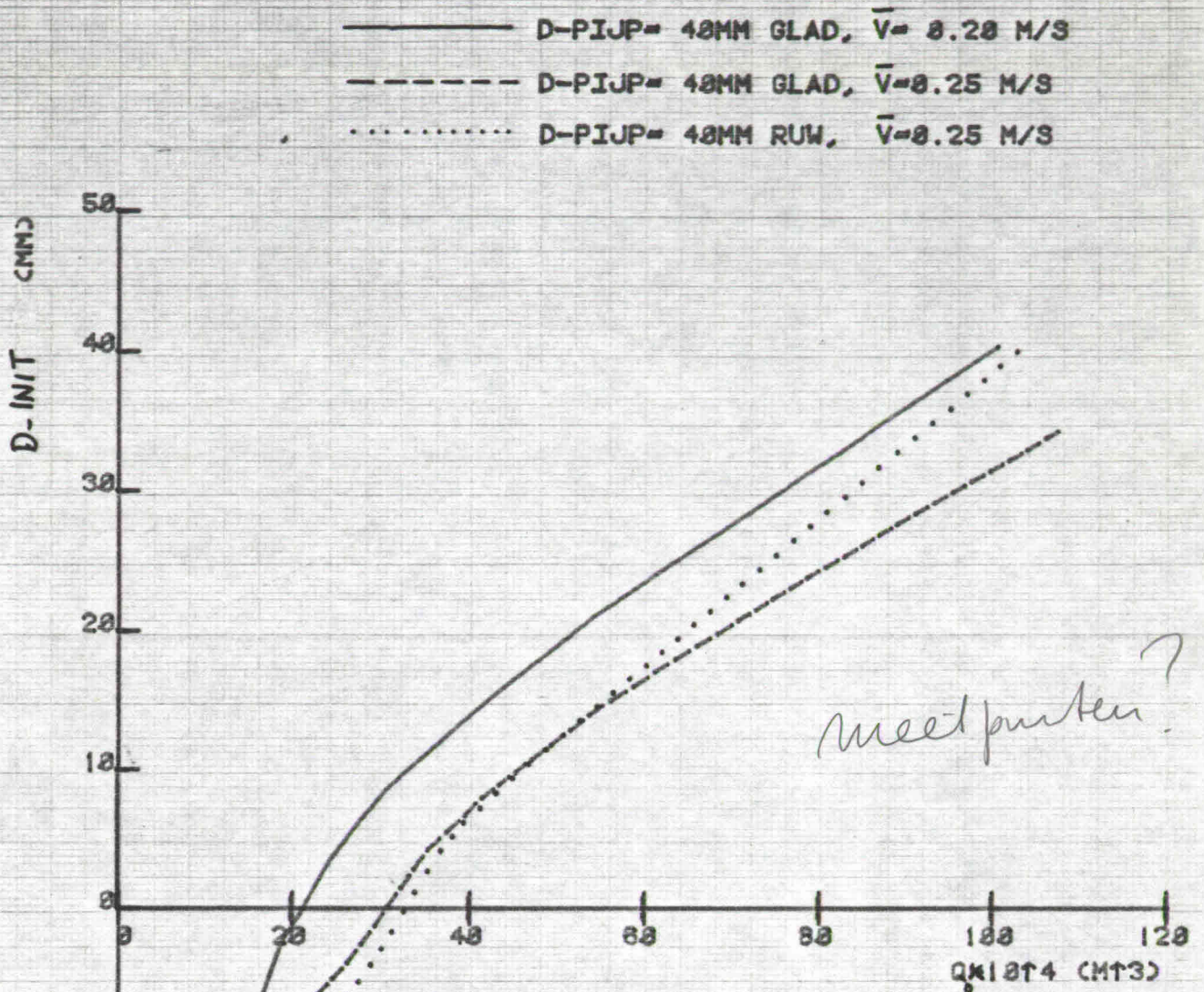
φ = MM

SNELHEDEN VLAK BOVEN

EN ONDER DE PIJP



ONTGRONDING ONDER PIJP



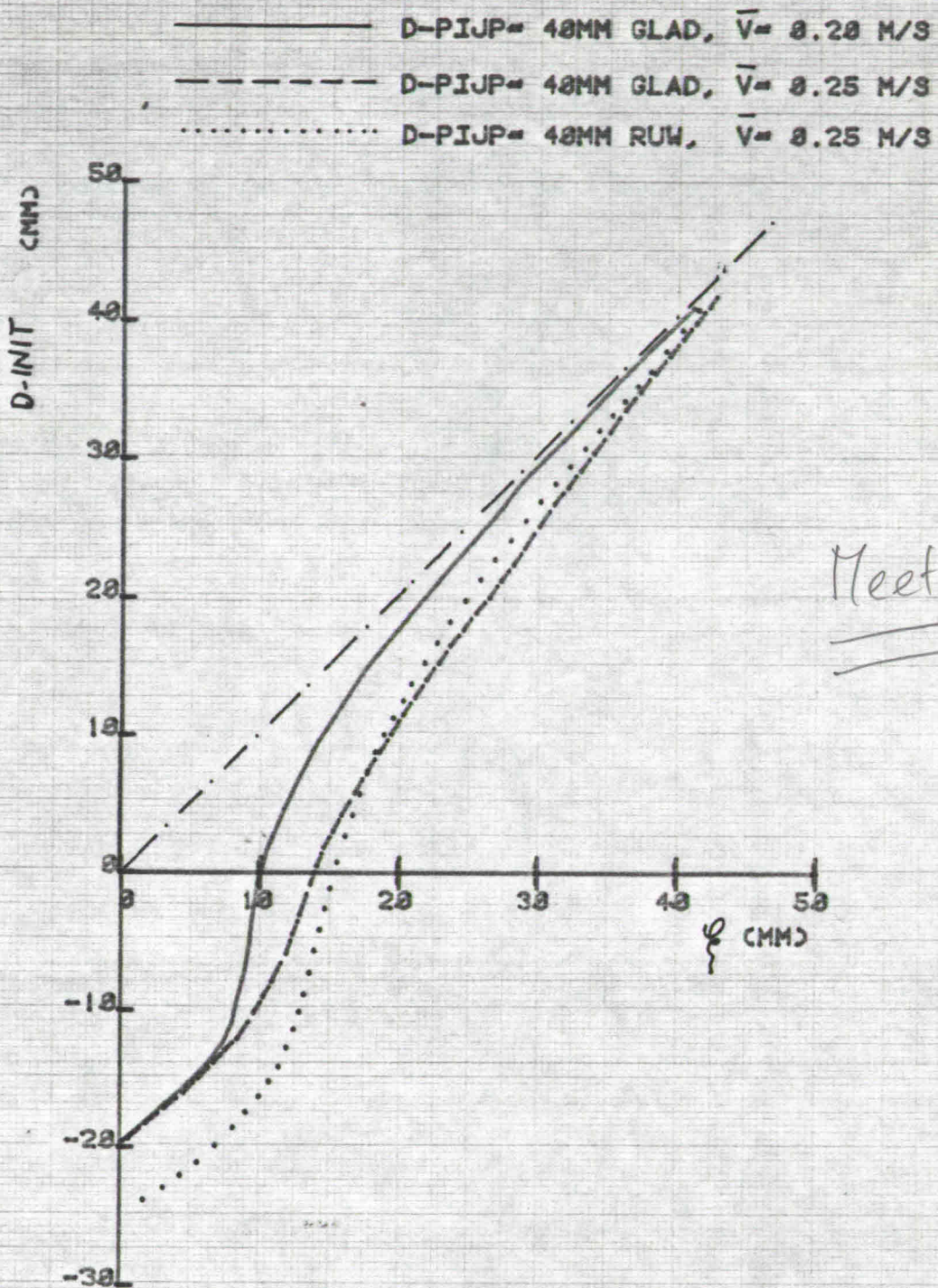
Q, IS HET TOTALE DEBIET ONDER DE PIJP

D IS DE AFSTAND ONDERKANT PIJP - DORSPRONKELIJKE BODEM

*2*  
int



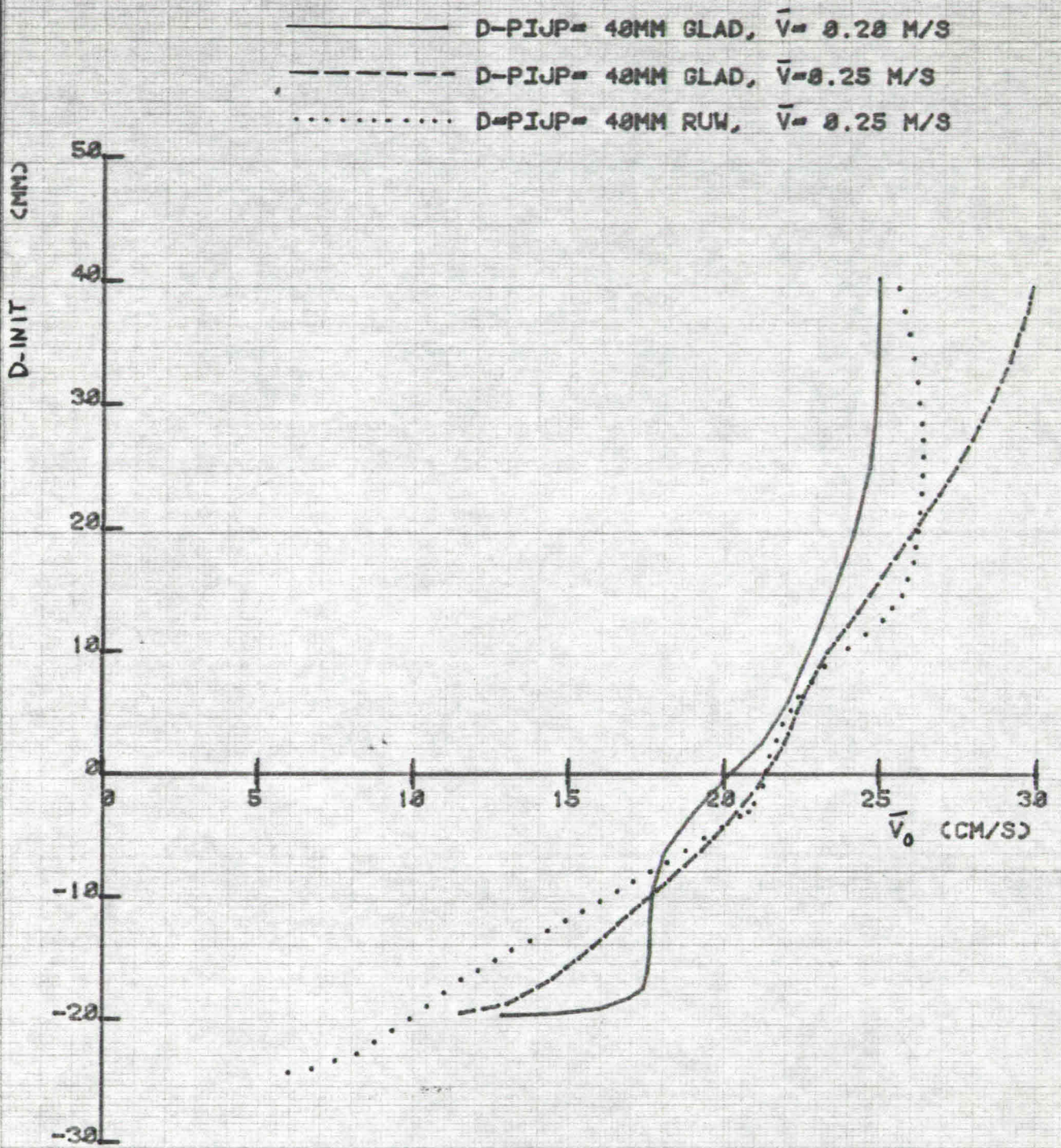
ONTGRONDING ONDER PIJP



$\xi$  IS DE AFSTAND ONDERKANT PIJP - BODEM ONTGRONDING  
 D IS DE AFSTAND ONDERKANT PIJP - OORSPRONKELIJKE BODEM  
 D-init



# ONTGRONDING ONDER PIJP



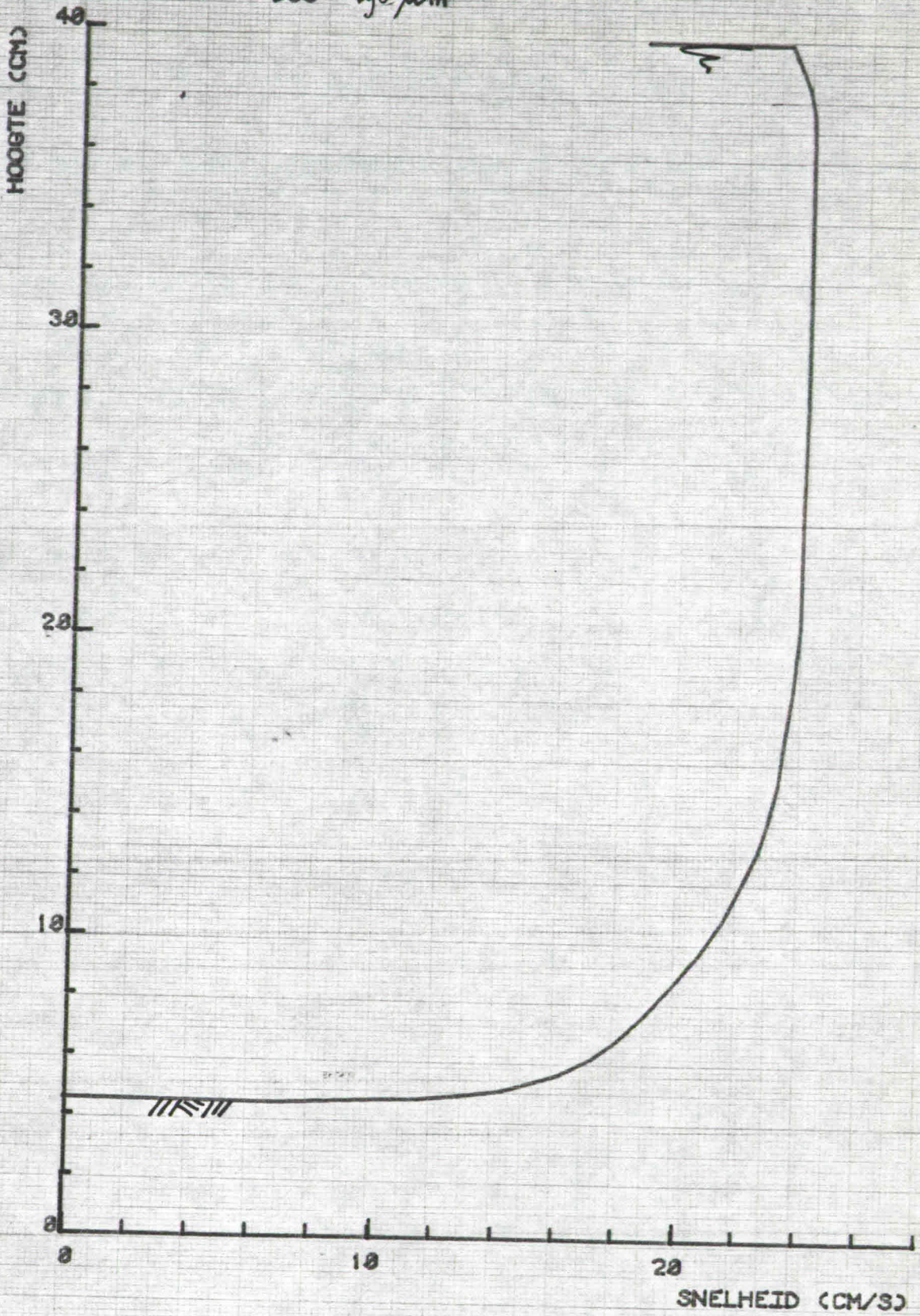
$\bar{V}_0$  IS DE GEMIDDELTE SNELHEID ONDER DE PIJP  
 D IS DE AFSTAND ONDERKANT PIJP - OORSPRONKELIJKE BODEM



SNELHEIDSPROFIEL ONGESTOORD

$\bar{V} = 0.28 \text{ M/S}$

$D50 = 190 \mu\text{m}$



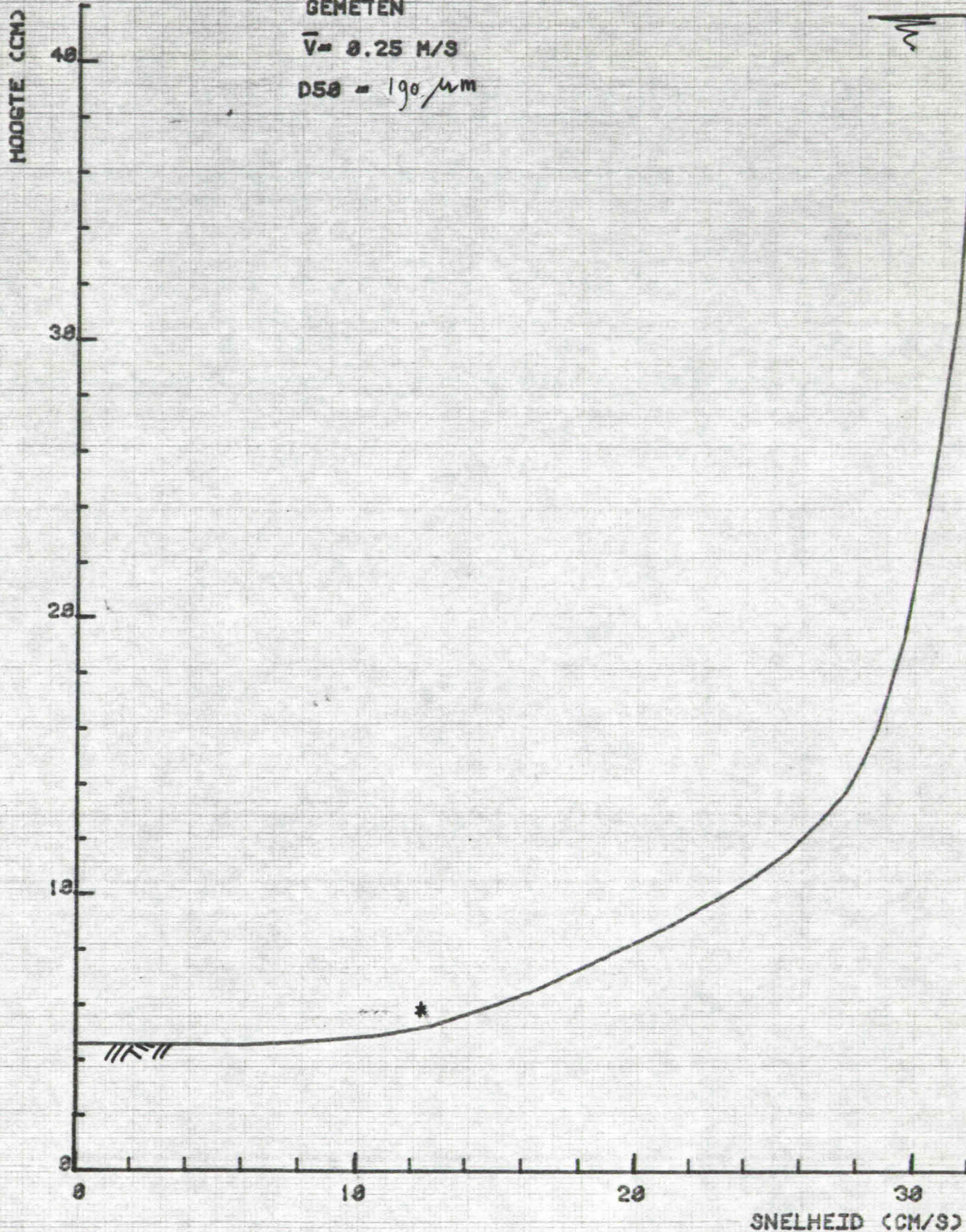


SNELHEIDSPROFIEL ONGESTOORD

GEMETEN

$$\bar{V} = 0.25 \text{ M/S}$$

$$D50 = 190 \mu\text{m}$$



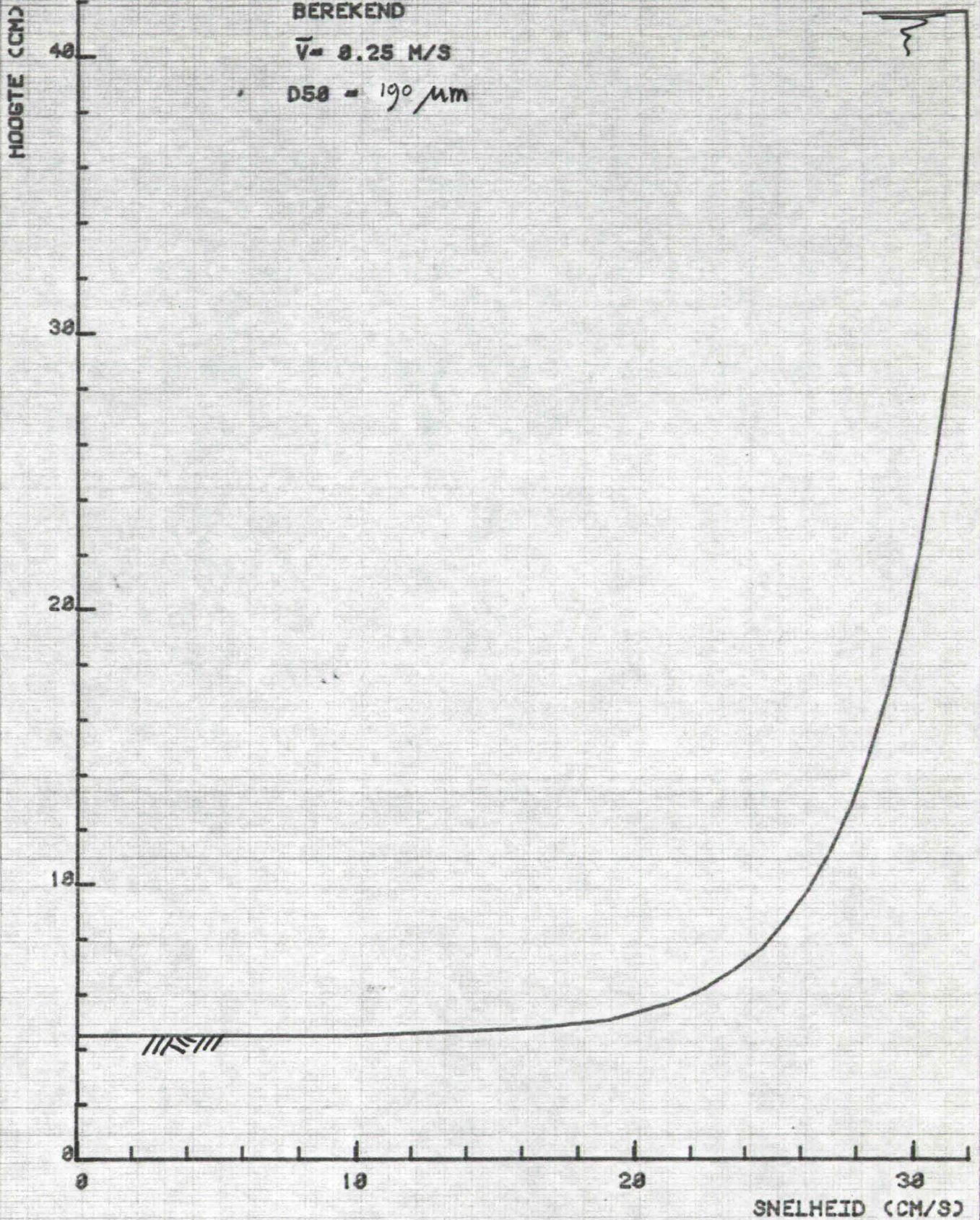


SNELHEIDSPROFIEL ONGESTOORD

BEREKEND

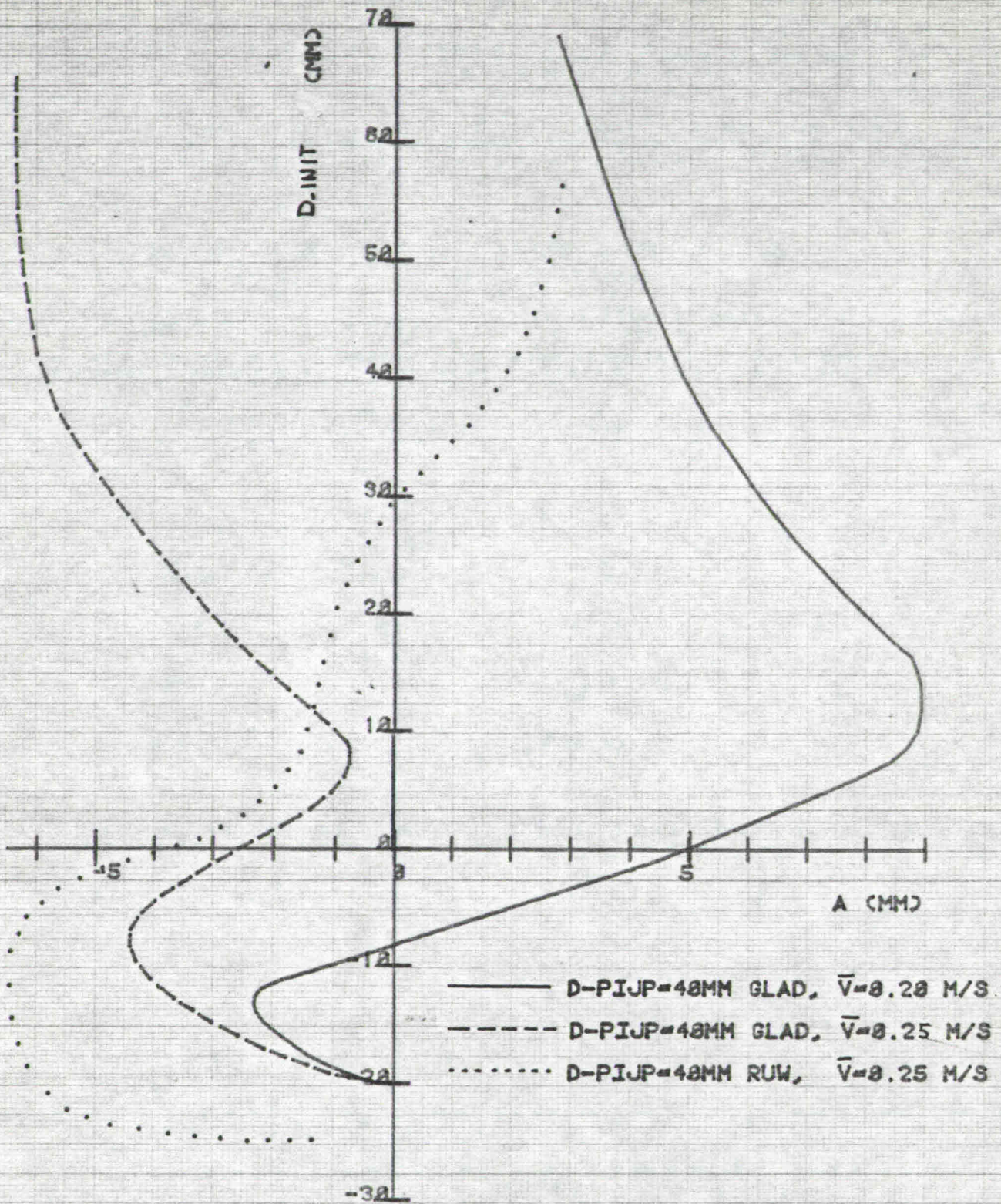
$$\bar{v} = 0.25 \text{ M/S}$$

$$D_{50} = 190 \mu\text{m}$$





A IS BEREKEND M.B.V. GEMETEN SNELHEIDSPROFIEL

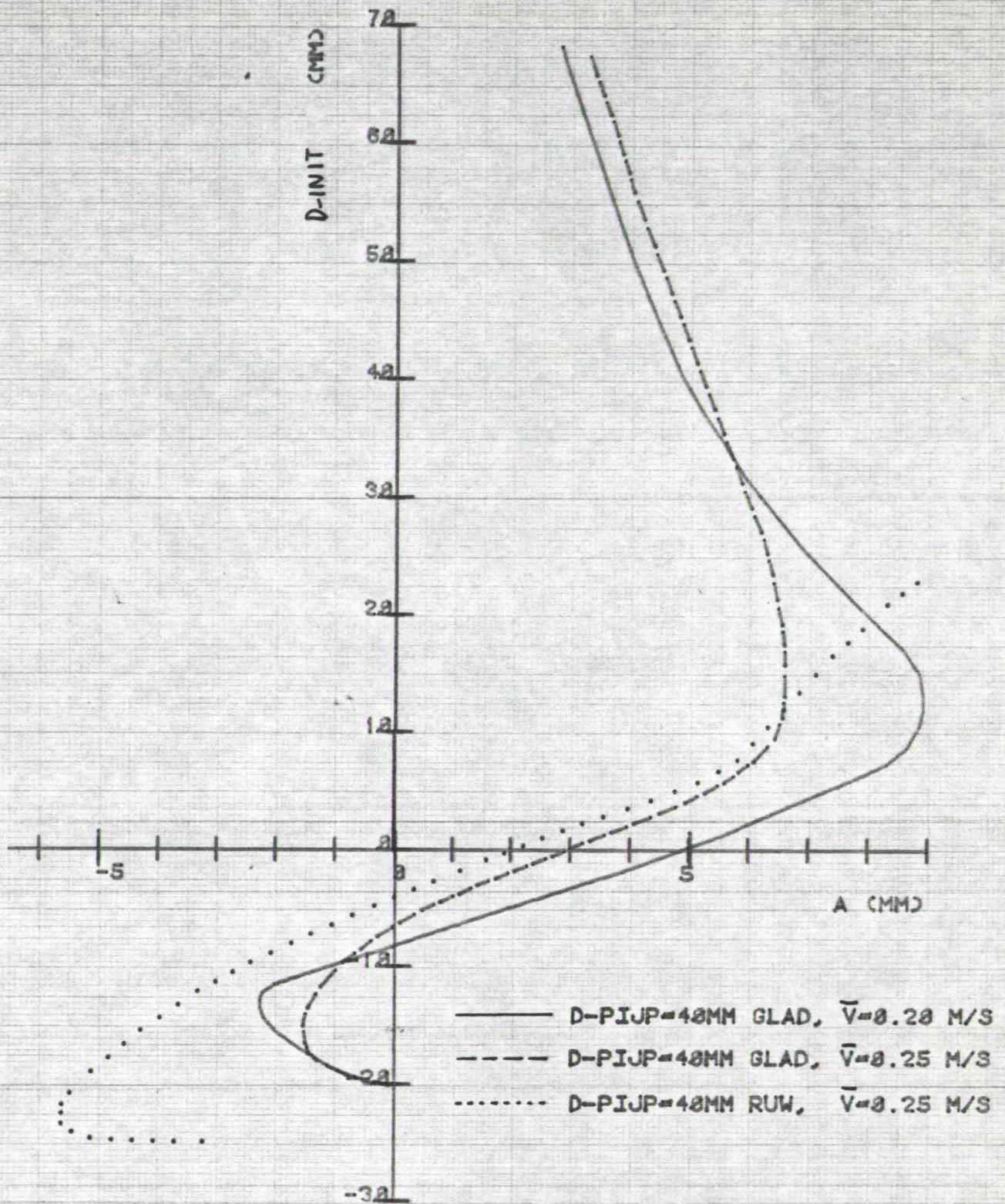


A: AFST. HARTLIJN PIJP-SCEIDINGSHOOGTE DEBIETEN

D: AFST. ONDERKANT PIJP-OORSPRONKELIJKE BODEM



A IS BEREKEND M.B.V. BEREKEND SNELHEIDSPROFIEL

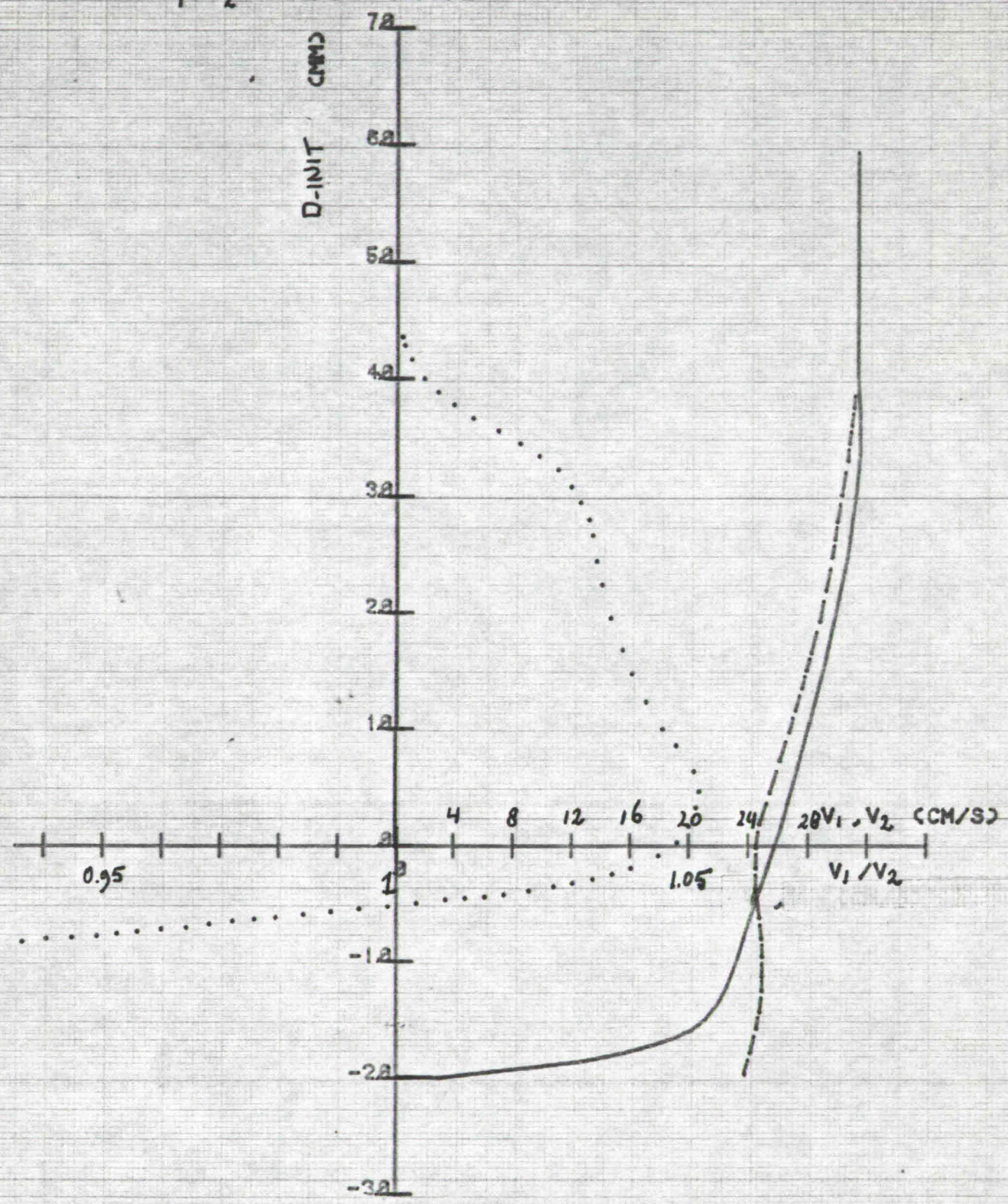


A: AFST. HARTLIJN PIJP-SCHIEDINGSHOOGTE DEBIETEN

D: AFST. ONDERKANT PIJP- DOORSPRONKELIJKE BODEM



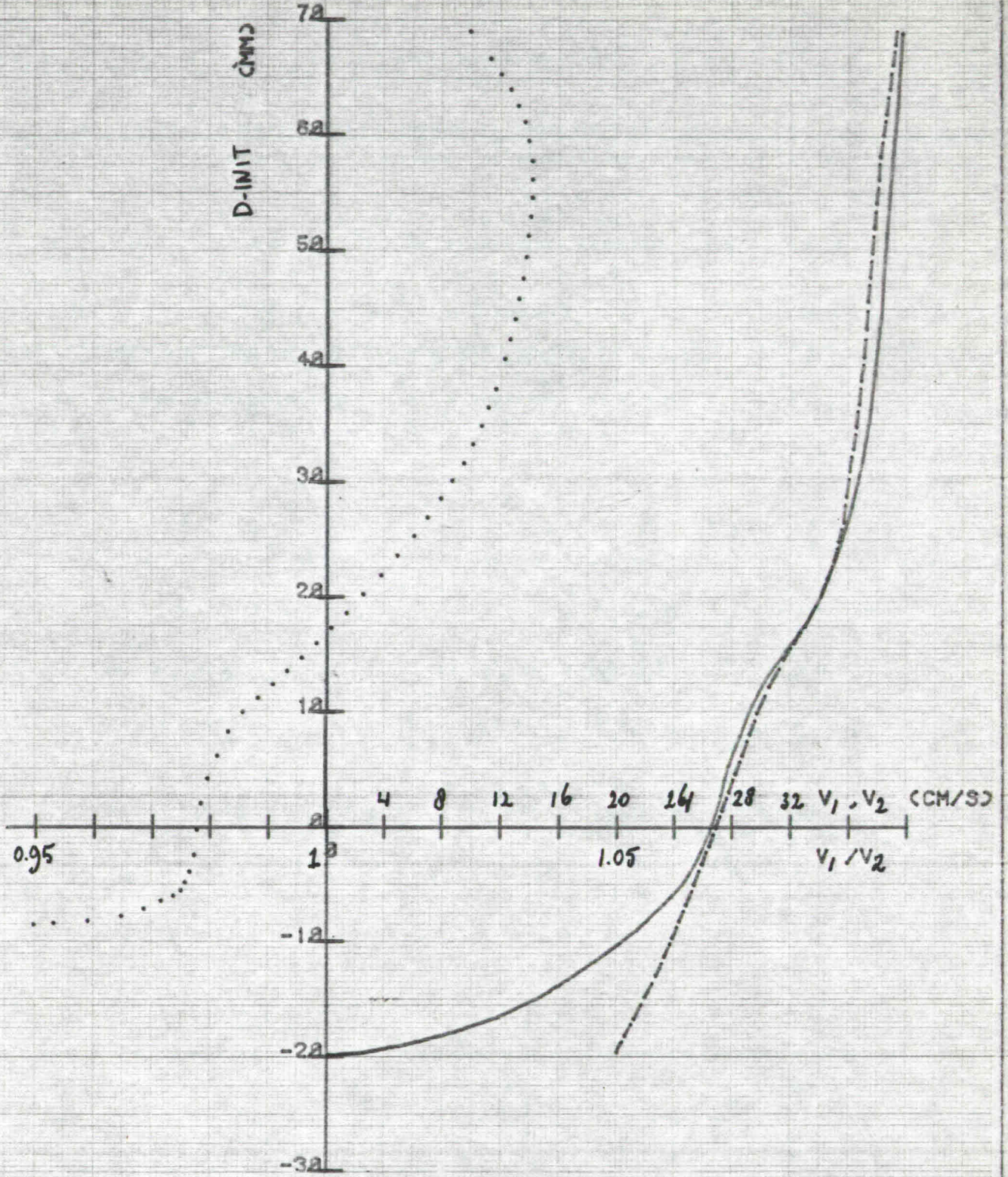
———  $V_1$ : MAX SNELHEID BIJ WAND ONDERKANT PIJP } EERSTE X-SCHAAL  
 - - -  $V_2$ : MAX SNELHEID BIJ WAND BOVENKANT PIJP }  
 ·····  $V_1/V_2$  TWEDE X-SCHAAL



MAXIMALE SNELHEID BIJ PIJPWAND  
 DIAM. PIJP=40MM,  $\bar{V}=0.20$  M/S,  $D_{50}=200\mu$   
 PIJPWAND GLAD



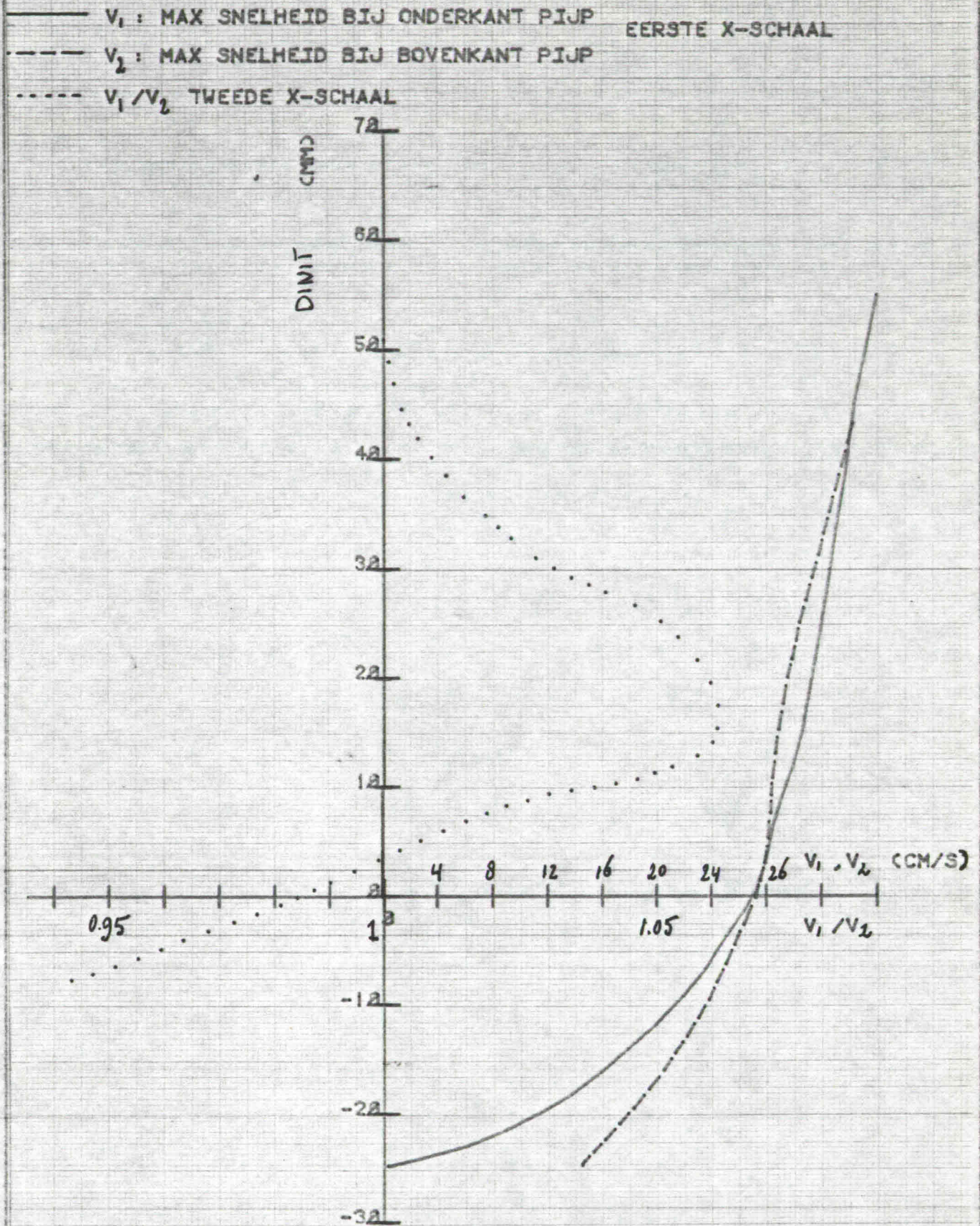
———  $V_1$  : MAX SNELHEID BIJ ONDERKANT PIJP } EERSTE X-SCHAAL  
 - - -  $V_2$  : MAX SNELHEID BIJ BOVENKANT PIJP }  
 ·····  $V_1/V_2$  TWEDE X-SCHAAL



MAXIMALE SNELHEID BIJ PIJPWAND  
 DIAM. PIJP=40MM,  $\bar{V}=0.25$  M/S,  $DES=222\mu$   
 PIJPWAND GLAD



ONTGRONDING ONDER PIJP



MAXIMALE SNELHEID BIJ PIJPWAND

DIAM. PIJP=40MM,  $\bar{V}=0.25$  M/S,  $DS=200\mu$

PIJPWAND RUW



