

TNO-rapport

**Invloed van weggeometrie op de concentratie
van luchtverontreinigende stoffen op en langs
de weg**

Referentienummer 94-377
Dossiernummer 112325-25033
Datum november 1994
NP

Auteur
J.W. Cleijne

Opdrachtgever
MILEF/VER/LU 4100.1367
Ministerie van Verkeer en Waterstaat
t.a.v. drs. A.H. Versluis
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
postbus 5044
2600 CA Delft

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Medegefinancierd door
Doelfinanciering VROM-DGM
contactpersoon ir. J. Herremans
VROM
Den Haag

Samenvatting

In verband met de overschrijding van Algemene Maatregelen van Bestuur grens- en richtwaarden voor luchtkwaliteit in woonsituaties heeft Rijkswaterstaat behoefte aan een instrument om de concentraties van luchtverontreinigende stoffen in complexe geometriën te bepalen. In dit onderzoek is onderzocht in hoeverre numerieke simulatie van de stroming (CFD) hiervoor geschikt is.

In het project is een tweedimensionaal wegmodel ontwikkeld, dat in staat is de concentraties van verontreinigende stoffen te berekenen op en nabij een snelweg. Het model houdt daarbij rekening met de aanwezigheid van rijdend wegverkeer, als gevolg waarvan extra menging optreedt. De extra menging wordt gerealiseerd door het modelleren van de turbulentie die door het rijdend wegverkeer wordt gegenereerd. Met behulp van het model is het mogelijk om de verspreiding langs verschillende soorten wegprofielen door te rekenen.

Het tweedimensionale model is gevalideerd aan de hand van windtunnelmetingen aan een wegmodel in vlak terrein en aan een weg met verlaagde ligging.

Om te kunnen beoordelen in hoeverre de tweedimensionale modellering een correct beeld geeft van de werkelijkheid is de omstroming van een enkel voertuig (stilstaand en rijdend) gemodelleerd. Hierbij is gekeken naar de verspreiding van de uitlaatgassen en naar de produktie van turbulentie door het rijdende voertuig.

Het onderzoek heeft geresulteerd in inzicht in de verspreiding van uitlaatgassen achter een enkel voertuig. In het onderzoek zijn een groot aantal windtunnelmetingen verricht die kunnen worden gebruikt ter validatie van berekeningen. Bovendien geven de windtunnelmetingen inzicht in de verspreiding van verontreinigende stoffen bij een weg in vlak terrein en bij een verdiept gelegen weg.

Het tweedimensionale model is in staat gebleken het algemene verloop van de windtunnelmetingen te reproduceren. Rekening houdend met een aantal onzekerheden in de meetgegevens is het resultaat van deze berekeningen goed te noemen.

Met behulp van het tweedimensionale wegmodel is een aantal parameters gevarieerd, namelijk de taludhelling en de terreinruwheid en is de invloed van deze parameters onderzocht. Uit deze berekeningen blijkt dat de invloed van de taludhelling relatief klein is, terwijl de invloed van de ruwheid een aanzienlijke invloed heeft op de verspreiding van verontreinigende stoffen.

Summary

In urban areas minimum levels of air quality may be exceeded due to the vicinity of roads. There is a need for a tool able to predict concentrations of pollutants in more complex geometries. The aim of the project is to study whether Computational Fluid Dynamics (CFD) can be used successfully for this purpose.

A two-dimensional prediction model for the concentration of pollutants in vicinity of motorways has been developed. The model accounts for the traffic on the motorway, which enhances the dilution of pollutants through increased mixing. The increased mixing has been introduced by including car-induced turbulence source in the model. Besides motorways in flat terrain, the model is able to predict the dispersion of pollutants in the vicinity of motorways of more complex situations, such as lowered roads in elevated terrain.

The two-dimensional model has been validated by means of wind tunnel measurements, carried out using a model of a motorway. One set of measurements was made on a motorway in flat terrain. A second set of measurements was made on a lowered motorway.

A full three-dimensional calculation has been made to model the flows around a driving and a stationary car and to model the dispersion of pollutants exiting the exhaust pipe. The three-dimensional calculation have been used to judge the two-dimensional dispersion model.

Considerable insight has been gained into the dispersion of pollutants behind a single (moving) vehicle. A large number of wind tunnel measurements have been carried out, which can be used for the validation of the model calculations. Moreover, the wind tunnel measurements have resulted in useful data on the dispersion of pollutants in flat terrain and in terrains of more complex shape.

The two-dimensional dispersion model has shown to be successful in the reproduction of the wind tunnel measurements. Taking into account the uncertainties in the measurements the agreement of calculations and wind tunnel measurements is good. Using the two-dimensional dispersion model, calculations have been carried out using a different terrain roughness and a different ramp angle. The results show that the ramp angle has very little effect on the concentration of pollutants, but that the influence of the terrain roughness on the dispersion is rather big.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
	Summary	3
1	Inleiding	6
2	Numerieke modellering van de verspreiding achter een personenvoertuig	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Rekenmodel en voertuigkeuze	10
2.3	Geometrie en rekenrooster	10
2.4	Randvoorwaarden en berekende configuraties	12
2.5	Resultaten	14
3	Experimenten	16
3.1	Windtunnelmodel van wegsegment met rijdend verkeer	16
3.2	Beproeversprogramma	16
3.3	Metingen en meetapparatuur	17
3.4	Meetlocaties en meetprogramma	18
3.5	Resultaten	19
3.6	Evaluatie	20
4	Numeriek model van een tweedimensionaal wegsegment	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Geometrie en grid	23
4.3	Conditie	25
4.4	Randvoorwaarden	25
4.5	Volumebronnen	25
4.6	Validatie aan de hand van metingen en driedimensionale berekeningen	27
4.6.1	Vergelijking van resultaten voor stilstaand verkeer	28
4.6.2	Vergelijking van resultaten voor rijdend verkeer	29
5	Resultaten en discussie	31
5.1	Stroming	31
5.2	Verspreiding	32
6	Parametervariaties	34
6.1	Variatie van de taludhelling	34
6.2	Variatie van de terreinruwheid	34
7	Conclusies en aanbevelingen	35
8	Referenties	37
9	Symbolenlijst	38
10	Verantwoording	39

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

Appendix

A1. Vergelijking van driedimensionale en tweedimensionale berekeningsresultaten

Figuren

A1-A40 Meetresultaten

Tabellen A1-A8 Experimentele verdunningsfactoren

Tabellen A9-A10 Resultaten van luchtsnelheids- en turbulentiemetingen

1 Inleiding

Probleemstelling

Het is bekend dat grenswaarden voor luchtkwaliteit veelvuldig worden overschreden in woonsituaties langs de Nederlandse autosnelwegen. Daar waar in de huidige situatie woonbebouwing zich dicht langs autosnelwegen bevindt ligt tenminste een deel van die bebouwing in een zone waarbinnen de grenswaarde voor NO₂ wordt overschreden. Dit probleem doet zich vooral voor in de omgeving van de grote steden. In het jaar 2000 is het probleem minder groot, omdat in de toekomst het autopark schoner wordt en de achtergrondconcentraties lager zullen worden. Toch blijft het probleem tot in 2000 aanwezig [1].

Op dit moment worden bestaande situaties met overschrijding van de grenswaarden gedoogd, maar VROM (afdeling Lucht en Energie) wil deze situatie in de nabije toekomst gaan aanpakken. VROM is beleid aan het ontwikkelen zodat in de woongebieden in de toekomst aan de grenswaarden wordt voldaan. De volgende oplossing bij overschrijding van grenswaarden in woongebieden langs wegen zijn mogelijk:

- gedoogsituatie laten voortbestaan;
- het saneren van woonbebouwing in het gebied met overschrijding;
- of het nemen van maatregelen ter verlaging van concentraties langs de weg, door middel van:
 - verlaging van de achtergrondconcentraties,
 - verbetering van de verspreiding,
 - reductie van de emissie.

In dit project worden mogelijkheden onderzocht die bestaan om maatregelen te nemen aan de wegconstructie, zodat de concentraties langs de weg lager worden. Veel autosnelwegen liggen verdiept, verhoogd, of hebben geluidwerende schermen of wallen in hun directe omgeving. Het is inmiddels duidelijk dat de luchtkwaliteit in de omgeving van verhoogde of verlaagde wegen en wegen met schermen en wallen beter verdund is dan in het geval dat deze obstakels afwezig zijn.

De kennis van de effecten van de constructie op de verspreiding van luchtverontreinigende stoffen is op dit moment onvoldoende en beperkt zich tot verspreiding langs wegen die op maaiveld gelegen zijn. Voor een beperkt aantal configuraties (onder andere geluidschermen en gebouwen) bestaat wel kennis over de invloed op de verspreiding, maar voor sterk afwijkende situaties is de waarde van voorspellingen onzeker. Voor complexe situaties van verdiepte of verhoogde ligging zijn geen of nauwelijks gegevens voorhanden.

In dit project is onderzocht in hoeverre geavanceerde rekenpakketten voor numerieke stromingsleer (Computational Fluid Dynamics = CFD) kunnen worden ingezet om de effecten van de wegconstructies op de verspreiding te bepalen. Het voordeel van CFD-berekeningen is dat het effect van parametervariëaties (zoals taludbreedte, taludhelling, schermhoogte en dergelijke) relatief snel kunnen worden geëvalueerd, wanneer de basisconfiguratie eenmaal bekend is uit windtunnel onderzoek. Met behulp van CFD is het ook mogelijk het werkelijke probleem beter te benaderen dan in het geval van windtunnelonderzoek, waar slechts sterk vereenvoudigde situaties onderzocht kunnen worden. CFD-berekeningen dienen echter wel eerst met metingen getoetst te worden om te verifiëren of de resultaten van deze metingen voldoende betrouwbaar zijn.

Doel van het project

Bij Rijkswaterstaat gelden allerlei richtlijnen voor het ontwerpen van wegconstructies. Zo bestaan er ook richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen (ROA, [2]). In

hoofdstuk III van deze richtlijnen worden de richtlijnen voor de dwarsprofielen van autosnelwegen beschreven. Bij het opstellen van deze richtlijnen is geen rekening gehouden met de verspreiding van luchtverontreinigende stoffen en voorkomende concentraties daarvan op en langs de weg.

Het lange termijn doel van het project is de optimale parameterwaarden (bijvoorbeeld de hellingshoek van taluds) te bepalen, die de laagste concentraties langs de weg geven. De vraagstelling valt daarbij uiteen in twee onderzoeksproblemen:

1. Wat is de invloed van het rijdend wegverkeer op de turbulentie en de concentratie op en langs de weg;
2. Wat is de invloed van de huidige ontwerprichtlijnen voor autosnelwegen op de turbulentie en de concentraties op en langs de weg.

Het korte termijn doel van het project is het ontwikkelen van een 2-dimensionaal CFD-model voor de verspreiding van luchtverontreinigende stoffen op en langs snelwegen, waarbij rekening wordt gehouden met de invloed van het rijdende wegverkeer op de turbulentie op en langs de weg. Het model moet geschikt zijn voor diverse dwarsprofielen, zoals taluds van verschillende afmetingen. Het model wordt gevalideerd met behulp van windtunnelmetingen aan een verkeerssimulatiemodel en toegepast op een beperkt aantal parametervariaties.

Aanpak

In de eerste fase van het project zijn modellen ontwikkeld die dienden als basis voor het later in het project ontwikkelde tweedimensionale CFD-model voor de verspreiding van verontreiniging langs snelwegen. De gebruikte numerieke stromingsmodellen zijn gebaseerd op het bekende k- ϵ turbulentiemodel, dat is geïmplementeerd in het eindige-volume pakket TASCflow.

Een driedimensionale CFD-berekening aan een model van een enkel personenvoertuig leverde gegevens en inzicht over de stroming rondom het voertuig. Dit houdt het snelheidsveld rondom het voertuig en het door het voertuig geïnduceerde turbulentieveld in. Bovendien werd de verspreiding van stoffen die de uitlaat van het voertuig verlaten onderzocht. Met behulp van een middelingsprocedure zijn uit deze driedimensionale berekening gegevens afgeleid voor de grootte en de sterkte van de verontreinigings- en turbulentiebronnen in het tweedimensionale verspreidingsmodel en voor de bepaling van de parameters die in het tweedimensionale model worden gebruikt. Het numerieke model van de verspreiding achter een enkel personenvoertuig wordt beschreven in hoofdstuk 2.

Speciale aandacht is besteed aan de numerieke modellering van de atmosferische grenslaag, dat wil zeggen aan de correcte modellering van de ruwe wand aan het aardoppervlak en aan de grootte (hoogte) van het rekendomein. De gebruikte modellering wordt beschreven in [3].

Windtunnelmetingen aan de verspreiding van luchtverontreiniging in een verkeerssimulatiemodel en aan de turbulentie in hetzelfde model hebben de gegevens geleverd voor de ijking en de validatie van de CFD-modellen. Er zijn windtunnelmetingen verricht aan een weg op maaiveld en aan een verzonken gelegen weg. Deze metingen zijn uitgevoerd met en zonder rijdend verkeer. De simulaties leverden de gegevens over de verspreiding van de luchtverontreinigende stoffen, maar ook over de turbulentie en het zog dat door het passerende wegverkeer wordt geïnduceerd. Hoofdstuk 4 geeft een volledige beschrijving van de experimenten in de windtunnel.

Aan de hand van de gegevens uit de driedimensionale berekening aan de verspreiding achter een enkel voertuig en aan de hand van de windtunnelmeting van rijdend en stilstaand verkeer is het tweedimensionale verspreidingsmodel ontwikkeld, waarbij het met name ging om de bepaling van de afmetingen van de grootte van de bronnen en de sterkte van de bronnen. Het model wordt beschreven in hoofdstuk 4. Tevens beschrijft dit hoofdstuk de bepaling van de verschillende modelparameters.

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

In de tweede fase van het project zijn de resultaten van de tweedimensionale berekeningen vergeleken met de resultaten van de windtunnelmetingen aan een weg in vlak terrein en een verzonken weg, in een situatie met en zonder rijdend verkeer. Het is mogelijk om uit deze gegevens uitspraken te doen over de invloed van de turbulentie die door het verkeer wordt geïnduceerd en over de invloed van het wegprofiel op de verspreiding. Hoofdstuk 5 geeft de resultaten van deze berekeningen en de vergelijking met de windtunnelmetingen.

In de derde fase van het project zijn op de twee basisconfiguraties van een weg met en zonder talud een aantal berekening uitgevoerd waarbij de terreinruwheid is gevarieerd en waarbij de taludhelling is gevarieerd. De resultaten van deze berekeningen worden gepresenteerd in hoofdstuk 6.

Tot slot volgen in hoofdstuk 7 de conclusies over het uitgevoerde onderzoek en de aanbevelingen voor in de toekomst uit te voeren onderzoek.

-
- | | |
|---|--|
| 1 | simulatie atmosferische grenslaag |
| 2 | inleidende berekeningen |
| a | driedimensionale berekeningen verspreiding achter een personenvoertuig |
| b | inleidende tweedimensionale berekeningen ter bepaling van de brongrootte en de turbulentiebron |
| c | vergelijkende windtunnelmetingen |
| 3 | keuze van het tweedimensionale wegmodel |
| 4 | ijking van het turbulentiemodel met behulp van modelberekeningen |
| 5 | berekeningen aan verschillende dwarsprofielen en vergelijking met metingen |
| a | vlakke weg, stilstaand verkeer |
| b | vlakke weg, rijdend verkeer |
| c | weg met talud, stilstaand verkeer |
| d | weg met talud, rijdend verkeer |
| 6 | variaties taludhelling, terreinruwheid |
-

Schema 1 Verschillende stadia van het project

2 Numerieke modellering van de verspreiding achter een personenvoertuig

2.1 Inleiding

De verspreiding van uitlaatgassen achter een rijdend voertuig wordt beïnvloed door de stroming rond de auto. Achter het voertuig bevindt zich in het algemeen een zogebied, waarin de lucht wordt meegesleurd in de rijrichting en waarin een verhoogde turbulentie waar te nemen valt. De karakteristieke lengteschaal van de turbulentie heeft de afmetingen van het voertuig. Achter het voertuig kunnen ook periodieke wervelstructuren worden waargenomen.

Op enige afstand achter het voertuig komt de meegesleurde lucht weer tot stilstand als gevolg van de wrijving van de lucht aan het wegoppervlak. Een waarnemer die zich langs de weg bevindt, voelt bij het passeren van een rij auto's een periodiek toe- en afname van de meegesleurde wind. Het zog dat zich achter de auto bevindt, wordt beïnvloed door het feit dat het zich in de atmosferische grenslaag bevindt, bijvoorbeeld doordat het zijwaarts wordt meegevoerd als gevolg van zijwind. Behalve dat het zog kan worden meegevoerd, wordt ook de menging van uitlaatgassen met schone lucht beïnvloed door de aanwezigheid van de atmosferische grenslaag.

De verspreiding van uitlaatgassen wordt natuurlijk beïnvloed door bovengenoemde processen, maar op voorhand is niet eenvoudig te zeggen hoe deze invloed eruit ziet.

Bij het modelleren van snelwegen wordt over het algemeen uitgegaan van een continue lijnbron voor de verontreinigende stoffen en wordt vervolgens berekend hoe de verontreinigende stoffen die door de lijnbron worden geëmitteerd, worden verspreid als gevolg van de wind in de atmosferische grenslaag. De processen zoals die worden geïnduceerd door het rijdend wegverkeer worden op zo'n manier in het geheel niet, of op zeer vereenvoudigde wijze [4] meegenomen.

Om de invloed van rijdend wegverkeer te onderzoeken is de verspreiding van uitlaatgassen gedetailleerd bestudeerd in een numeriek model van een enkel rijdend personenvoertuig. In detail zijn bestudeerd de geïnduceerde snelheden, de turbulentie, geïnduceerde wervels, de verspreiding van de uitlaatgassen en de fluctuaties van het snelheidsveld zoals dat wordt waargenomen door de stilstaande waarnemer. De uitlaatgassen worden gemodelleerd door middel van een inerte component in de stromingsvergelijkingen. Er wordt dus geen rekening gehouden met eventuele chemische omzetting van verontreinigende componenten. De resultaten van deze berekeningen worden getoond in § 2.4 van dit hoofdstuk. Deze resultaten zijn gebruikt ter validatie en ijking van het tweedimensionale model van een snelweg. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 4.

Het rijdend verkeer in het windtunnelonderzoek wordt gesimuleerd door rechthoekige plaatjes die op een lopende band zijn gemonteerd. De driedimensionale berekeningen kunnen ook worden gebruikt om te controleren in hoeverre dit een correcte benadering van de werkelijkheid is.

In het restant van dit hoofdstuk wordt de geometrie en het rekenrooster van het personenvoertuig en zijn omgeving beschreven (§ 2.2). § 2.3 geeft een overzicht van de configuraties die zijn doorgerekend en de daarbij gebruikte randvoorwaarden. In § 2.4 worden die resultaten beschreven die inzicht geven in de verspreiding van uit-

laatgassen en de karakteristieke eigenschappen van de verspreiding in het zog van het voertuig. De resultaten die gebruikt zijn voor de ijking van het tweedimensionale verspreidingsmodel worden beschreven in hoofdstuk 4.

2.2 Rekenmodel en voertuigkeuze

Bij de berekeningen van de verspreiding is uitgegaan van de Reynolds-gemiddelde Navier-Stokes vergelijkingen, waarbij de turbulentie gemodelleerd is door middel van het bekende k-ε model [5]. De verspreiding van de verontreiniging wordt gemodelleerd met behulp van de vergelijking:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Hierin is C de concentratie, u de lokale snelheid, ρ de dichtheid en Γ_{eff} de effectieve diffusiecoëfficiënt gegeven door:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \Gamma + \frac{\mu_t}{Sc_t} \quad (2)$$

Hierin is Γ de moleculaire diffusiecoëfficiënt, μ_t de turbulente viscositeit, die berekend wordt met het bovengenoemde k-ε model. Sc_t is het turbulente Schmidtgetal, een empirische factor, die gelijk is genomen aan $Sc_t = 0.9$.

De modelvergelijkingen zijn opgelost door middel van het eindige-volumepakket TASCflow.

Bij de berekeningen is uitgegaan van een veelvoorkomend type personenauto, namelijk Opel Kadett Hatchback, type E. In 1991 was Opel Kadett het meest voorkomende type auto in Nederland (531991 van de 5569094 in totaal) [6].

De geometrie is van belang, omdat verschillende typen voertuigen een verschillend stromingspatroon hebben, waardoor de menging van de uitlaatgassen anders verloopt.

Dit houdt in, dat de berekeningen, die hier worden gepresenteerd niet zonder meer geldig zijn voor vrachtverkeer.

2.3 Geometrie en rekenrooster

Geometrie van het voertuig

De berekeningen zijn uitgevoerd aan een model van een veelvoorkomend type personenauto (Opel Kadett Hatchback). De geometrie van de personenauto is sterk vereenvoudigd om te voorkomen dat het rekenrooster nodeloos ingewikkeld wordt, maar de geometrie is voldoende nauwkeurig om de belangrijkste aspecten van de stroming rond de auto en de verspreiding achter de auto te bepalen. Tabel 2.1 geeft enkele karakteristieke maten van het gebruikte voertuig. Figuur 2.1 geeft een voor- en zijaanzicht van het voertuig.

Tabel 2.1 Overzicht van karakteristieke maten van het voertuig

Hoogte	1.38 m
Breedte	1.50 m
Breedte dak	1.00 m
Afstand bodemplaat wegoppervlak	0.30 m
Lengte	3.87 m
Lengte dak	1.00 m
Plaats van de uitlaat	0.75 m links van de hartlijn
Oppervlak van de uitlaat	0.0022 m ²

Het rekendomein

Het rekendomein bestond uit een rechthoekige doos met een breedte van 10 m en een hoogte van 12 m. De lengte van het domein was in het geval van een stilstaande auto met zijwind gelijk aan 40 m. De berekeningen aan een rijdend voertuig met zijwind zijn uitgevoerd in een verlengd rekendomein, waarbij de lengte van het domein zodanig werd gekozen dat de pluim met verontreiniging door de zijwand van het rekendomein werd afgevoerd. De snelheid van de zijwind bedroeg 6 m/s op een hoogte van 10 meter. De totale lengte van het rekendomein was 100 meter.

Diagram 2.1 geeft een bovenaanzicht van het rekendomein weer en toont tevens de naamgeving van de diverse vlakken. Het onder- en bovenvlak worden Bodem, respectievelijk Top genoemd.

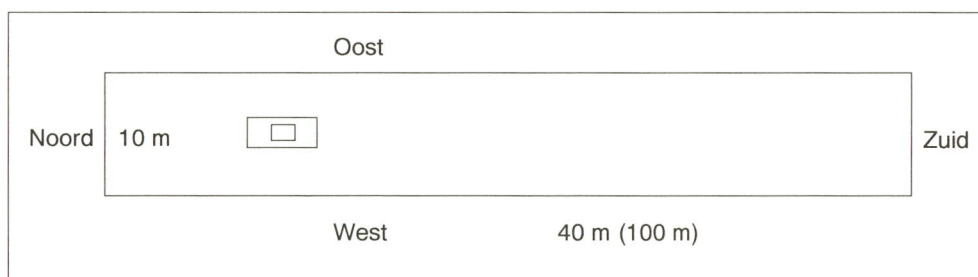


Diagram 2.1 Boven-aanzicht van het rekendomein

De verticale wanden van het rekendomein heten respectievelijk Noord, Zuid, Oost en West. Noord en West vormen de instroomoppervlakken; Oost en Zuid zijn de uitstroomoppervlakken. De hoogte en de breedte van het domein is zo gekozen dat de bovenkant van het domein geen invloed heeft op de omstroming van de auto als gevolg van opstuwing.

Het rekenrooster

Voor het oplossen van de stromingsvergelijkingen wordt een rekenrooster aangebracht in het rekendomein. De positie van de roosterpunten en de fijnheid van de verdeling van de roosterpunten bepaald in hoge mate de juistheid en nauwkeurigheid van de oplossing van de stromingsvergelijking. In het algemeen geldt dat daar waar de grootste gradiënten in de stromingsvariabelen worden gevonden het rekenrooster het fijnste verdeeld moet zijn. In gebieden waar de oplossing slechts weinig veranderd als functie van de plaats kan worden volstaan met een veel grovere verdeling van de roos-

terpunten.

Het rekenrooster voor de berekening van de verspreiding achter een enkele auto bedroeg in totaal 70000 knooppunten. Het rekenrooster was lokaal verfijnd in de nabijheid van het voertuig (figuur 2.2). Daar waar loslating van de stroming werd verwacht werd nog een verdere verfijning aangebracht. In de nabijheid van de uitlaat van de auto, waar de gradiënten van de concentratie het grootste zijn, was de onderlinge afstand van de knooppunten in de orde van 10 cm.

2.4 Randvoorwaarden en berekende configuraties

Configuraties

Na een aantal inleidende berekeningen zijn twee configuraties gemodelleerd en nader geanalyseerd. Het betrof een configuratie met verspreiding achter een stilstaande auto en een configuratie met een rijdende auto. Tabel 2.2 geeft een overzicht van deze twee configuraties.

In beide configuraties bevindt het voertuig zich in een dwarswind van 90° met een snelheid van 6 m/s op een referentiehoogte van 10 m. Het bijbehorende windsnelheidsprofiel is zo gekozen dat het in evenwicht is met een stroomopwaartse ruwheidslengte van $z_0 = 0.1$ m. Het rijdende voertuig beweegt zich met een snelheid van 24 m/s voort. Dit komt overeen met 86.4 km/hr.

De uitlaatgassen verlaten de uitlaat met een snelheid van 10 m/s, onder een neerwaartse hoek van 30° . De hoek, waaronder de uitlaatgassen de uitlaat verlaten, is via opmeting bepaald. Het debiet is bepaald aan de hand van een berekening van een rijdend voertuig. Gegeven het oppervlak van de gemodelleerde uitlaatopening komt dit overeen met een debiet van $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabel 2.2 Gemodelleerde configuraties

	I stilstaande auto	II rijdende auto	Opmerkingen
voertuigsnelheid	0 m/s	24 m/s	86,4 km/h
windsnelheid op 10 m hoogte	6 m/s	6 m/s	3 Beaufort
windrichting	90°	90°	
ruwheidslengte z_0 (stroomopwaarts)	0.1 m	0.1 m	type terrein
uitstroomsnelheid uitlaat	10 m/s	10 m/s	
uitstroomrichting uitlaat	30°	30°	

Randvoorwaarden

Hierboven zijn de configuraties die zijn doorgerekend globaal beschreven. Voor de modelvergelijking leidt dit tot de volgende randvoorwaarden.

Configuratie I: Stilstaande auto

In het geval van een stilstaande auto vormt het Westvlak een instroomopening. Het instroomprofiel bestaat uit een logaritmisch snelheidsprofiel gegeven door:

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z/z_0) \quad (3)$$

waarin z_0 de stroomopwaartse ruwheidslengte is, u_* de wrijvingsnelheid en κ de Von Kármán-constante ($\kappa = 0.4$). z_0 is overeenkomstig tabel 2.2 gelijk aan 0.1 m genomen. De overige componenten van de wind zijn gelijk aan nul. Behalve de snelheid in het inlaatvlak moeten ook de turbulente kinetische energie (k) en de turbulente dissipatie (ϵ) worden gespecificeerd. Deze verticale profielen van deze grootheden zijn zo gekozen dat zij samen met het windsnelheidsprofiel een grenslaag vormen die in evenwicht is met een ruwheidslengte van 0.1 m.

Aan het Noord-, Zuid en Topvlak geldt in het geval van het stilstaande voertuig een symmetrierandvoorwaarde, dit betekent dat de gradiënten van alle grootheden aan deze oppervlakken verdwijnen. Een symmetrie voorwaarde voldoet in dit geval, omdat de genoemde vlakken voldoende ver weg zijn en geen invloed uitoefenen op de lokale omstroming van de auto of op de verspreiding van de uitlaatgassen.

Het Oostvlak is gemodelleerd door middel van een uitstroomvoorwaarde die beschrijft dat de stroming vanuit het binnendomein naar de rand wordt geëxtrapoleerd. De Bodem is gemodelleerd als een hydraulisch gladde wand. (Ondanks dat een weg een zeer lage wandruwheid kent, is dit strikt genomen niet juist. Ten tijde van deze berekeningen zat er echter nog een fout in de implementatie van de ruwe-wandrandvoorwaarde, die het niet mogelijk maakte deze oplossing te gebruiken. De invloed van deze afwijking strekt zich vooral uit tot de onderste laag van de berekening. Op grotere hoogten wordt de oplossing nog bepaald door het op de Westwand opgelegde windsnelheidsprofiel.)

Als randvoorwaarde voor de concentratie wordt de concentratie in de uitlaat gelijk genomen aan 1.

Configuratie II: rijdende auto

De configuratie met de rijdende auto is voor het grootste gedeelte overeenkomstig configuratie I. Aangezien het nu niet om een stilstaand voertuig gaat maar om een rijdend voertuig, wordt de stroming berekend in het assenstelsel dat met de auto meebeweegt, door van alle snelheden, die aan de randen worden opgelegd, de rijsnelheid van de auto af te trekken. Op die manier is de stroming als stationair ten opzichte van de auto te beschouwen.

Aangezien er nu ook lucht door het Noordvlak in en door het Zuidvlak uitstroomt, kunnen deze niet langer als symmetrievlakken worden beschouwd, maar moeten ze als inlaat, respectievelijk uitlaatvlak worden gemodelleerd. De V-component wordt over deze twee vlakken gelijk genomen aan het logaritmisch snelheidsprofiel gegeven door formule (3). De U-component is gelijk aan de rijwind, namelijk 24 m/s. De verticale component W is wederom gelijk aan nul.

Behalve het Oostvlak is nu ook het Zuidvlak een uitstroomopening.

Het Bodemvlak wordt nu gevormd door een van Noord naar Zuid bewegende gladde wand, met een snelheid van tevens 24 m/s. De randvoorwaarden aan de uitlaat blijven ongewijzigd.

2.5 Resultaten

In deze paragraaf wordt een algemeen overzicht gegeven van de stroming rond het voertuig en de gevolgen voor de verspreiding van uitlaatgassen. Kwantitatief worden de resultaten verder uitgewerkt in Hoofdstuk 4.

Figuur 2.3 geeft het relatieve concentratieverloop van uitlaatgassen bij configuratie I, een stilstaand voertuig onder invloed van een zijwind van 6 m/s op 10 m hoogte. De figuur laat zien dat de wind de verontreinigende stoffen meevoert dwars op het voertuig. Onder invloed van de snelheidsgradiënt in de atmosferische grenslaag verplaatst de pluim zich in de richting van het grondoppervlak. De lage snelheden aan de grond leiden namelijk tot hoge concentraties. De verontreinigingen verspreiden zich passief, waarbij de invloed van het voertuig slechts minimaal is.

De berekeningen aan configuratie II, het rijdende voertuig laten een heel ander beeld zien. Voordat het concentratieverloop wordt getoond, wordt eerst het stromingsbeeld rondom de rijdende auto besproken.

Figuur 2.4 geeft het beeld van de stroming rondom het rijdende voertuig. De getekende vectoren geven de grootte en de snelheid van de stroming in het symmetrievlak van het voertuig weer. De snelheden zijn gegeven ten opzichte van het met het voertuig verbonden assenstelsel, die zich met een snelheid van 24 m/s voortbeweegt. Aan de voorkant van het voertuig bevindt zich een stuwpunt in de stroming; onder en boven het voertuig wordt de stroming sterk versneld. Aan de achterzijde van het voertuig bevindt zich een zoggebied, waarin de snelheden veel lager zijn dan in de rest van de stroming. De vectoren laten zien dat in het zog ook terugstroming optreedt, dat wil zeggen, naar het voertuig toe. Verderop stroomafwaarts wordt het zoggebied aangevuld met impuls van buiten, waardoor de snelheid weer langzaam toeneemt tot de ongestoorde waarde van 24 m/s.

Vertaald naar het stilstaande assenstelsel betekent dit dat bij het voorbijkomen van een voertuig de lucht in het zoggebied wordt meegezogen, waarbij de snelheid in dat zog vrijwel gelijk is aan de snelheid van het voertuig. Na het passeren van het voertuig is deze rijwind nog enige tijd merkbaar, doordat de lucht met het voertuig wordt meegezogen. Tenslotte neemt de luchtsnelheid weer af tot nul.

Het zog van een voertuig is hiermee nog niet helemaal beschreven. Behalve terugstroming van de bovenzijde en de onderzijde van het voertuig, treedt er ook terugstroming aan de zijkanten van het voertuig op. Als gevolg van dit driedimensionale zog ontwikkelen zich twee lijnwervels, parallel aan de rijrichting van het voertuig (zie figuur 2.5). Dit houdt in dat de lucht die aan de achterkant van het voertuig afstroomt, zich deelt en spiraliseert rond de twee wervelkernen. Onder invloed van de wind loodrecht op de rijrichting is de wervelstructuur niet symmetrisch ten opzichte van de lengte-as van het voertuig. Midden achter het voertuig heeft de stroming een neerwaartse component, terwijl aan de buitenkant van het zog de stroming een opwaartse component heeft. Verder is de invloed van de zijwind op de wervelstructuur zichtbaar. Deze structuur verdwijnt langzaam als gevolg van interactie met het grondoppervlak. Het zal blijken dat het bestaan van deze structuren gevolgen heeft voor de verspreiding van de uitlaatgassen.

Figuur 2.6 toont de turbulente kinetische energie in het symmetrievlak van het voertuig. De turbulente kinetische energie (k of TKE) is een maat voor de grootte van de turbulente snelheidsfluctuaties en is gedefinieerd als:

$$k = \frac{1}{2} \left(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2 \right)$$

De turbulente kinetische energie is duidelijk het hoogste in het zog van het voertuig. Als gevolg van de afschuiving van de hoofdstroming (het grootste aan de onderzijde van het voertuig) en het voertuigzog wordt turbulente kinetische energie geproduceerd. Dit is één van de oorzaken van de verhoogde menging bij rijdend verkeer. Uit de figuur blijkt dat als gevolg van de hoge dissipatie in het zog, de verhoogde turbulentie zich aan de achterzijde uitstrekt tot ongeveer een voertuiglengte.

Een beeld van de verspreiding van verontreinigende stoffen wordt verkregen uit figuur 2.7. Deze figuur laat de strijklijnen zien van de gasdeeltjes die de uitlaat verlaten. Een strijklijn is te beschouwen als de baan die de uitlaatgassen volgen. De kleur in de figuur geeft de relatieve concentratie van verontreinigende stoffen weer, gerelateerd aan de concentratie aan de bron.

De figuur laat duidelijk de wervelstructuur zien, waarin de uitlaatgassen worden meegevoerd. Als gevolg van de wervel worden de uitlaatgassen naar boven getransporteerd. Het lijkt erop dat de initiële menging van uitlaatgassen met name bepaald wordt door de afmetingen van het zog. Figuur 2.8 geeft een soortgelijk beeld van de verspreiding, nu niet door middel van strijklijnen, maar door middel van contourvlakken van de concentratie. De figuur maakt duidelijk dat de pluim zich naar de grond beweegt. Op enige afstand van het voertuig doet de zijwind zich gelden en worden de uitlaatgassen meegevoerd naar de zijkant van het rekendomein.

Uit de vergelijking van het stilstaande en het bewegende voertuig blijkt duidelijk dat de verspreiding van uitlaatgassen in deze twee gevallen verschillend verloopt. Er bestaat een duidelijke interactie tussen de stroming rondom de auto en de (initiële) verspreiding van uitlaatgassen.

3 Experimenten

3.1 Windtunnelmodel van wegsegment met rijdend verkeer

Windtunnel

De gebruikte windtunnel is een atmosferische grenslaagwindtunnel van het open type, waarvan de afmetingen zijn weergegeven in figuur 3.1. De meetsectie heeft een breedte van 3 m en een hoogte van 2 m. In de vloer van de meetsectie bevindt zich een ronde opening met een diameter van 2.7 m. Hierin kan een draaischijf met dezelfde - nominale - diameter worden geplaatst. In dit onderzoek is een draaischijf met een diameter van 2.3 m gebruikt en is de tussengelegen ruimte opgevuld waarvan de bovenkant gelijk ligt met de windtunnelvloer en de bovenzijde van de draaischijf.

Wegsegment

Het model waarmee rijdend verkeer op een tweebaans/vierstrooks autosnelweg kan worden gesimuleerd is gemonteerd in een draaischijf die in de windtunnel kan worden aangebracht. Het model is eerder gebruikt in een voor Rijkswaterstaat uitgevoerd onderzoek en beschreven in de daarbij behorende rapportage [7].

De schaalfactor van het model is 250. Enige relevante afmetingen zijn weergegeven in figuur 3.2.

De verschillen ten opzichte van de in [5] beschreven opstelling zijn:

1. de onderlinge afstand tussen twee (modellen van) voertuigen is nu $250 \text{ mm} = 62.5 \text{ m}$;
2. een model van een vrachtwagen (blokje met frontaal oppervlak van $9 \times 12 \text{ mm}^2 = 2.25 \times 3 \text{ m}^2$) wordt gevolgd door vier personenvoertuigen (blokje met een frontaal oppervlak van $8 \times 6 \text{ mm}^2 = 2 \times 1.5 \text{ m}^2$); daarna volgt weer een vrachtwagen en herhaalt de cyclus zich;
3. het tracergas wordt toegevoerd door openingen met een diameter van 1 mm in de scheidingsstrook tussen twee rijstroken met dezelfde rijrichting; de onderlinge afstand tussen twee naburige openingen is 15 mm; het totale aantal openingen is 110 (55 per rijbaan).

3.2 Beproeversprogramma

Windtunnelconfiguratie

Conform de opdracht is uitgegaan van een ruwheidslengte z_0 op ware grootte van 0.1 m. De corresponderende kleinschalige ruwheidslengte is een factor 250 kleiner en bedraagt dus $z_0 = 0.4 \text{ mm}$. Deze ruwheidslengte wordt het best benaderd door de windtunnelconfiguratie 5V-150Z-4S-02, waarbij:

- de vloer van de aanloopsectie stroomopwaarts van de meetsectie is bekleed met platen met duplonoppen (voorland);
- stroomopwaarts van het voorland zaagtandprofielen (zaagtandhoogte 150 mm) en 'spires' zijn geplaatst;
- geen roosters of gazen zijn aangebracht.

Uit experimenten zijn bij een regelsnelheid U_B van de lucht in de windtunnel de volgende z_0 -waarden verkregen.

$$\begin{array}{ll} U_B = 15 \text{ m/s}, & z_0 = 0.38 \text{ mm} \\ U_B = 5 \text{ m/s}, & z_0 = 0.24 \text{ mm} \end{array}$$

De bekleding van de vloer van het voorland met duplo-platen is doorgetrokken tot onmiddellijk voor de ring rond de draaischijf. De bovenzijde van de draaischijf is (behalve op de plaats van het verkeerssimulatiemodel) kunstmatig ruw gemaakt met behulp van zandkorrels.

Wind- en verkeerssnelheid

In het programma zijn twee waarden van de verhouding verkeerssnelheid /windsnelheid (W/U) op 10 m hoogte opgenomen, namelijk (zie analogie hoofdstuk 2, $W = 24 \text{ m/s}$, $U = 6 \text{ m/s}$):

$$\begin{array}{l} W/U = 0 \text{ en} \\ W/U = 4. \end{array}$$

Bij de experimenten in de windtunnel diende te worden uitgegaan van de beperkingen van het verkeerssimulatiemodel enerzijds en van garanties met betrekking tot een voldoende stabiliteit van de stroming in de windtunnel anderzijds. Op basis van deze overwegingen zijn de betreffende snelheden als volgt gekozen:

$$\begin{array}{ll} U = 3 \text{ m/s} & (\text{bij alle experimenten}); \\ W = 12 \text{ m/s} & (\text{bij } W/U = 4); \\ W = 0 \text{ m/s} & (\text{bij } W/U = 0). \end{array}$$

De hoogte van 10 m op ware grootte correspondeert met een hoogte van 40 mm in de windtunnel; op die hoogte moet de windsnelheid gelijk zijn aan $U_{40} = 3 \text{ m/s}$. Dit komt overeen met $U_{500} = 4.5 \text{ m/s}$ op 500 mm hoogte, die tijdens de experimenten is gemeten vanwege de eenvoud.

Configuratie verkeersweg

In het onderzoek zijn twee wegconfiguraties doorgemeten, namelijk:

- weg in vlak terrein;
- weg met aangrenzende - opgaande - taluds (weg met verzonken ligging).

De configuratie met de weg in vlak terrein kent geen bijzonderheden. De configuratie met aangrenzende taluds is in de windtunnel gerealiseerd door de weg een verzonken ligging te geven. Het terrein boven aan de taluds geldt als maaiveld en ligt qua hoogte gelijk met de vloer van de windtunnel.

Figuur 3.3 bevat de voornaamste afmetingen van de dwarsdoorsnede van weg en talud. De geometrie is in overeenstemming met de richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen (ROA, pagina 65, figuur 9.4). Er is gekozen voor een zo steil mogelijke helling. Bij flauwe hellingen zal namelijk geen of onvoldoende recirculatie optreden en lijkt de situatie sterk op een weg in vlak terrein. Het hoogteverschil tussen wegdek en maaiveld correspondeert met een hoogteverschil van 4.5 m op ware grootte.

3.3 Metingen en meetapparatuur

Het experimentele programma omvat de volgende metingen:

- concentratiemetingen van een tracergas,
- luchtsnelheids- en turbulentiemetingen.

Concentratiemetingen

Zoals vermeld in 3.1 wordt het tracergas toegevoerd door openingen in de scheidingsstroken tussen rijstroken met dezelfde rijrichting. Teneinde te voorkomen dat deze uitstroming uit iedere opening het karakter van een vrije straal heeft is als eis gesteld dat de uitstroomsnelheid niet hoger mag zijn dan de helft van de windsnelheid op de halve hoogte van het model van een personenauto. Bij alle experimenten is een debiet van 100 l tracergas per uur ingesteld. Hiermee is ruimschoots aan bovenstaande eis voldaan. Het tracergas bestaat uit een mengsel van isobutyleen en lucht in de volumeverhouding 8/92.

Het gebruikte meetinstrument is een foto-ionisatie detector. De gekozen meetperiode is 30 s. De meting levert de lokale tijdgemiddelde concentratie van het tracergas.

Luchtsnelheids- en turbulentiemetingen

De luchtsnelheids- en turbulentiemetingen zijn verricht in de onmiddellijke nabijheid van het wegsegment met behulp van een kruisdraad-hetendraadanemometer. Aangezien de kruisdraden zich in het horizontale vlak bevinden, worden de horizontale componenten (in x- en y-richting) van de luchtsnelheid en de turbulentie-intensiteit gemeten.

De bemonsteringsfrequentie is 500 Hz, gefilterd met een laagdoorlaatfilter met een kantelfrequentie van 250 Hz en de meetduur bedraagt 8 s.

3.4 Meetlocaties en meetprogramma

Concentratiemetingen

Meetdoorsneden

Concentratiemetingen zijn uitgevoerd in drie doorsneden loodrecht op het wegsegment namelijk:

- op de middellijn van het wegsegment;
- in de twee doorsneden op 285 mm afstand van deze middelloodlijn.

Afstanden

In elke doorsnede is gemeten op vijf afstanden van de hartlijn van het wegsegment, namelijk op 45, 80, 120, 200 en 400 mm. Deze afstanden komen overeen met 11, 25, 20, 30, 50 en 100 m op ware grootte. De lokatie van de receptorpunten is weergegeven in figuur 3.4. Zoals te zien is in figuur 3.4 is een aantal van de receptoren dubbel uitgevoerd met een onderlinge afstand van 7.5 mm (tevens de onderlinge afstand van de uitstroomopeningen). Tijdens de proefmetingen is nagegaan of de gemeten concentratie voor deze receptorpunten gelijk is en er dus geconcludeerd kan worden, dat er geen ruimtelijke verschillen optreden als gevolg van de onderlinge afstand van de uitstroomopening.

Bij de uitvoering van het hoofdprogramma zijn daarom alleen de receptorpunten 1, 3, 5, 7, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 en 27 gebruikt.

Meethoogten

Er zijn twee categorieën proeven uitgevoerd:

- concentratiemetingen met een vaste meethoogte van 6 mm;
 - concentratiemetingen met een meethoogte die afhankelijk is van de afstand tot de as van het wegsegment; hierbij zijn onderstaande meethoogten toegepast:
- | | | | | | |
|------------------------------|----|----|-----|-----|-----|
| afstand wegas meetpunt (mm): | 45 | 80 | 120 | 200 | 400 |
| meethoogte (mm): | 11 | 13 | 16 | 20 | 30 |

De meethoogte is evenredig gekozen met de verwachte pluimhoogte.

Onder meethoogte wordt verstaan de hoogte van de aanzuigopening van de receptor ten opzichte van het grondoppervlak.

De meethoogten zijn zodanig gekozen dat de meetwaarden enerzijds voldoende van elkaar verschillen en anderzijds nog binnen de pluim zijn gelegen.

Meetprogramma

In het kader van het meetprogramma zijn concentratiemetingen op de genoemde plaatsen verricht bij een groot aantal windrichtingen. De draaischijf in de windtunnel is hiertoe periodiek versteld in stappen van 10°.

Voor iedere windrichting zijn concentratiemetingen verricht bij stilstaand en bij bewegend verkeer op de eerder genoemde receptorlokaties.

Luchtsnelheids- en turbulentiemetingen

Meetdoorsnede

De luchtsnelheids- en turbulentiemetingen zijn uitgevoerd op de middelloodlijn van het wegsegment en halverwege de lengte ervan.

Meetlokaties in de doorsnede

In de bovengenoemde doorsnede zijn metingen uitgevoerd op een aantal punten op horizontale afstanden van 0, 12, 24, 36 en 48 mm van het midden van een rijbaan en op hoogten van 5, 10, 15, 20, 25, 35, 40, 45 en 50 mm (bij bewegend verkeer zijn voor de horizontale afstanden van 0 en 12 mm geen metingen uitgevoerd voor hoogten beneden 20 mm).

Meetprogramma

Luchtsnelheids- en turbulentiemetingen zijn (slechts) uitgevoerd voor:

- weg in vlak terrein;
- windrichting loodrecht op het wegsegment;
- een stroomafwaarts van de as van de wegsegment gelegen meetdoorsnede.

3.5 Resultaten

Concentratiemetingen

De resultaten van de concentratiemetingen zijn weergegeven in de tabellen 1-8. Elke tabel is opgezet als matrix. De elementen van de matrix zijn de concentratiewaarden, waarbij de concentratie in de uitstroomopening als eenheid is gekozen, dat wil zeggen c/c_0 .

De getallen boven in de rij bovenaan geven de meetpunten aan. De getallen in de kolom uiterst links geven de stand van de draaischijf aan. Bij hoek 0 is de as van het wegsegment loodrecht op de as van de windtunnel en bevinden zich de receptoren zich

stroomopwaarts van de as van het wegsegment. De vermelde hoek neemt toe bij draaiing van de schijf in tegenwijzerzin.

Luchtsnelheids- en turbulentiemetingen

De resultaten van de luchtsnelheids- en turbulentiemetingen zijn vermeld in tabel 9 voor stilstaand verkeer en tabel 10 voor bewegend verkeer. De afstand x (mm) in stroomopwaartse richting is gemeten vanaf het midden van een rijbaan; het midden van een scheidingsstrook tussen twee rijstroken. z is de hoogte in mm. De turbulentie-intensiteiten I_x in axiale richting en I_y in dwarsrichting zijn uitgedrukt in procenten.

3.6 Evaluatie

Concentratiemetingen

Voor de concentratie c (m^3/m^3) kan worden geschreven:

$$c = K \frac{q}{U} \quad (4)$$

Hierin is K de verdunningsfactor, q de lijnbronsterkte (m^3/ms) en U de windsnelheid (m/s) op de referentiehoogte (40 mm). De dimensie van K is m^{-1} . De verdunningsfactor K blijkt een nuttige grootheid te zijn bij het vertalen van de windtunnelproeven naar de volle-schaalsituatie.

Daar c is berekend als fractie van de volledige uitstroom moet bij de berekening van q worden uitgegaan van de volledige hoeveelheid tracergas (mengsel) per tijdseenheid (100 l/h). Als lengte van het wegsegment is ingevoerd 840 mm.

Dan is $q = 3.307 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{ms}$. De aldus berekende K -waarden voor $U = 3 \text{ m/s}$ zijn opgenomen in de tabellen 11-18.

Verdunningsfactor versus afstand tot de as van het wegsegment

De figuren A1-A40 tonen de verdunningsfactor K als functie van de afstand tussen de receptorpunten en de as van het wegsegment voor de windtunnelsituatie.

De diagrammen zijn opgesteld voor de diverse onderzochte configuraties en ingestelde omstandigheden, namelijk:

- stilstand en bewegend verkeer ($W = 0$, c.q. 12 m/s);
 - meethoogte constant (6 mm $\approx$ 1.5 m) en meethoogte plaatsafhankelijk;
 - weg in vlak terrein en weg met verzonken ligging
- en voor draaischijfstanden van 140, 160, 180, 200 en 220°.

In het algemeen vertoont het verloop van K met de afstand tot de as van de weg een consistent beeld. Bij stilstaand verkeer vertoont dit verloop voor de draaischijfstanden 160° en 200° overeenkomsten die in de lijn van de verwachting liggen. Hetzelfde geldt voor het K -verloop bij de draaischijfstanden 140° en 220°. De waargenomen asymmetrie kan worden verklaard met het 'meesleepeffect'.

Dimensie-analyse en vertaling naar de volle-schaal situatie

De concentratie c is afhankelijk van vele grootheden:

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

$$c = c(q, U, l, x, y, z, \theta, \text{configuratie}) \quad (5)$$

l is hierin een representatieve lengtemaat (de wegafmeting); x, y, z , zijn de coördinaten van het beschouwde receptorpunt op de draaischijf; θ is de stand van de draaischijf. Indien dimensieloze getallen worden geformuleerd is:

$$c = c\left(\frac{q}{Ul}, \frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{z}{l}, \theta, \text{configuratie}\right) \quad (6)$$

Daar $c \sim q$ en $c \sim U^{-1}$ kan worden geschreven:

$$c = k \cdot \frac{q}{Ul} \quad (7)$$

k is hierin een dimensieloze evenredigheidsconstante waarvoor geldt:

$$k = k\left(\frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{z}{l}, \theta, \text{configuratie}\right) \quad (8)$$

Indien $x/l, y/l$, etc. voor de kleinschalige en de grootschalige situatie identiek zijn is k (kleine schaal) = k (grote schaal) = k .

Vergelijking met de eerder gegeven formule voor c laat zien dat:

$$K = k/l$$

Voor de kleinschalige situatie is $K_m = k/l_m$, voor de volle-schaal situatie is $K_v = k/l_v$. Aangezien l_v/l_m de schaalfactor is resulteert $K_v = K_m \cdot (l_m/l_v)$. Met $l_v/l_m = 250$ geldt dus:

$$K_v = 0.004 \cdot K_m$$

De verdunningsfactor voor de volle-schaalsituatie is derhalve een factor 0.004 kleiner dan de verdunningsfactor in de windtunnel.

Luchtsnelheids- en turbulentiemetingen

De luchtsnelheden in de axiale richting (x) bij bewegend en stilstaand verkeer blijken nauwelijks van elkaar te verschillen. Alleen op een hoogte van 5 mm is de luchtsnelheid bij bewegend verkeer systematisch iets hoger dan bij stilstaand verkeer.

Bij stilstaand en rijdend verkeer zijn de luchtsnelheden in de dwarsrichting (y) in het algemeen laag (kleiner dan 0.2 m/s). Bij bewegend verkeer komen op de hoogten 5 en 10 mm (en in een enkel geval ook 15 mm) echter snelheden voor die hoger zijn en de orde van grootte van 0.5 en 1 m/s hebben.

De turbulentie-intensiteit is op geringere hoogten bij bewegend verkeer duidelijk hoger dan bij stilstaand verkeer. Dit is met name het geval voor hoogten van 5 en 10 mm. Op hoogten groter dan 25 mm is dit verschil van geen betekenis meer.

Voor enige meetlokaties is zowel voor de x-component als voor de y-component het spectrum en de kansdichtheidsverdeling van de turbulentie bepaald. Het betreft hier de meetlokaties:

x(mm)	z(mm)
0	20
12	20
48	20
0	50

Figuur 3.5 laat het turbulentiespectrum zien van de u-component voor de lokatie $(x, y, z) = (12, 0, 20)$ ($\cong$ (3 m, 0 m, 5 m) volle schaal) voor de situatie met rijdend verkeer en de situatie met stilstaand verkeer. Duidelijk is de invloed van passerende voertuigen te herkennen. Het frequentiespectrum vertoont duidelijke pieken bij frequenties die overeenkomen met de passagefrequentie van de voertuigen en met veelvoudigen van deze frequenties.

4 Numeriek model van een tweedimensionaal wegsegment

4.1 Inleiding

Een tweedimensionaal model van een wegsegment maakt het mogelijk om de verspreiding van verontreinigende stoffen van wegverkeer te onderzoeken in situaties, waarin sprake is van variaties in het wegprofiel (zoals op en afgaande taluds, berm sloten en dergelijke), de terreinruwheid en obstakels (bomen, struikgewas, geluidschermen, etc.).

In een dergelijk tweedimensionaal model worden de verontreinigende stoffen geëmitteerd door een continue lijnbron en zich op de plaats van de voertuigen bevindt. De sterkte en ook de virtuele grootte van de bron moeten zodanig worden gekozen, dat concentraties van verontreinigende stoffen op en naast de weg zo goed mogelijk overeenkomen met de in de werkelijkheid gemeten concentraties.

Een stroom rijdende voertuigen levert een ander verspreidingspatroon op dan een rij stilstaande voertuigen, als gevolg van de door de voertuigen geproduceerde turbulentie en de turbulente lengteschalen die een rol spelen. Een mogelijkheid om dit in rekening te brengen is door het rijdende wegverkeer niet alleen als een bron van verontreiniging te modelleren, maar ook als een bron voor de turbulentie. Dit laatste wordt in dit hoofdstuk beschreven. De empirische coëfficiënten die in deze lijnbronnen worden gebruikt zijn bepaald uit de driedimensionale berekeningen van de verspreiding achter een enkel voertuig, beschreven in hoofdstuk 2 en uit de metingen aan het verkeerssimulatiemodel beschreven in hoofdstuk 3.

Wanneer de volumebronnen voor concentratie en turbulentie eenmaal zijn vastgesteld, kunnen zij ook gebruikt worden voor complexere situaties. De gemodelleerde situaties hoeven zich niet te beperken tot eenvoudige tweedimensionale wegprofielen, maar zij kunnen ook worden gebruikt in complexere modellen van een werkelijke driedimensionale situatie, waarin bijvoorbeeld een snelweg die zich door een stadswijk slingert kan worden gemodelleerd.

4.2 Geometrie en grid

De modelberekeningen zijn uitgevoerd aan twee verschillende configuraties, die gelijk gekozen zijn aan de windtunnelconfiguraties. Het betreft een verkeersweg met 2×2 rijstroken. De volgende twee configuraties zijn gemodelleerd:

- I. Weg gelegen in vlak terrein zonder berm sloten of obstakels aan beide zijden (ROA pagina 65, figuur 9.4, zonder obstakel, geen botsveilig object en geen geleiderail), zie diagram 4.1.
- II. Weg met verdiepte ligging (weg met 2 brede taluds) zonder obstakels (ROA pagina 65 figuur 9.4, zonder obstakel, geen botsveilig object en geen geleide rail), zie diagram 4.1.

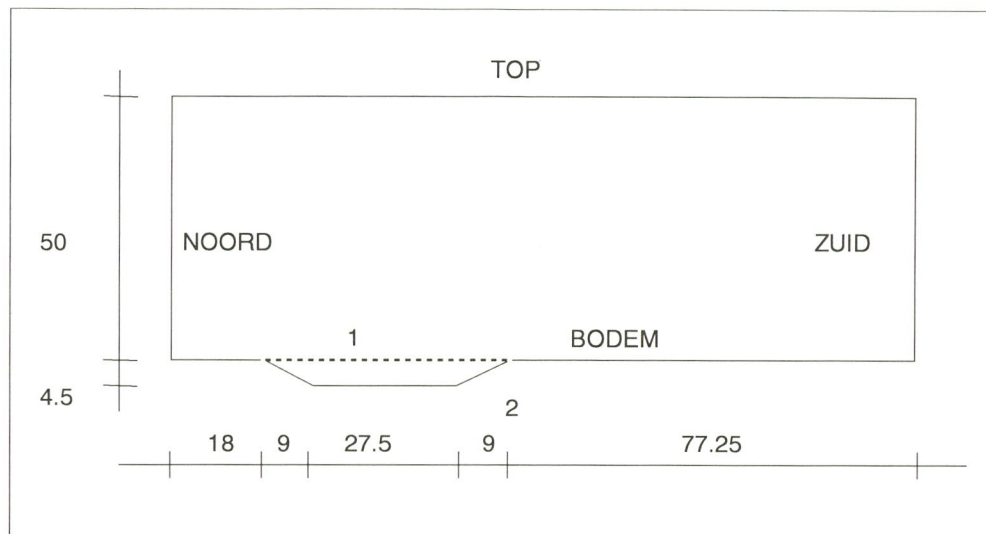


Diagram 4.2 Geometrie van het rekendomein

Het rekendomein heeft een lengte van in totaal 141 m, waarvan 41 m stroomopwaarts van het midden van de weg en 100 m stroomafwaarts hiervan. De windtunnelmetingen worden hiermee volledig gedekt. De hoogte van het domein is 50 m. Deze hoogte is zodanig gekozen dat de atmosferische grenslaag niet wordt beïnvloed door de randvoorwaarde aan de bovenkant van het rekendomein (zie ook [3]). De breedte van het domein kan willekeurig gekozen worden, omdat het hier gaat om een tweedimensionale berekening gaat. Een breedte van 1 m is voor de berekeningen aangehouden. In configuratie II (met verdiepte ligging) hebben de neergaande opgaande taluds een horizontale afmeting van 9 m; de hoogte van de taluds is 4.5 m. Deze afmetingen zijn in overeenstemming met de windtunnelmetingen.

Het rekenrooster

Het rekenrooster bestaat uit 12000 cellen, dat wil zeggen 125 cellen in horizontale richting, 32 in verticale richting en 2 cellen (het minimale aantal) in de dwarsrichting. In verticale richting is de verdeling van de cellen zo gekozen, dat de resolutie aan de grond het grootste is en naar grotere hoogte sterk afneemt overeenkomstig de gradiënt van het logaritmisch snelheidsprofiel.

De resolutie in horizontale richting wordt sterk bepaald door de aanwezigheid van de op- en afgaande taluds en de lokatie van de verontreinigingsbronnen. De dichtheid van cellen is hoog daar waar het wegprofiel een knik vertoont, zoals bij het begin en eind van de taluds. De stroming kan daar loslaten, wat gepaard gaat met grote snelheidsgradiënten. Dit maakt een hoge resolutie van het grid noodzakelijk. In de nabijheid van de verontreinigingsbronnen zijn de concentratiegradiënten zeer groot, zodat ook daar de dichtheid van de cellen groot dient te zijn. Verder stroomafwaarts nemen de gradiënten van concentraties en snelheden sterk af, zodat kan worden volstaan met een veel grover rekenrooster.

Een aantal roosterpunten is geplaatst overeenkomstig de meetposities in de windtunnelexperimenten, wat een rechtstreekse vergelijking van metingen en berekeningen mogelijk maakt.

4.3 Conditie

De configuraties I en II zijn beide doorgerekend voor dezelfde stromingcondities. Voor beide configuraties zijn berekeningen uitgevoerd met rijdend verkeer en met stilstaand verkeer. Het verkeer bevond zich op 4 rijstroken. De eigenschappen van het verkeer zijn in overeenstemming gekozen met de windtunnelmetingen. De gebruikte weerstandscoefficiënt komt overeen met die van vlakke plaatjes. Het frontaal oppervlak is een gewogen gemiddelde van het frontaal oppervlak van personen- en vrachtauto's. De snelheid van het verkeer bedroeg daarbij 24 m/s. De verspreidingsberekeningen zijn uitgevoerd voor een neutrale atmosfeer, dat wil zeggen dat de ongestoorde wind voldoet aan een logaritmisch snelheidsprofiel, waarvan de snelheid 6 m/s bedraagt op een referentiehoogte van 10 m. De stromingsrichting is van links naar rechts. De basiscondities gaan uit van een constante ruwheidslengte van $z_0 = 0.1$ m.

4.4 Randvoorwaarden

Voor alle condities is gebruik gemaakt van dezelfde randvoorwaarden.

Noord

Zoals hierboven reeds beschreven wordt aan het Noordoppervlak een logaritmisch snelheidsprofiel aangelegd als randvoorwaarde (3). Behalve de snelheid in het inlaatvlak moeten ook de turbulente kinetische energie (k) en de turbulente dissipatie (ϵ) worden gespecificeerd. Deze verticale profielen van deze grootheden zijn zo gekozen dat zij samen met het windsnelheidsprofiel een grenslaag vormen die in evenwicht is met een ruwheidslengte van 0.1 m.

Zuid

Het Zuidvlak is gemodelleerd door middel van een uitstroomvoorwaarde die voorschrijft dat de stromingscondities vanuit het binnendomein naar de rand wordt geëxtrapoleerd. De gemiddelde druk wordt op het Zuidvlak gelijk aan nul genomen.

Oost, West en Top

Aangezien de berekening tweedimensionaal is geldt een symmetrie-randvoorwaarden voor de vlakken Oost en West. Dezelfde randvoorwaarde is aangenomen voor het Topvlak. Hoewel deze randvoorwaarde formeel niet juist is, is aangetoond, dat afwijkingen als gevolg van deze randvoorwaarde kunnen verwaarloosd (zie figuur 5.1, § 5.1.1).

Bodem

Het Bodemvlak is gemodelleerd als een ruwe wand. De hoogte van de ruwheidselementen is zo gekozen dat deze overeenkomt met een ruwheidslengte van $z_0 = 0.1$ m.

4.5 Volumebronnen

De emissie van verontreinigende stoffen is gemodelleerd door middel van een volumebron van eindige grootte en constante sterkte. De sterkte van de bron

wordt bepaald door de emissie van verontreinigende stoffen per auto en de onderlinge afstand van de auto's.

De invloed van het rijdend wegverkeer is in rekening gebracht door middel van een volumebron van turbulente kinetische energie. De sterkte en grootte van deze bron is empirisch bepaald aan de hand van de driedimensionale berekening aan een enkel voertuig en aan de hand van de windtunnelmetingen van turbulentie en concentratiefactoren.

Verontreiniging

De uitstoot van verontreinigende stoffen is in het tweedimensionale verspreidingsmodel van de snelweg gemodelleerd met behulp van een volumebron van constante sterkte en eindige afmetingen. Gegeven de gemiddelde emissie per voertuig Q (kmol/s), de gemiddelde afstand tussen de voertuigen l (m) dan wordt de bronsterkte Φ_Q (kmol/m³s) van de emissie:

$$\Phi_Q = \frac{Q}{l} \cdot \frac{1}{A_{\text{bron}}} \quad (9)$$

Hierin is A_{bron} (m²) het dwarsoppervlak van de gekozen bron in het tweedimensionale model. In het gebruikte model heeft het emissieoppervlak afmetingen van 0.1×0.1 m². In het midden van ieder van de vier rijstroken is een emissiebron aangebracht op een hoogte van 0.3 m boven het wegdek.

Turbulentie

Passerende voertuigen genereren een turbulent zog dat met de voertuigen meebeweegt. Een stilstaande waarnemer langs de weg merkt het passeren van het zog als periodieke snelheidsfluctuaties.

De turbulente kinetische energie die door het zog wordt opgewekt is evenredig met de kracht die het voertuig ondervindt bij het rijden:

$$F_w = 1/2 \rho V^2 c_w A_v \quad (10)$$

waarbij V de voertuigsnellheid, c_w de weerstandscoefficiënt van het voertuig is en A_v het frontale voertuigoppervlak. Op grond van dimensiebeschouwingen kan worden afgeleid dat de produktie van turbulente kinetische energie, die door het rijdende verkeer wordt geïnduceerd ($P_{k, \text{ind}}$) dan wordt gegeven door:

$$P_{k, \text{ind}} = \alpha \cdot \frac{F_w \cdot V}{l \cdot A_{\text{turb}}} = \alpha \cdot \frac{1/2 \rho V^3 c_w A_v}{l \cdot A_{\text{turb}}} \quad (11)$$

Hierin is l weer de onderlinge afstand van de voertuigen en A_{turb} het oppervlak waarover de bron werkzaam is. α is een empirische evenredigheidsconstante die moet worden bepaald uit metingen (dat wil zeggen de windtunnelexperimenten) of uit de hierboven beschreven driedimensionale berekeningen aan een rijdend voertuig.

Voor de berekeningen die zijn uitgevoerd met het tweedimensionale model is voor α (empirische evenredigheidsfactor voor de turbulente bron) een waarde genomen van:

$$\alpha = 0.25$$

Het oppervlak waarover de bron wordt toegepast is gelijk genomen aan $1.50 \times 0.50 \text{ m}^2$. Het oppervlak van de bron is empirisch bepaald, waarbij er voor gezorgd is, dat de gemeten en berekende turbulentie met elkaar overeenkomen. De bronnen worden op de vier rijstroken toegepast.

4.6 Validatie aan de hand van metingen en driedimensionale berekeningen

Het 2-dimensionale model is in twee stappen gevalideerd. In eerste instantie is het verspreidingsmodel van het stilstaande wegverkeer gevalideerd aan de hand van:

- de 3-dimensionale berekening van de verspreiding achter de stilstaande auto,
- de windtunnelmeting in vlak terrein bij stilstaand verkeer.

Het verspreidingsmodel, dat gebruikt is bij de modellering van *rijdend* wegverkeer is daarna gevalideerd met behulp van:

- de 3-dimensionale berekening van de verspreiding achter de rijdende auto,
- de windtunnelmeting in vlak terrein bij rijdend verkeer.

Hierbij is speciaal gelet op een correcte modellering van de turbulentie in het 2-dimensionale model, waarbij niet meer getornd is aan de eerder bepaalde waarden voor de verspreiding in de stilstaande situatie.

Voor de vergelijking van het 2-dimensionale model met de 3-dimensionale berekeningen is een aparte set berekeningen uitgevoerd. In afwijking van het uiteindelijke wegmodel zijn in dit model niet vier turbulentie- en verontreinigingsbronnen aangebracht maar slechts één, aangezien de 3-dimensionale berekening aan slechts één voertuig is uitgevoerd. De waarde van de parameters wijkt soms af van de waarden, die in het uiteindelijke model van § 4.5 zijn gebruikt.

Middeling van de 3-dimensionale berekeningsresultaten

De resultaten van de 3-dimensionale berekeningen kunnen niet zonder meer gebruikt worden voor de validatie van het 2-dimensionale wegmodel. Het 3-dimensionale model levert een ruimtelijk beeld van de stroming rondom het personenvoertuig en de daarbij behoorde verspreiding van uitlaatgassen. Bij de 2-dimensionale modellering van de verspreiding ontbreekt de informatie over de stroming en de verspreiding rondom de individuele voertuigen, maar is alleen tijdgemiddelde informatie aanwezig. Om de resultaten met elkaar te vergelijken is het noodzakelijk de resultaten van de 3-dimensionale berekening te middelen in de tijd. Op deze manier wordt de bijdrage aan de verspreiding van luchtverontreiniging bepaald van de passage van een enkel voertuig. Vermenigvuldiging met het gemiddelde aantal voertuigen dat per tijdseenheid passeert levert de tijdgemiddelde concentratie op verschillende afstanden naast de weg. Dit resultaat is rechtstreeks te vergelijken met de 2-dimensionale berekeningsresultaten en met de metingen in het wegsimulatiemodel dat bij de windtunnelmetingen is gebruikt.

Aangezien de 3-dimensionale berekening is uitgevoerd in het met het voertuig meebewegende assenstelsel is de procedure om de concentraties in de tijd te middelen vervangen door een middeling in de x-richting. Dit heeft als bijkomend voordeel dat ook in het geval van stilstaand verkeer de gemiddelde concentratie van verontreinigende stoffen kan worden bepaald. De procedure wordt uitgewerkt in appendix A1. Uit de 3-dimensionale berekeningen wordt bepaald:

- een gemiddelde verdunningsfactor $K3d$,
- een gemiddelde toegevoegde turbulente kinetische energie (dimensieloos gemaakt met F_W/ρ),
- een gemiddeld snelheidsdeficit in het zog van het voertuig.

Bij de vergelijking beperken we ons tot de eerste twee factoren. Deze factoren worden vergeleken met de respectievelijke factoren uit de metingen en de 2-dimensionale berekeningen. De vergelijking vindt plaats op een afstand tot 5 m van het midden van de rijstrook (tevens het midden van het voertuig), aangezien rekenresultaten op een grotere afstand in het geval van de driedimensionale berekening niet aanwezig zijn.

Bij de vergelijking zijn een aantal aannamen gehanteerd. Deze aannamen zijn:

- de onderlinge afstand van de voertuigen bedraagt 62.5 m,
- de c_W -waarde van de voertuigen bedraagt $c_W = 0.4$ (personenauto).

Er bestaat een aanzienlijke onzekerheid in de c_W -waarde, waar rekening mee moet worden gehouden in de vergelijking van de berekeningen van de toegevoegde turbulente kinetische energie.

4.6.1 Vergelijking van resultaten voor stilstaand verkeer

Vergelijking van tweedimensionale en driedimensionale berekening

Figuur 4.1 toont het profiel van de verdunningsfactor $K3d$ als functie van de hoogte op een afstand van 2, 3, 4 en 5 m van het midden van de rijstrook. Figuur 4.2 laat het resultaat van de 2-dimensionale berekening op dezelfde plaatsen zien.

Vergelijking van de figuren laat zien dat de waarde van de verdunningsfactor dezelfde orde van grootte heeft in beide berekeningen. Voor afstanden kleiner dan 3 m is de vorm van het concentratieprofiel verschillend voor de twee berekeningen. In de driedimensionale berekening duurt het langer voordat de pluim de grond bereikt, terwijl de afmetingen naar verhouding kleiner zijn. Een direct gevolg hiervan is dat de waarden van de verdunningsfactoren lager zijn bij de tweedimensionale berekening dan bij de driedimensionale berekening.

Mogelijke verklaringen voor de verschillen zijn:

- Het verschil in de wandruwheid in de berekeningen. Weliswaar is in allebei de berekeningen als instroomvoorwaarde een logaritmisch snelheidsprofiel gebruikt met een ruwheidslengte van $z_0 = 0.1$ m, maar in het geval van de driedimensionale berekening is de randvoorwaarde aan het bodemoppervlak die van een gladde wand. Als gevolg hiervan ontstaat in de nabijheid van de wand een interne grenslaag met een lagere turbulentie en een kleinere opmenging.
- Mogelijk speelt de interactie van de pluim met het voertuig een rol. De pluim beweegt zich onder invloed van de wind parallel aan de achterzijde van het voertuig.
- Het is mogelijk dat door de gebruikte middelingsprocedure om van ruimtelijke gegevens naar de gemiddelde waarde $K3d$ te komen onnauwkeurigheden zijn opgetreden.

Vergelijking van tweedimensionale berekening en windtunnelmeting

De tweedimensionale berekeningsresultaten van een vlak wegprofiel, stilstaand verkeer, windsnelheid 6 m/s (op 10 m hoogte), loodrecht op de weg, is vergeleken met de windtunnelmetingen onder dezelfde omstandigheden.

Figuur 4.3 toont de berekende verdunningsfactor, zoals gedefinieerd in hoofdstuk 3 als functie van de afstand tot het midden van de op een meethoogte van 1.50 m. De vierkantjes in de figuur zijn de gemeten concentratiefactoren op afstanden van 13.75 m, 20 m, 30 m, 50 m en 100 m van het midden van de weg.

De figuur laat zien dat de berekening het verloop van de berekening van de meting goed weet te voorspellen. De berekening en de meting wijken maximaal 25% van elkaar af. Het niveau van de verdunningsfactor op de weg zelf, dat wil zeggen daar waar het maximum wordt gevonden wordt goed voorspeld.

Figuur 4.4 geeft het verticale profiel van de verdunningsfactor weer als functie van de hoogte voor de afstanden tot de weg van 30 m, 50 m en 100 m. Aangezien van het verticale profiel slechts twee punten gemeten zijn is het moeilijk om uitspraken te doen over de vorm van het concentratieprofiel. Het lijkt erop dat het gemeten profiel steiler is dan berekend. Dat wil zeggen dat de gemeten pluim dichter aan de grond blijft.

Mogelijk wordt dit verschil bepaald doordat de uitstroomopeningen van het verkeersmodel zich aan het oppervlak van de weg bevinden, terwijl in het numerieke model de bron van verontreiniging zich op een hoogte van 0.3 m bevindt. De initiële opmenging van de pluim is daardoor voor stilstaand verkeer anders.

4.6.2 Vergelijking van resultaten voor rijdend verkeer

In 4.4 is het model gepresenteerd dat wordt gebruikt voor het toevoegen van extra turbulentie om voor de extra menging te zorgen die door het rijdende verkeer wordt veroorzaakt. In deze paragraaf zal worden nagegaan in hoeverre dit model in staat is de turbulentie langs de weg correct te voorspellen. Aangezien dit nog niet de garantie geeft dat ook de verspreiding correct wordt voorspeld, is ook nagegaan in hoeverre de verdunningsfactoren overeenstemmen.

Vergelijking van tweedimensionale en driedimensionale berekening

Turbulentie

Bestudering van de berekeningsresultaten van het driedimensionale numerieke model laat zien dat de toegevoegde turbulente kinetische energie, direct als gevolg van het zog achter het voertuig, alleen significant was direct achter het voertuig. Op enige afstand van het voertuig, zowel naar achteren als naar de zijkant nam de toegevoegde turbulente kinetische energie zeer snel af. Een vergelijking met de windtunnelmetingen liet zien dat de gemeten waarde van de turbulente kinetische energie veel groter was.

De verklaring voor dit verschil is als volgt:

De gemeten snelheidsfluctuaties in het windtunnelexperiment bestaan uit twee componenten: de turbulente snelheidsfluctuaties (willekeurig in alle richtingen) en een snelheidsfluctuatie, die het gevolg is van het passeren van het zog van een voertuig (in de rijrichting).

Bij de bovenstaande vergelijking is deze snelheidsfluctuatie als gevolg van het voertuig in de windtunnelmeting wel meegenomen, maar in de modelberekening niet.

Wanneer deze snelheidsfluctuatie in de modelberekening wel wordt meegenomen, dan blijkt de vergelijking veel beter uit te vallen.

De snelheidsfluctuatie als gevolg van zogpassage wordt gekarakteriseerd met behulp van de 'rijwindturbulentie' k_{temp} , die is gedefinieerd door:

$$k_{\text{temp}} = \frac{1}{2} (\langle u^2 \rangle - \langle u \rangle^2)$$

de verwachtingswaarde van de snelheidsfluctuaties in rijrichting.

Figuur 4.5 geeft het verloop van k_{temp} als functie van de hoogte voor 4 verschillende afstanden. Figuur 4.6 laat ook het resultaat zien van de tweedimensionale berekening met een turbulente bron met afmetingen, zoals gegeven in 4.4 en voor een waarde van de turbulentiefactor $\alpha = 0.17$. Vergelijking van de figuren laat zien dat de twee berekeningen goed overeenkomen, zowel wat de vorm van het turbulentieprofiel betreft, als wat betreft de absolute waarde. Een berekening met de waarde van $\alpha = 0.25$ is niet uitgevoerd. Gezien de onnauwkeurigheid in de gebruikte waarden voor c_w in het windtunnel experiment en in de driedimensionale berekening mag de overeenstemming goed worden genoemd.

Concentratie

In figuur 4.7 en 4.8 worden de resulterende profielen van de verdunningsfactor voor de tweedimensionale en voor de driedimensionale berekening met elkaar vergeleken. De gevonden verdunningsfactoren zijn duidelijk lager dan in het geval van een stilstaande bron. De vorm van het profiel komt voor de twee berekeningen goed overeen. Op 2 meter afstand heeft de pluim de grond reeds bereikt. De waarden van de verdunningsfactor aan de grond is in het geval van de driedimensionale berekening zo'n 25% hoger.

Vergelijking van tweedimensionale berekening met windtunnelmeting

Turbulentie

Figuur 4.9 toont de waarde van de turbulente kinetische energie als functie van de hoogte voor de afstanden $x = 6$ m, $x = 9$ m en $x = 12$ m tot het midden van de wegheeft. De punten in de grafiek zijn de gemeten waarden van de turbulente kinetische energie, de lijnen zijn de berekende waarden voor het model uit 4.4. De overeenkomst tussen de berekeningen en de metingen is opmerkelijk goed. De vorm van de berekening wijkt aan de grond enigszins af van de berekende vorm.

De verdunningsfactor

Figuur 4.10 toont de verdunningsfactor als functie van de afstand voor de meethoogte die overeenkomt met 1.50 m volle schaal, voor de afstanden $x = 13.75$ m, $x = 20$ m, $x = 30$ m, $x = 50$ m en $x = 100$ m. Behalve op kleine afstand tot de weg is de verdunningsfactor hoger dan in de situatie met stilstaand verkeer. Dit wordt veroorzaakt door de grotere opmenging als gevolg van de toegevoegde turbulentie. Op kleine afstand tot de weg heeft de extra turbulentie het schijnbaar paradoxaal effect dat de verdunningsfactor hoger is dan bij stilstaand verkeer. Dit verschijnsel kan worden verklaard door het feit dat bij de situatie met stilstaand verkeer de pluim het niveau van 1.50 m nog niet bereikt heeft, terwijl in het geval van rijdend verkeer de extra turbulentie voor een grotere pluimafmeting zorgt.

De meetpunten liggen beduidend lager dan de berekende waarden. Op grote afstand van de weg nemen de verschillen tussen de meting en de berekening af. De reden voor dit verschil is niet duidelijk.

5 Resultaten en discussie

5.1 Stroming

Vlak terrein

De concentratieprofielen hangen sterk af van een juiste modellering van de stroming in de atmosferische grenslaag.

In een stationaire atmosferische grenslaag voldoet het snelheidsprofiel aan de logaritmische wandwet (3) en is de turbulente kinetische energie constant, dat wil zeggen onafhankelijk van de hoogte. Snelheids- en turbulentieprofiel passen bij de wandruwheid en zijn onafhankelijk van de plaats. In deze paragraaf wordt aangetoond, dat de gebruikte modellering hieraan voldoet.

Figuur 5.1.1 toont de snelheid en de turbulente kinetische energie voor het in- en het uitstroomoppervlak als functie van de hoogte. Voor beide grootheden is dezelfde schaalverdeling aangehouden op de verticale as; de snelheid U is gegeven in m/s, de turbulente kinetische energie TKE is gegeven in m^2/s^2 . Het inlaatvlak bevindt zich op $x = 0$ m, het uitlaatvlak bevindt zich op $x = 400$ m.

De figuur laat zien dat het grenslaagprofiel als stationair kan worden beschouwd. Het snelheidsprofiel is nagenoeg gelijk in het inlaat- en uitlaatvlak. Hetzelfde geldt voor het turbulentieprofiel. Het snelheidsprofiel is aan de bovenkant enigszins verstoord als gevolg van de daar aangelegde symmetrische randvoorwaarde. Aangezien de verstoring zich slechts uitstrekt tot de bovenste 10 meter van het rekendomein heeft deze afwijking geen invloed op de verspreiding.

Weg met talud

Figuur 5.2 toont de snelheidsvectoren voor een stroming in een weg met talud inclusief turbulentie- en concentratiebronnen zoals beschreven in hoofdstuk 4. Links is het logaritmisch snelheidsprofiel te herkennen dat als randvoorwaarde is opgelegd. Aan de rand van het neergaande talud ontstaat een loslaatgebied waarin terugstroming optreedt; hier zijn de snelheden zeer laag. Dit loslaatgebied strekt zich uit tot aan het vlakke gedeelte van het profiel, maar bereikt niet de rijstroken zelf. Aan de stroomopwaartse rand van het opgaande talud neemt de snelheid af zonder tot loslating te leiden. Aan de bovenrand van het opgaande talud wordt de stroming aanzienlijk versneld, waardoor tamelijk hoge snelheden aan het grondoppervlak voorkomen. Verder stroomafwaarts herstelt zich het verticale snelheidsprofiel weer tot het logaritmische snelheidsprofiel, zoals dat ook in de inlaat aanwezig is.

Figuur 5.3 toont de turbulente kinetische energie in de situatie met stilstaand verkeer. Als gevolg van de snelheidsverschillen tussen de hoofdstroming en het recirculatiegebied ontstaat een gebied van hogere turbulentie.

Figuur 5.4 toont de turbulente kinetische energie in een situatie waarin de bronnen van turbulente kinetische energie zijn ingeschakeld. Duidelijk is te herkennen hoe de vier bronnen van turbulentie zorgen voor een hoog niveau van turbulente kinetische energie op de rijstroken. De wind zorgt ervoor dat de turbulentie mee stroomafwaarts wordt gevoerd.

5.2 Verspreiding

Figuur 5.2 geeft het resultaat van een verspreidingsberekening in de vorm van een contourplot voor de situatie van een verdiept gelegen weg met stilstaand verkeer. De figuur toont de verdunningsfactor K (m^{-1}) voor de volle-schaalsituatie. Duidelijk waarneembaar zijn de vier bronnen van verontreiniging die zich op de rijstroken bevinden. De verontreiniging wordt afgevoerd in stroomafwaartse richting. Zoals reeds beschreven in 5.1 strekt het terugstroomgebied aan het neergaande talud zich niet uit tot de eerste rijstrook, zodat geen verontreiniging in stroomopwaartse richting wordt meegevoerd. Als gevolg van de versnelling bij de knik in het wegprofiel bovenaan het opgaande talud is de waarde van de verdunningsfactor relatief laag.

In figuur 5.6-5.9 wordt de verdunningsfactor gegeven als een functie van de afstand tot het midden van de weg voor de vier configuraties zoals hierboven gegeven. Het betreft hier waarden voor de verdunningsfactor op een hoogte van 1.50 m ten opzichte van het grondniveau. Deze hoogte komt overeen met de hoogte waarop de verdunningsfactor is bepaald in de windtunnelexperimenten, zodat een goede vergelijking mogelijk is.

Bij vlak terrein en stilstaand verkeer is de verdunningsfactor maximaal 0.39 m^{-1} op een afstand van ongeveer 15 m ten opzichte van het midden van het wegsegment. Daarna valt de verdunningsfactor af als functie van de afstand tot het midden van de weg. Op een afstand van 100 m is de verdunningsfactor ongeveer 0.12 m^{-1} . De gemeten verdunningsfactoren liggen over het hele bereik enigszins hoger dan de berekende waarden, maar volgen het verloop van de berekeningsresultaten goed.

De berekening voor een vlakke weg en rijdend verkeer laat zien dat de maximale verdunningsfactor ongeveer 0.48 m^{-1} bedraagt op de hoogte van 1.50 m. Dit is hoger dan in het geval van stilstaand verkeer. Op het eerste gezicht lijkt dit vreemd, omdat de extra turbulentie die door het verkeer wordt opgewekt, leidt tot extra menging en dus tot lagere concentraties in de buurt van de bron. De hogere concentratie kan verklaard worden door het feit dat enerzijds de concentraties bij de bron weliswaar lager zijn, maar anderzijds de afmeting van de pluim in de buurt van de bron groter is, zodat netto de verdunningsfactor op de hoogte van 1.50 m hoger is.

Verder stroomafwaarts, dat wil zeggen op een afstand groter dan 15 m is de verdunningsfactor bij rijdend verkeer ongeveer 5 tot 10% lager dan bij stilstaand verkeer. Op een afstand van 100 m zijn de verdunningsfactoren in beide gevallen weer gelijk. Op deze afstand is blijkbaar de invloed van de bron niet langer belangrijk, maar speelt nog slechts de afstand tot de bron een rol.

De verdunningsfactor bij een weg met verdiepte ligging en stilstaand verkeer laat zien dat het verloop duidelijk afwijkt van de vlakke-wegsituatie (zie figuur 5.10). Het niveau van de verontreiniging op de weg is aanmerkelijk hoger, de maximum waarde van de verdunningsfactor bedraagt daar namelijk 0.7 m^{-1} . Ter hoogte van het talud neemt de verdunningsfactor snel af. Op 13.75 m en 22.25 m vertonen de berekeningsresultaten een knik, deze plaatsen komen natuurlijk precies overeen met de plaatsen waar het wegprofiel een knik vertoont. Bij de bovenste knik aan het opgaande talud is de verdunningsfactor 30% lager dan op dezelfde plaats bij het vlakke wegprofiel. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het versnellen van de stroming bij de knik in het wegprofiel. Bij gelijkblijvende transport van verontreinigende stoffen, zijn bij hogere snelheden de concentraties lager. Het verschil tussen de beide configuraties

blijft tot op de maximaal berekende afstand van 100 m merkbaar, maar wordt kleiner. De overeenstemming met de meting is goed. Het verloop van de metingen wordt door de berekeningen goed gevolgd, dat wil zeggen hoge concentraties in het verdiept gelegen gedeelte van het wegprofiel, daarna een snelle daling en dan een geleidelijke afname voor het vlakke gedeelte verder stroomafwaarts.

De vergelijking van de berekening aan de verdiept gelegen weg met rijdend verkeer met de situatie verdiept gelegen weg, stilstaand verkeer laat slechts kleine verschillen zien. Over het geheel liggen de berekeningsresultaten voor de situatie met rijdend verkeer enigszins hoger dan in de situatie met stilstaand verkeer. Mogelijk dat de grotere initiële pluimhoogte hiervan de oorzaak is. De aanwezigheid van het talud lijkt het effect van het rijdende verkeer teniet te doen. De metingen vertonen ongeveer hetzelfde verloop als de berekeningen, maar liggen wel lager dan de metingen bij stilstaand wegverkeer.

In het geval van een verdiept gelegen weg en rijdend verkeer wijken de berekening en de meting nogal sterk van elkaar af. Analyse van de meetgegevens laat zien dat in dat geval waarschijnlijk de massabalans van de metingen niet klopt. Mogelijk is tracergas langs de weg naar elders meegevoerd.

6 Parametervariaties

6.1 Variatie van de taludhelling

Als variatie op de standaardconfiguratie van een weg met neergaand talud (taludhelling 1 : 2), is een berekening uitgevoerd met een taludhelling van 1 : 1 (breedte = hoogte). Het doel van deze berekening is te zien wat voor verschil variatie van de taludafmetingen maakt op de verdunningsfactoren op de weg en stroomafwaarts van de weg. De windsnelheid is gelijk genomen aan de basisconfiguratie, namelijk 6 m/s op 10 m hoogte, terwijl voor de snelheid van het wegverkeer 24 m/s is aangehouden.

Figuur 6.1 toont de resultaten van deze berekening en de vergelijking met de basisconfiguratie. De berekening laat zien dat stroomafwaarts van het talud de taludhelling nauwelijks enig verschil maakt. In de verdiept gelegen 'bak' is er wel een invloed op de concentraties van verontreinigende stoffen waar te nemen. Steilere taludhellingen leiden tot 10-20% hogere concentraties boven de weg.

Het steilere talud leidt bovendien tot hogere concentraties stroomopwaarts van het wegverkeer. Dit wordt verklaard uit het feit dat het recirculatiegebied aan de achterzijde van het neergaande talud groter is bij een steiler talud. Het recirculatiegebied strekt zich tot voorbij de eerste rijstrook uit, waardoor verontreinigende stoffen mee stroomopwaarts worden gevoerd. Dit is in het geval van de 1 : 2 taludhelling niet waar te nemen.

6.2 Variatie van de terreinruwheid

Als variatie op de basisconditie $z_0 = 0.10$ m is het concentratieverloop berekend bij een ruwheidshoogte $z_0 = 0.25$ m. De windsnelheid is gelijk genomen aan de basisconfiguratie, namelijk 6 m/s op 10 m hoogte, terwijl voor de snelheid van het wegverkeer 24 m/s is aangehouden.

Figuur 6.2 laat de resultaten zien van deze variaties ten opzichte van de standaardconfiguratie. De figuur laat zien dat een andere waarde voor de ruwheidshoogte geen enkele invloed heeft op de concentratie op de weg, maar dat de invloed van een hogere ruwheid op enige afstand duidelijk aanwezig is. Een grotere ruwheid van het terrein leidt tot een grotere menging in de atmosferische grenslaag. Dit wordt vertaald in kleinere verdunningsfactoren. Op een afstand van 100 m is de verdunningsfactor bij een ruwheidslengte $z_0 = 0.25$ m ongeveer 25% lager dan bij $z_0 = 0.1$ m.

7 Conclusies en aanbevelingen

Algemene conclusies

Het is mogelijk gebleken met behulp van een k- ϵ model goede voorspellingen te maken van de verdunningsfactoren in de nabijheid van een gewijzigd wegprofiel. De invloed van het wegverkeer is te modelleren met behulp van een turbulente bron die afhangt van de snelheid van het wegverkeer. De berekeningen zijn gevalideerd aan de hand van windtunnelmetingen. De overeenkomst tussen berekeningen en metingen is goed.

Het lijkt mogelijk de berekeningen uit te breiden naar meer complexe situaties zoals die in de praktijk voorkomen, dat wil zeggen situaties met woonwijken en dergelijke.

Numerieke modellering rond een enkel voertuig

De numerieke modellering van een rijdend en een stilstaand voertuig laat zien dat het zog achter het rijdende voertuig de initiële verspreiding van de uitlaatgassen sterk beïnvloedt. De wervels in de rijrichting achter het rijdende voertuig zorgen ervoor dat de verontreinigingen dichtbij het voertuig verspreid worden over een gebied ter grootte van het frontale oppervlak van het voertuig. Vertaald naar de tweedimensionale situatie blijkt er echter maar een klein verschil te bestaan tussen de tweedimensionale pluimafmetingen van een rijdend en een stilstaand voertuig. De waarden van σ_{z0} , die gebruikt worden in Car-Special zijn van de orde van grootte. De pluim blijft aan de grond.

In het zog van het rijdende voertuig is de turbulente kinetische energie aanmerkelijk hoger dan in de omringende lucht. Dit gebied van verhoogde turbulente kinetische energie strekt zich achterwaarts slechts uit tot ongeveer een voertuiglengte. De conclusie is dat dit niet het mechanisme is dat tot een verhoogde verdunning leidt bij bewegend wegverkeer. Het periodiek passeren van voertuigen leidt tot snelheidsfluctuaties in de rijrichting. Dit is een belangrijk mechanisme voor de menging.

Tweedimensionale modellering van een weg

De tweedimensionale modellering van een weg is mogelijk gebleken met behulp van het gebruikte k- ϵ model.

Tweedimensionale volumebronnen voor de emissie van verontreinigende stoffen en voor toegevoegde turbulentie zijn ontwikkeld. De bron voor toegevoegde turbulentie dient om de invloed van het rijdende verkeer op de verspreiding in rekening te brengen. De sterkte en de grootte van de bronnen zijn gekoppeld op windtunnelmetingen en op de driedimensionale modellering van een rijdend voertuig.

Resultaten van de berekeningen en vergelijking met windtunnelmetingen

Vergelijking van modelberekeningen met windtunnelmetingen in vier configuraties:

- vlak terrein, stilstaand verkeer;
- vlak terrein, rijdend verkeer;
- verdiept gelegen weg, stilstaand verkeer;
- verdiept gelegen weg, rijdend verkeer

laat zien dat de overeenstemming tussen metingen en berekeningen goed te noemen is. De verdunning van de verontreinigende stoffen als functie van de axiale afstand wordt goed voorspeld en voor zover is te beoordelen aan de hand van de metingen wordt ook de hoogte van de pluim goed voorspeld. In het geval van een verdiept gelegen weg en rijdend verkeer wijken de berekening en de meting nogal sterk van elkaar af. Analyse van de meetgegevens laat zien dat in dat geval waarschijnlijk de massabalans van de metingen niet klopt. Mogelijk is tracergas langs de weg naar elders mee-

gevoerd.

De berekeningen laten zien dat duidelijk verschillen in verdunningsfactoren optreden tussen de situatie met en de situatie zonder talud. De situatie met verdiept gelegen weg laat zien dat de concentratie op het wegsegment 50% hoger zijn dan in het geval de weg gelegen is in vlak terrein. Als gevolg van de versnelling van de stroming aan de bovenkant van het talud in het geval van de verdiept gelegen weg zijn de concentraties daar ongeveer 10% lager dan bij de vlak gelegen weg. Op enige afstand van het talud (meer dan 50 m) zijn de verdunningsfactoren weer vrijwel gelijk.

De invloed van het rijdende wegverkeer zorgt voor een kleine verhoging van de verdunningsfactoren in het geval van de berekeningen en voor een verlaging bij de metingen (zie ook bovenstaande opmerking).

Variatie van ruwheidslengte en taludhelling

Variatie van de ruwheidslengte in de berekeningen laat zien dat de ruwheid van het terrein een behoorlijk grote invloed heeft op de verdunning van verontreinigende stoffen. Een ruwheidslengte van 0.25 m in plaats van 0.1 m geeft een reductie van ongeveer 25% stroomafwaarts van de bron te zien (op 100 m afstand). De concentraties op de weg blijven door de verandering van de ruwheidslengte ongewijzigd.

Een verandering van de taludhelling van de standaard gebruikte taludhelling 2 : 1 naar 1 : 1 laat zien dat dit de verdunning stroomafwaarts van het talud nauwelijks beïnvloedt. Als gevolg van het steilere talud neemt wel de concentratie verontreinigende stoffen in het verdiept gelegen gedeelte aanmerkelijk toe. Als gevolg van een groter recirculatiegebied aan het stroomopwaarts gelegen talud wordt verontreiniging mee stroomopwaarts gevoerd, wat leidt tot grotere concentraties op dit stroomopwaarts gelegen talud.

Aanbevelingen

Aangezien de het CFD-model geschikt is gebleken om de invloed van rijdend wegverkeer op de turbulentie en op de concentratie te berekenen op en naast een vlakke en een verdiept gelegen weg en een eerste indruk is verkregen van de invloed is verkregen van de invloed van de talud helling en de terreinruwheid, wordt aanbevolen onderzoek uit te voeren naar:

- verhoogd gelegen wegsegmenten met neergaand talud aan beide zijden;
- configuraties met geluidwerende voorzieningen als schermen en wallen (vlakke weg en in situaties met taluds);
- configuraties van vegetatie (struiken, geboomte) in vlak terrein en met taluds;
- uitbreiding naar complexere, niet tweedimensionale situaties.

8 Referenties

- [1] L.Th. de Leu,
Onderzoek naar de luchtkwaliteit langs wegen buiten de bebouwde kom in de
provincie Zuid-Holland
Regionale Directie Zuid-Holland R92/003, februari 1992.
- [2] ROA, Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen
(voorlopige richtlijnen).
- [3] Cromwijk, J.W.
Numerieke modellering van stroming over complex terrein
TNO-ME rapport, Apeldoorn, 1994.
- [4] Duijm, N.J., Melle, A. van
Ontwikkeling van Car-Special
Deel 2: Modelbeschrijving van Car-Special
TNO-ME rapport, 92-305, Apeldoorn, augustus 1993.
- [5] Launder, B.E., Spaling, D.B.
The numerical computation of turbulent flows
Comp. Math. App. Mech. Eng., vol. 3, p.p. 269-289, 1974.
- [6] Statistiek van de motorvoertuigen.
SDU-uitgeverij CBS-publicaties, 's-Gravenhage, 1991
- [7] Duijm, N.J.
De invloed van geluidbeperkende voorzieningen op de verspreiding van
luchtverontreinigende stoffen afkomstig van het wegverkeer
rapport 89-003, TNO-MT, Apeldoorn, januari 1989.
- [8] TASCflow manual, version 2.3
Advanced Scientific Computing ltd.
Waterloo, Canada, 1994.

9 Symbolenlijst

A_{bron}	dwarsoppervlak van de 2-dimensionale bron	[m ²]
A_{turb}	dwarsoppervlak 2-dimensionale turbulente bron	[m ²]
A_v	frontaal oppervlak voertuig	[m ²]
c, CONC	concentratie	[kmol/m ³]
c_w	weerstandcoëfficiënt	[-]
F_v	kracht op het voertuig	[N]
I	turbulentie-intensiteit	[-]
k, TKE	turbulente kinetische energie	[m ² /s ²]
K	verdunningsfactor	[m ⁻¹]
k_{temp}	temporele component van turbulente kinetische energie	[m ² /s ²]
l	afstand tussen voertuigen	[m]
P_k	produktie van turbulente kinetische energie	[kg/(m.s ³)]
q	emissie van lijnbron	[kmol/(m.s)]
Q	emissie per voertuig	[kmol/s]
Sc_t	turbulent Schmidt-getal	[-]
u	snellheidsvector	[m/s]
U	windtunnelsnelheid	[m/s]
W	voertuigsnelheid	[m/s]
z_0	ruwheidshoogte	[m]
Γ	moleculaire diffusiecoëfficiënt	[kg/m.s]
Γ_{eff}	turbulente diffusiecoëfficiënt	[kg/m.s]
θ	aanstroomhoek	[-]
μ_t	turbulente viscositeit	[kg/m.s]
ρ	dichtheid	[kg/m ³]
ϕ_Q	emissiebronsterkte	[kmol/(m ³ .s)]
ε	dissipatie van turbulente kinetische energie	[m ² /s ³]

10 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever
MILEF/VER/LU 4100.1367
Ministerie van Verkeer en Waterstaat
t.a.v. drs. A.H. Versluis
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
postbus 5044
2600 CA Delft

Namen en functies van de medewerkers
J.W. Cleijne - Research-medewerker
H. Wildschut - Research-medewerker
F. Balster - Meettechnicus

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed
niet van toepassing

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad
september 1993-oktober 1994

Ondertekening

J.W. Cleijne
projectleider

Goedgekeurd door

N.J. Duijm
werkgroep leider Stroomingstechniek

Appendix A1 Vergelijking van driedimensionale en tweedimensionale berekeningsresultaten

De 3D berekeningen laten een 3-dimensionaal beeld zien van de verspreiding van verontreiniging en de produktie van turbulentie achter een voertuig. Het doel van de 3-d berekeningen is driedig:

- inzicht krijgen in de verspreiding;
- ter vergelijking met de windtunnelmetingen;
- ter bepaling van brontermen voor de tweedimensionale berekeningen.

Om de 3d-berekeningen te kunnen vergelijken met de 2d-berekeningen en metingen is het nodig de resultaten van de 3d berekeningen te middelen in axiale richting. Eerst rekenen we dit uit voor de verspreiding van verontreiniging. Daarna gebeurt hetzelfde voor de turbulentie. Aangenomen wordt dat er geen beïnvloeding is door de achterrijdende auto.

Concentratie

De uitstoot per tijdseenheid van een enkel voertuig bedraagt Q [kg/s]. Op een locatie (x, y, z) is de concentratie $c(\underline{x})$ [kg/m]. De coördinaat x is gedefinieerd in de rijrichting, y loodrecht op de weg en z in verticale richting. Veronderstel dat de voertuigen zich op een onderlinge afstand l bevinden, dan is het mogelijk een gemiddelde concentratie $c_{\text{gem}}(y, z)$ als volgt te berekenen:

$$c_{\text{gem}}(y, z) = \frac{1}{l} \int_0^l c(\underline{x}) dx \quad (1)$$

De gemiddelde uitstoot per eenheid weglengte is Q/l , zodat een verdunningsfactor kan worden gedefinieerd gelijk aan:

$$K_{3d}(y, z) = u \cdot \frac{\frac{1}{l} \int_0^l c(\underline{x}) dx}{Q/l} = \frac{u \int_0^l c(\underline{x}) dx}{Q} \quad (2)$$

is een gekozen referentiesnelheid. Formule (2) laat zien dat K_{3d} onafhankelijk is van de gekozen onderlinge afstand l en kan worden berekend uit het concentratieverloop van een enkel voertuig. K_{3d} rechtstreeks worden vergeleken met de concentratiefactor van een lijnbron, wanneer $q = Q/l$ als lijnbronsterkte wordt genomen. Immers:

$$K_{2d} = \frac{c(y, z) u}{q} \quad (3)$$

Merk op dat de verdunningsfactor een dimensiehoudende grootheid is met een dimensie m^{-1} , zodat de schaal van het probleem nog een rol speelt.

Turbulentie

De turbulentie die achter een rijdend voertuig wordt geproduceerd wordt verspreidt zich onder invloed van wind ook zijwaarts. Analoog aan de concentratie-verdunningsfactor laat zich een turbulentie-‘verdunnings’factor definiëren. De turbulentie wordt gekarakteriseerd met behulp van de turbulente kinetische energie k . De produktie van k hangt samen met de kracht die door het voertuig wordt uitgeoefend op de omstromende lucht. De turbulente kinetische energie wordt geschaald met de op het voertuig uitgeoefende weerstandskracht F_w/ρ , waarin ρ de luchtdichtheid voorstelt. F_w wordt ook wel geschreven als:

$$F_w/\rho = 1/2 W^2 c_w A \quad (4)$$

waarin c_w de weerstandscoefficiënt is, W de voertuigsnellheid en A het frontale oppervlak van het voertuig. De turbulente ‘verdunnings’factor M wordt nu analoog aan (2) gedefinieerd door:

$$M_{3d}(y, z) = \frac{\frac{1}{l} \int_0^l k(x) dx}{F/\rho l} = \frac{\int_0^l k(x) dx}{F/\rho} = \frac{\int_0^l k(x) dx}{1/2 W^2 c_w A} \quad (5)$$

en dit maakt vergelijking met een 2d lijnbron voor turbulentie mogelijk.

Axiaal snelheidsdeficit

De snelheidsverlaging in het zog van een rijdend voertuig hangt samen met de weerstand van het voertuig. Het impulsverlies in het zog kan worden beschreven met:

$$\Delta m = \rho U (U - W) \quad (6)$$

waarin W de ongestoorde snelheid is en U de snelheid in het zog. Analoog aan de beschouwingen hierboven, definiëren we:

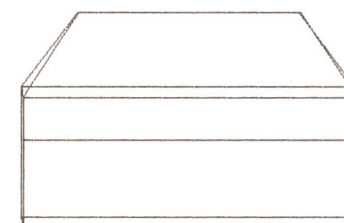
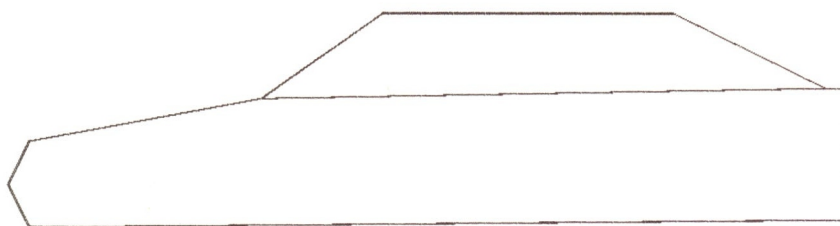
$$L_{3d} = \frac{\frac{1}{l} \int_0^l \Delta m dx}{F/\rho l} = \frac{\int_0^l U (U - W) dx}{1/2 W^2 c_w A} \quad (7)$$

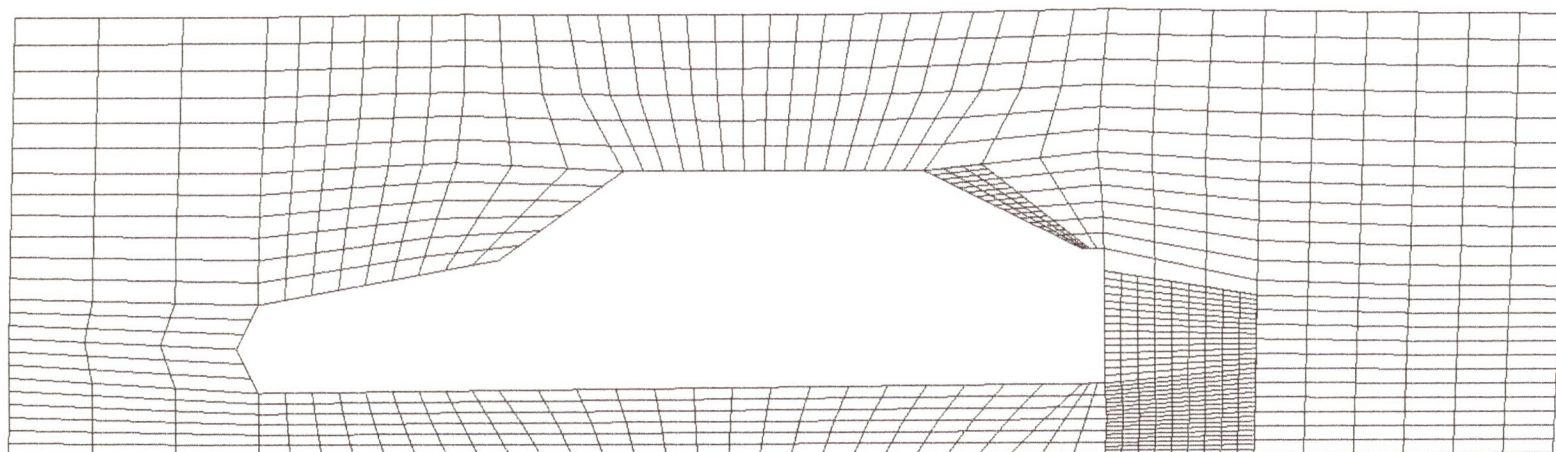
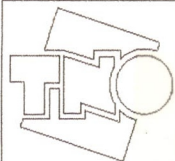
Als W klein is, zoals het geval is op grote afstand van het voertuig kan U benaderd worden met W , zodat:

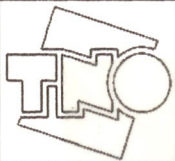
$$L_{3D} = \frac{\int_0^l W (U - W) dx}{1/2 W^2 c_w A} \quad (8)$$

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

Het axiaal snelheidsdeficiet speelt geen rol bij de huidige tweedimensionale modellering, maar wordt van belang bij meer complexe wegsituaties.

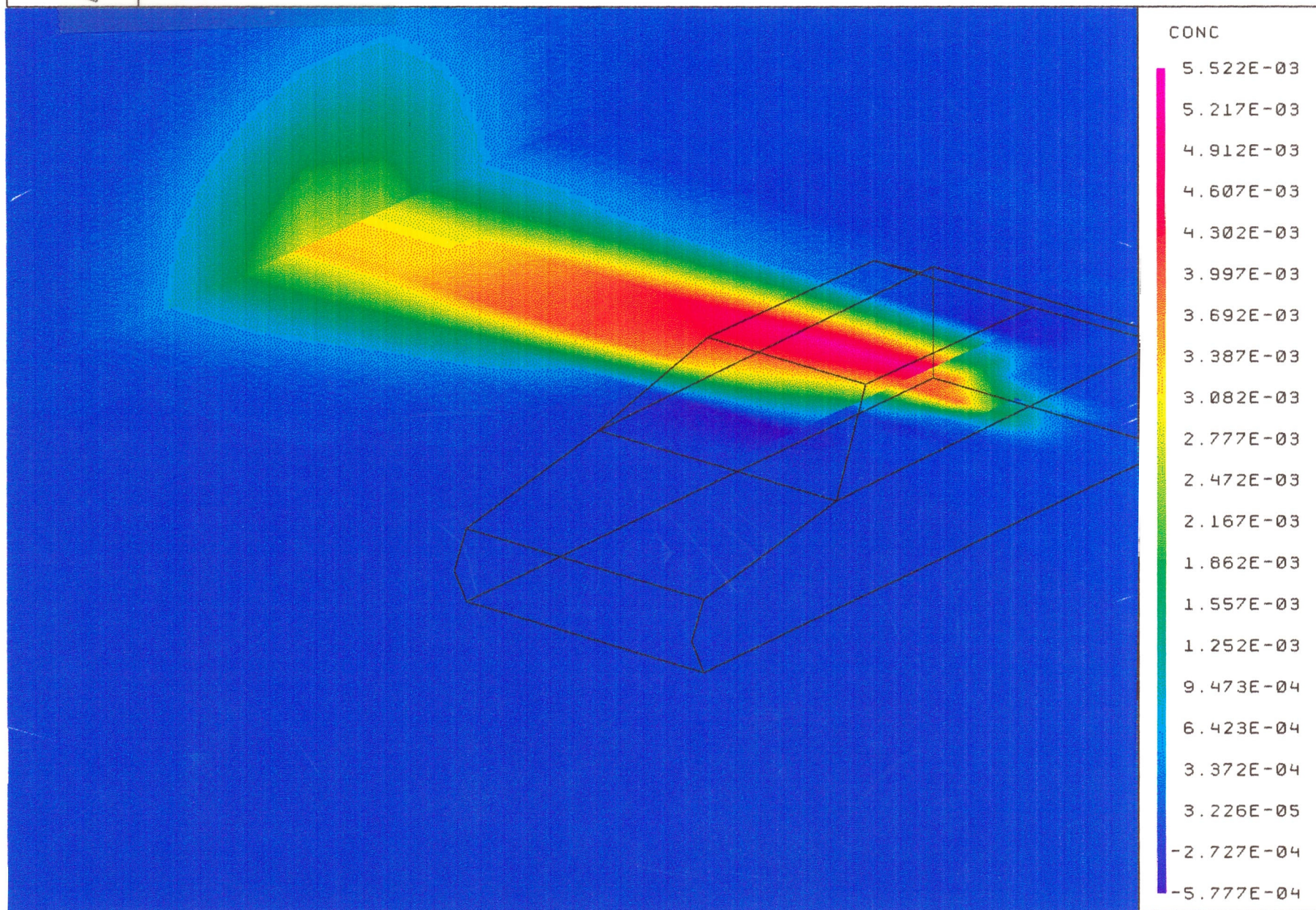


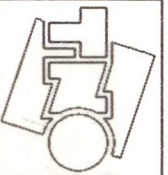




W=0M/S. U=6M/S

Figuur 2.3

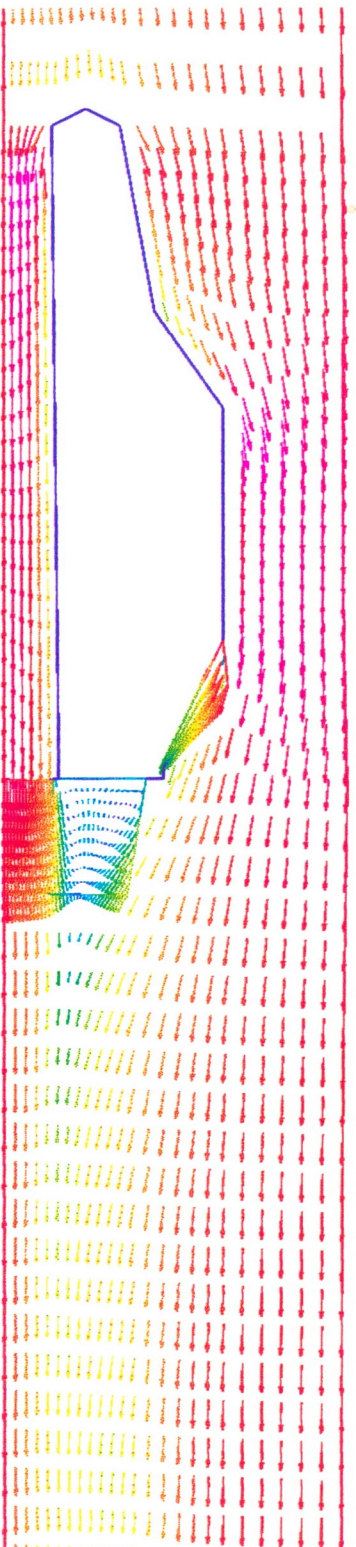




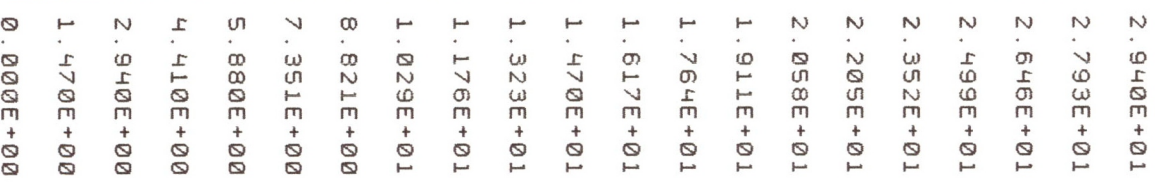
OMSTROMING VOERTUIG

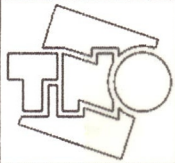
Figuur 2.4

Vector Scale
← 1
1.417E+02



SPEED





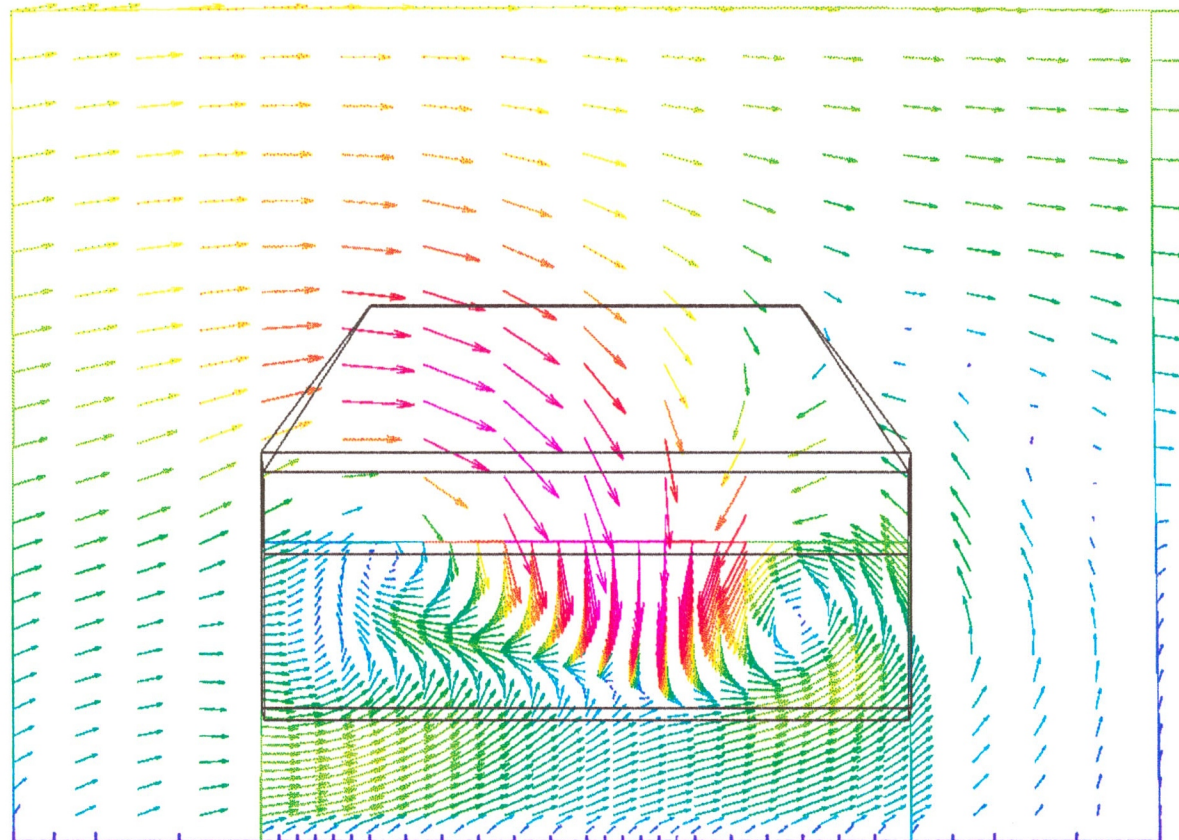
AXIALE WERVELS

Figuur 2.5

Vector Scale



1.744E+01



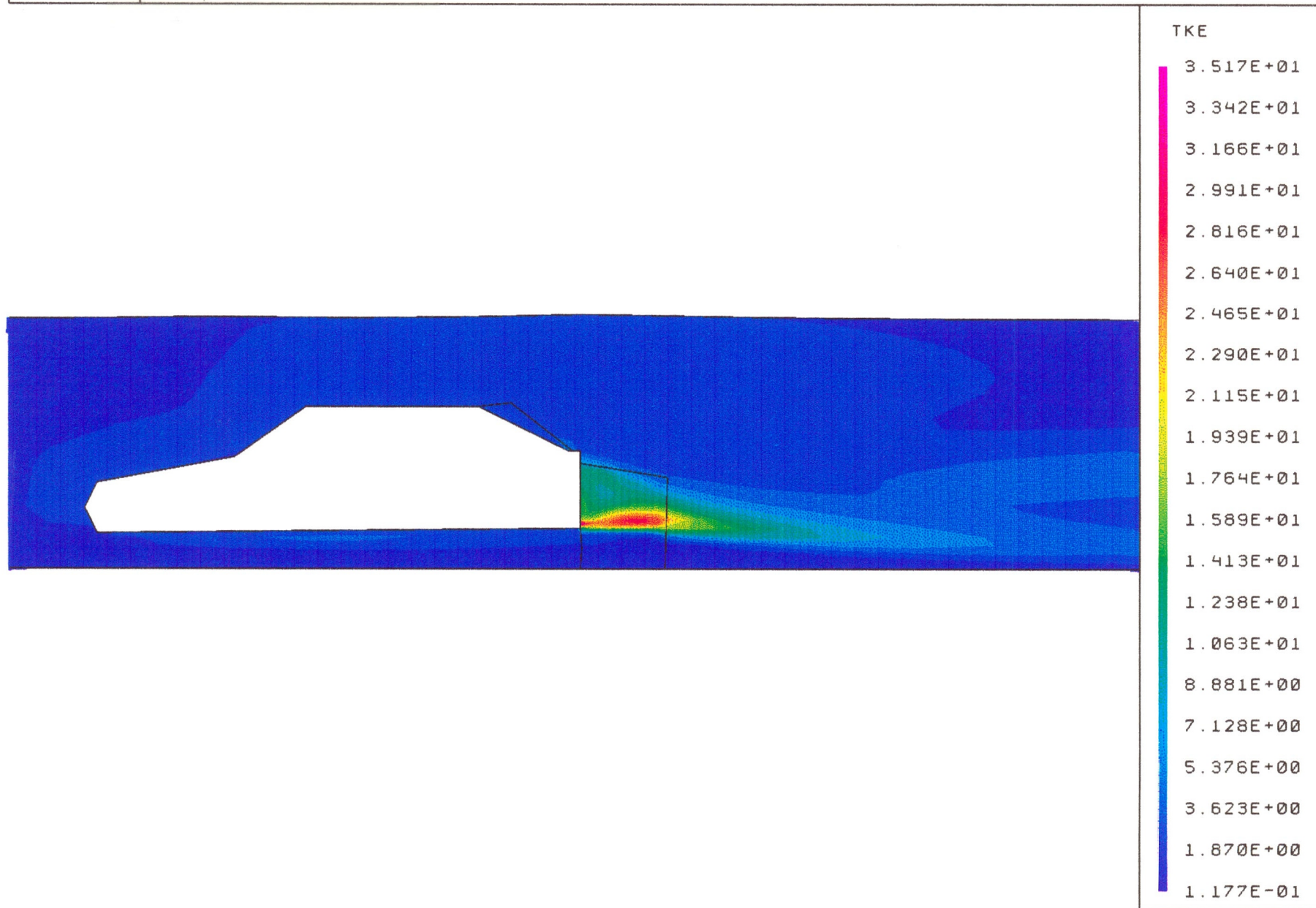
SPD

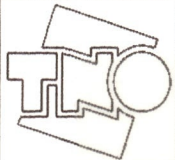
7.987E+00
7.587E+00
7.188E+00
6.789E+00
6.389E+00
5.990E+00
5.591E+00
5.191E+00
4.792E+00
4.393E+00
3.993E+00
3.594E+00
3.194E+00
2.795E+00
2.396E+00
1.996E+00
1.597E+00
1.198E+00
7.988E-01
3.994E-01
1.441E-04



TURBULENTE KINETISCHE ENERGIE

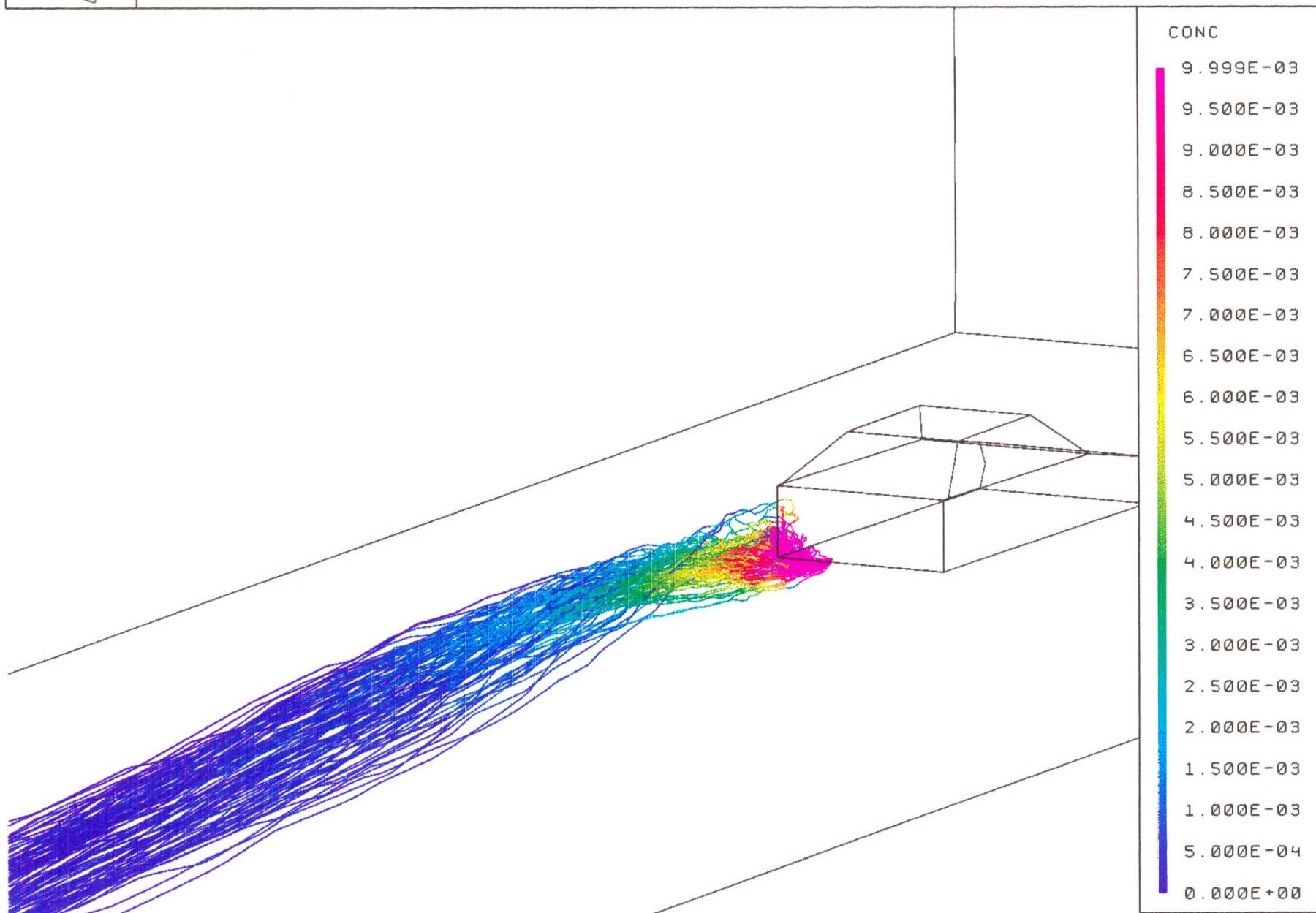
Figuur 2.6





W=24M/S, U=6M/S

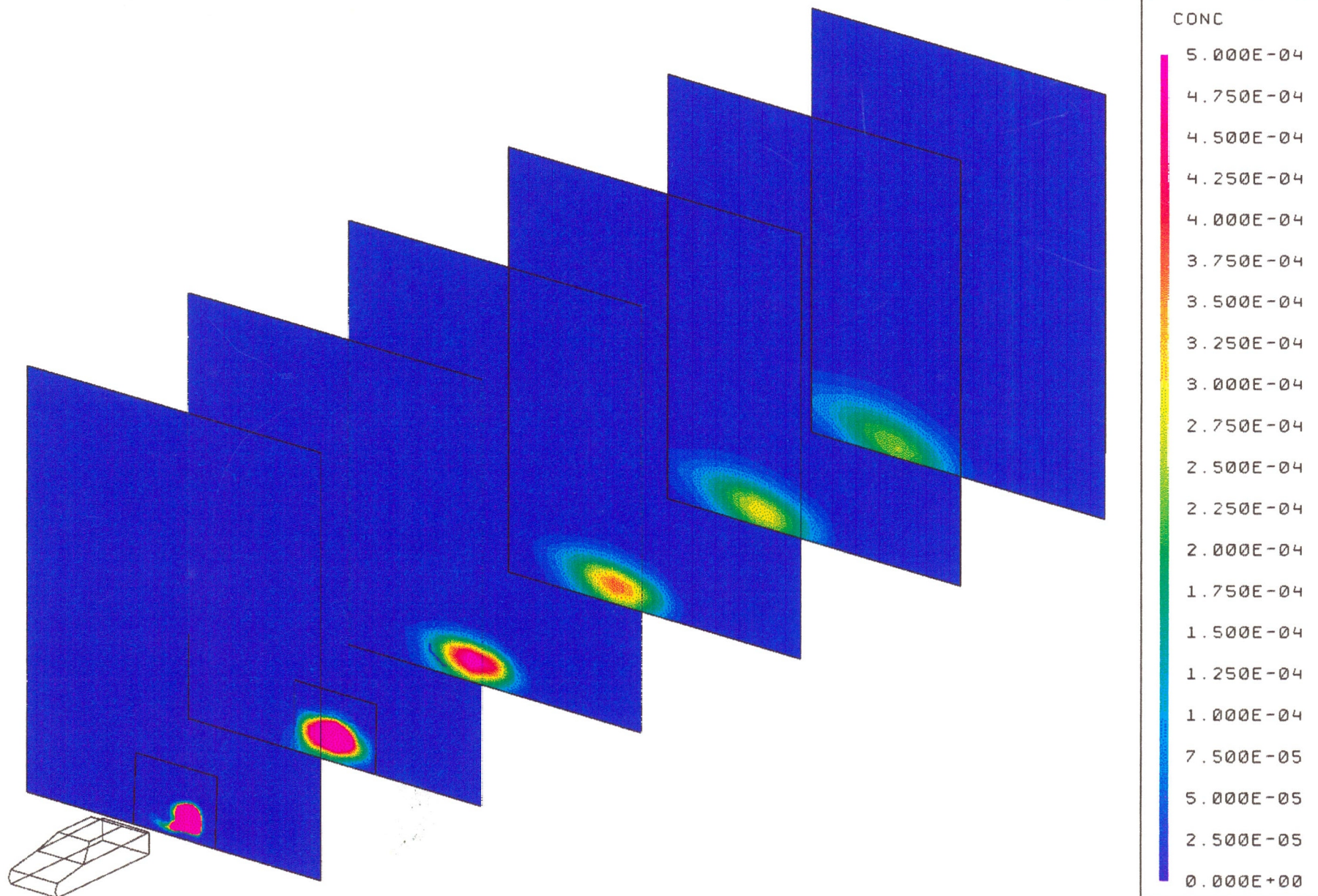
Figuur 2.7

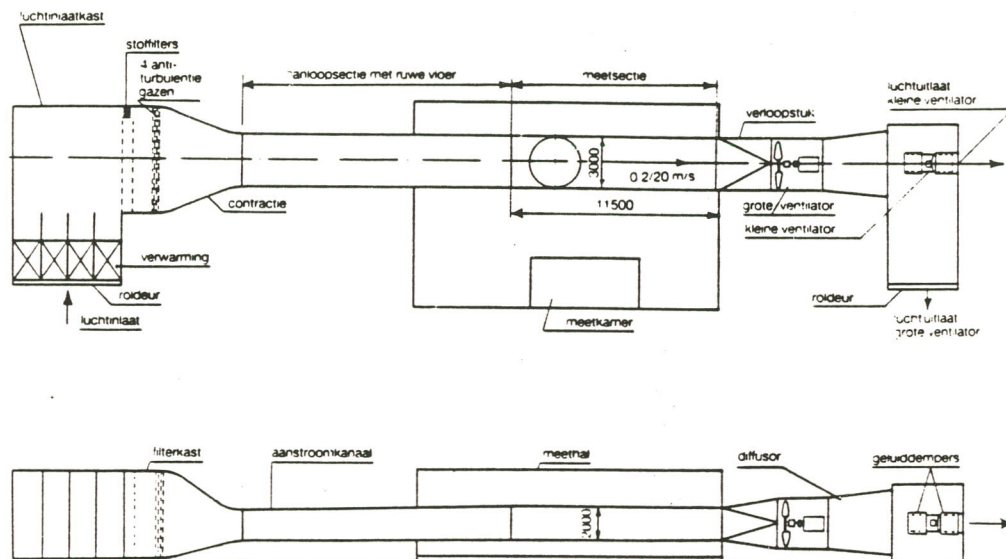




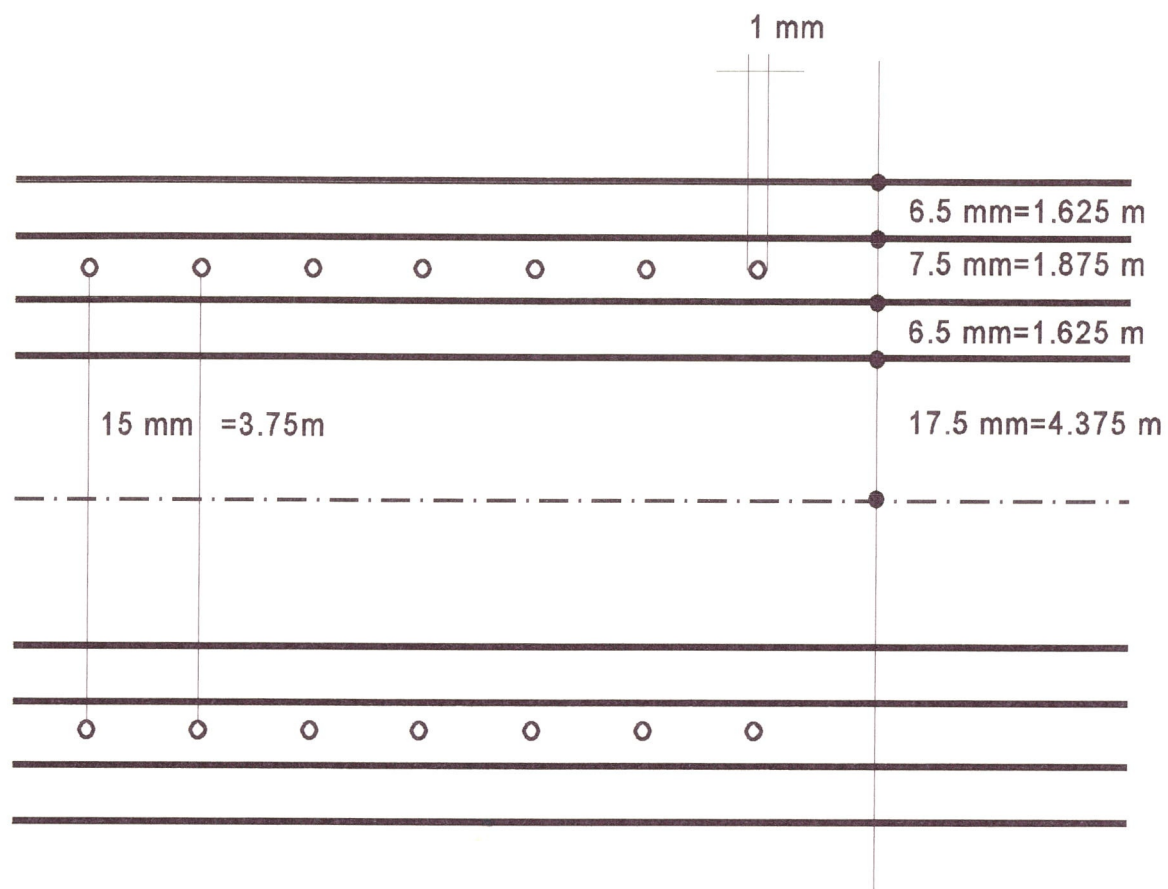
VERONTREINIGING

Figuur 2.8

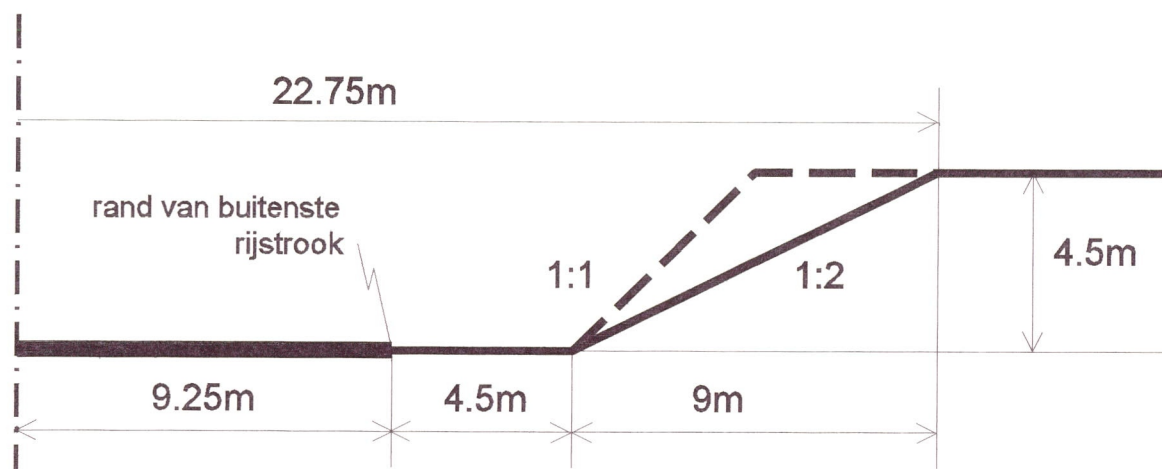


Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

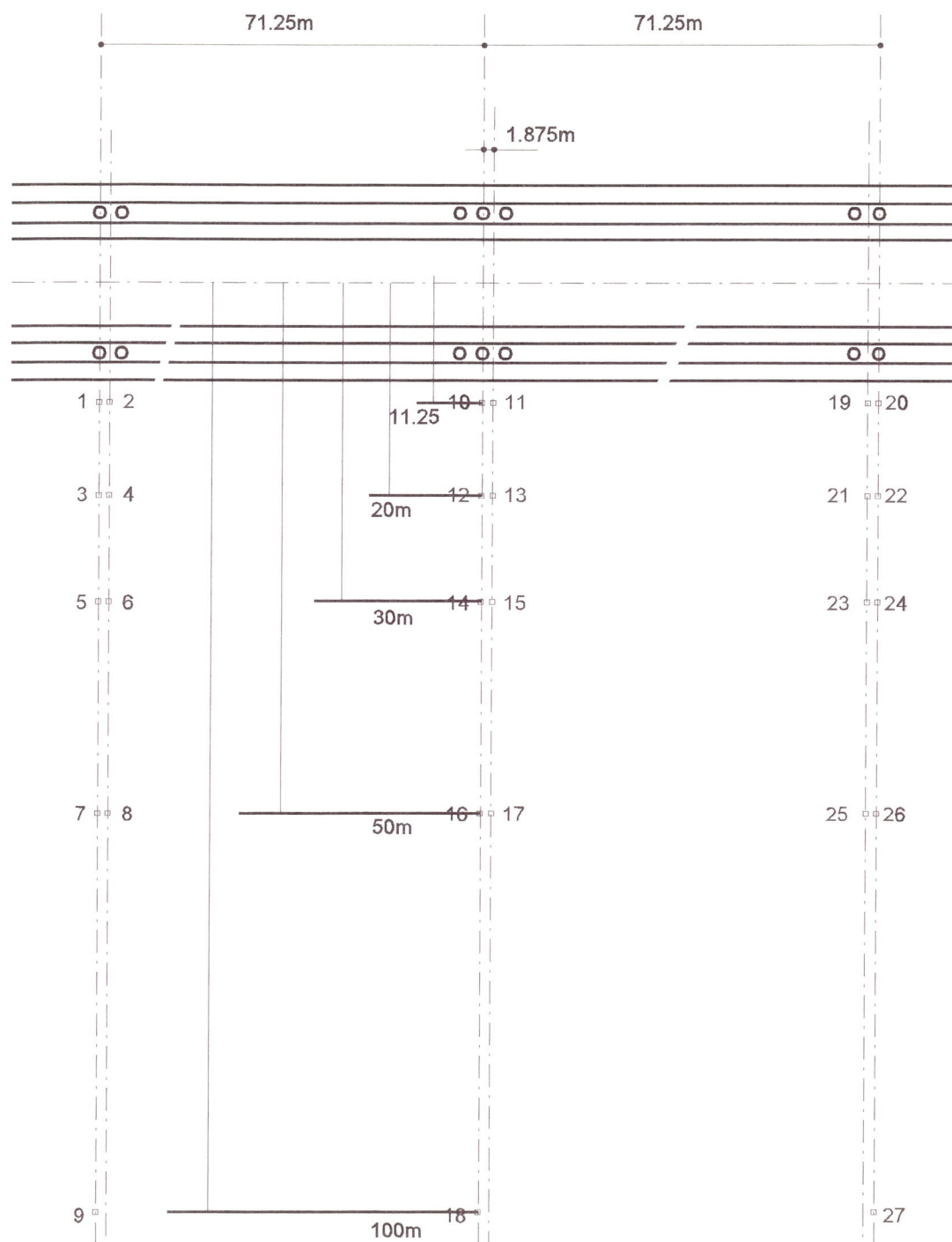
Figuur 3.1 Geometrie en afmetingen van gebruikte windtunnel

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

Figuur 3.2 Voornaamste afmetingen van wegsegmentmodel in windtunnel



Figuur 3.3 Voornaamste afmetingen van dwarsdoorsnede van verdiept liggend wegsegment (maten in mm)

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

Figuur 3.4 Locatie van receptorpunten bij concentratiemetingen in windtunnel

ANEMO Versie 5.4

SERIE DC

POSITIE 4

LOCATIE X Y Z 12.0 0.0 20.0

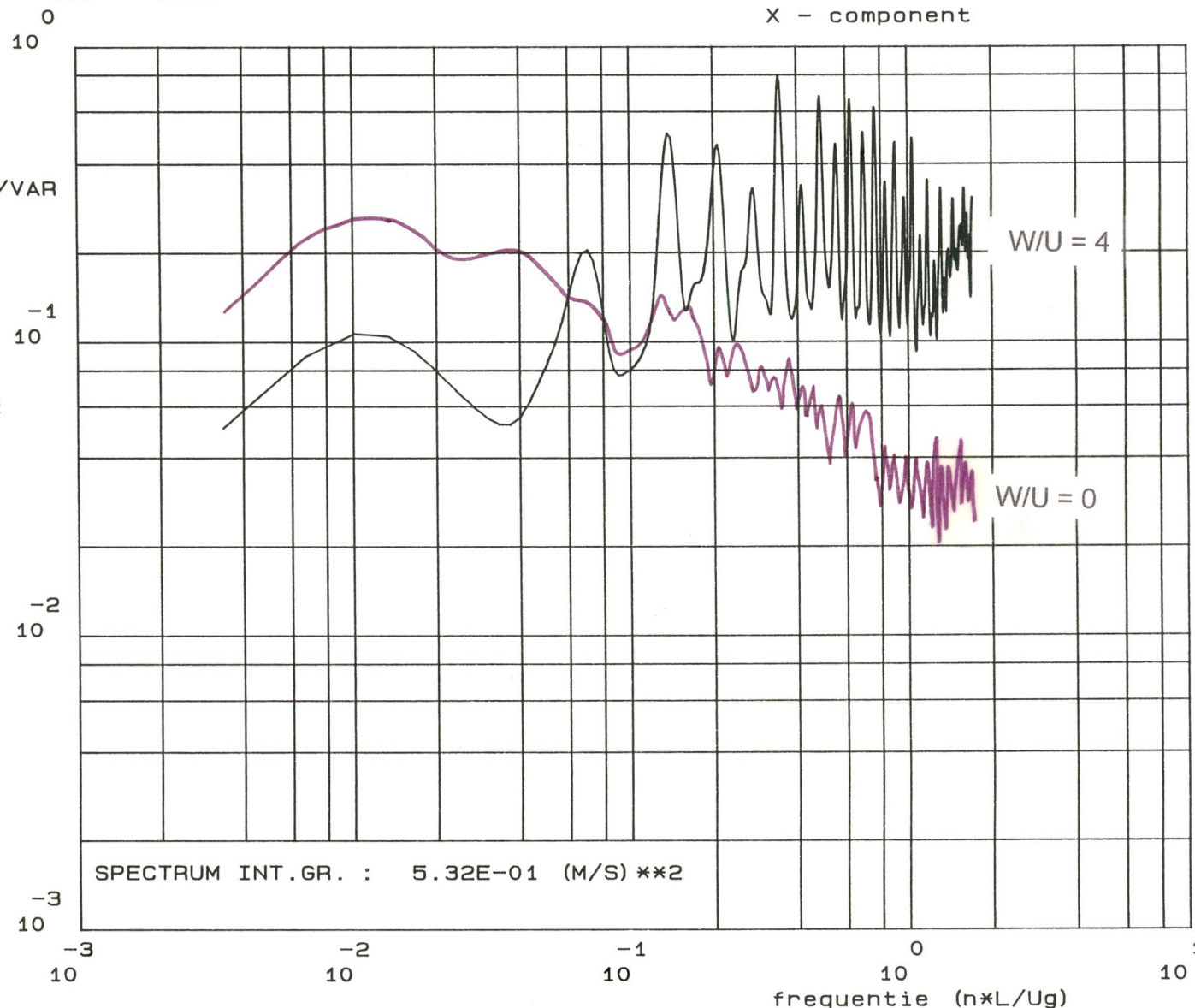
2:29 PM WED.. 19 JAN.. 1994

SPECTRUM

X - component

VAR. = 5.48E-01 (M/S)**2
 RMS = 7.40E-01 (M/S)
 GEM. = 3.01 (M/S)
 TURB. = 24.6 (%)
 DUUR = 8.2 (SEC)
 FREQ. = 500 (1/SEC)
 L = .02 (M)
 Ug = 2.92 (M/S)

nS (n) /VAR



WINDTUNNEL : 4

MODEL CONF : 2

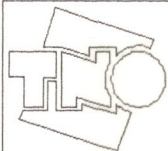
TUNNEL CONF: 5V-150Z-4S-0R

PROJECT : RIJKSWATERSTAAT

MEETASS : F.BALSTER

IMET-TNO
 25033
 Figur 3.5

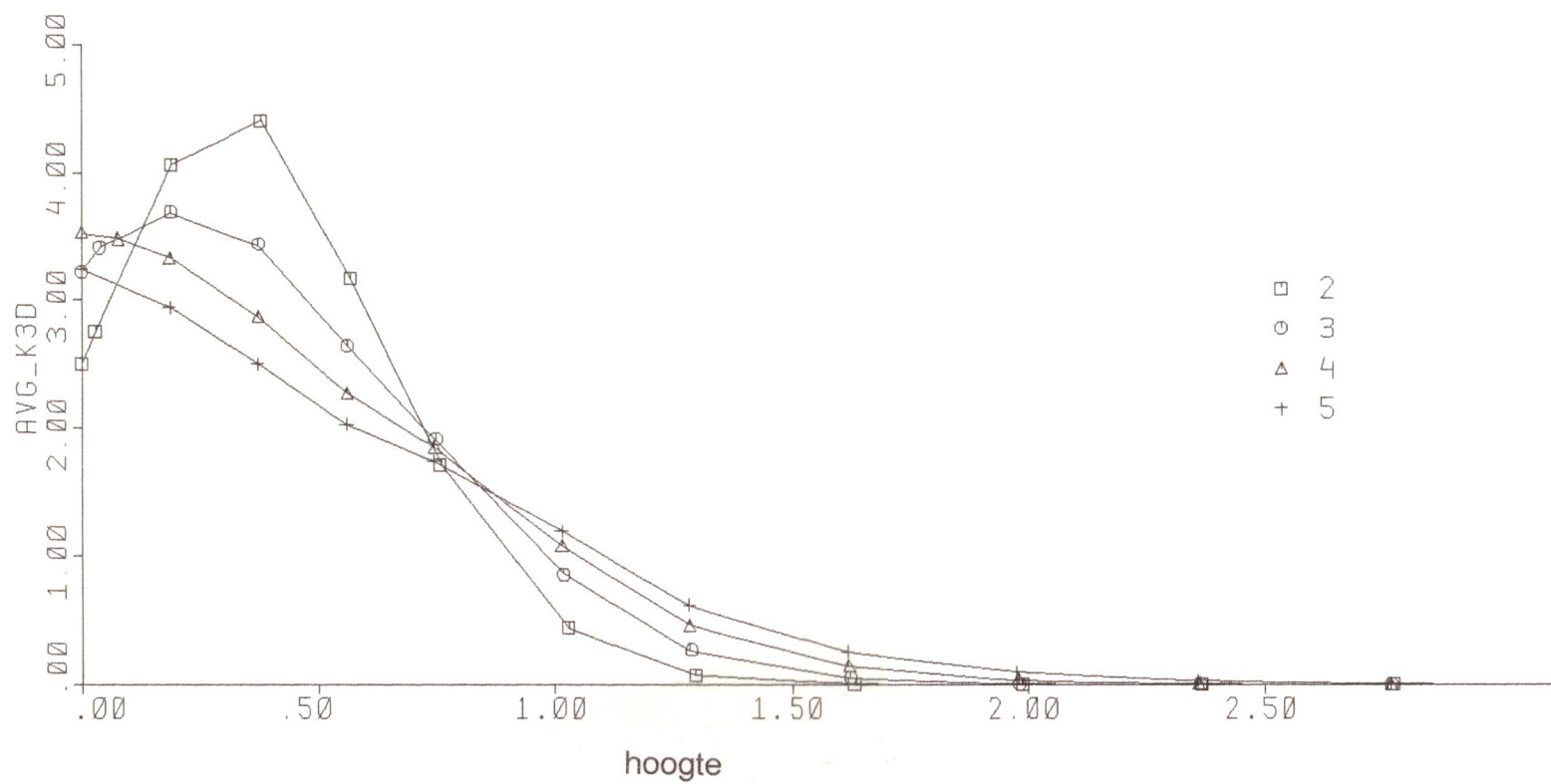




W=0M/S, U=6M/S

Figuur 4.1

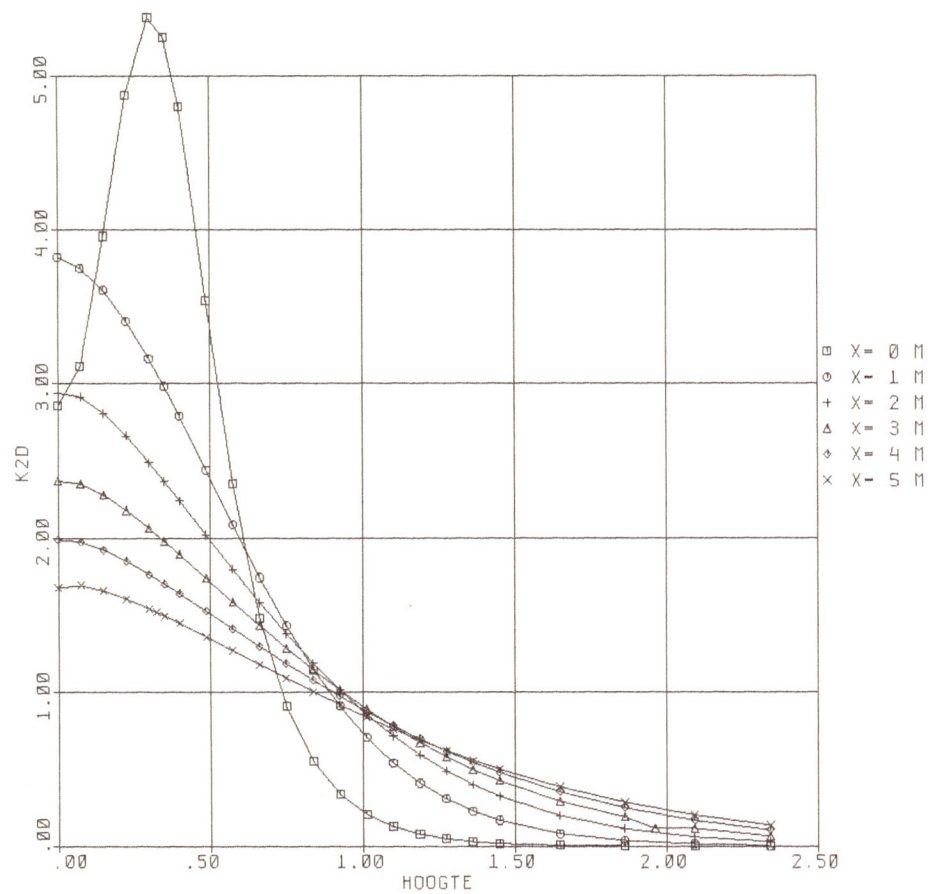
AVG_K3D VS DISTANCE ALONG GRID LINE

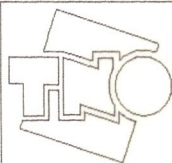




2D LIJNBRON

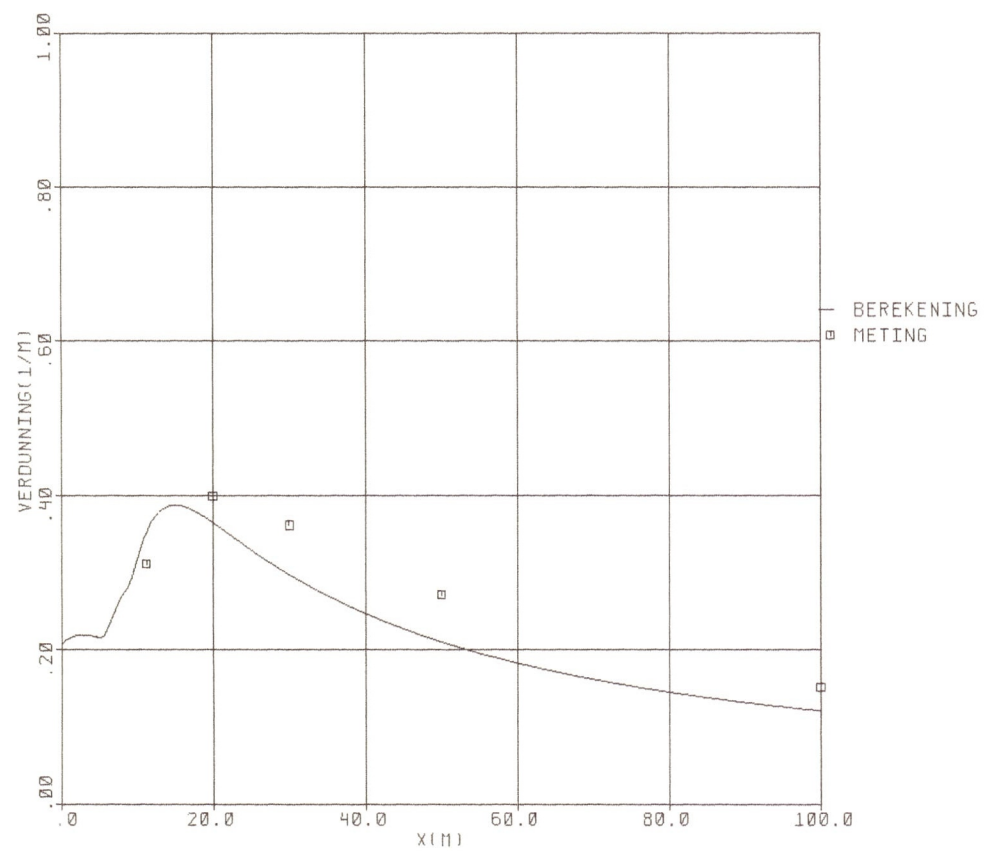
Figuur 4.2

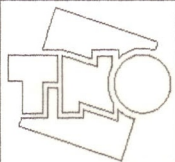




VLAKKE WEG. STILSTAAND VERKEER

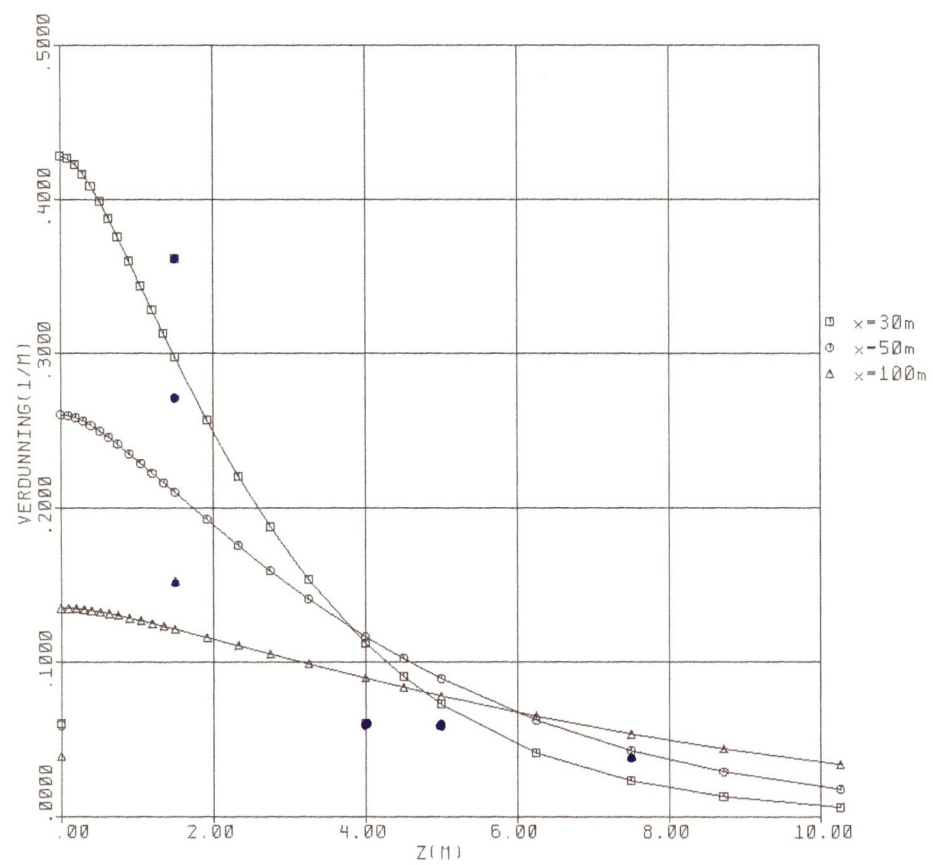
Figuur 4.3





VLAKKE WEG. STILSTAAND VERKEER

Figuur 4.4

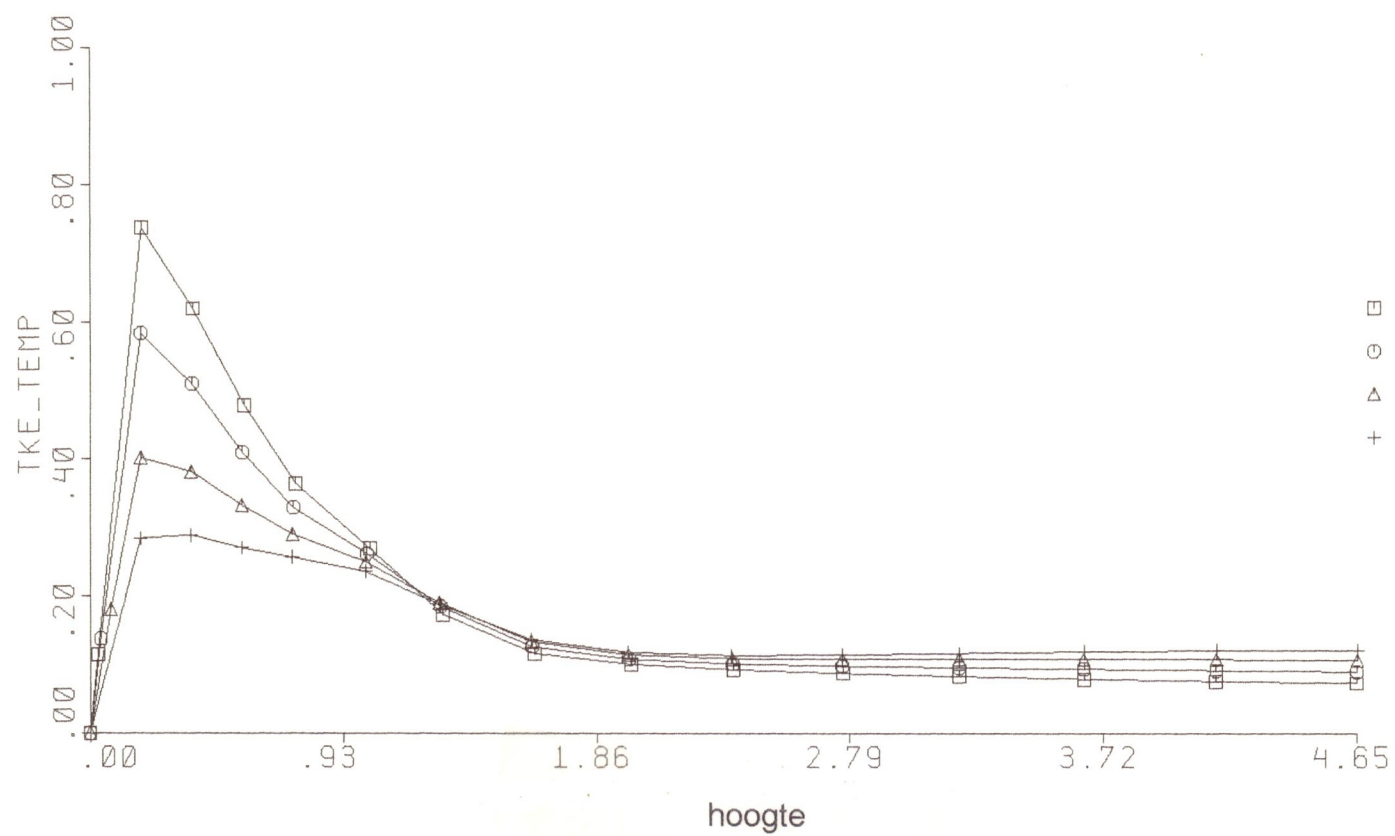




$W = 24 \text{ M/S}$. $U = 6 \text{ M/S}$

Figuur 4.5

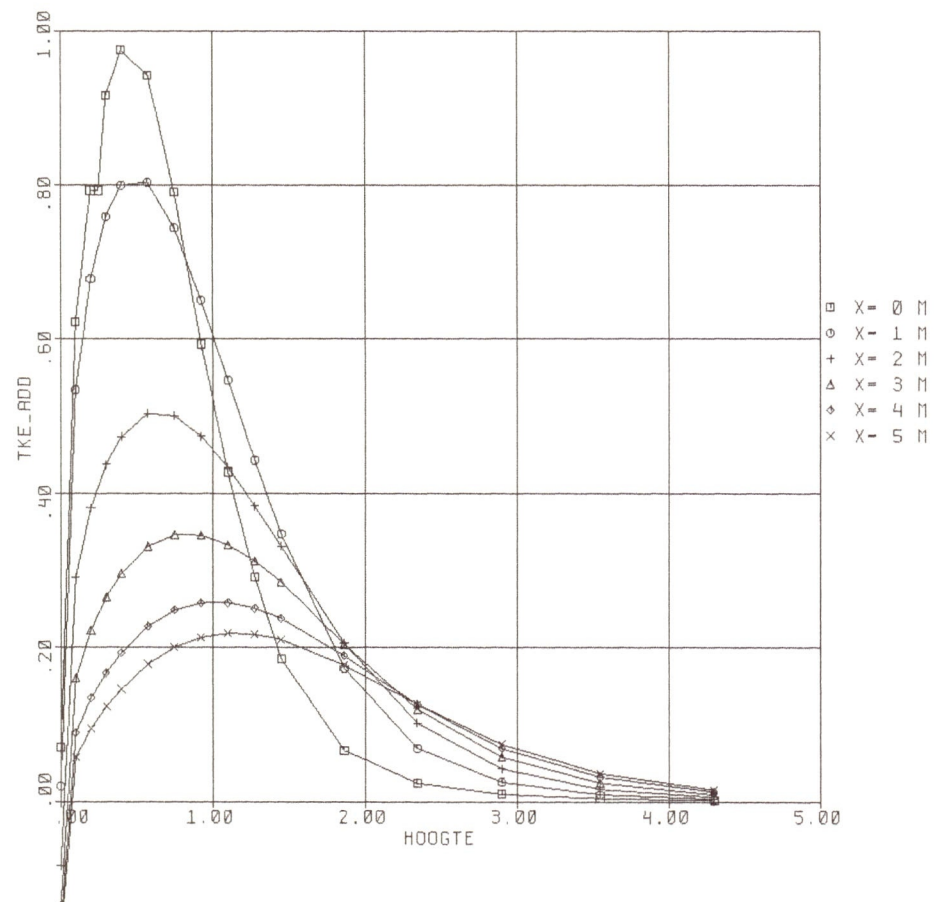
TKE_TEMP VS DISTANCE ALONG GRID LINE

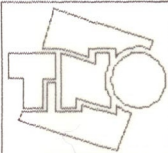




2D LIJNBRON

Figuur 4.6

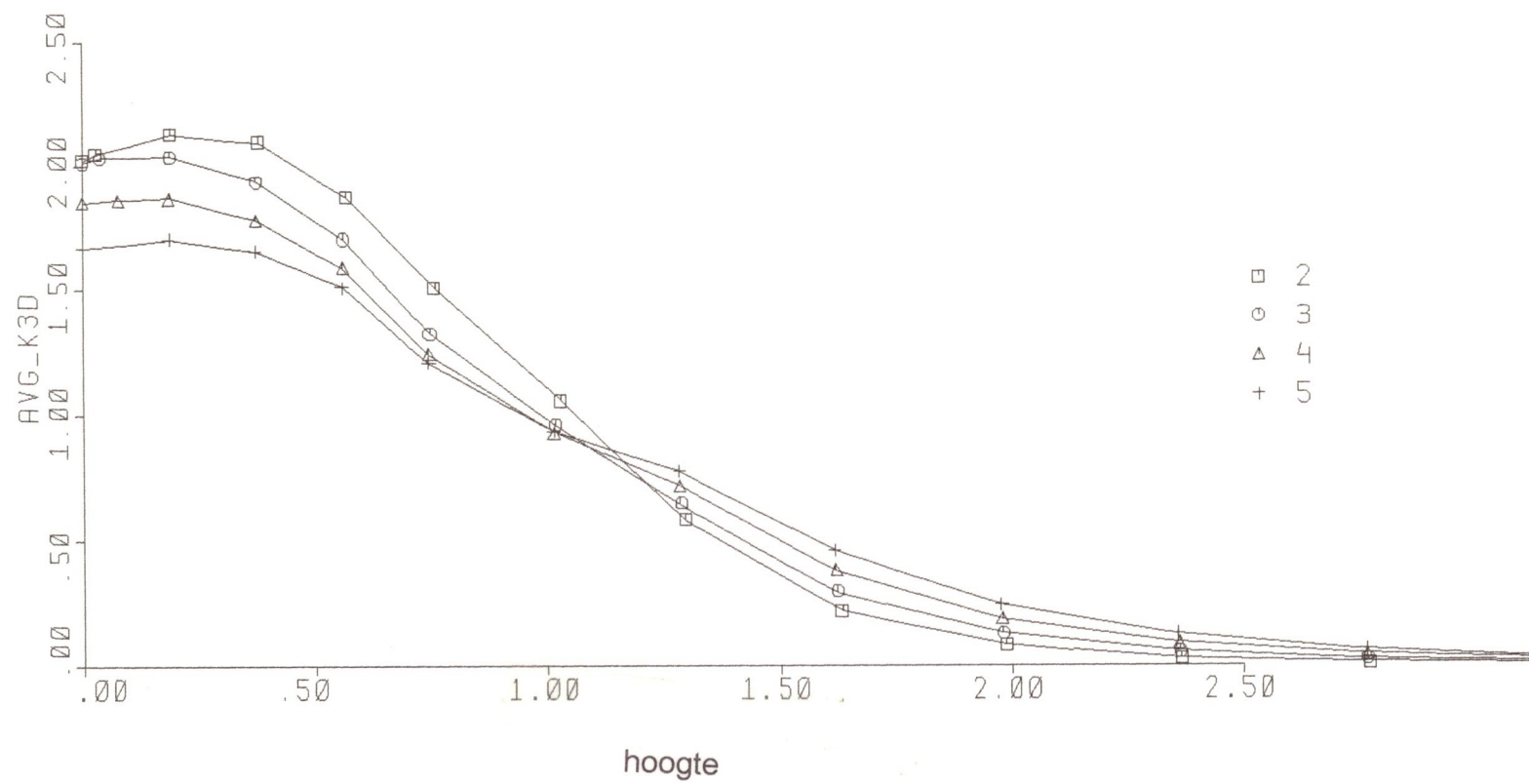




$W=24\text{M/S}$, $U=6\text{M/S}$

Figuur 4.7

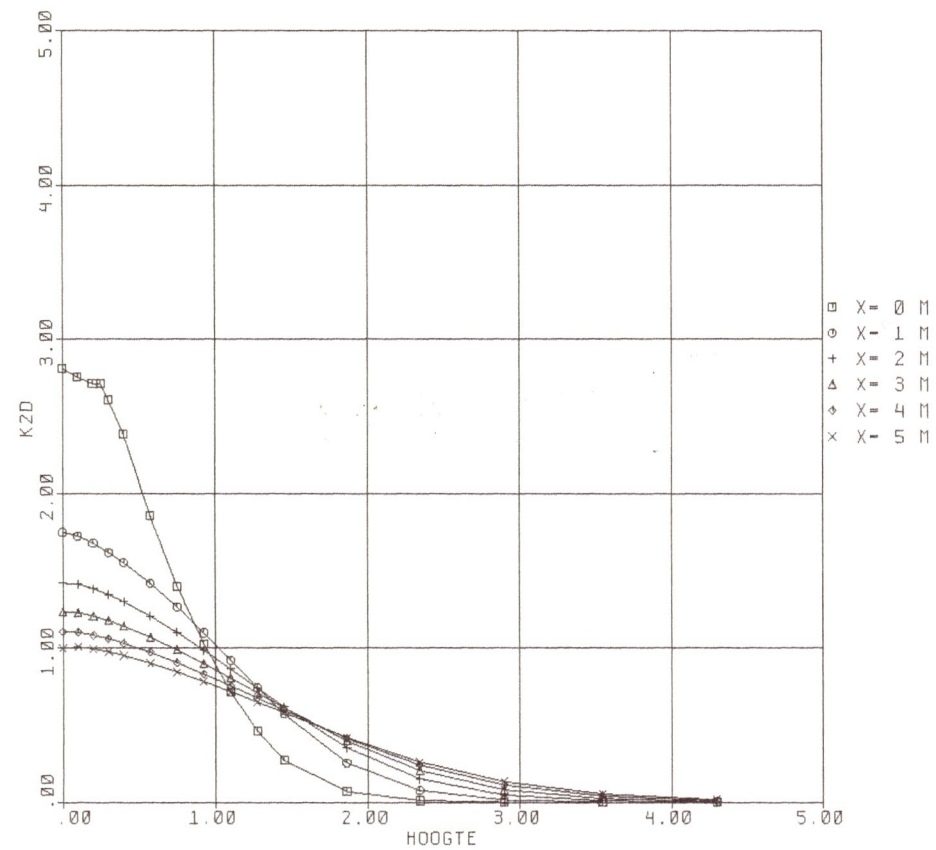
AVG_K3D VS DISTANCE ALONG GRID LINE

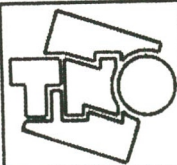




2D LIJNBRON

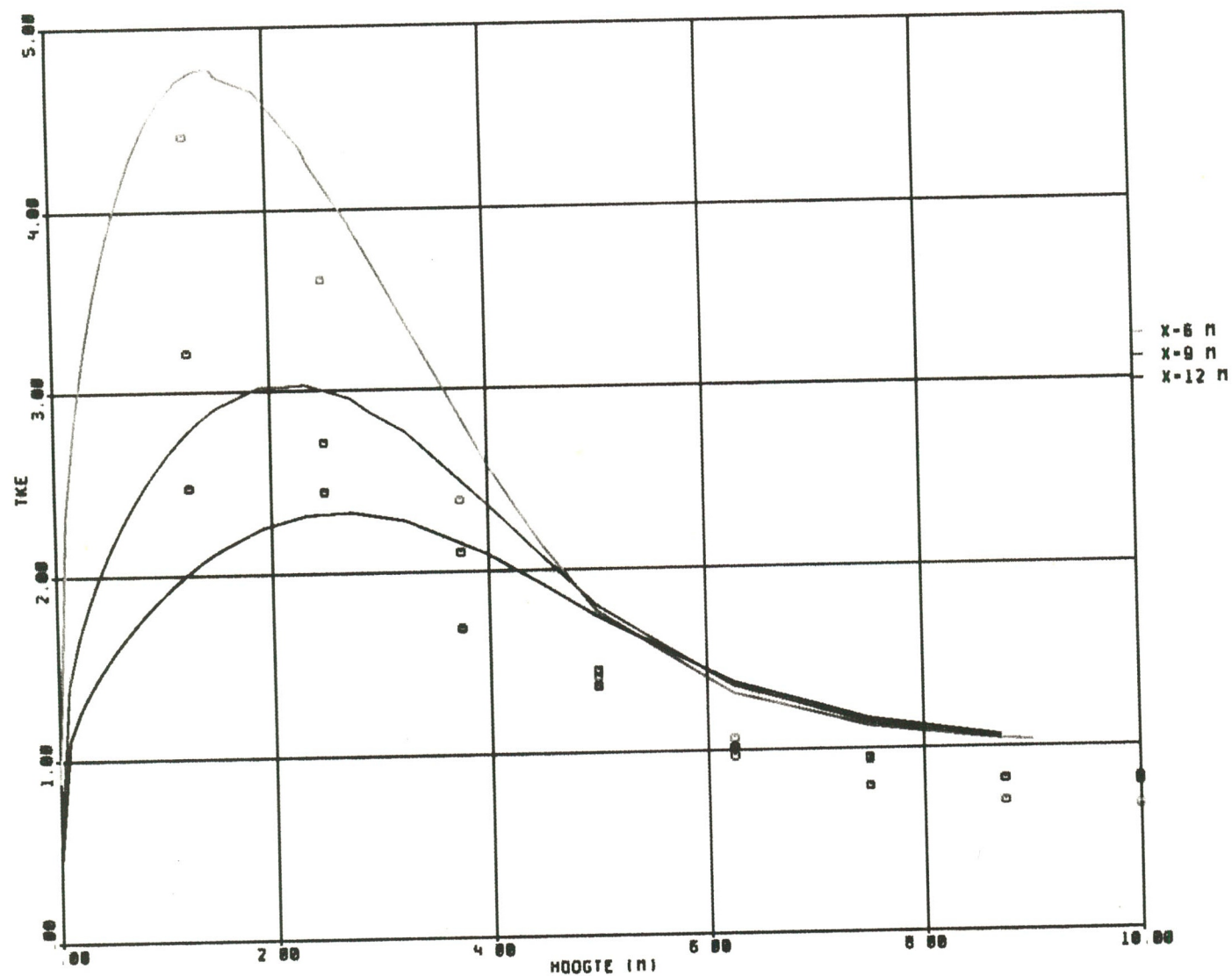
Figuur 4.8





TURBULENTE KINETISCHE ENERGIE

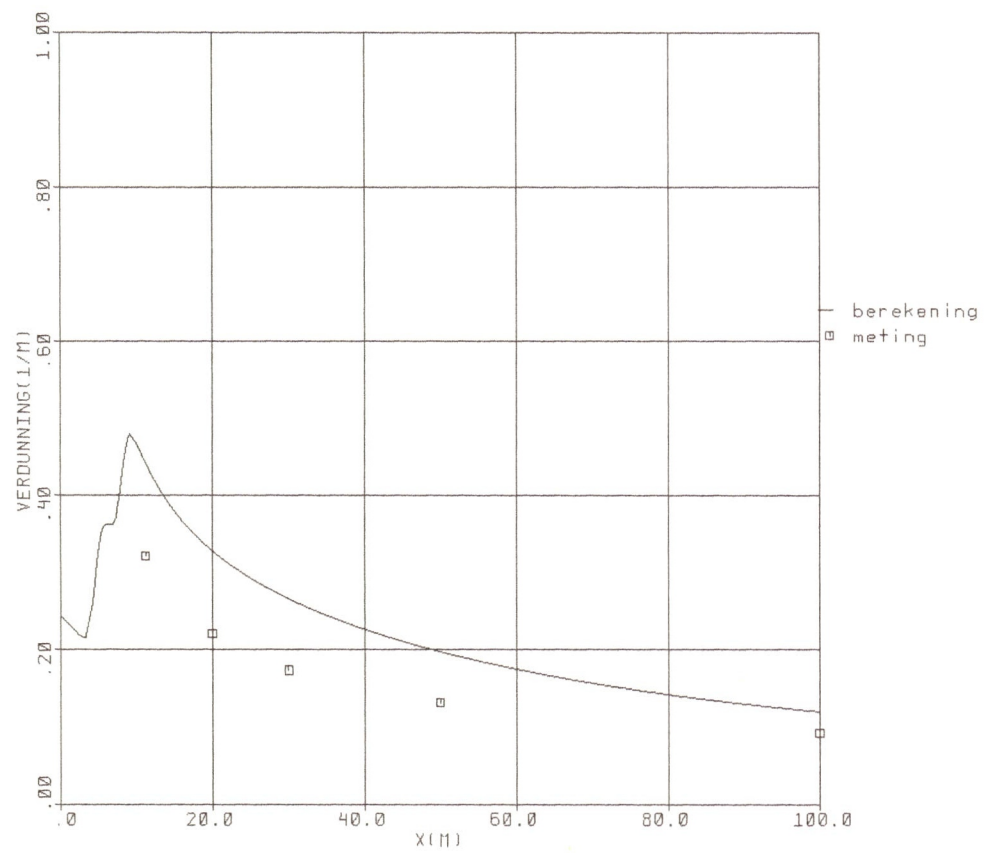
Figuur 4.9





VLAKKE WEG. RIJDEND VERKEER

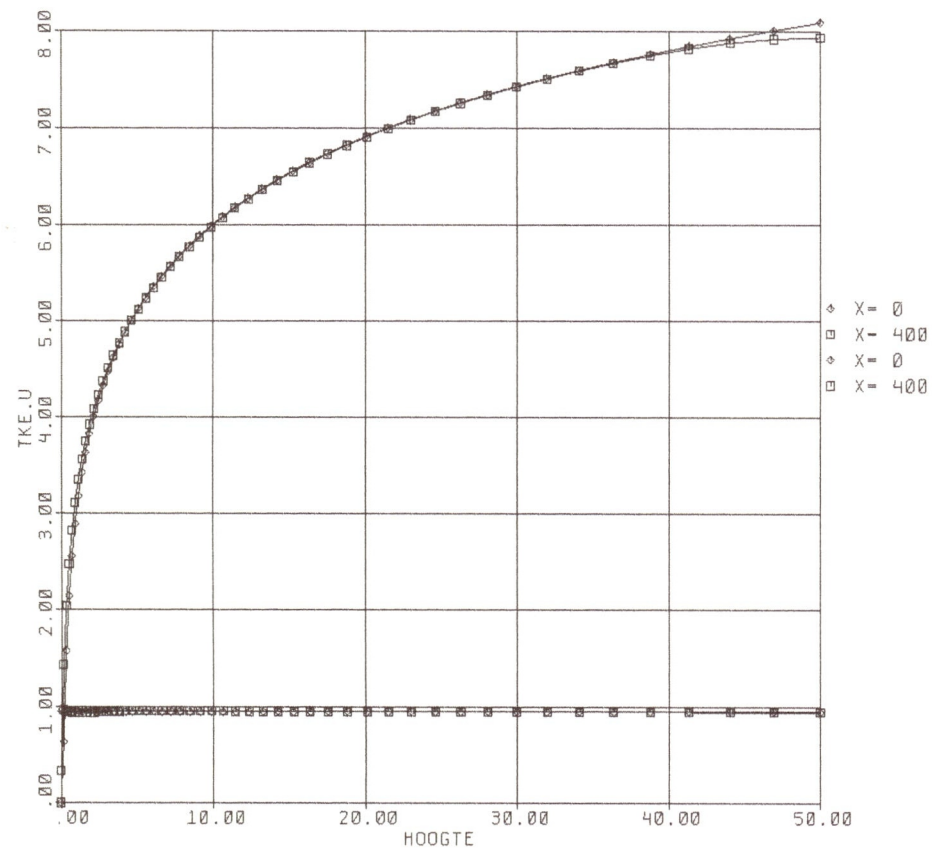
Figuur 4.10





ONTWIKKELING GRENSLAAG

Figuur 5.1





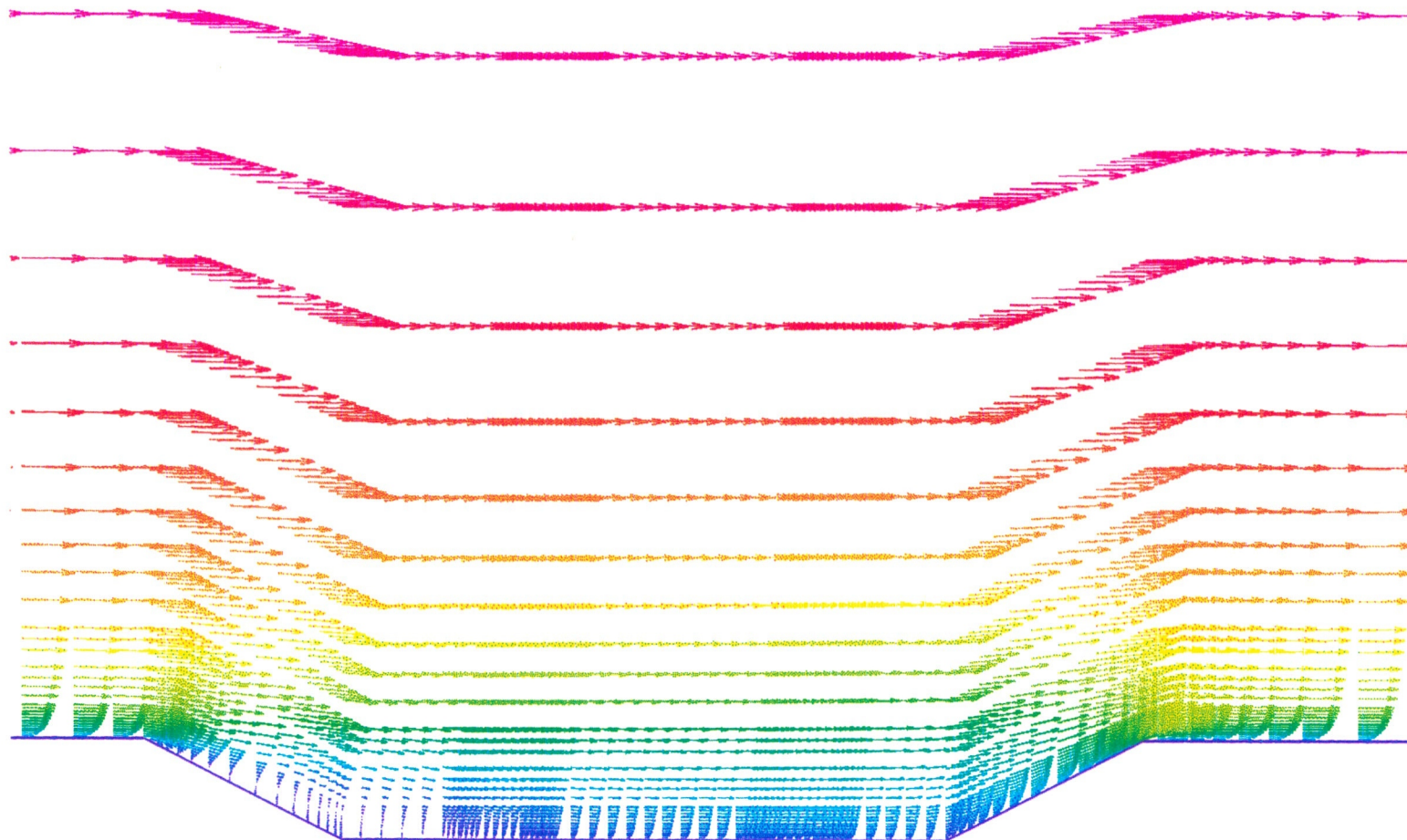
TALUD: STILSTAAND VERKEER

Figuur 5.2

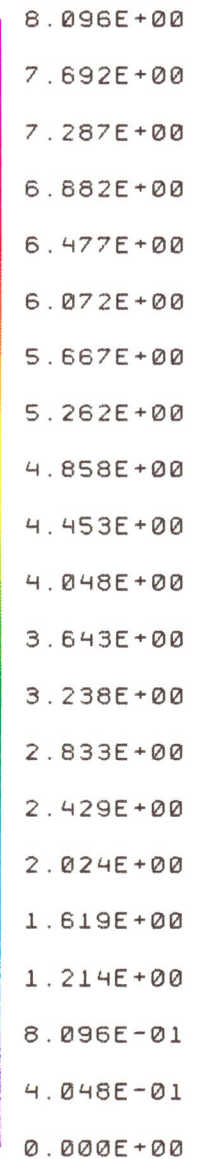
Vector Scale



1.771E+01



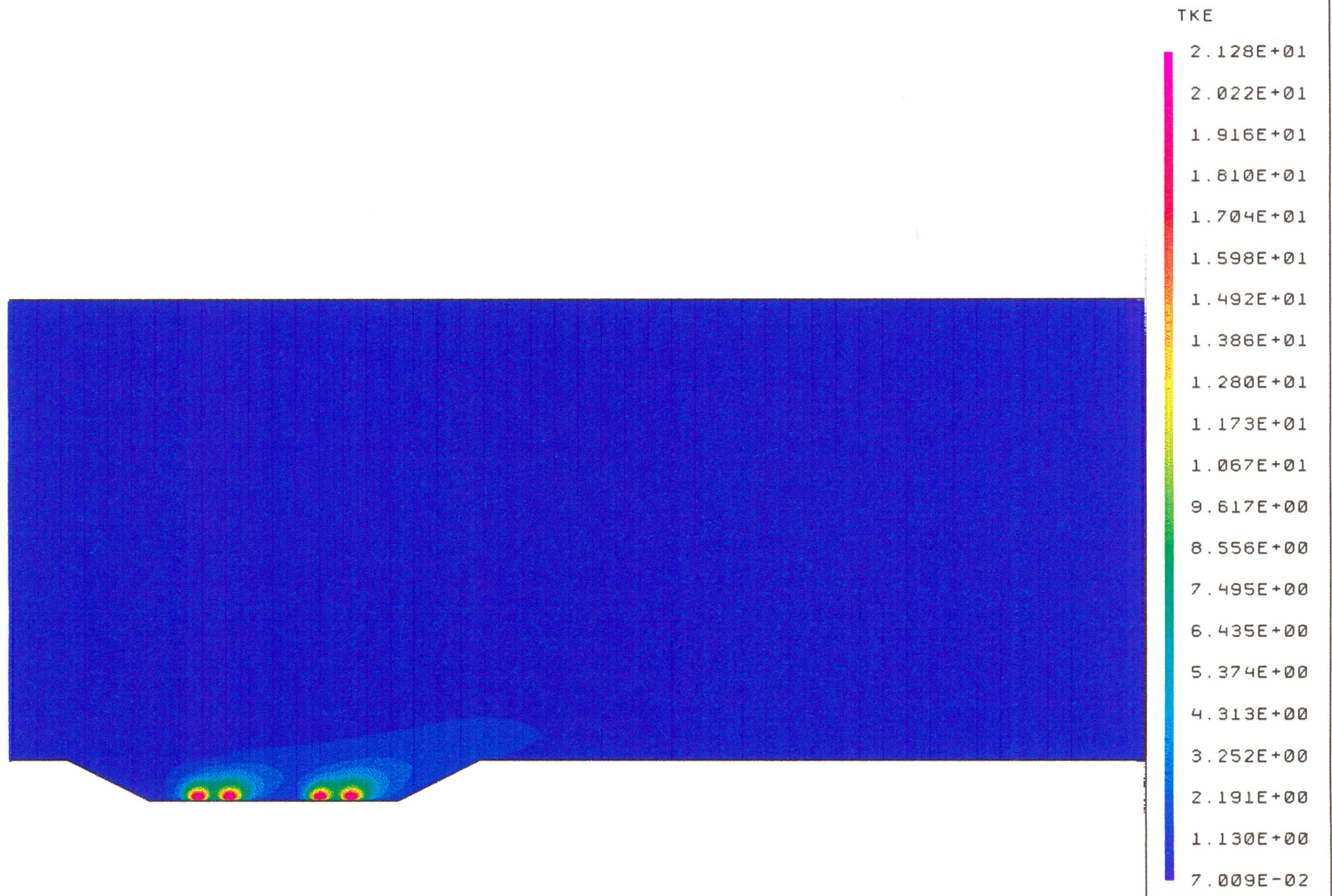
SPEED

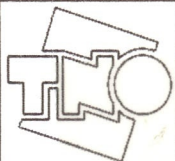




TALUD. RIJDEND VERKEER

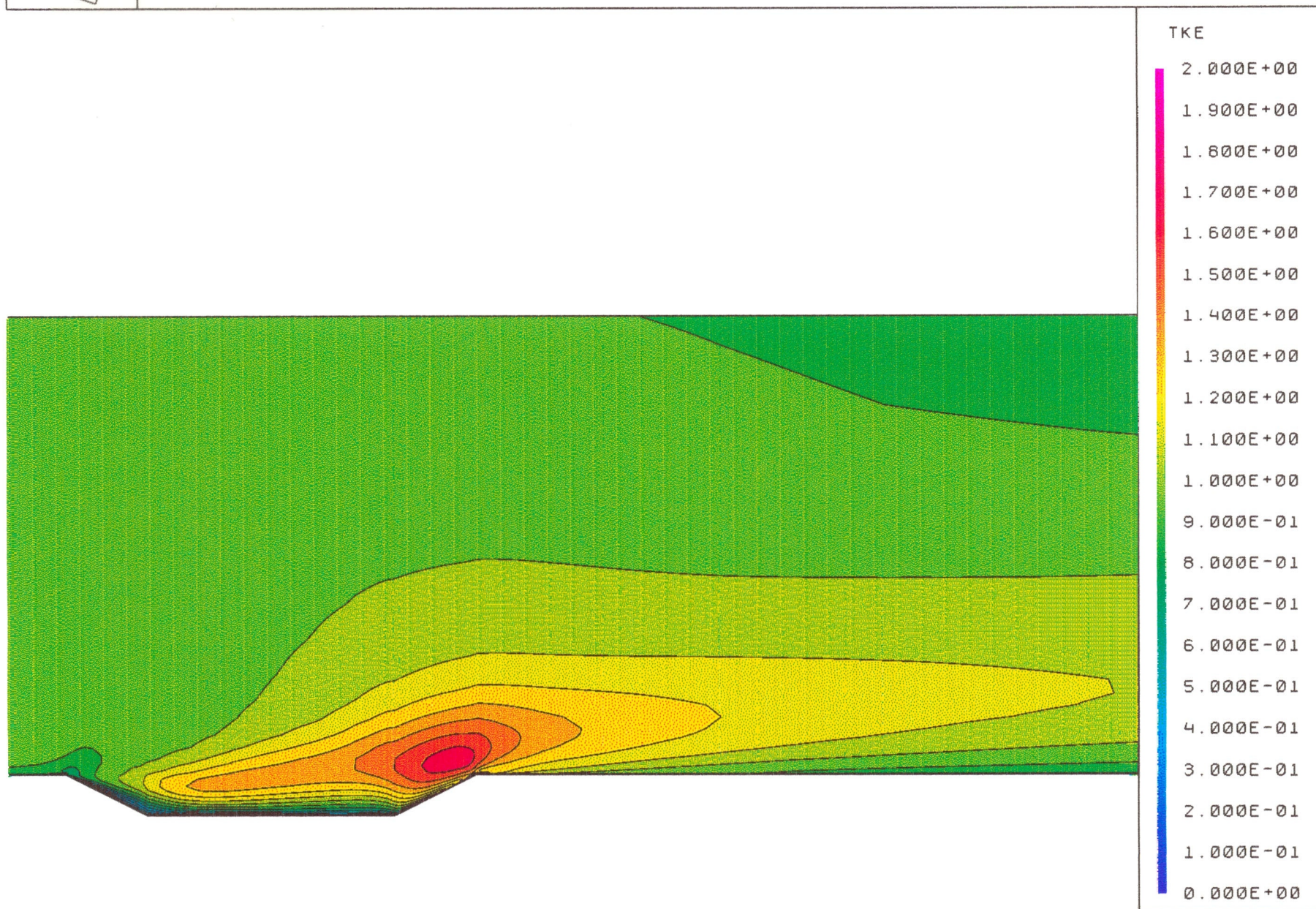
Figuur 5.3

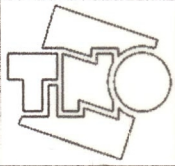




TALUD. STILSTAAND VERKEER

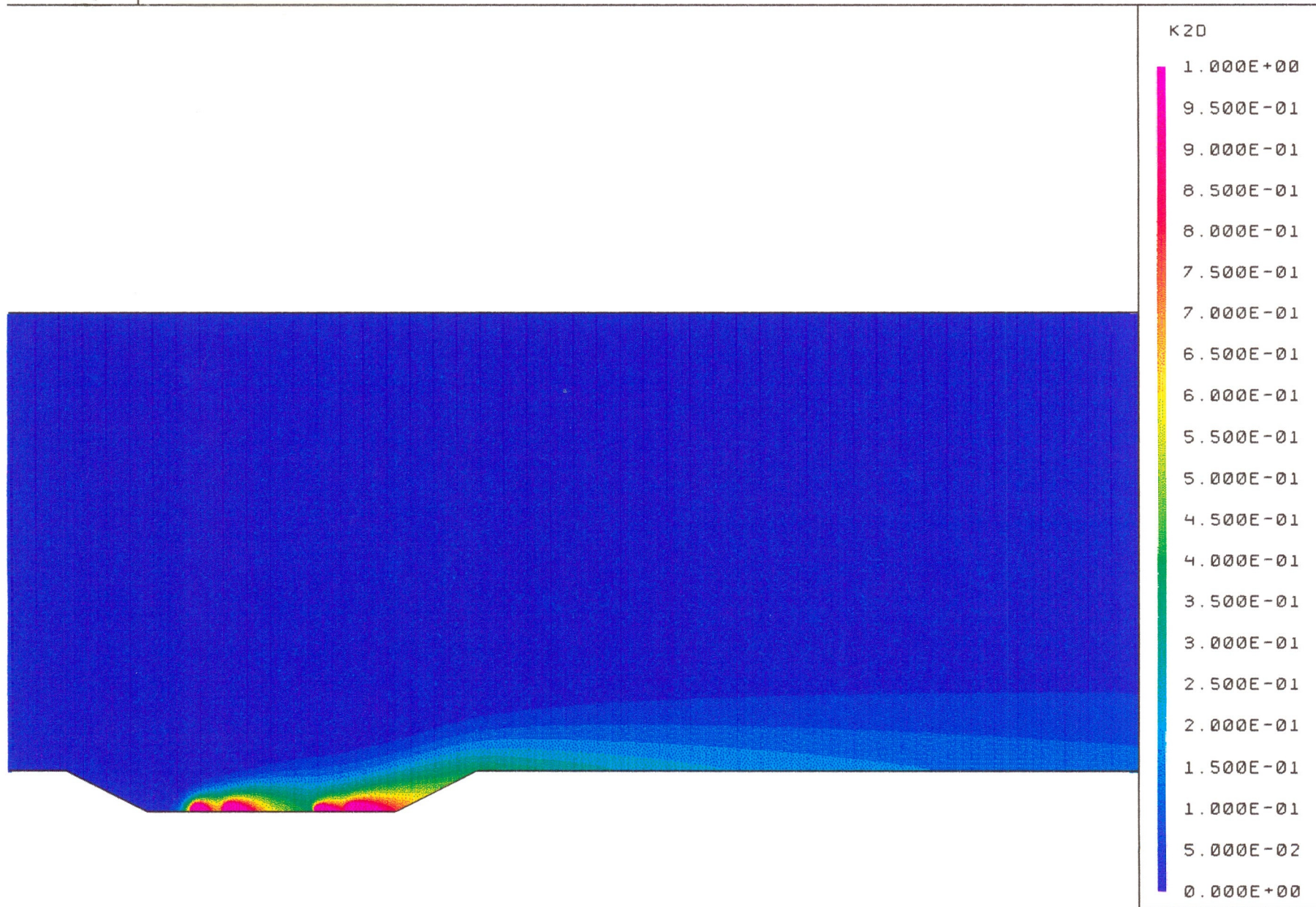
Figuur 5.4

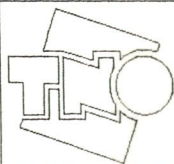




TALUD. STILSTAAND VERKEER

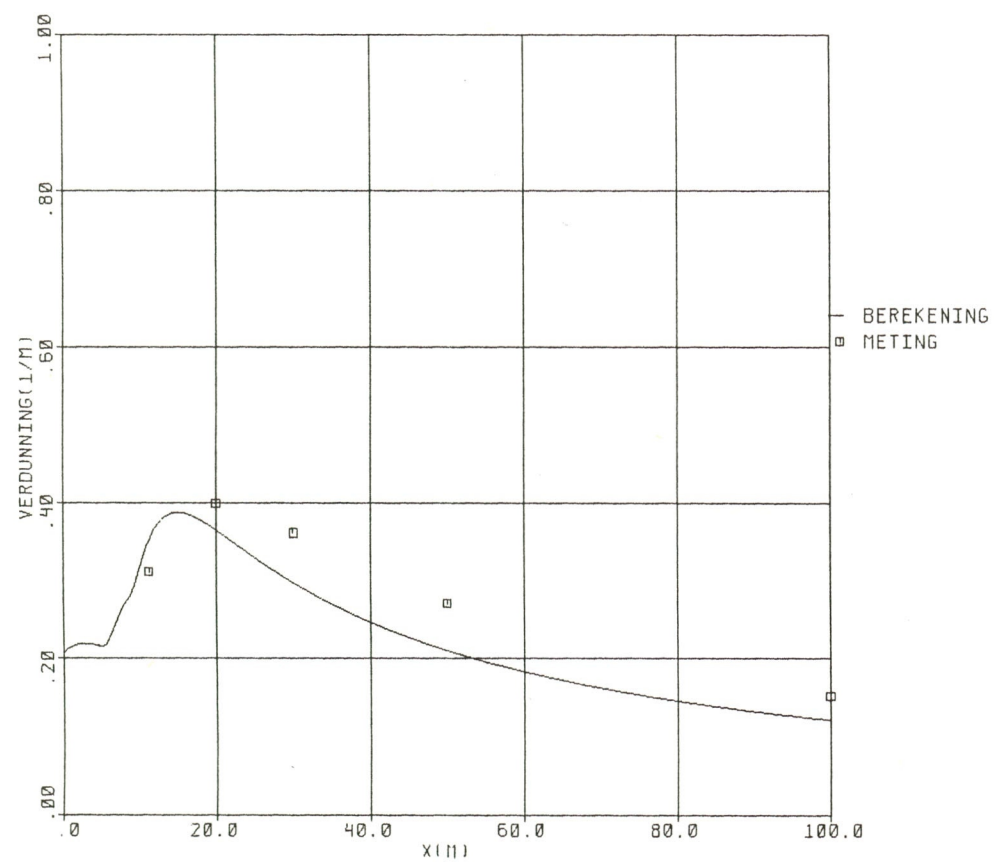
Figuur 5.5





VLAKKE WEG. STILSTAAND VERKEER

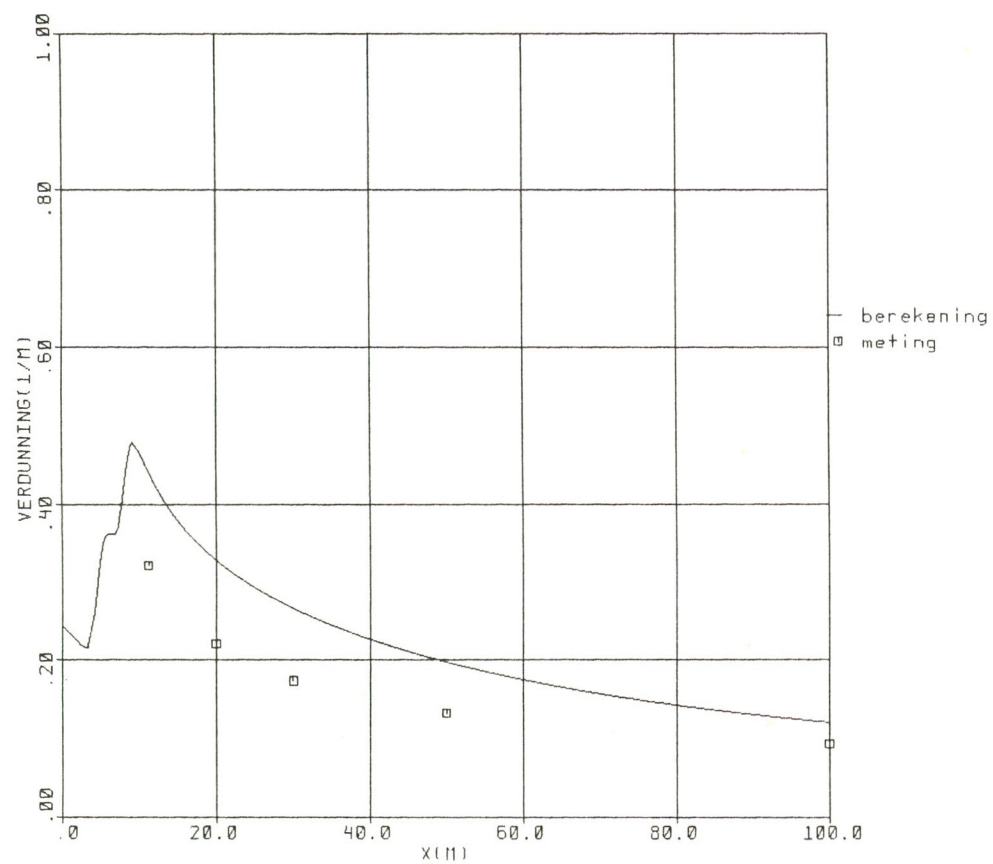
Figuur 5.6





VLAKKE WEG. RIJDEND VERKEER

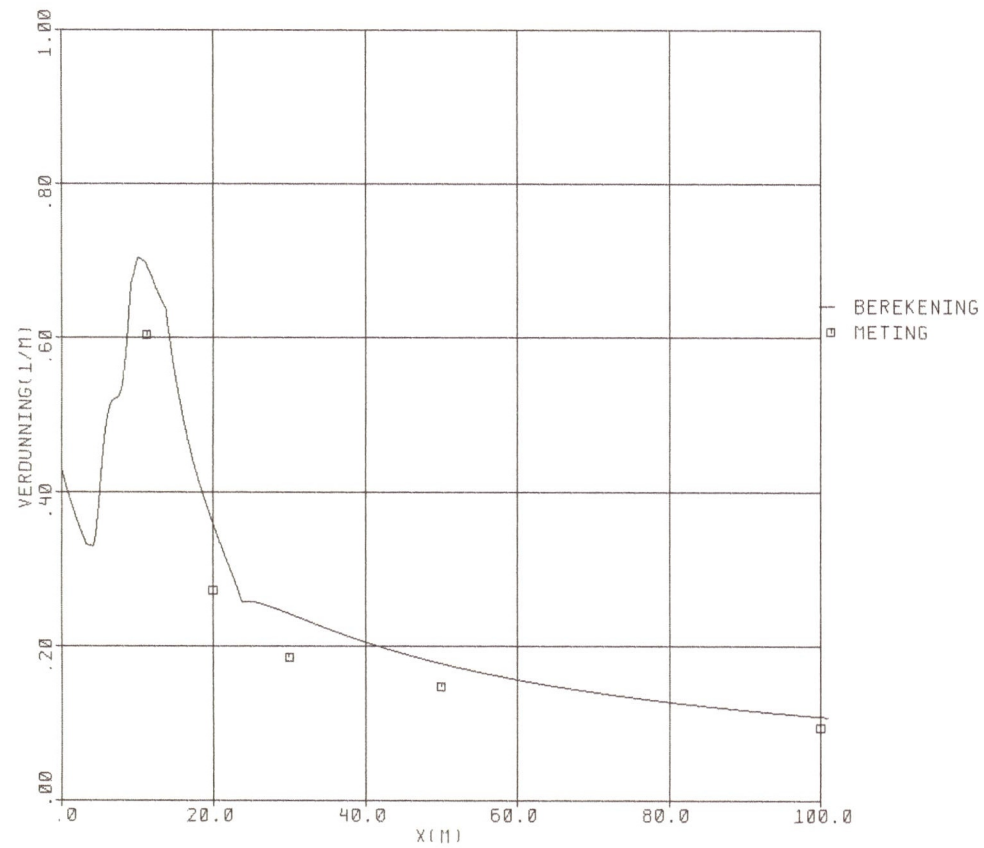
Figuur 5.7





TALUD. STILSTAAND VERKEER

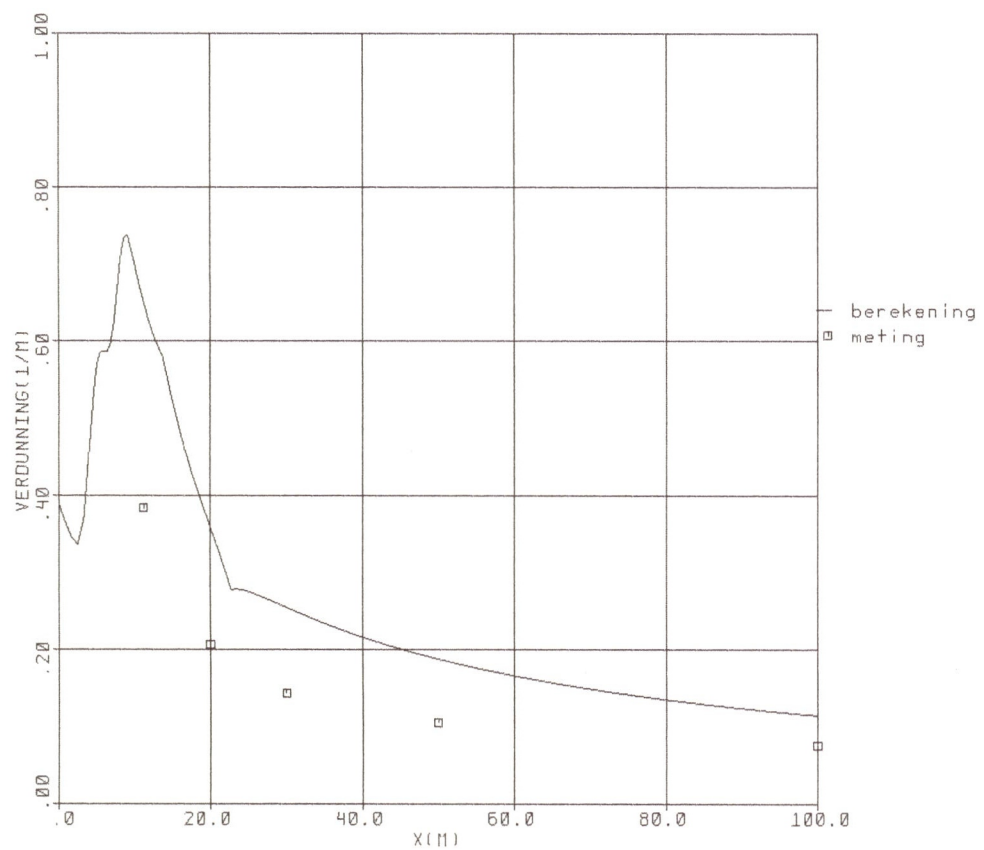
Figuur 5.8

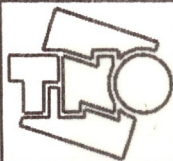




TALUD. RIJDEND VERKEER

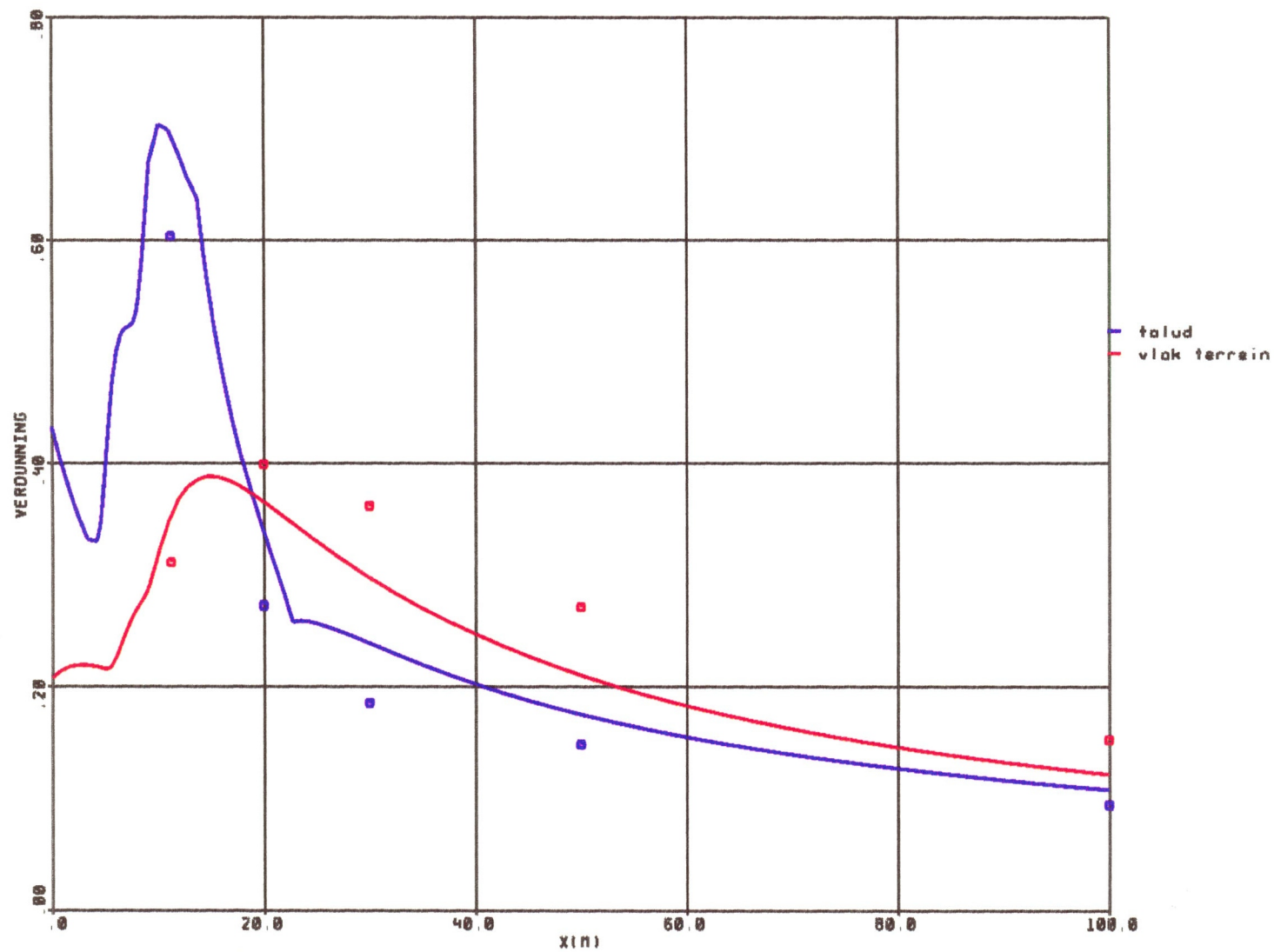
Figuur 5.9





VERGELIJKING VLAK TERREIN, TALUD

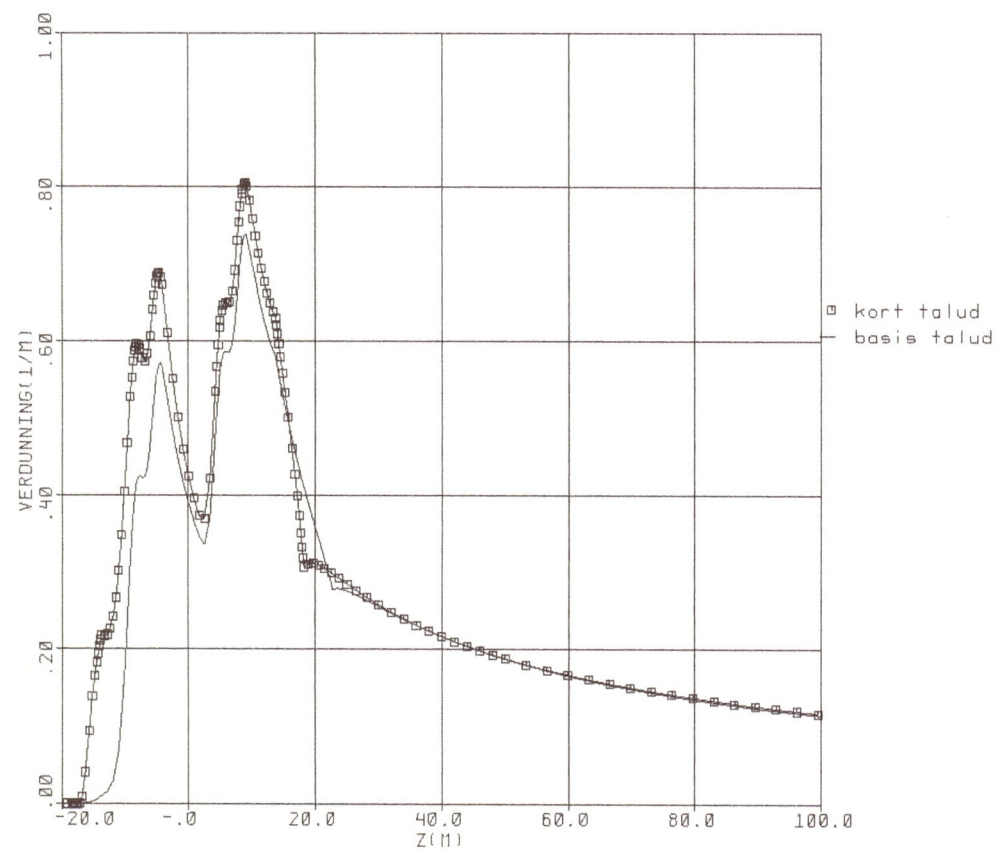
Figuur 5.10





KORT TALUD. RIJDEND VERKEER

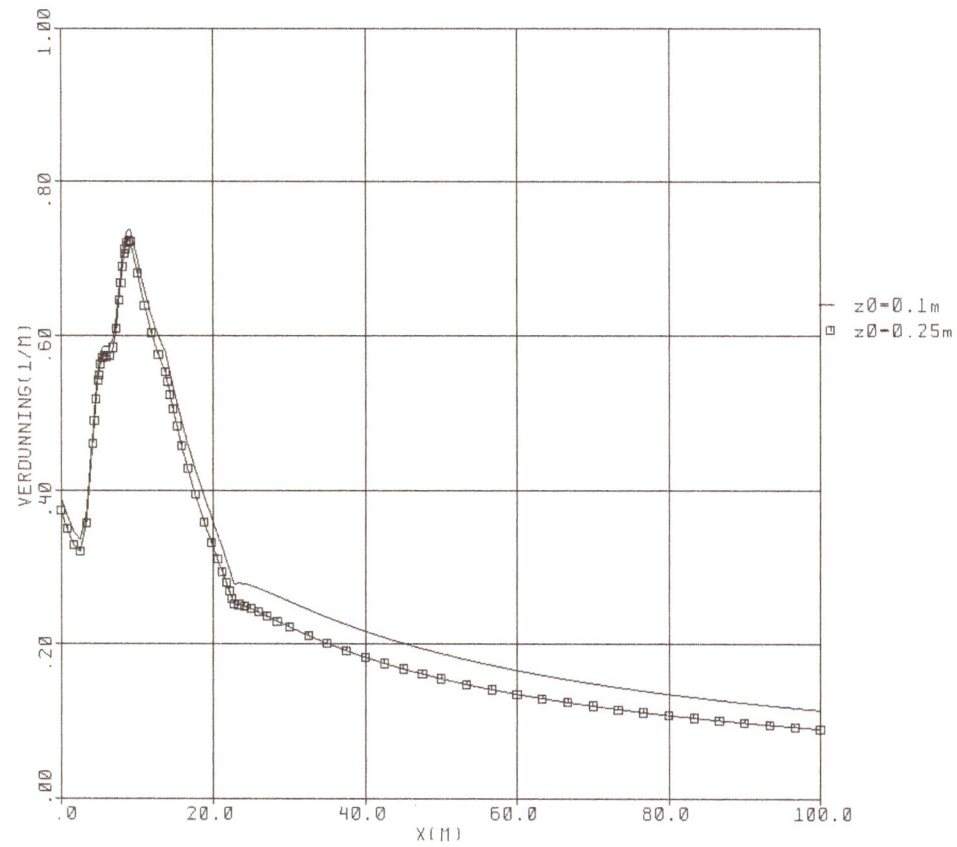
Figuur 6.1





TALUD. RIJDEND VERKEER

Figuur 6.2



Figuren A1 - A40

Verdunningsfactor K voor windtunnel versus afstanden receptorpunt in windtunnel tot hartlijn van wegsegment

Figuur	Hoek °C	V (m/s)	Meethoogte (mm)	Wegligging
A1	140	0	6	vlak
A2	160			
A3	180			
A4	200			
A5	220			
A6	140	12	6	vlak
A7	160			
A8	180			
A9	200			
A10	220			
A11	140	0	plaatsafhankelijk	vlak
A12	160			
A13	180			
A14	200			
A15	220			
A16	140	12	plaatsafhankelijk	vlak
A17	160			
A18	180			
A19	200			
A20	220			

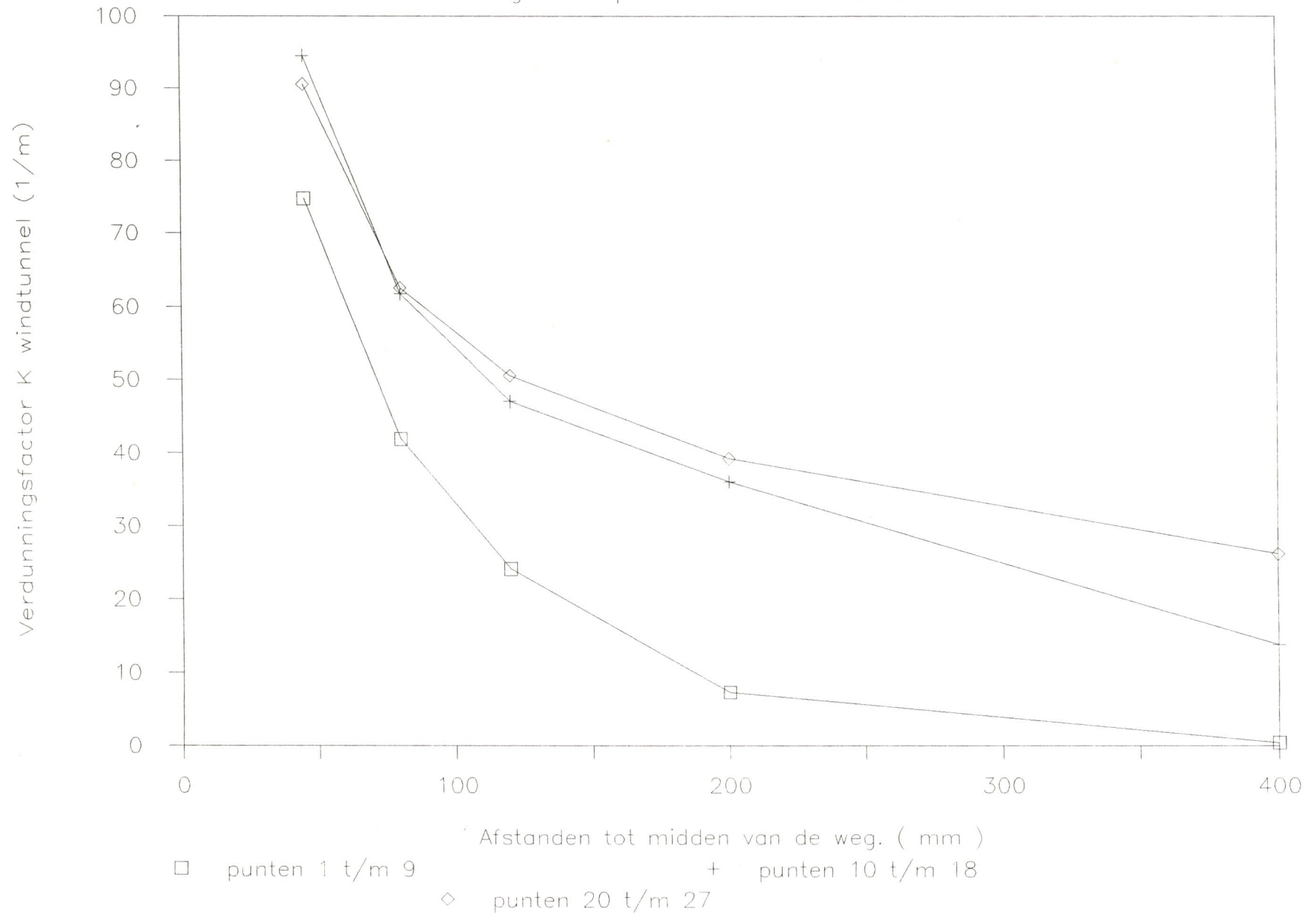
Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

Figuur	Hoek °C	V (m/s)	Meethoogte (mm)	Wegligging
A21	140	0	6	verzonken
A22	160			
A23	180			
A24	200			
A25	220			
A26	140	12	6	verzonken
A27	160			
A28	180			
A29	200			
A30	220			
A31	140	0	plaatsafhankelijk	verzonken
A32	160			
A33	180			
A34	200			
A35	220			
A36	140	12	plaatsafhankelijk	verzonken
A37	160			
A38	180			
A39	200			
A40	220			

HOEK 140 gr. $W/U = 4$

Hoogte meetp. = 6 mm

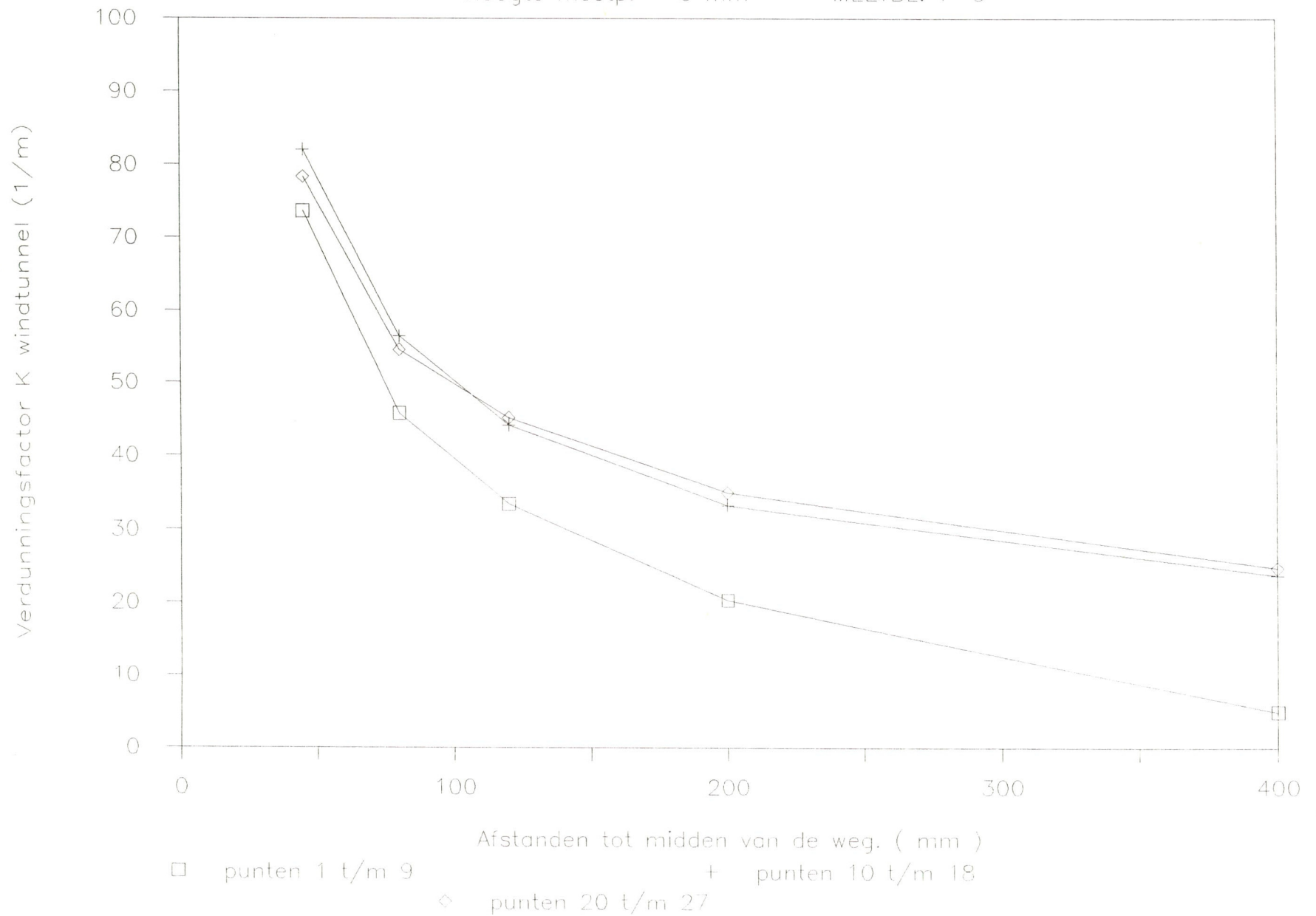
MEETBL. 7-9



HOEK 160 gr. $W/U = 4$

Hoogte meetp. = 6 mm

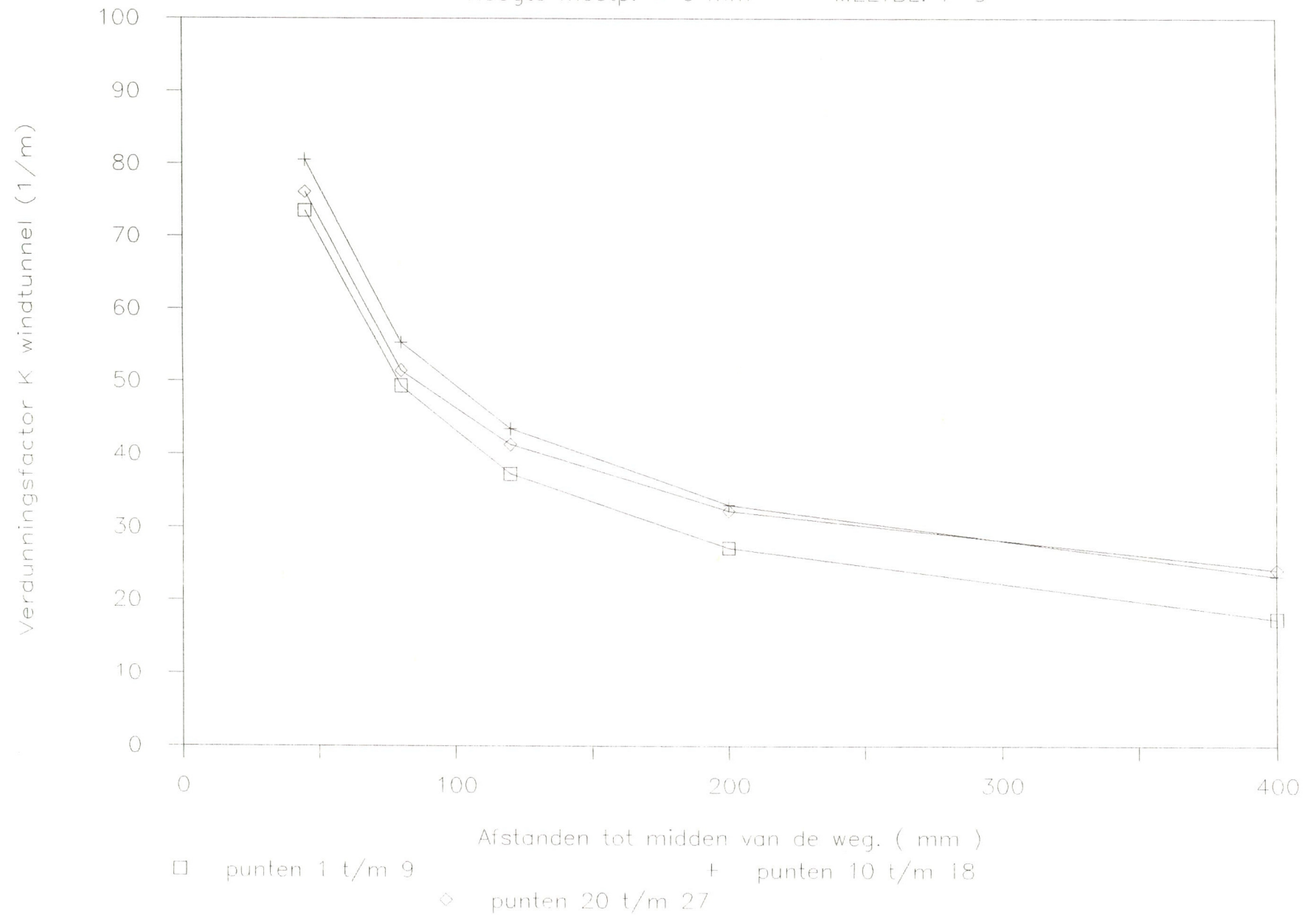
MEETBL. 7-9



HOEK 180 gr. $W/U = 4$

Hoogte meetp. = 6 mm

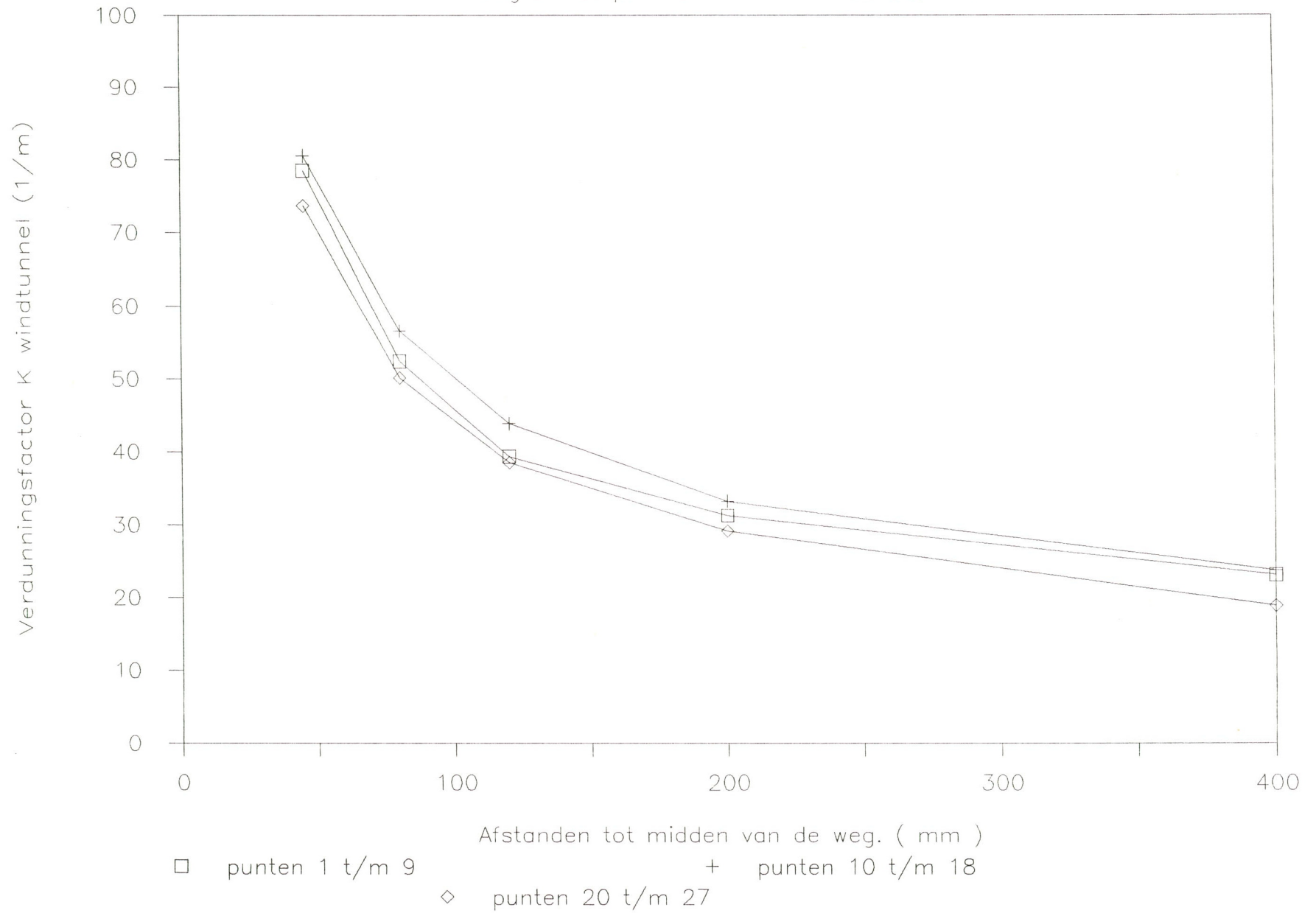
MEETBL. 7-9



HOEK 200 gr. $W/U = 4$

Hoogte meetp. = 6 mm

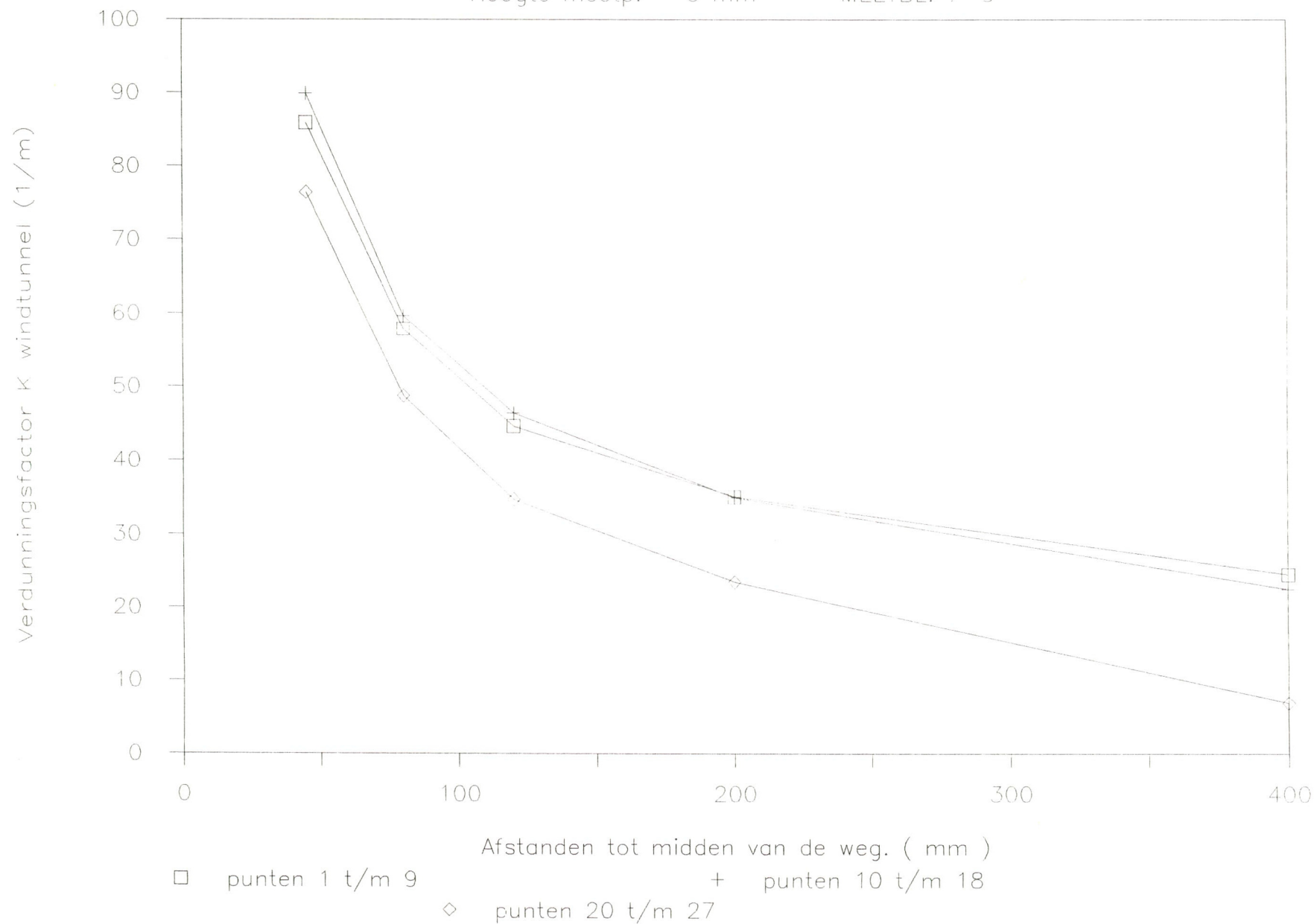
MEETBL. 7-9



HOEK 220 gr. $W/U = 4$

Hoogte meetp. = 6 mm

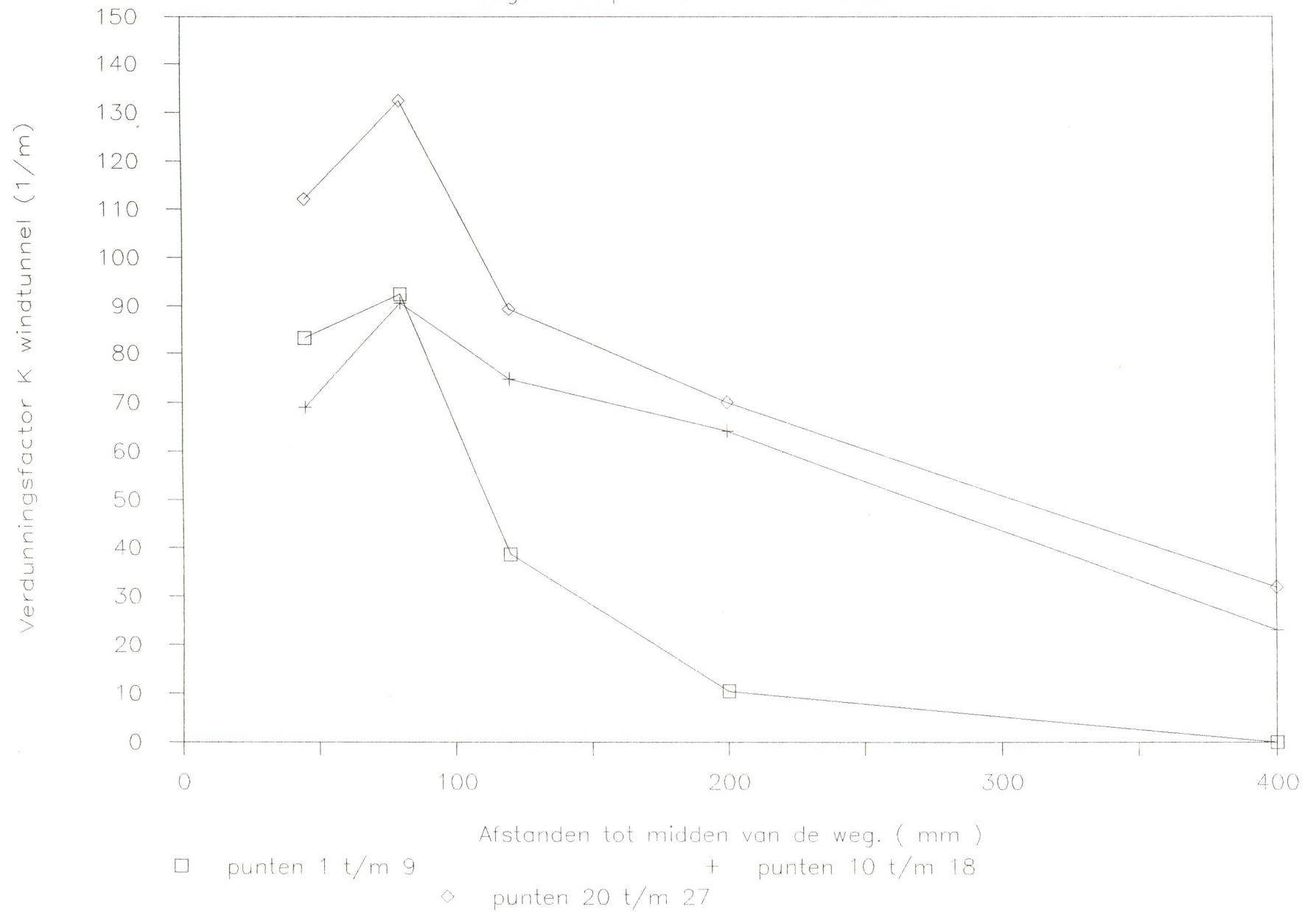
MEETBL. 7-9



HOEK 140 gr. $W/U = 0$

Hoogte meetp. = 6 mm

MEETBL. 10-11

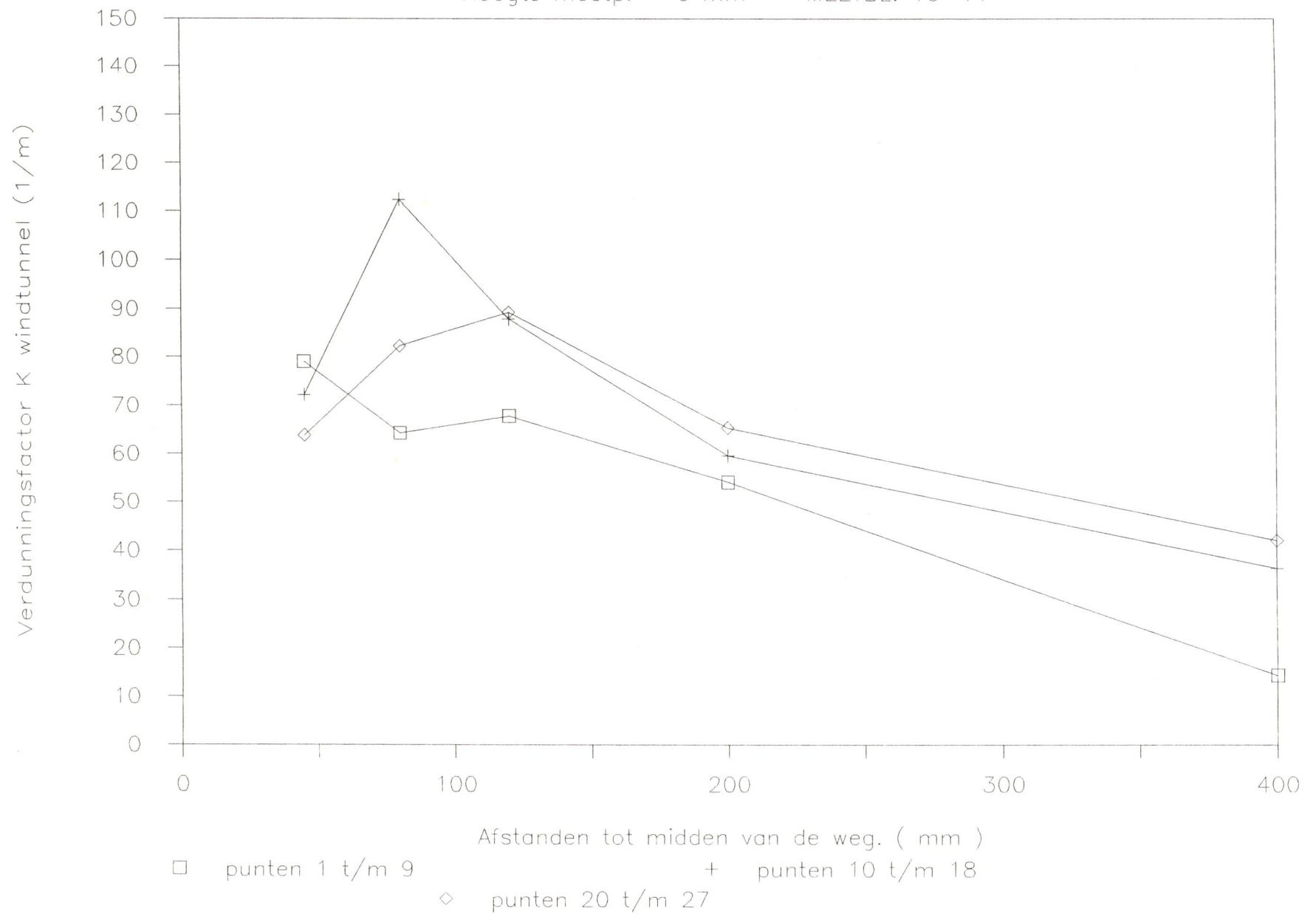


HOEK 160 gr.

$W/U = 0$

Hoogte meetp. = 6 mm

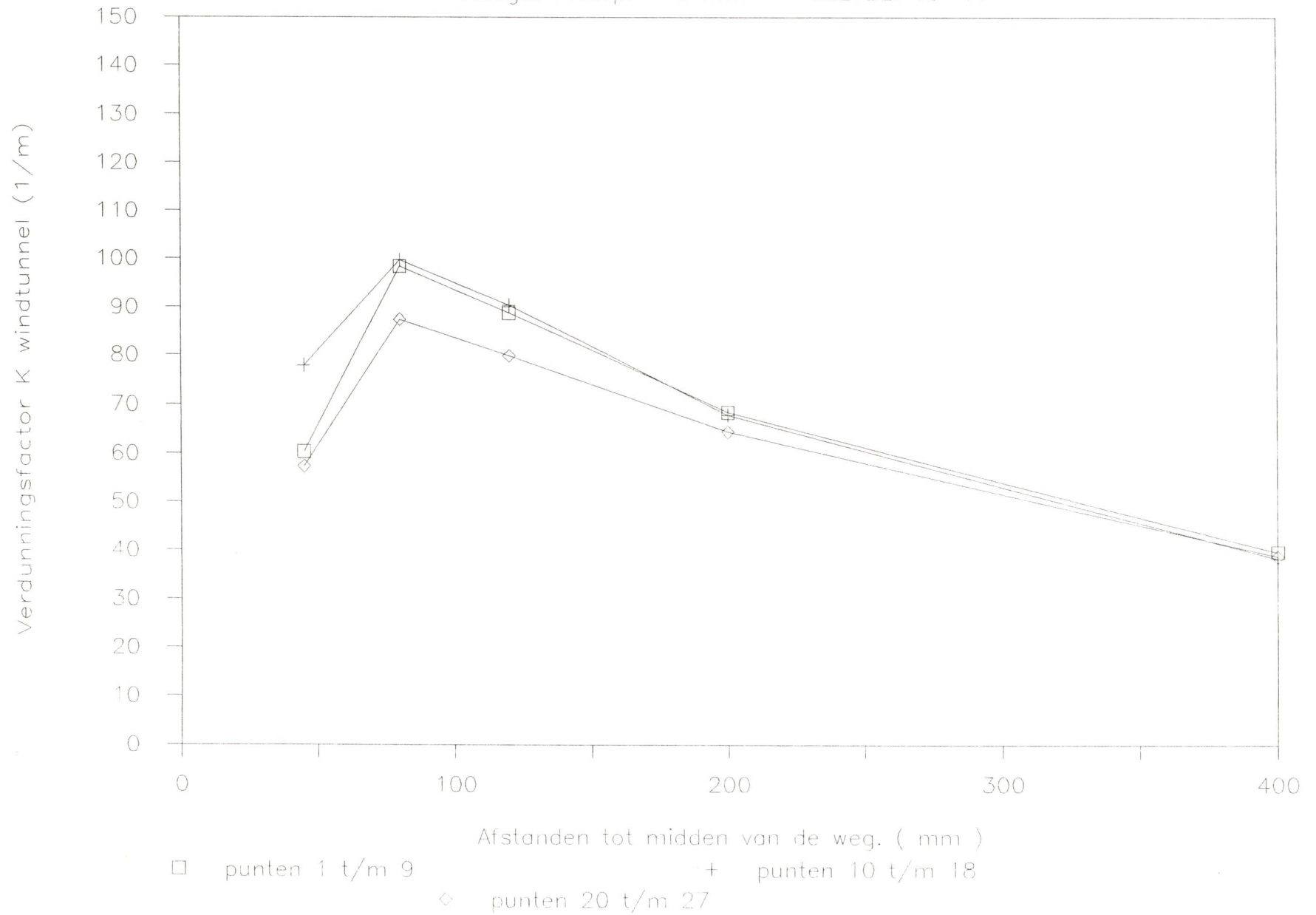
MEETBL. 10-11



HOEK 180 gr. $W/U = 0$

Hoogte meetp. = 6 mm

MEETBL. 10-11

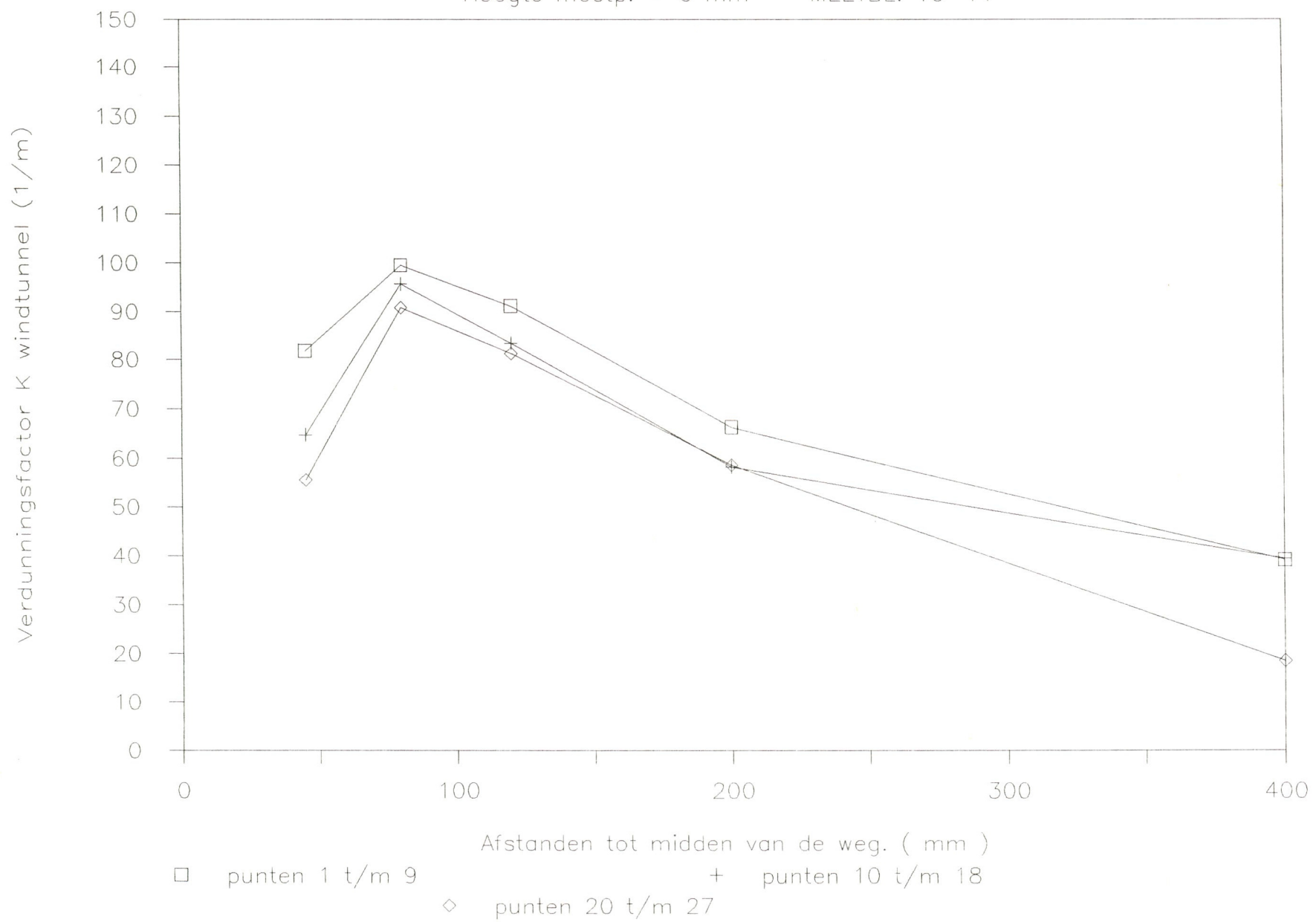


HOEK 200 gr.

W/U = 0

Hoogte meetp. = 6 mm

MEETBL. 10-11

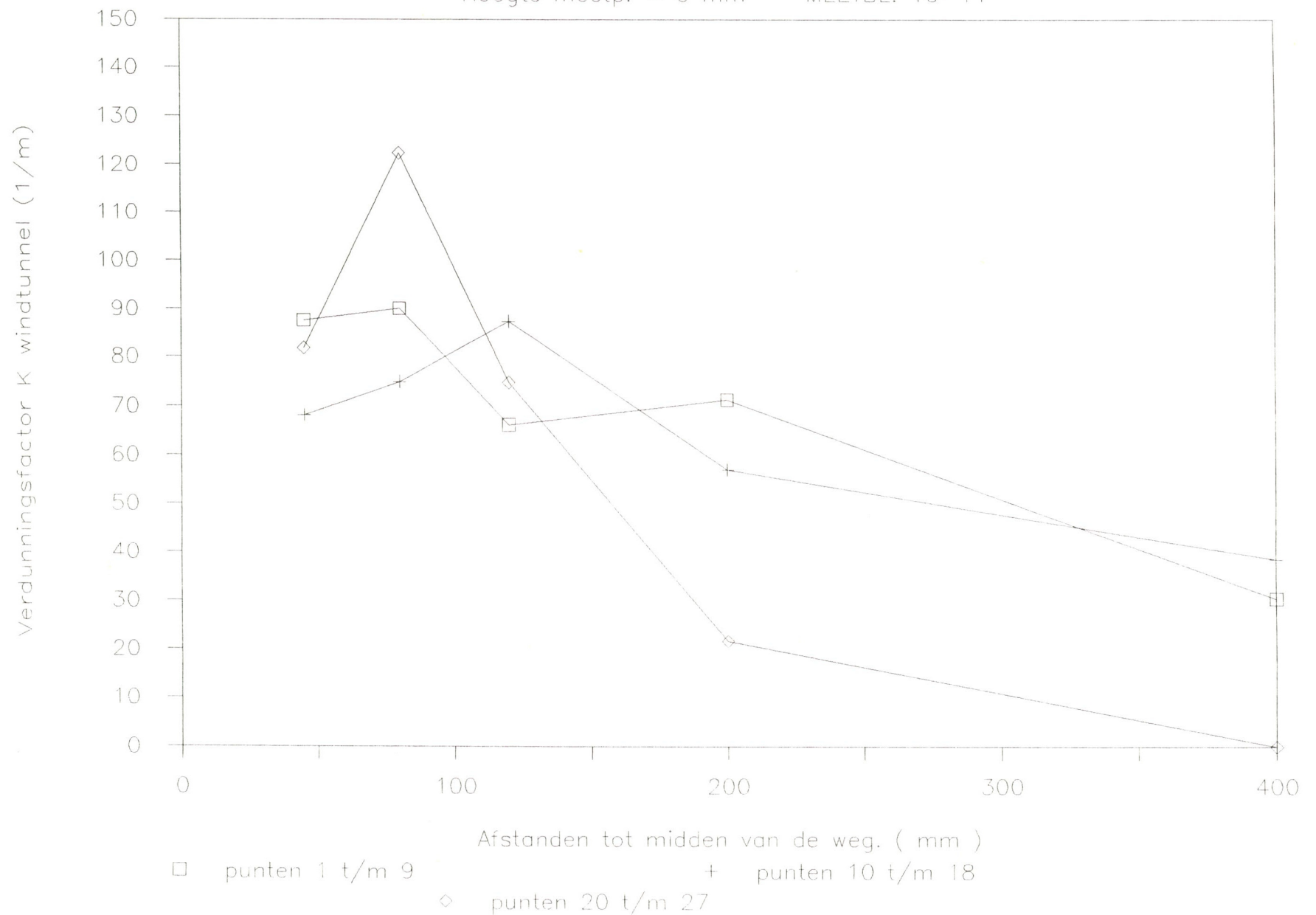


HOEK 220 gr.

$W/U = 0$

Hoogte meetp. = 6 mm

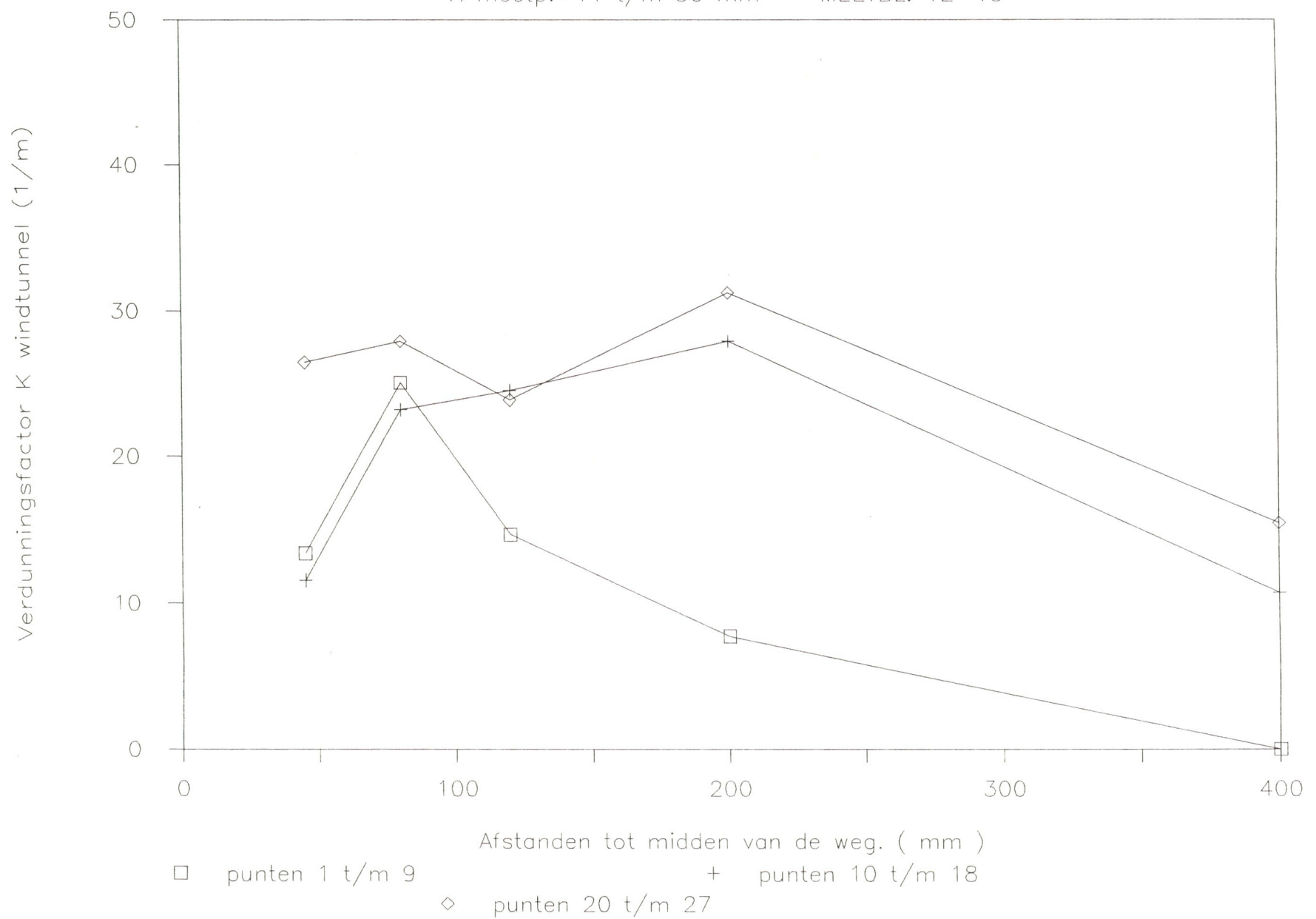
MEETBL. 10-11



HOEK 140 gr. $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm

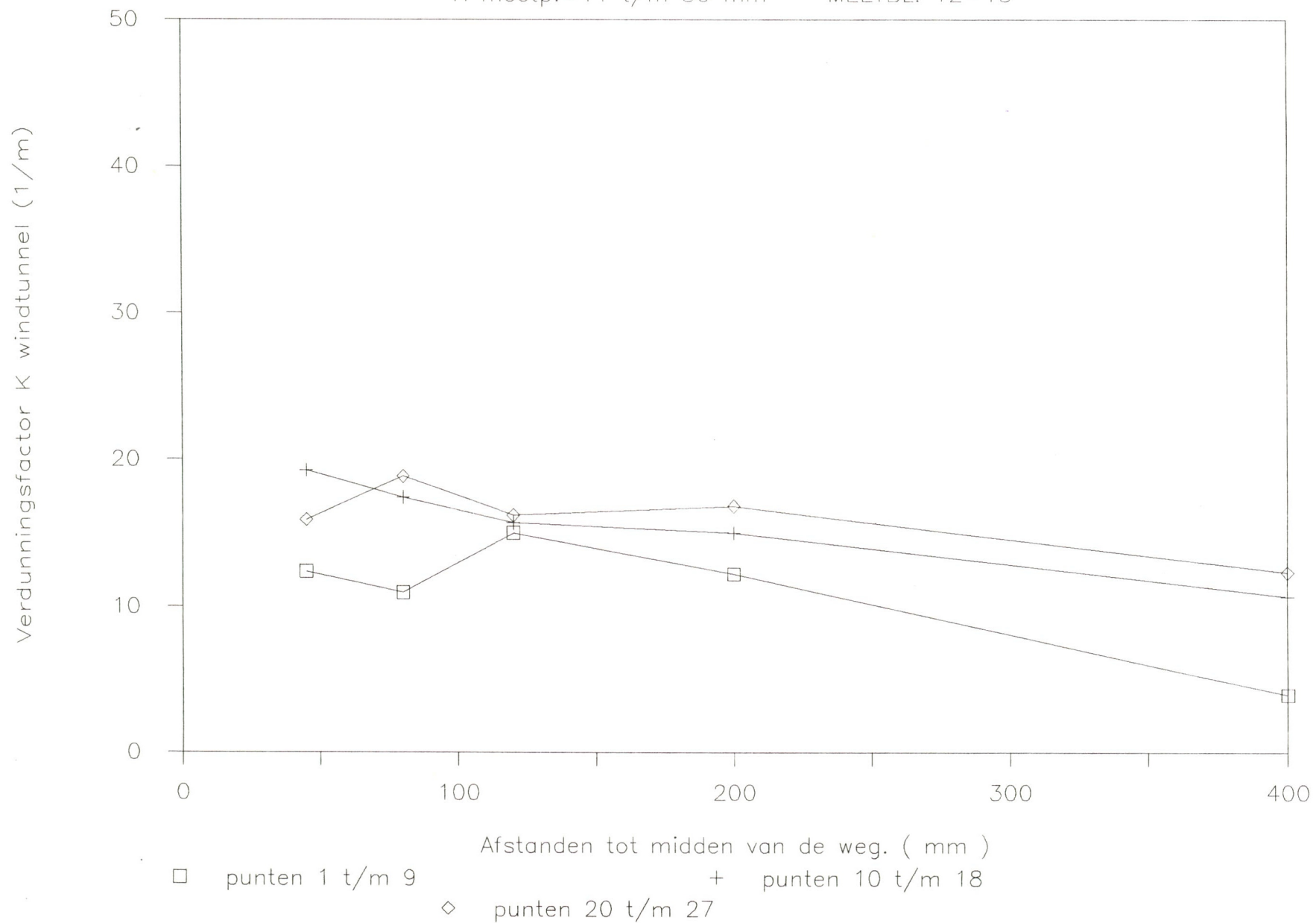
MEETBL. 12-13



HOEK 160 gr. $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm

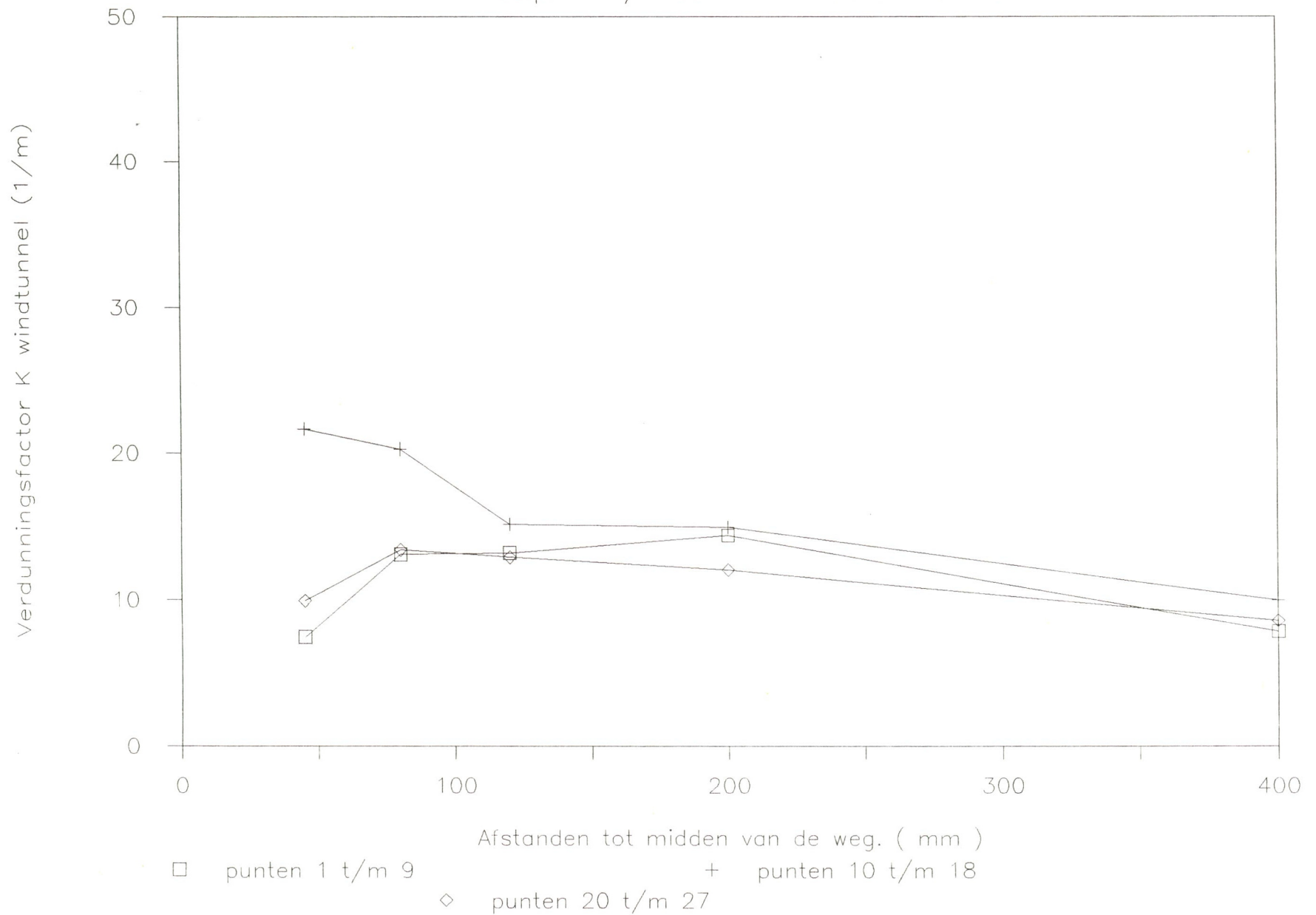
MEETBL. 12-13



HOEK 180 gr. $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm

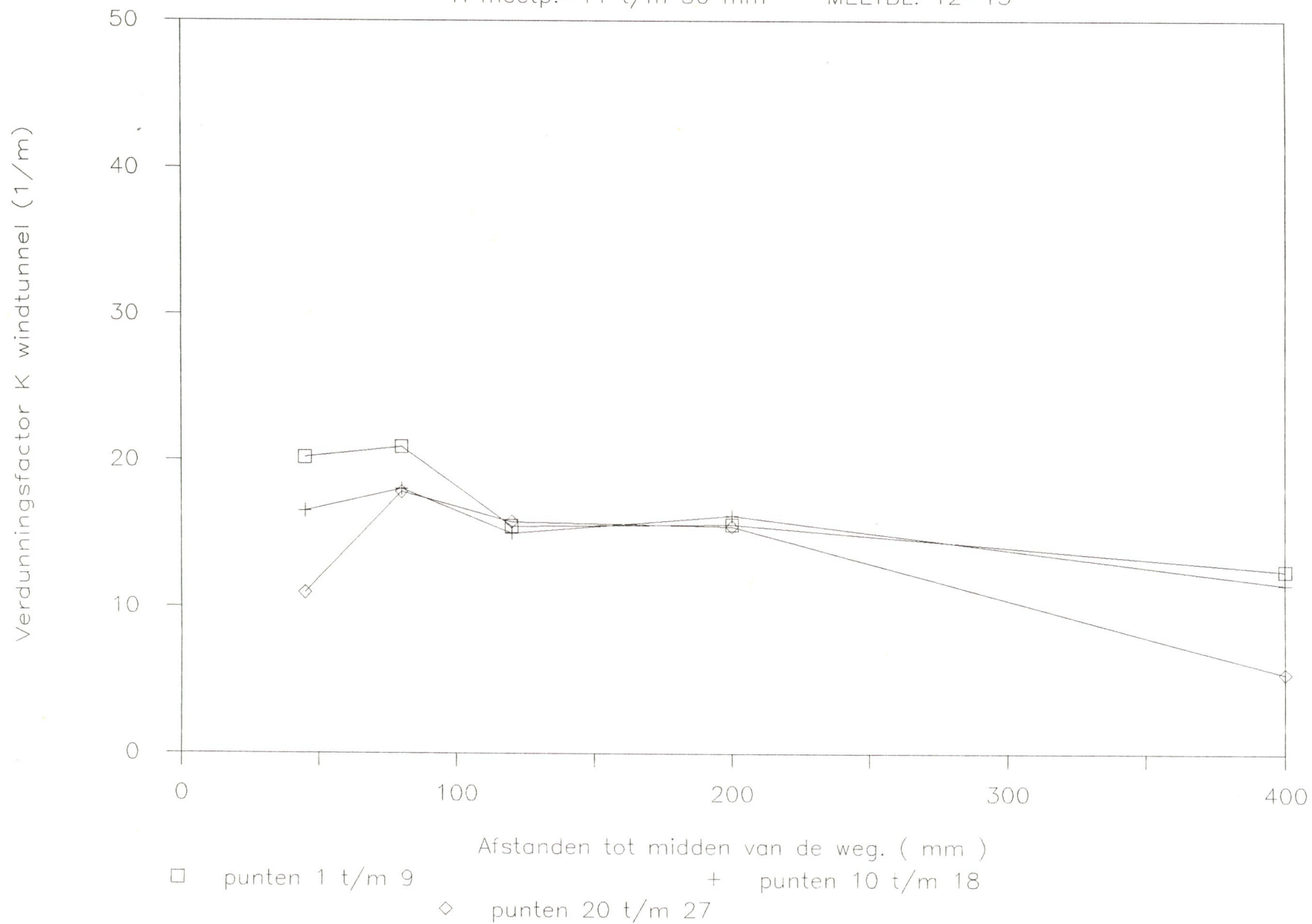
MEETBL. 12-13



HOEK 200 gr. $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm

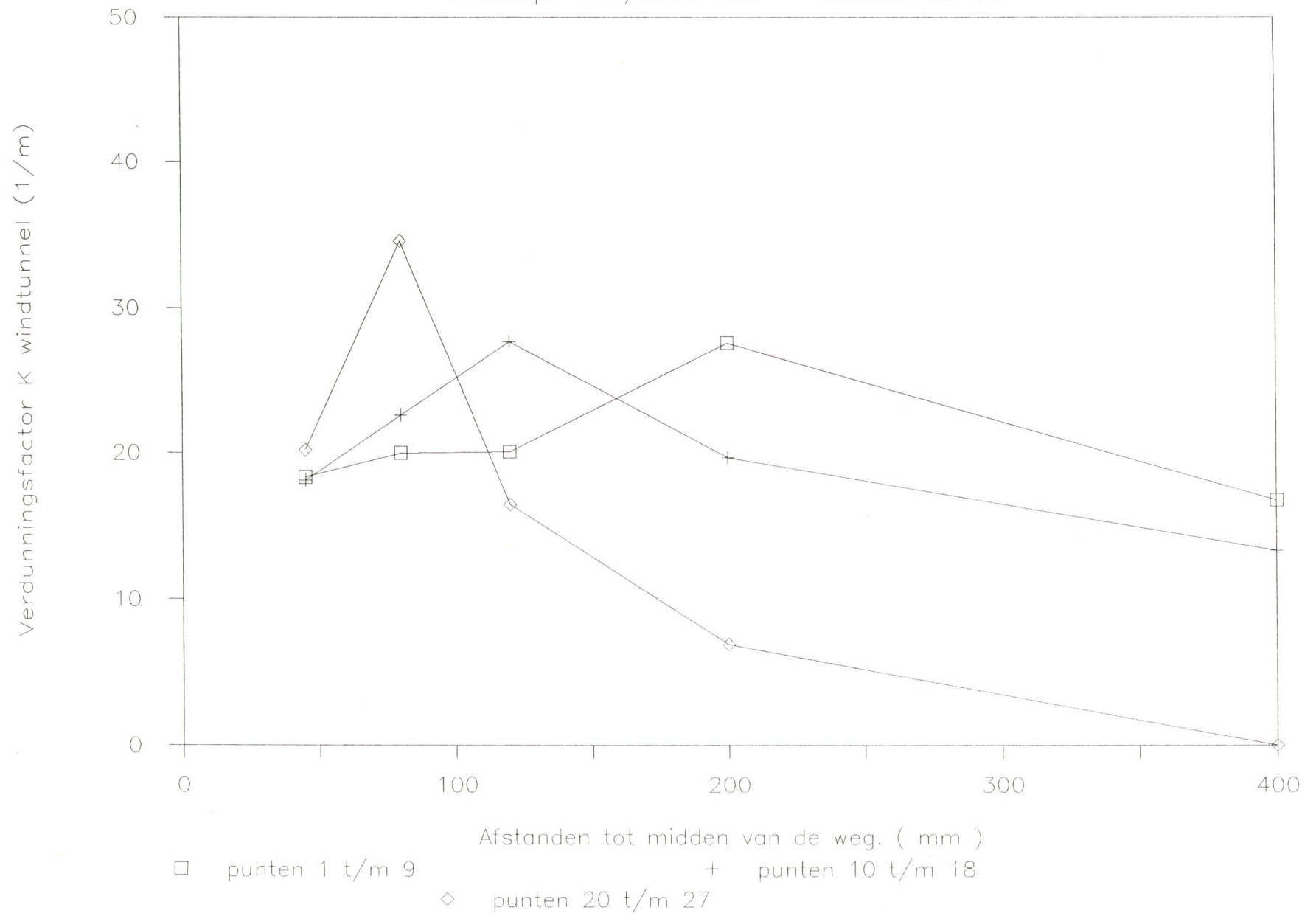
MEETBL. 12-13



HOEK 220 gr. $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm

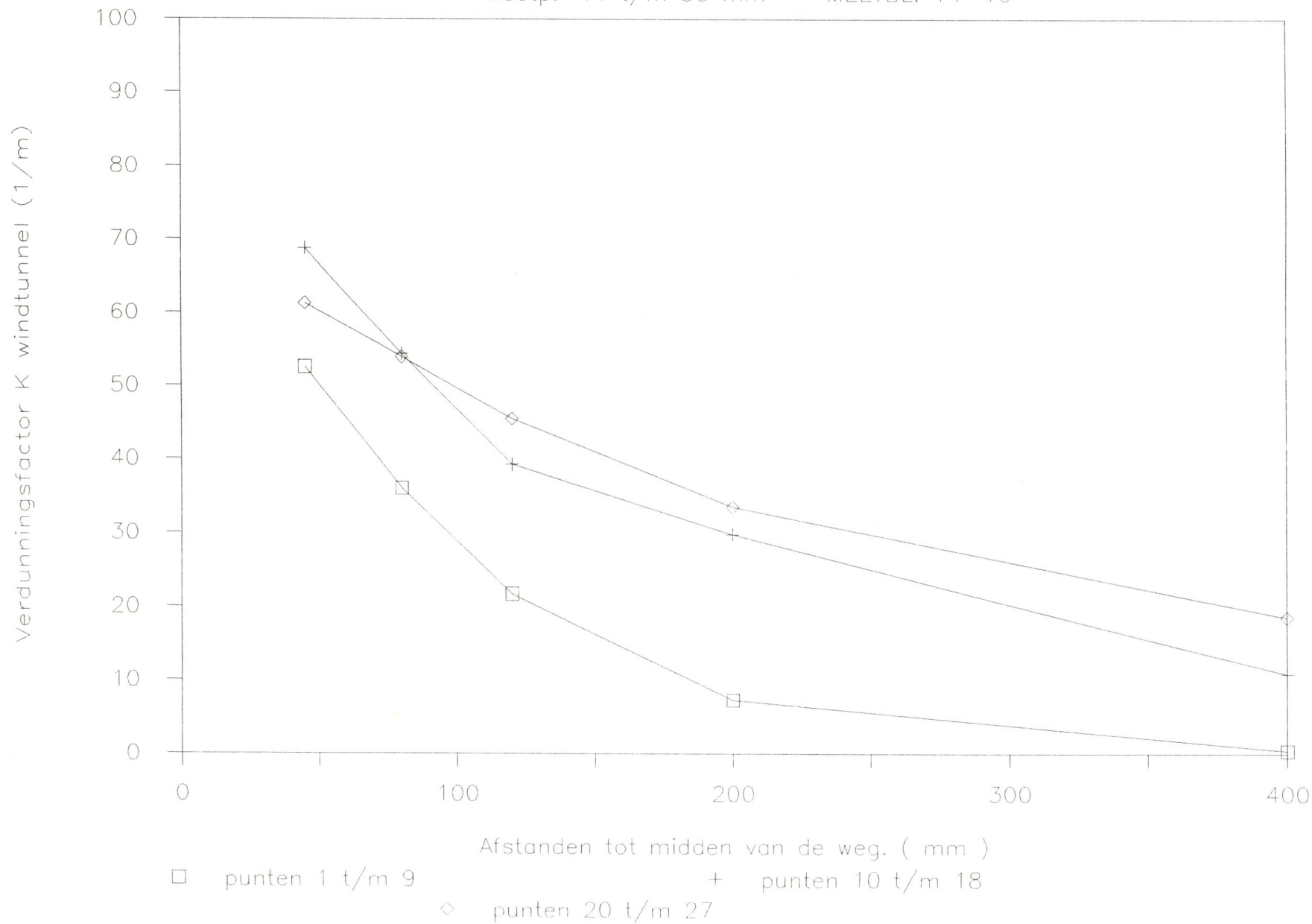
MEETBL. 12-13



HOEK 140 gr. $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm

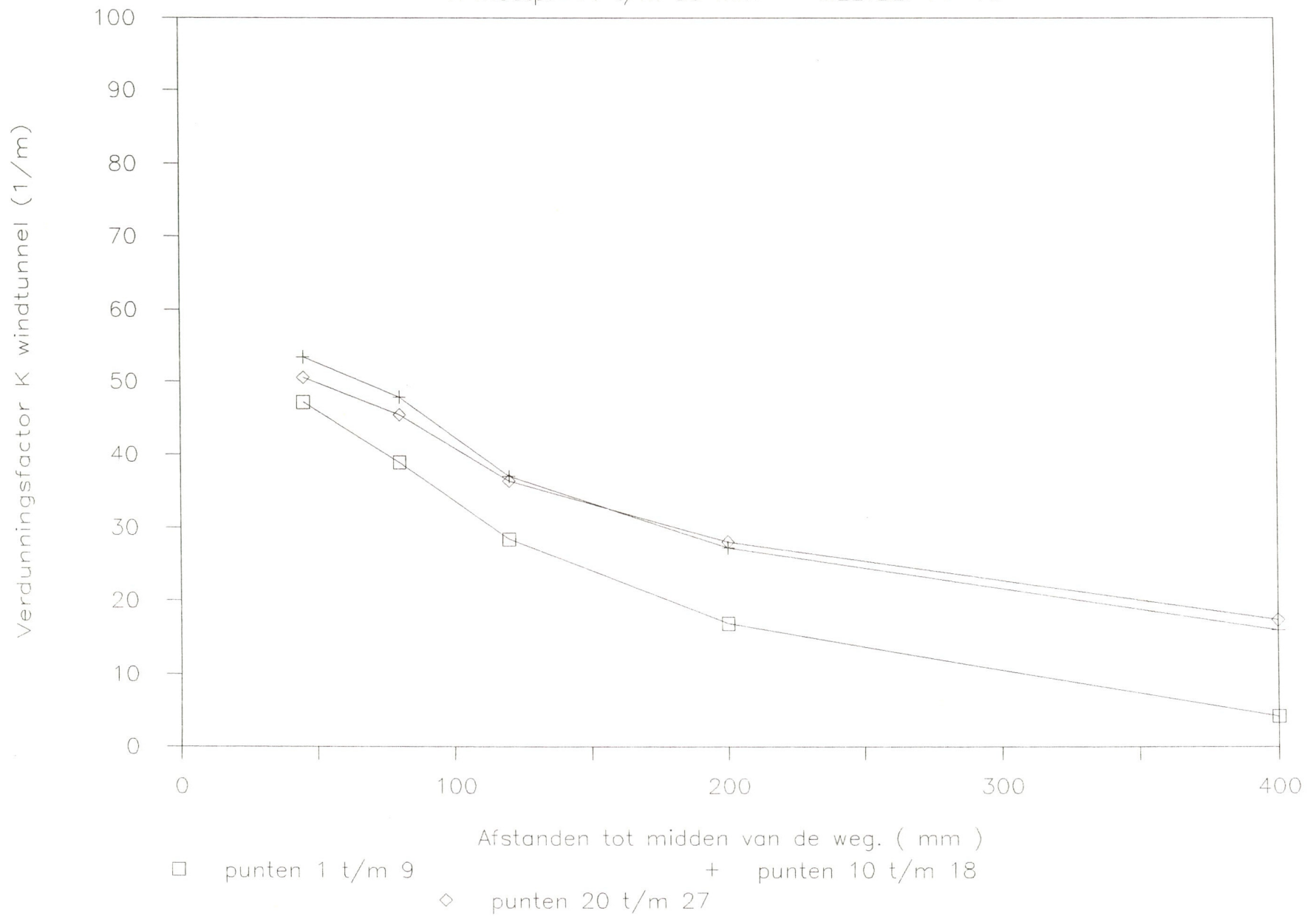
MEETBL. 14-16



HOEK 160 gr. $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm

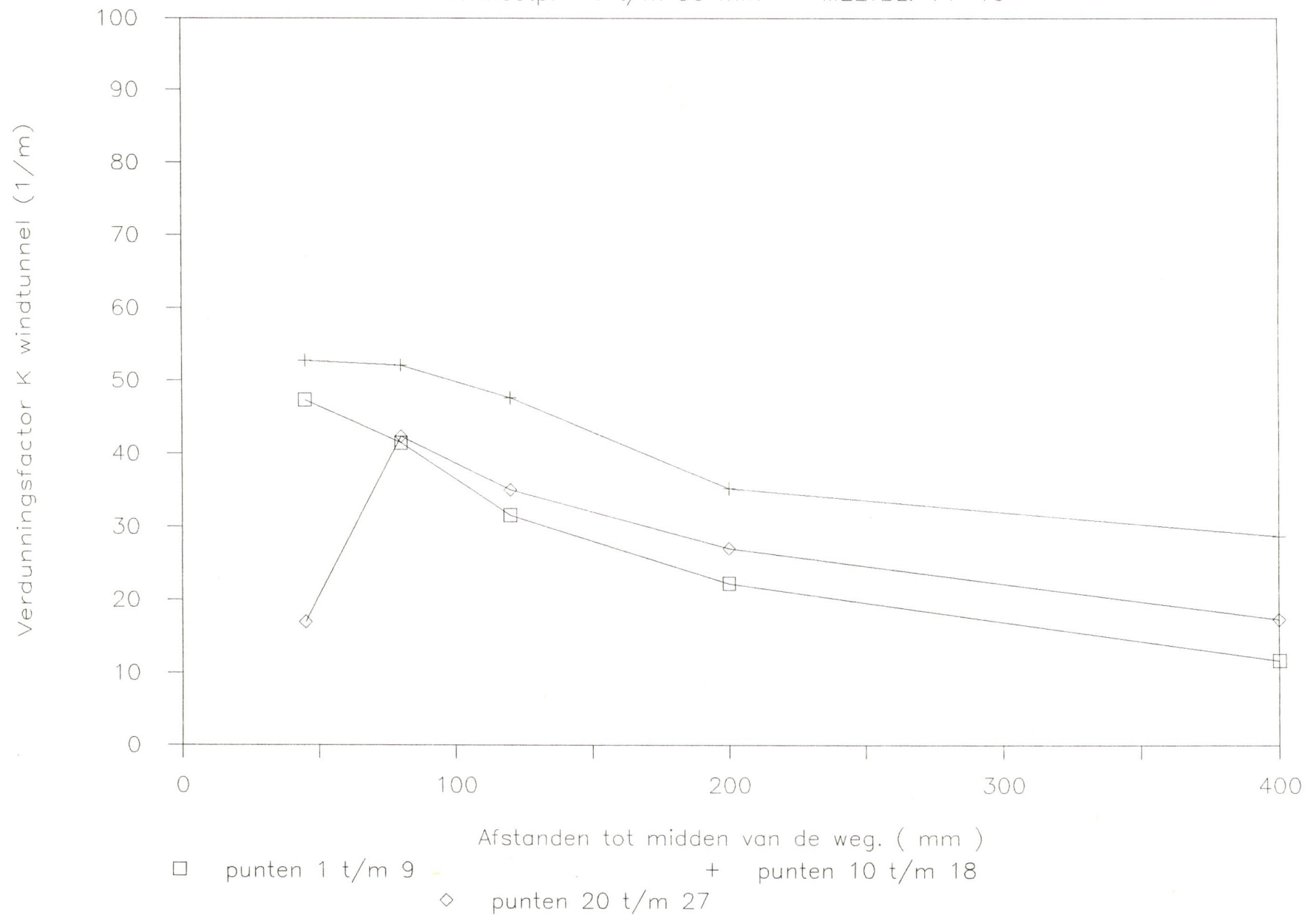
MEETBL. 14-16



HOEK 180 gr. $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm

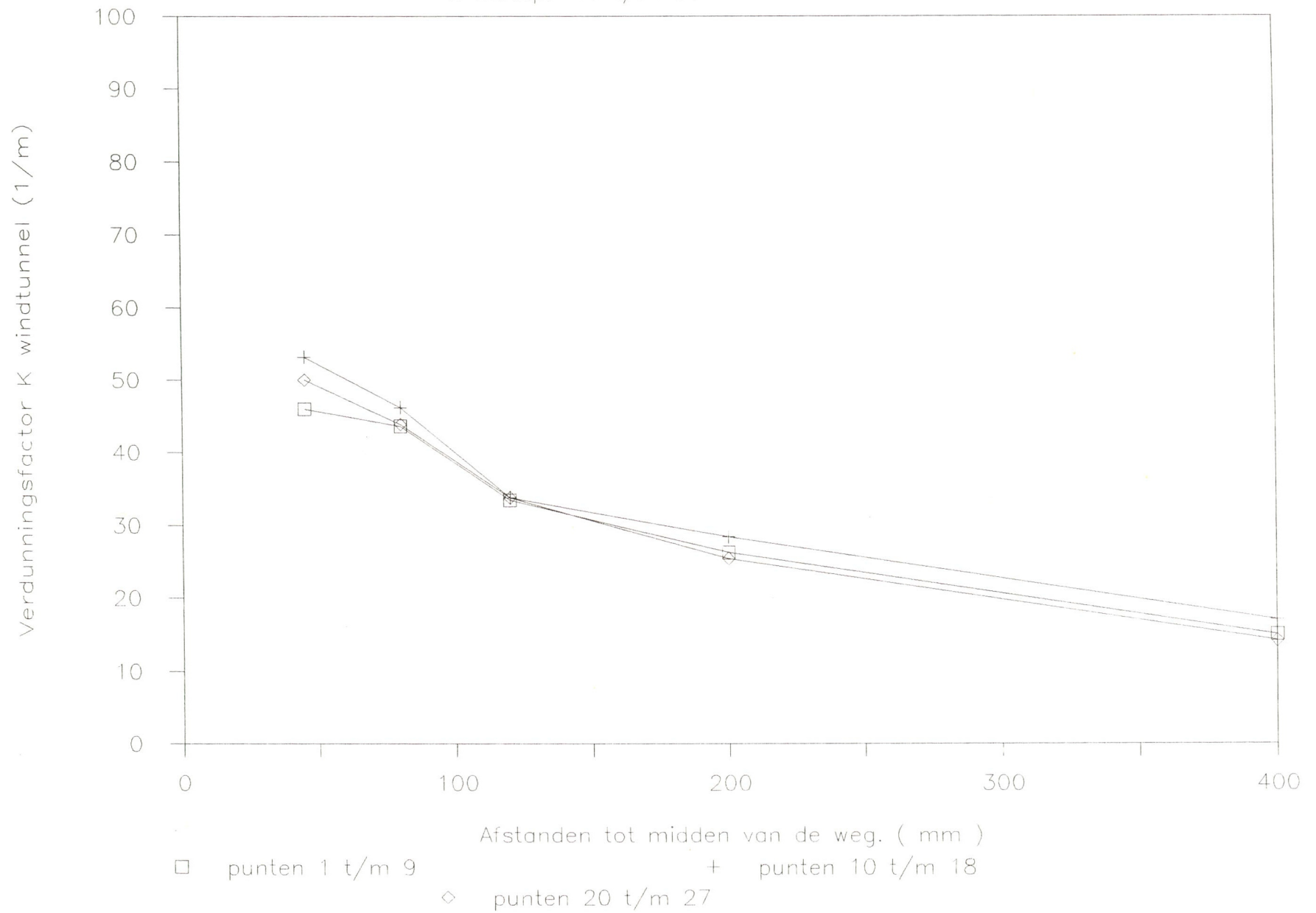
MEETBL. 14-16



HOEK 200 gr. $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm

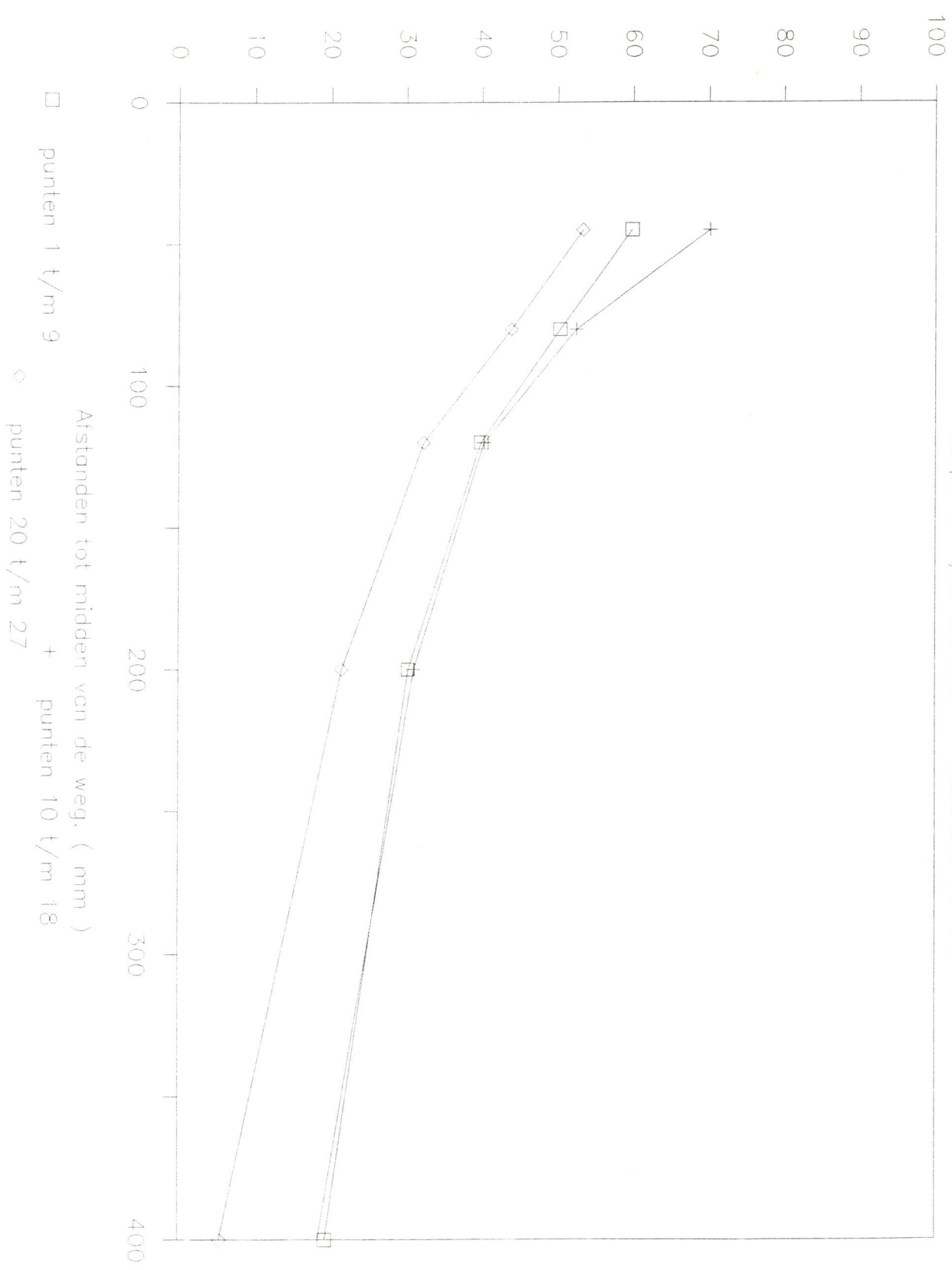
MEETBL. 14-16



HOEK 220 gr. $W/U = 4$

H meetp. = 1 t/m 30 mm MEETBL. 14-16

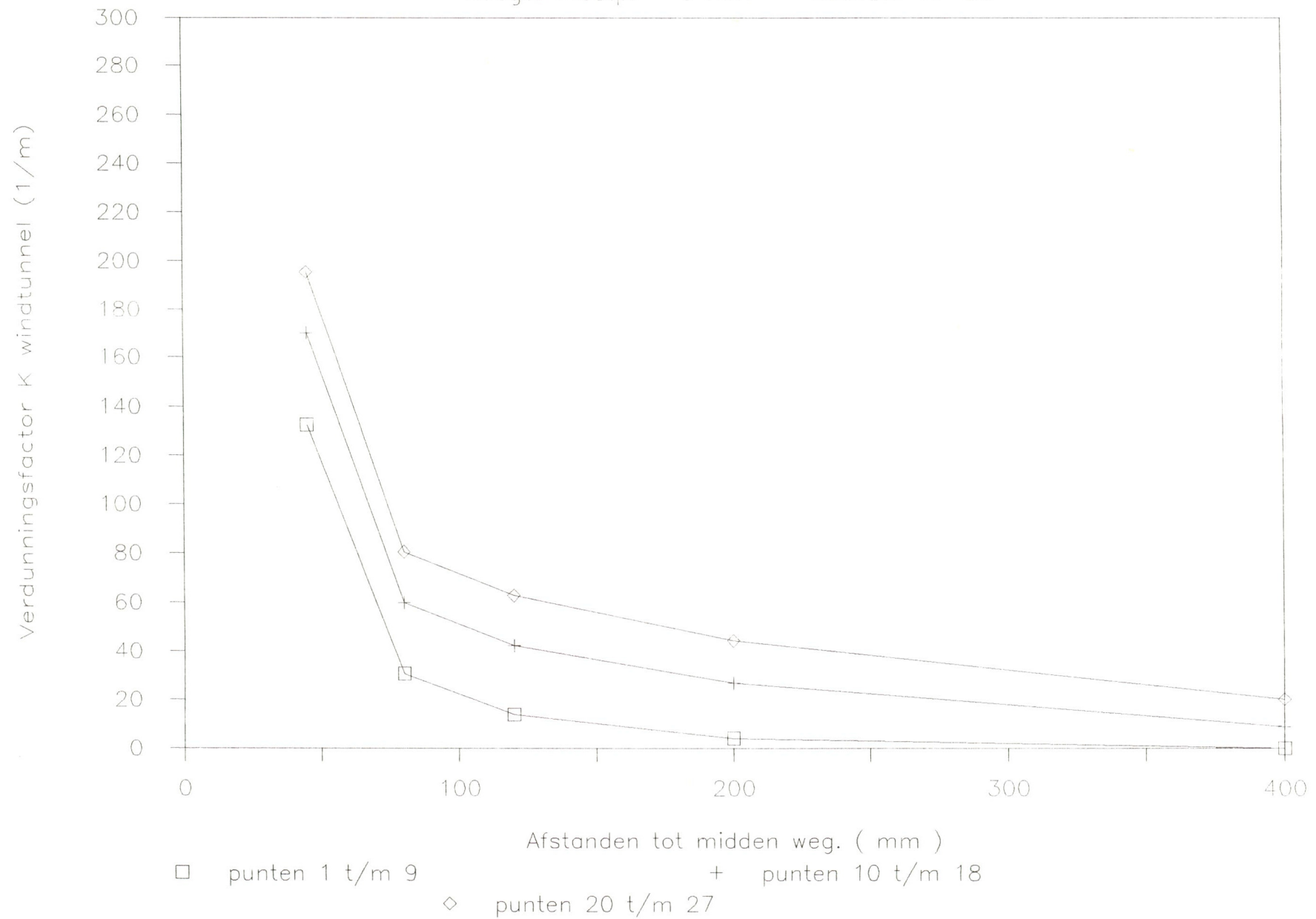
Verdunningsfactor K windtunnel (1/m)



HOEK 140 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

Hoogte meetp. = 6 mm

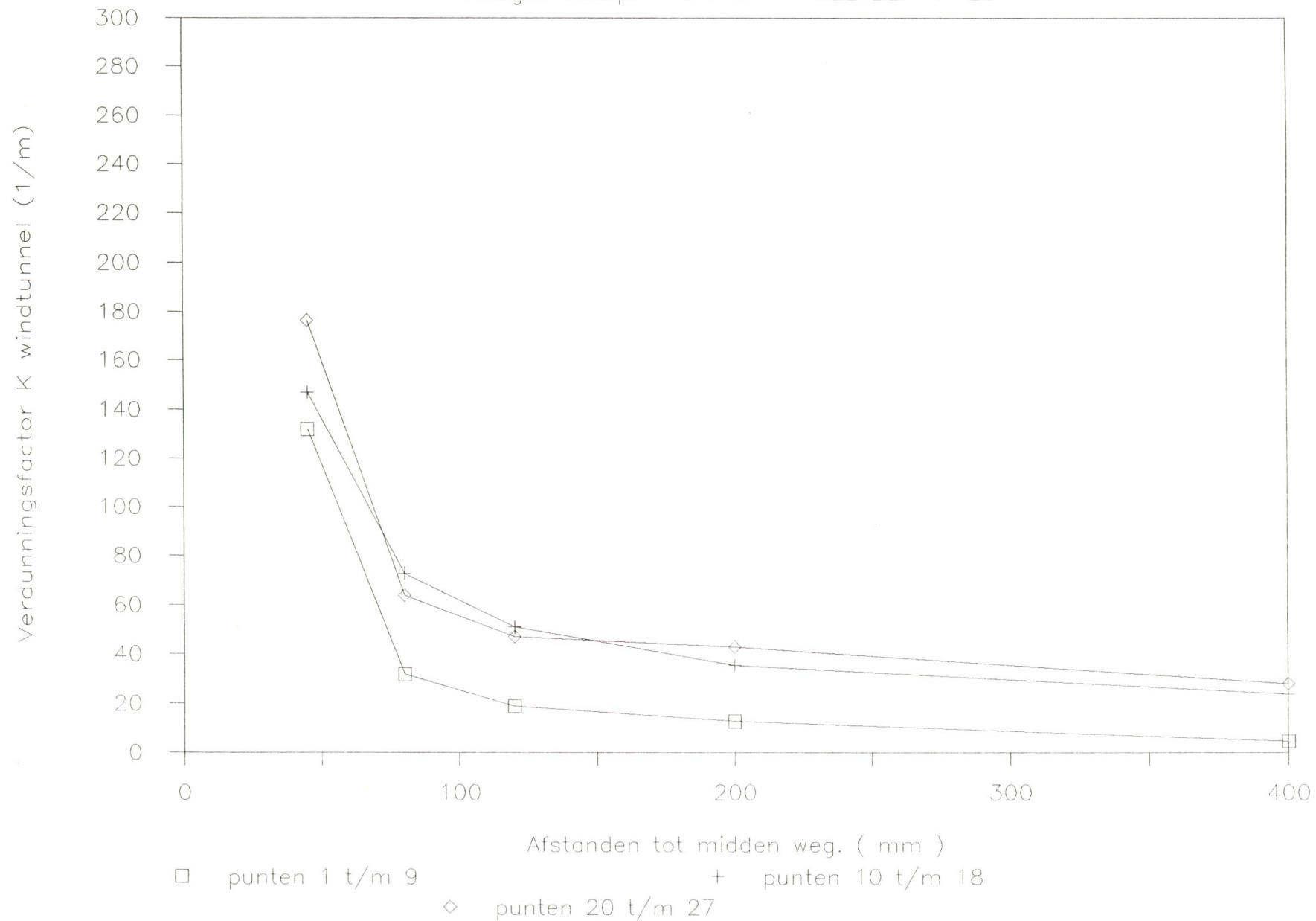
MEETBL. 17-20



HOEK 160 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

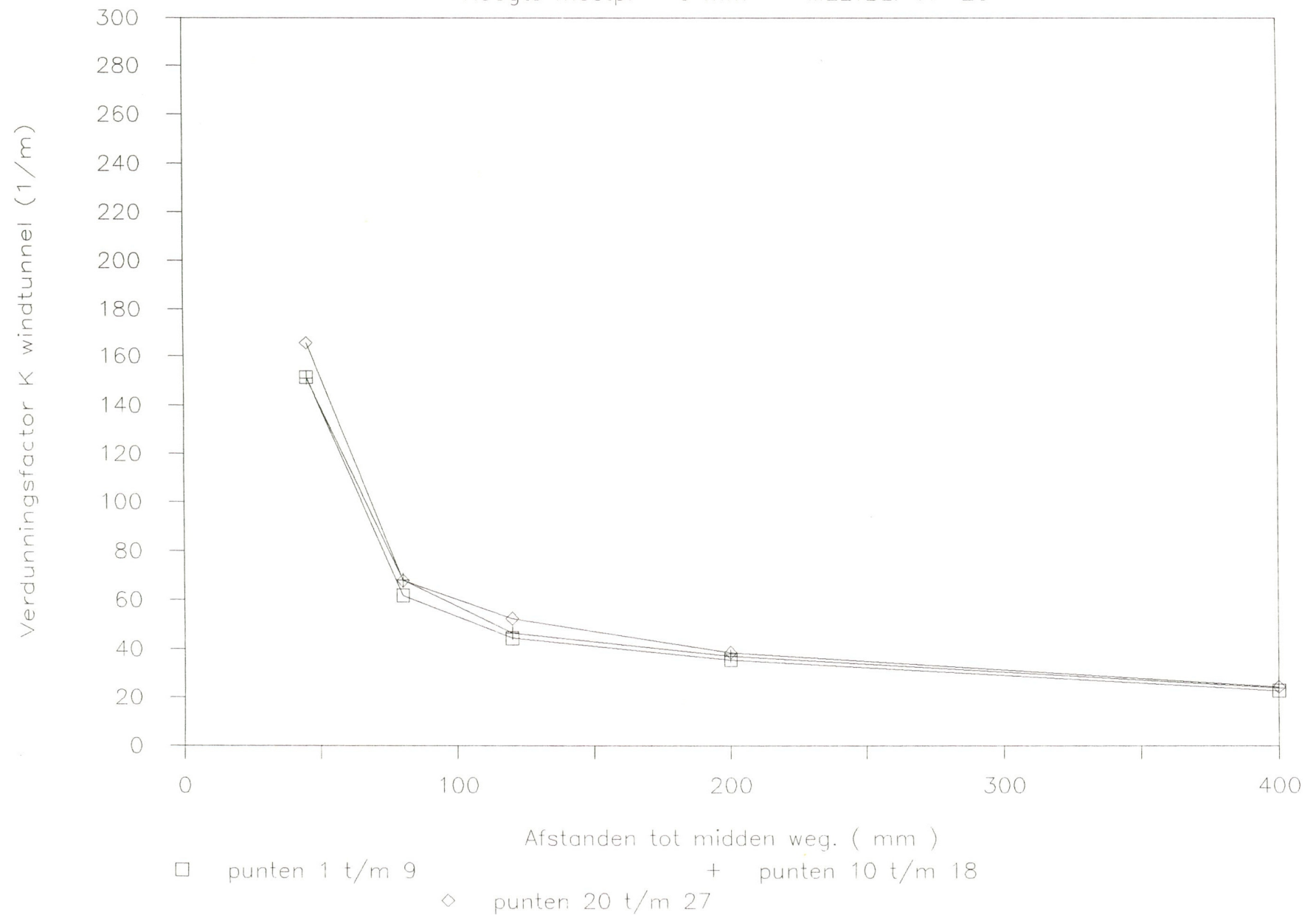
Hoogte meetp. = 6 mm

MEETBL. 17-20



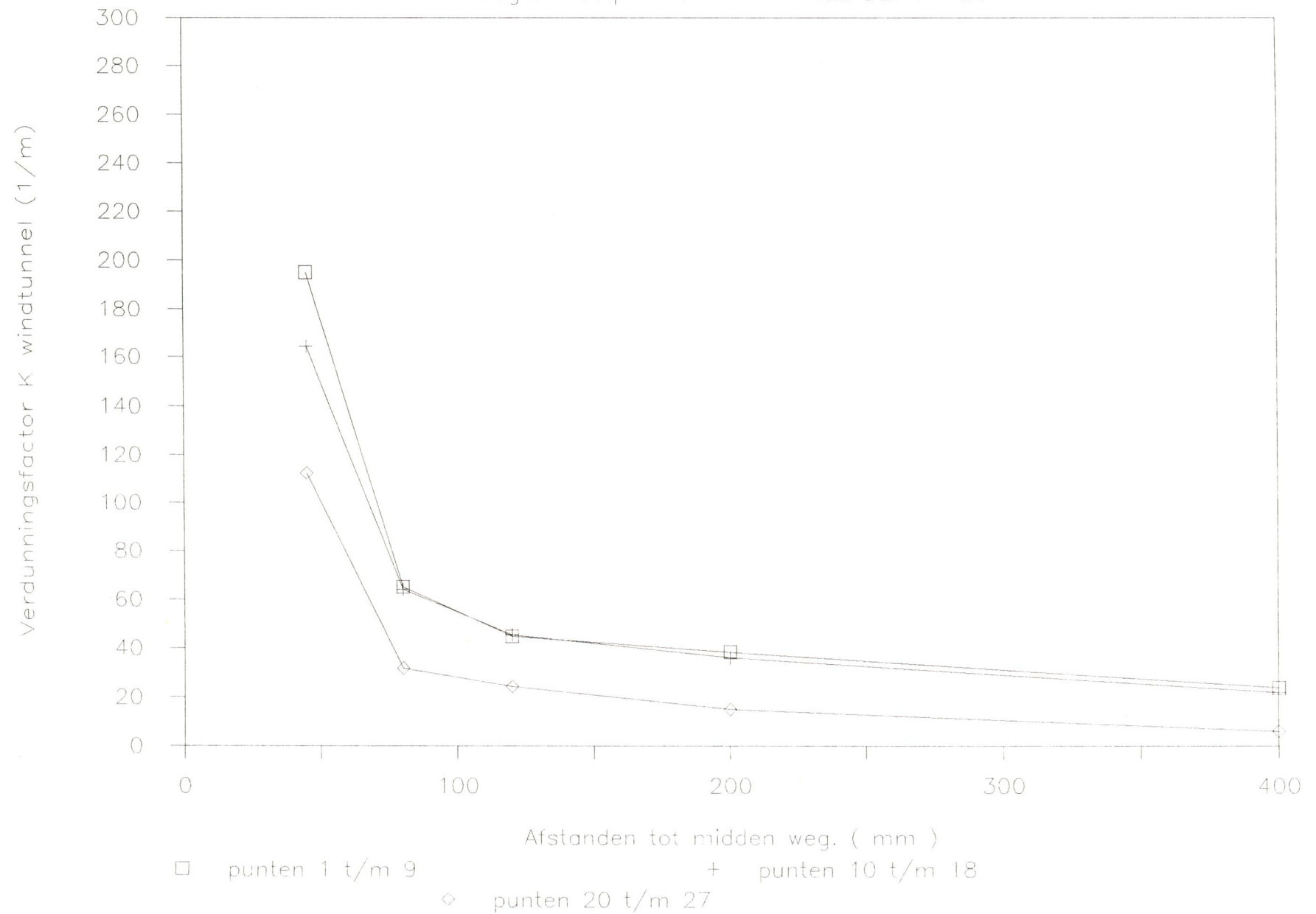
HOEK 180 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

Hoogte meetp. = 6 mm MEETBL. 17-20



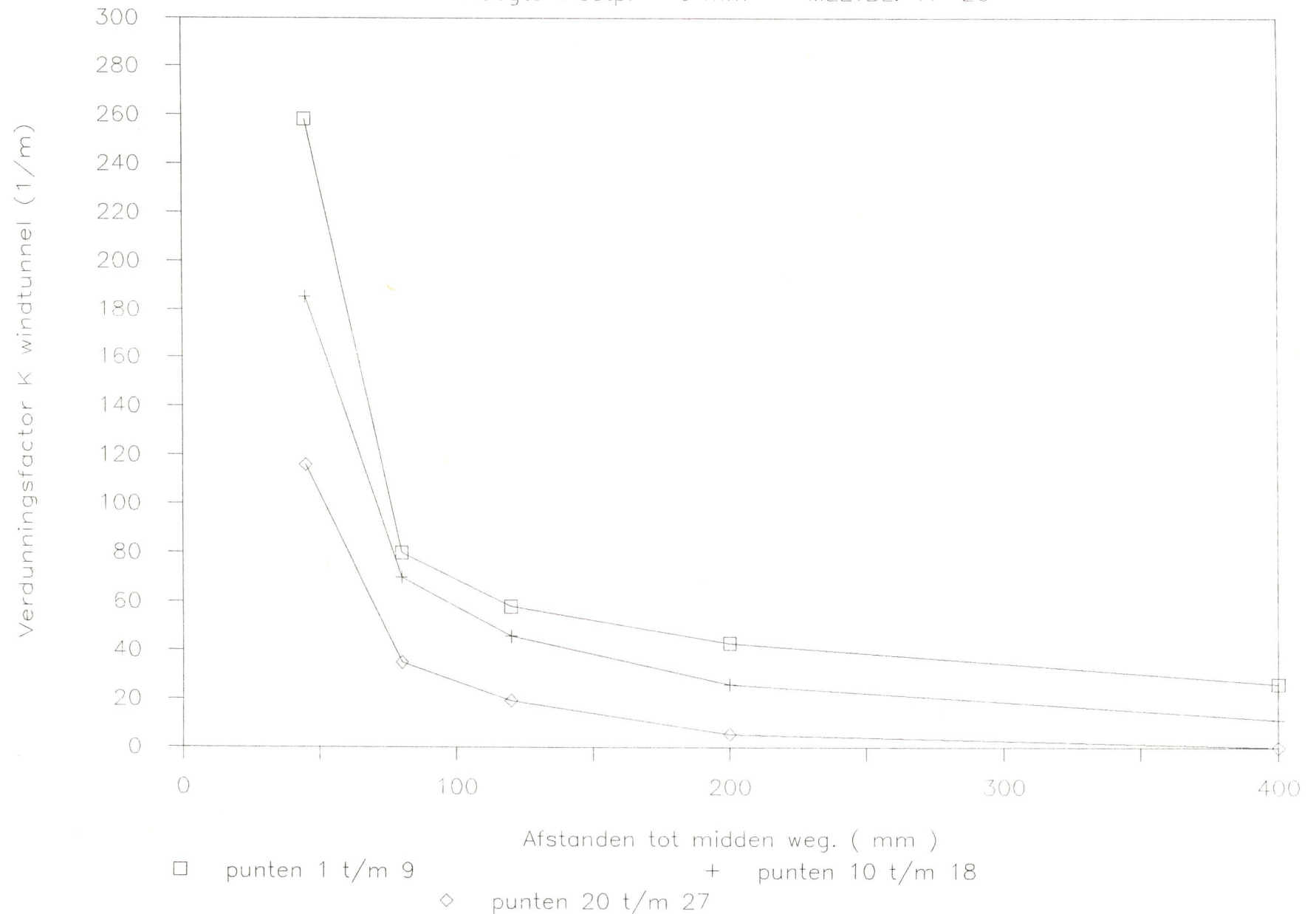
HOEK 200 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

Hoogte meetp. = 6 mm MEETBL. 17-20



HOEK 220 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

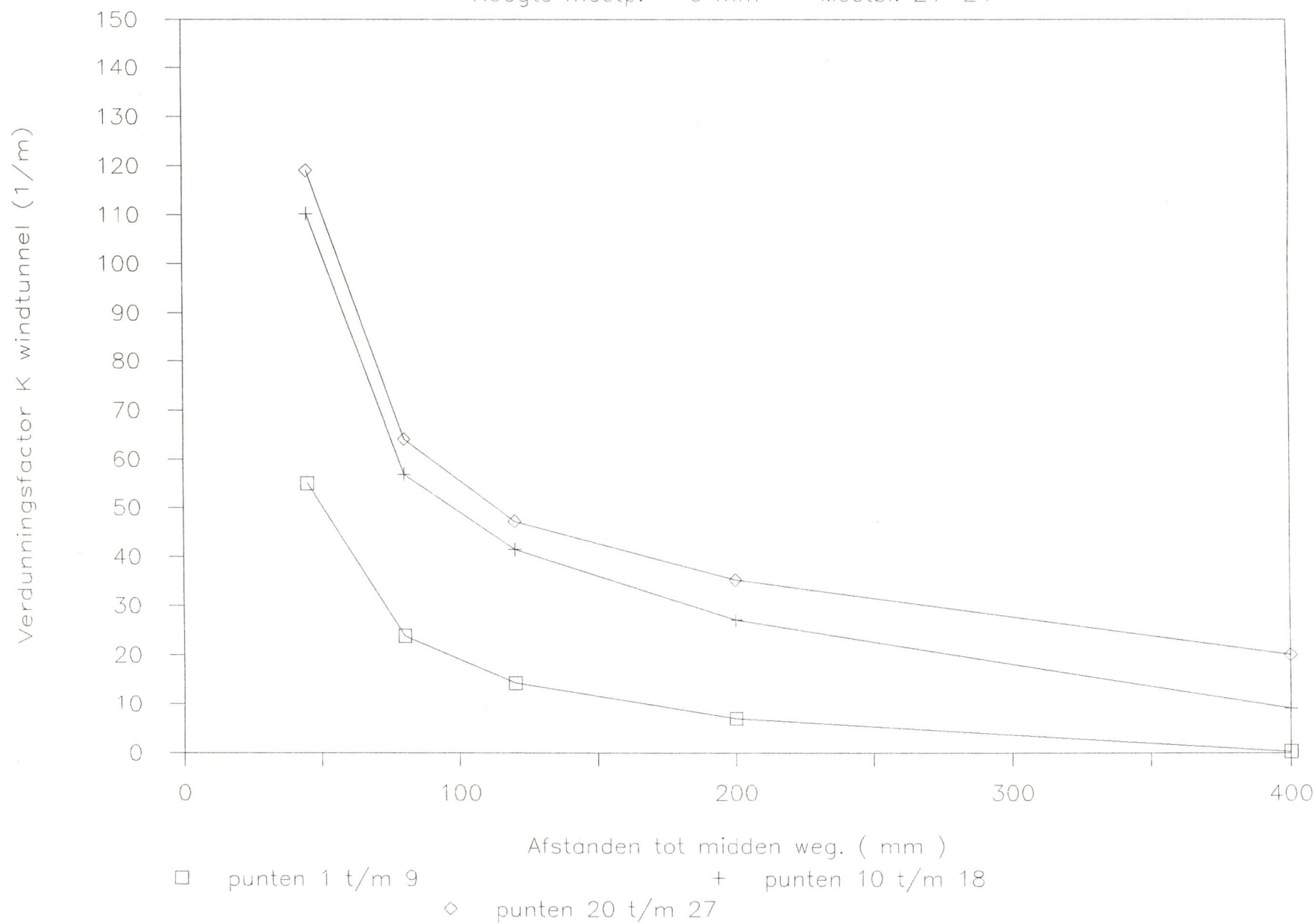
Hoogte meetp. = 6 mm MEETBL. 17-20



HOEK 140 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

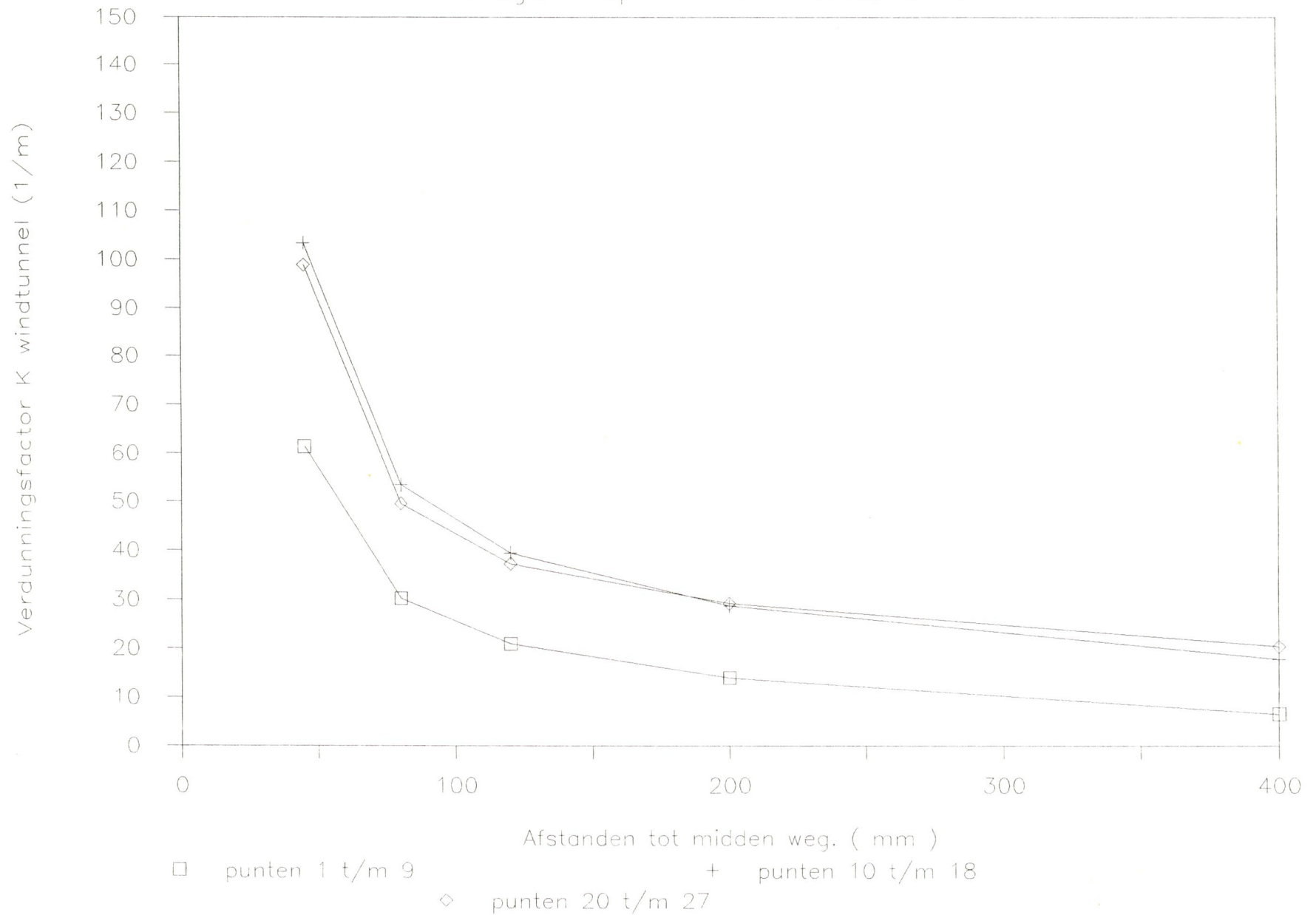
Hoogte meetp. = 6 mm

Meetbl. 21-24



HOEK 160 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

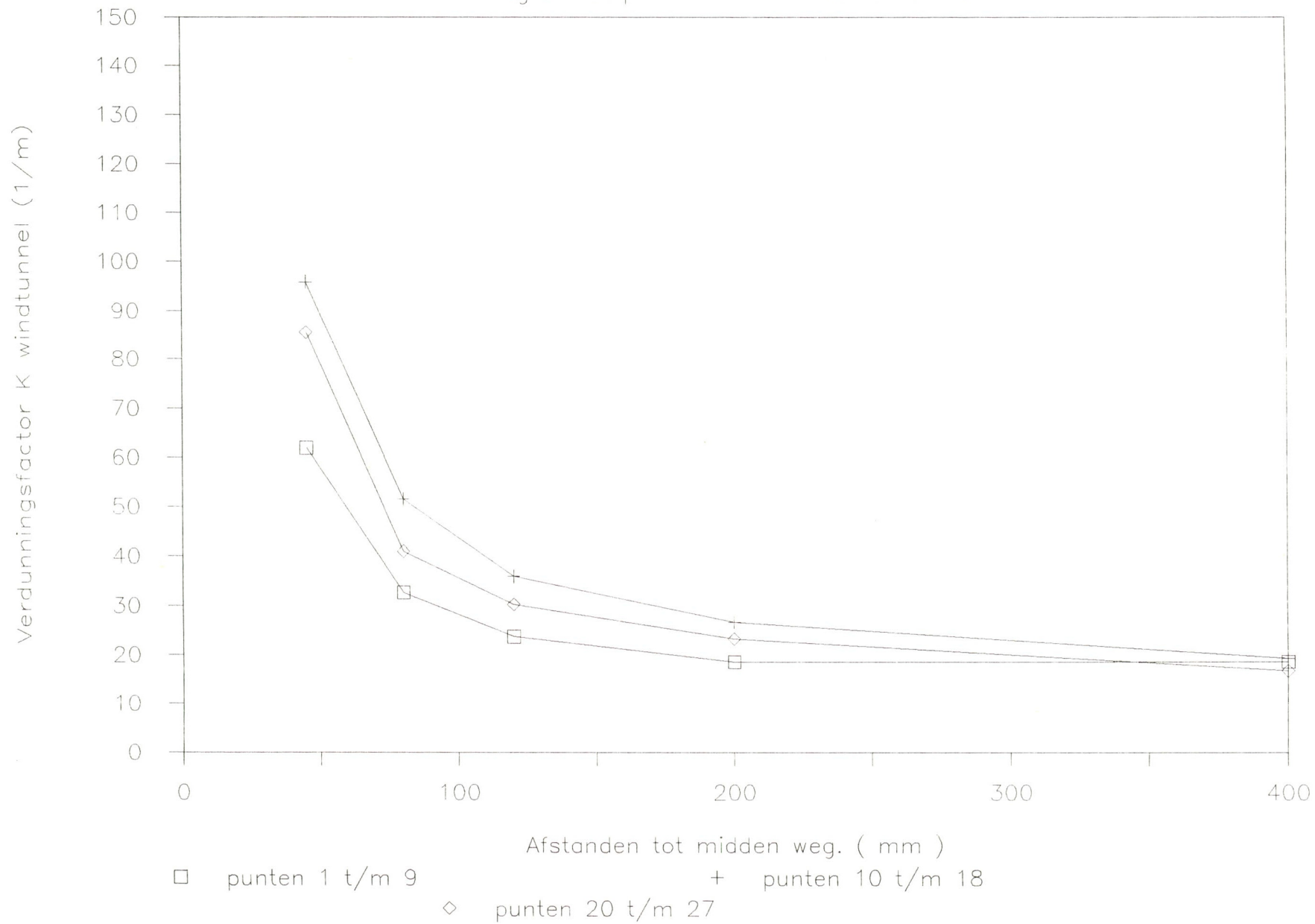
Hoogte meetp. = 6 mm Meetbl. 21-24



HOEK 180 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

Hoogte meetp. = 6 mm

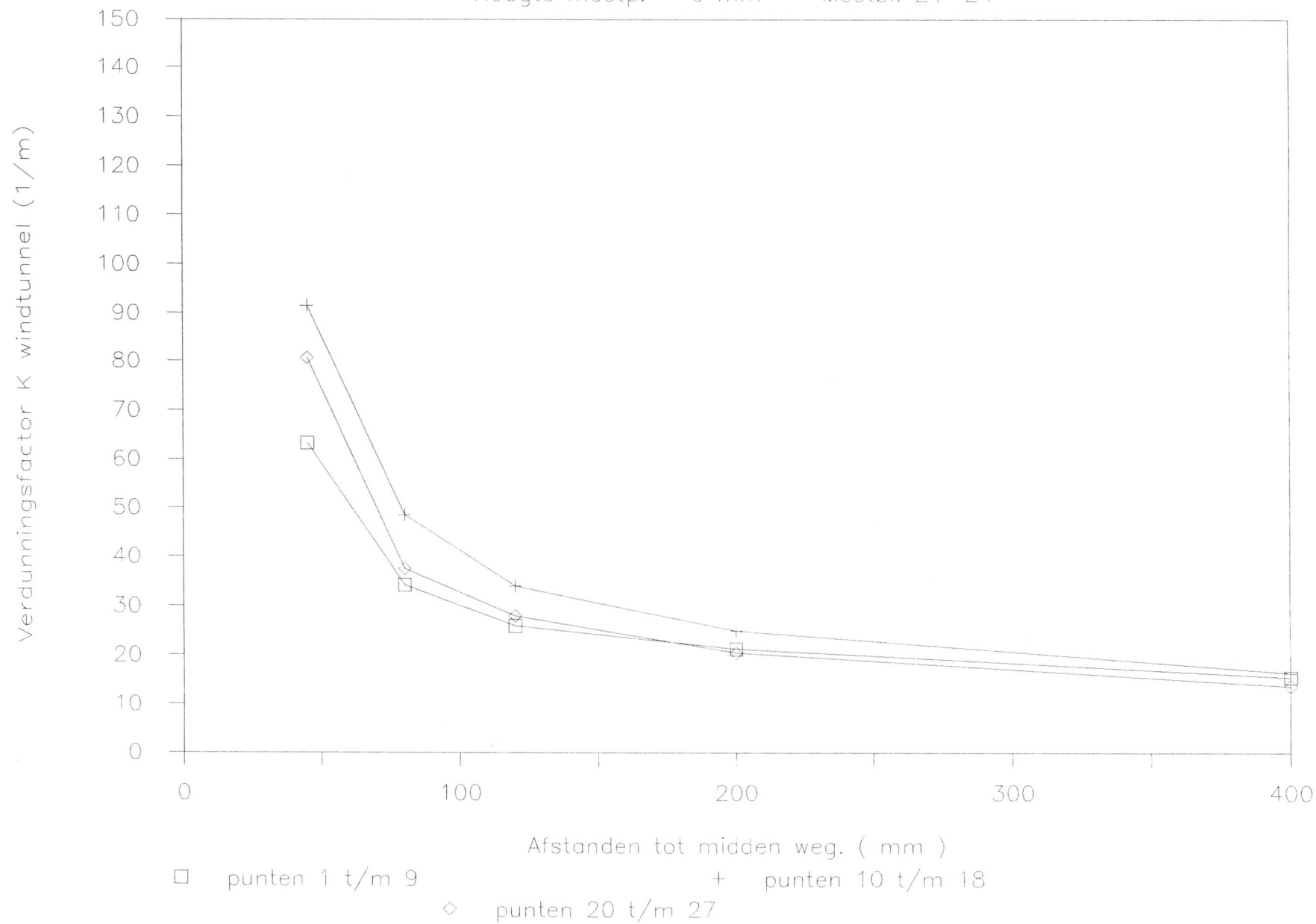
Meetbl. 21-24



HOEK 200 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

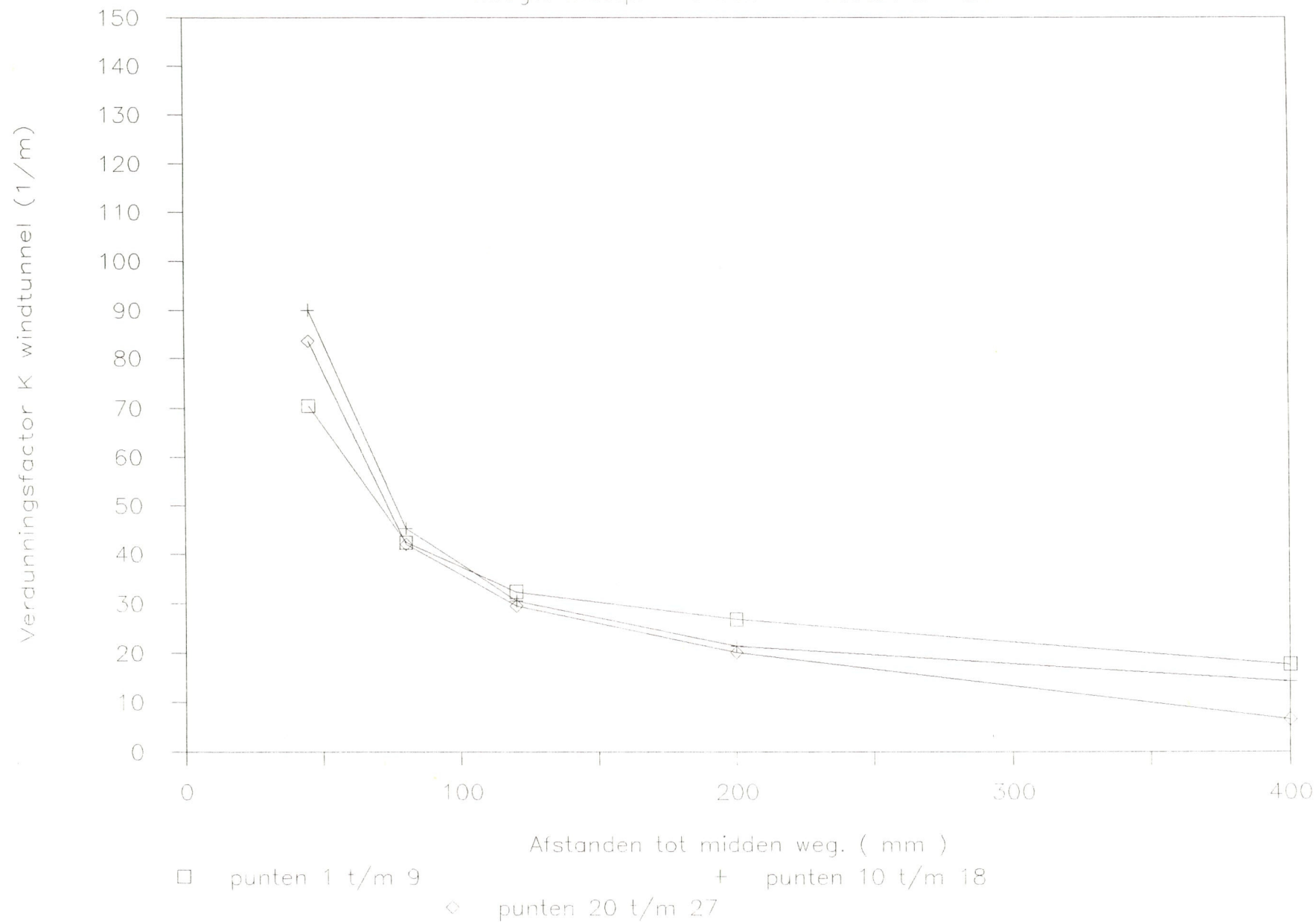
Hoogte meetp. = 6 mm

Meetbl. 21-24



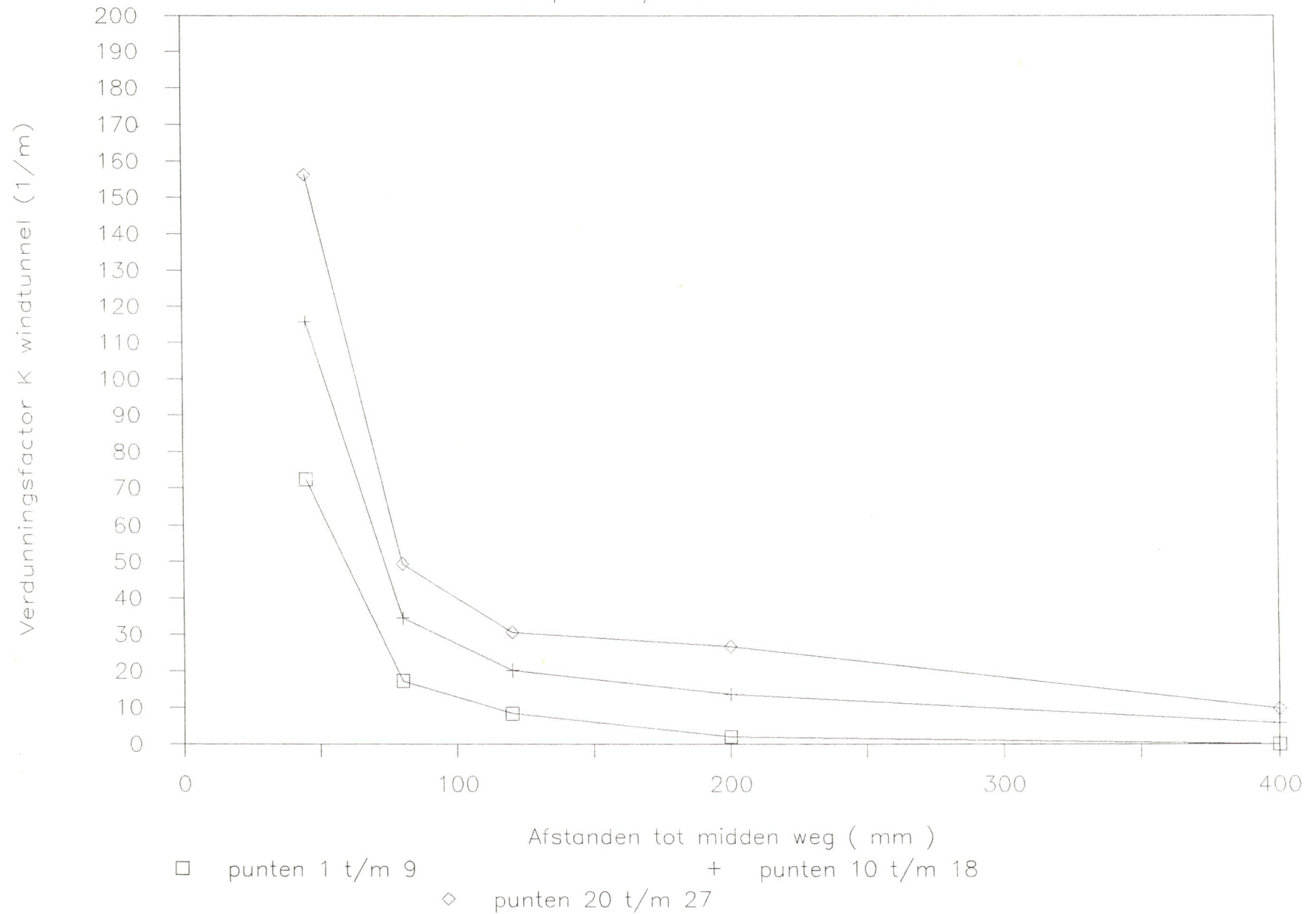
HOEK 220 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

Hoogte meetp. = 6 mm Meetbl. 21-24



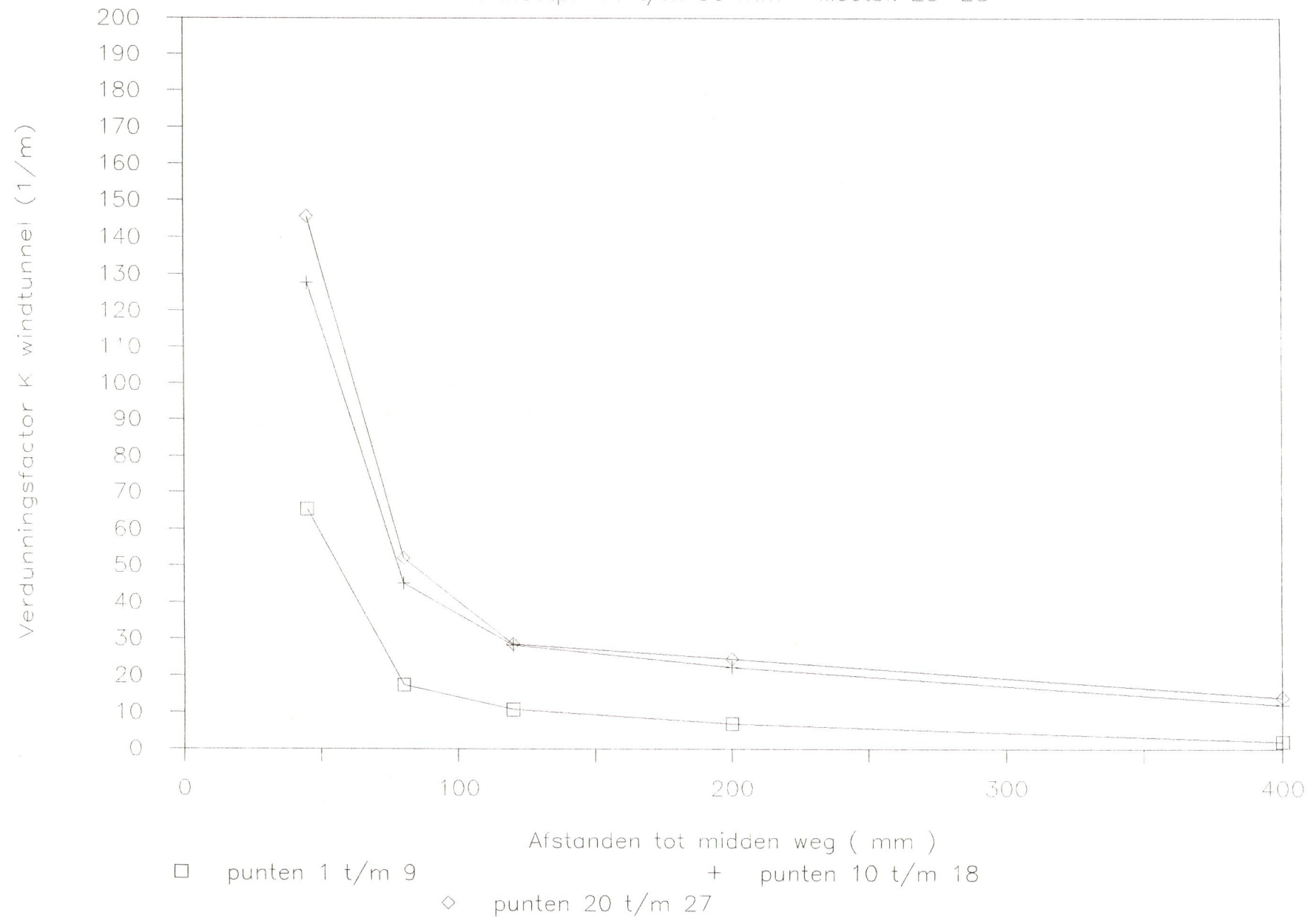
HOEK 140 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 25-28



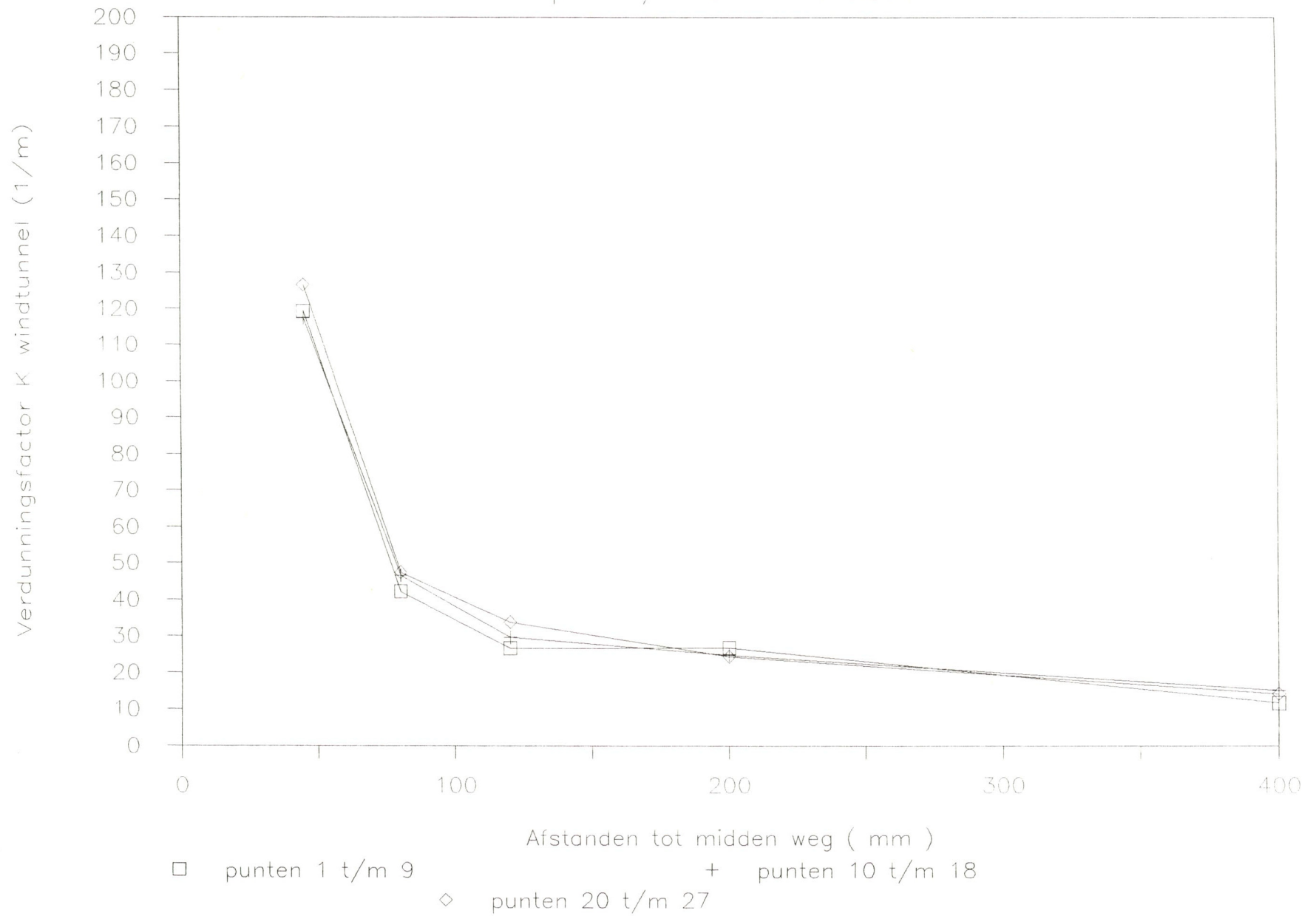
HOEK 160 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 25-28



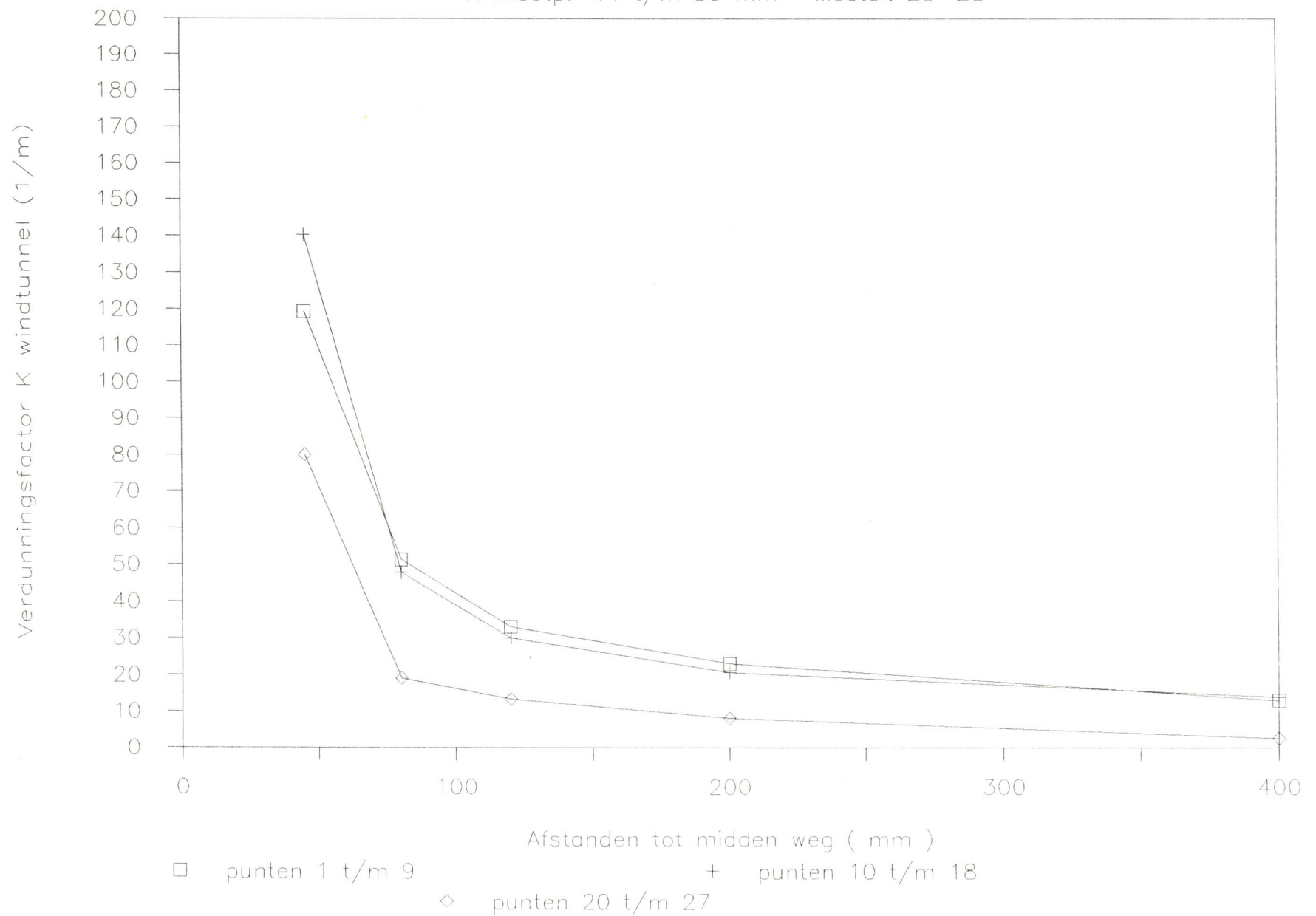
HOEK 180 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 25-28



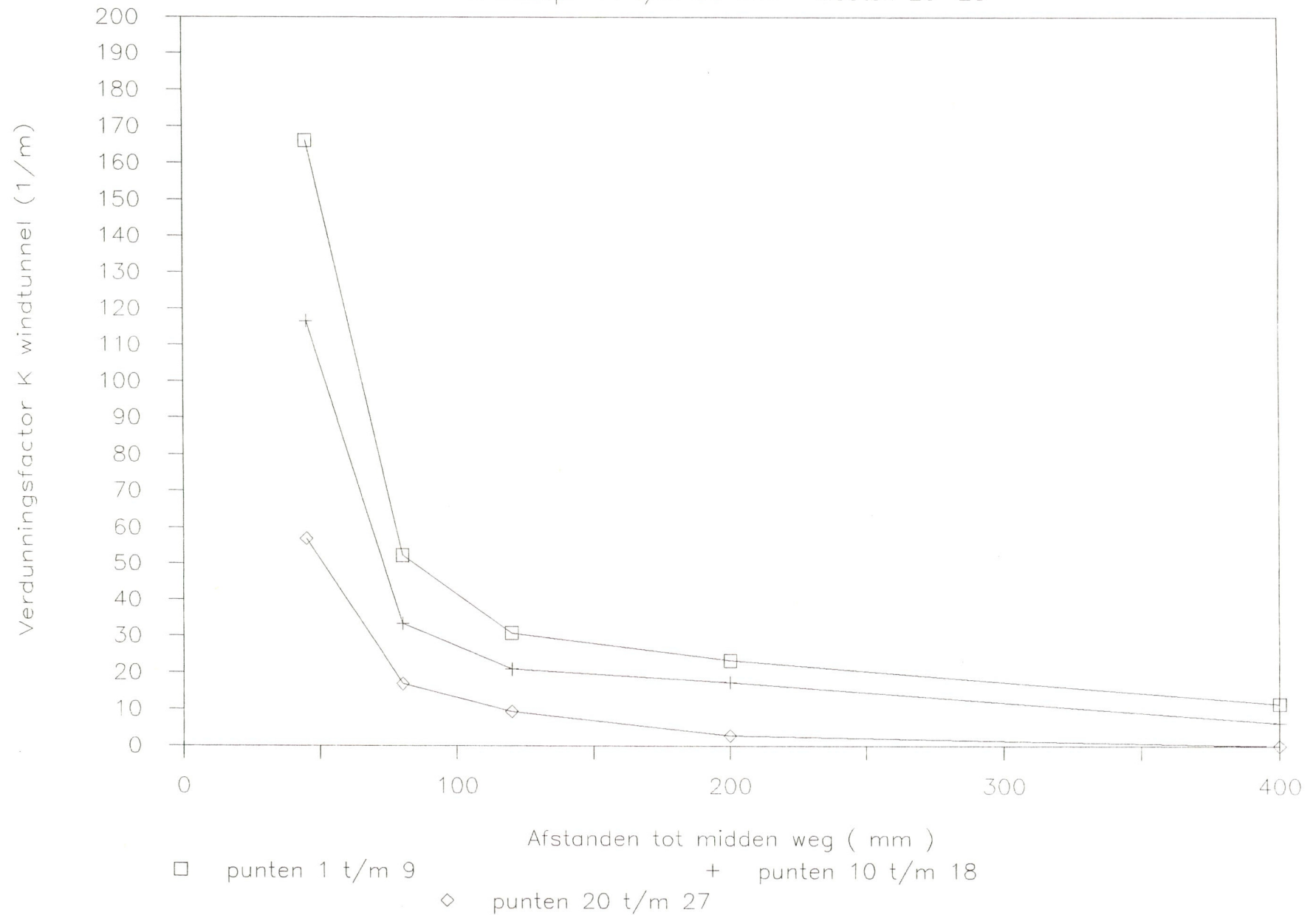
HOEK 200 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 25-28



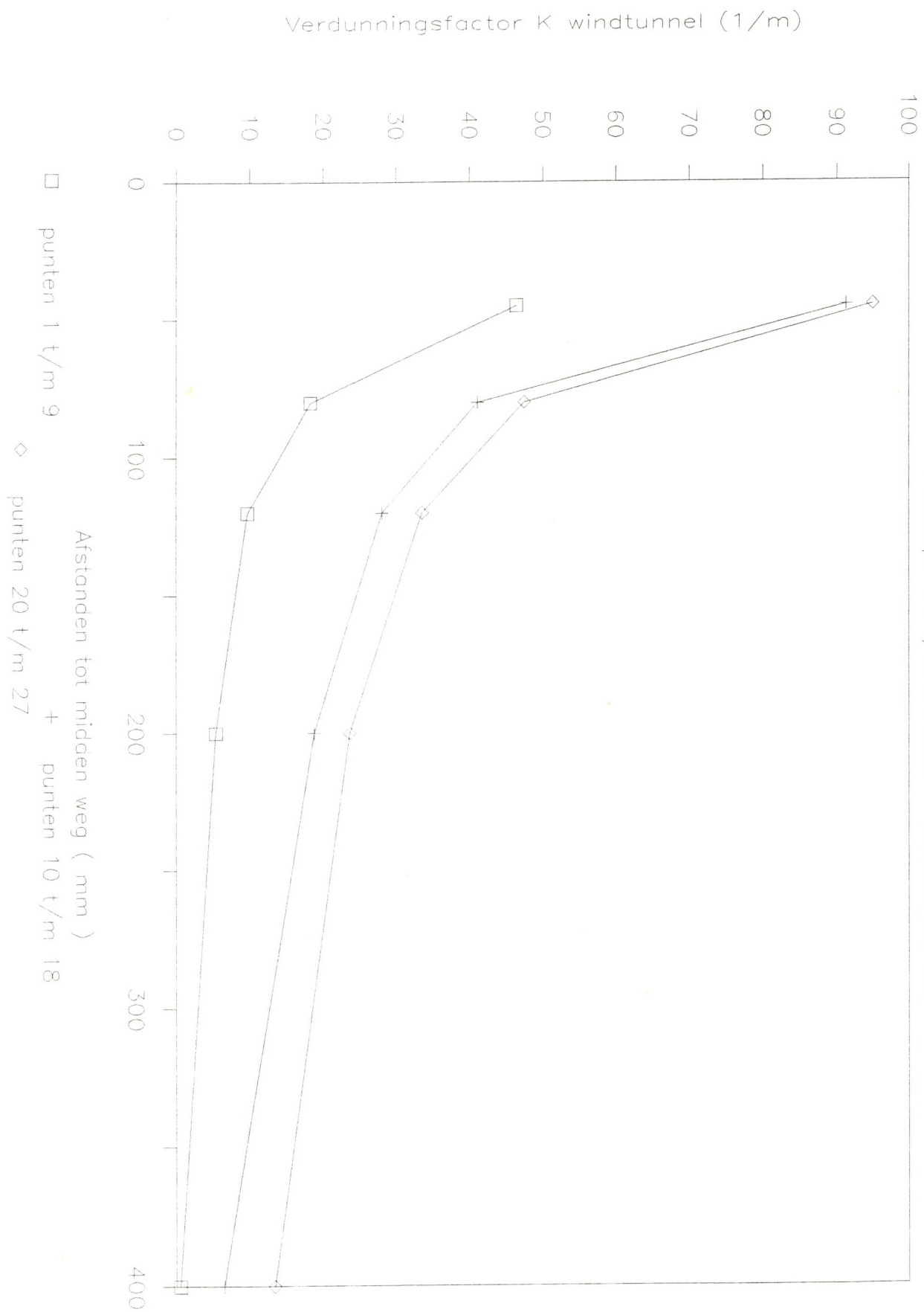
HOEK 220 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 0$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 25-28



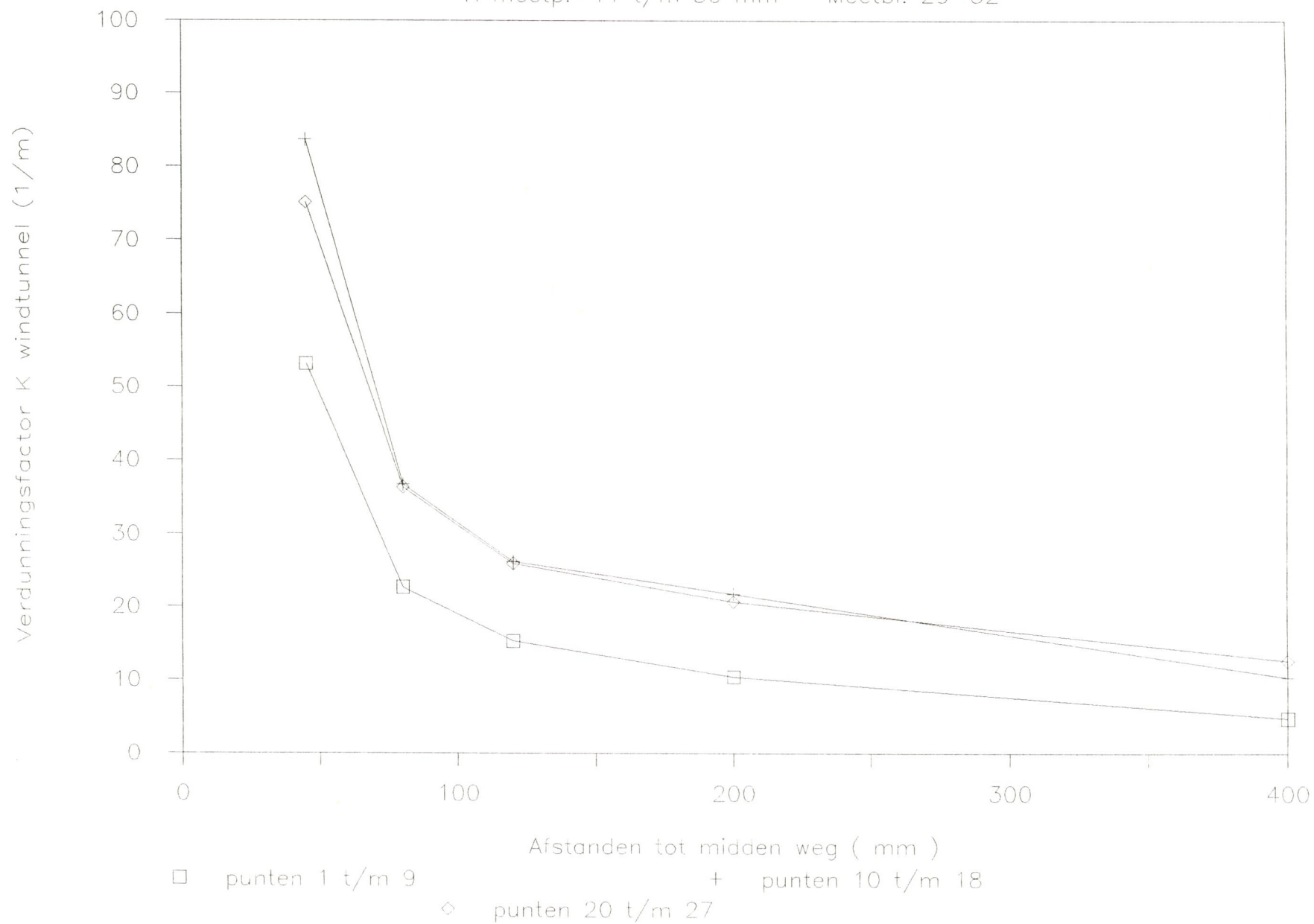
HOEK 140 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 29-32



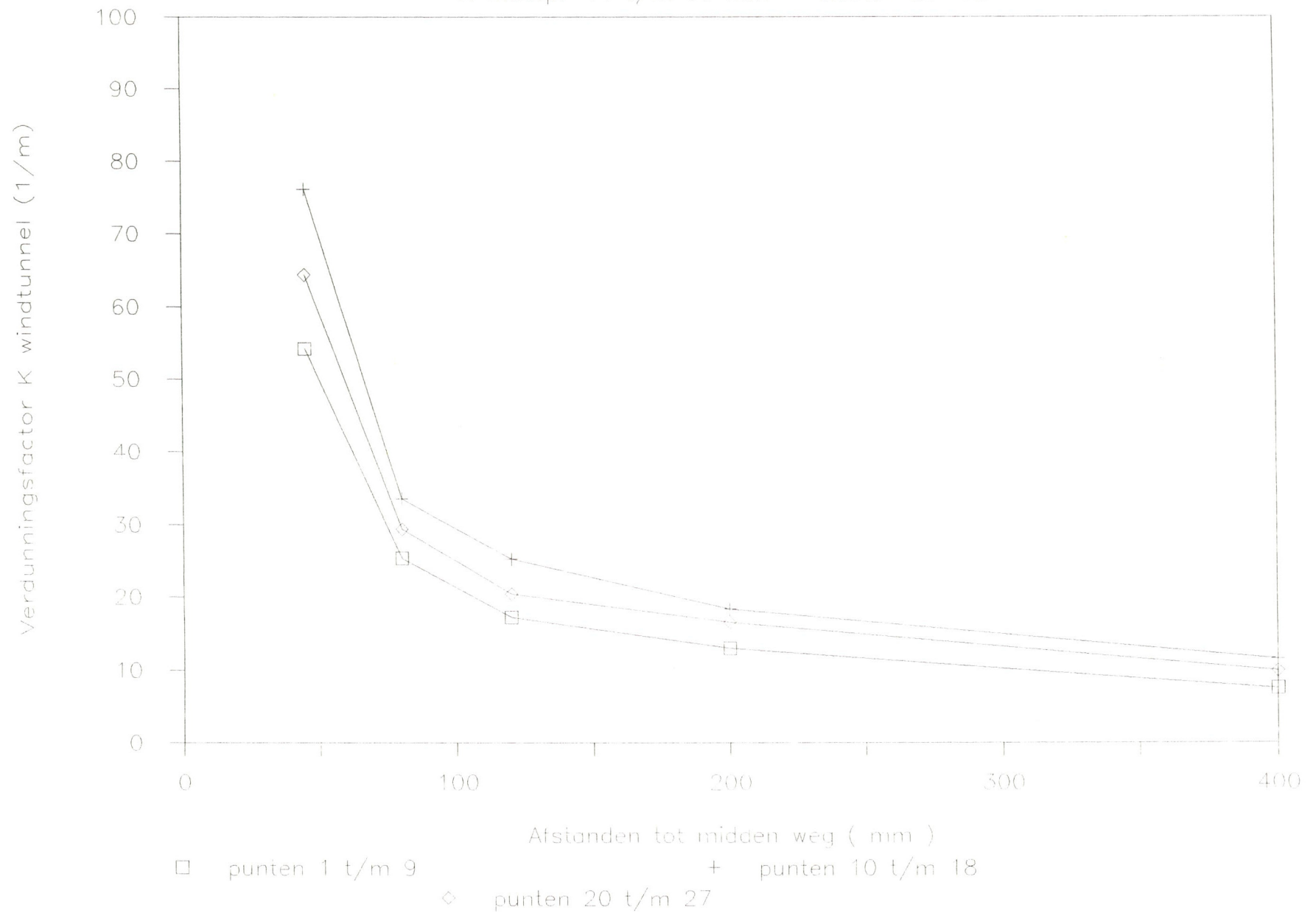
HOEK 160 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 29-32



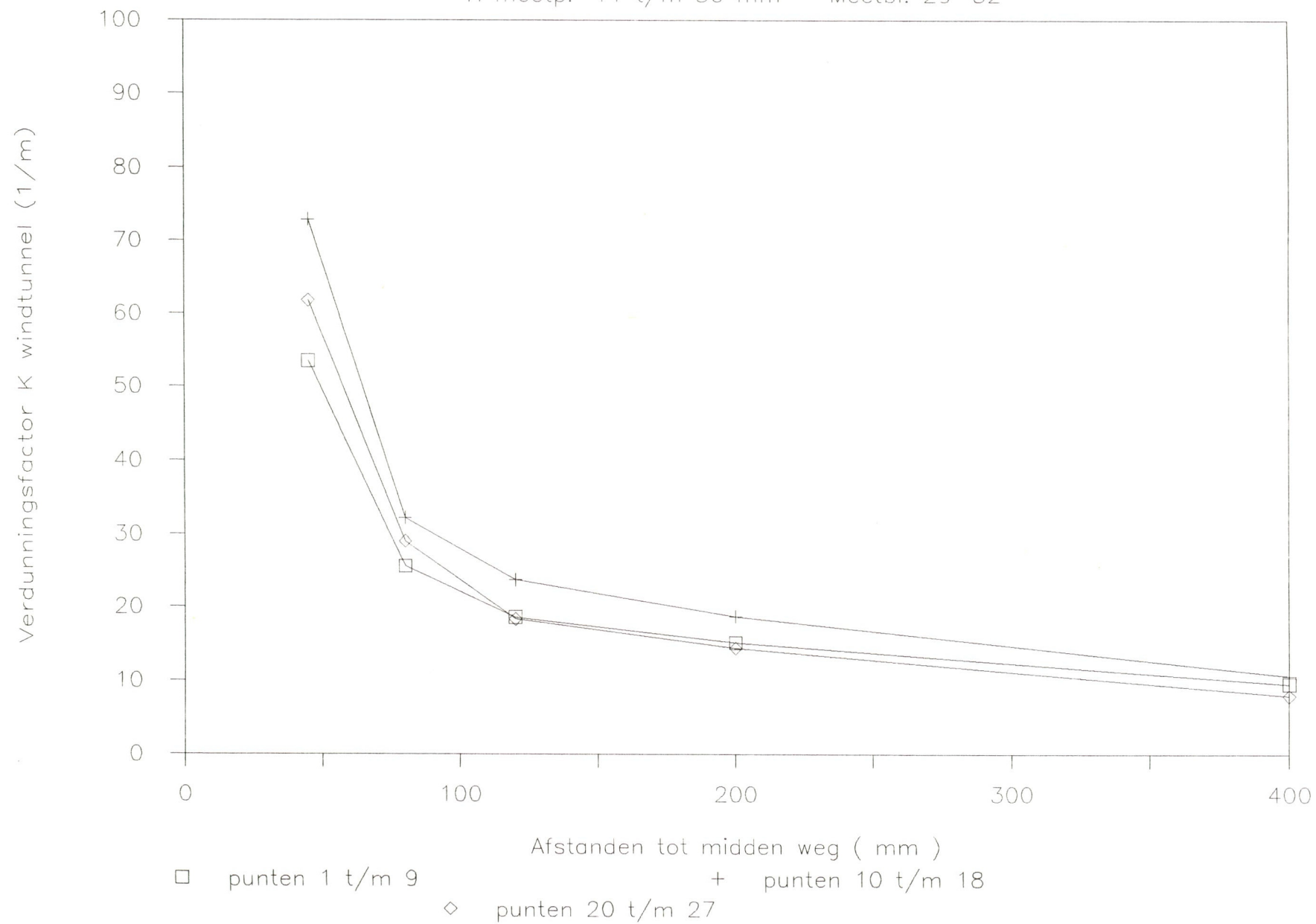
HOEK 180 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 29-32



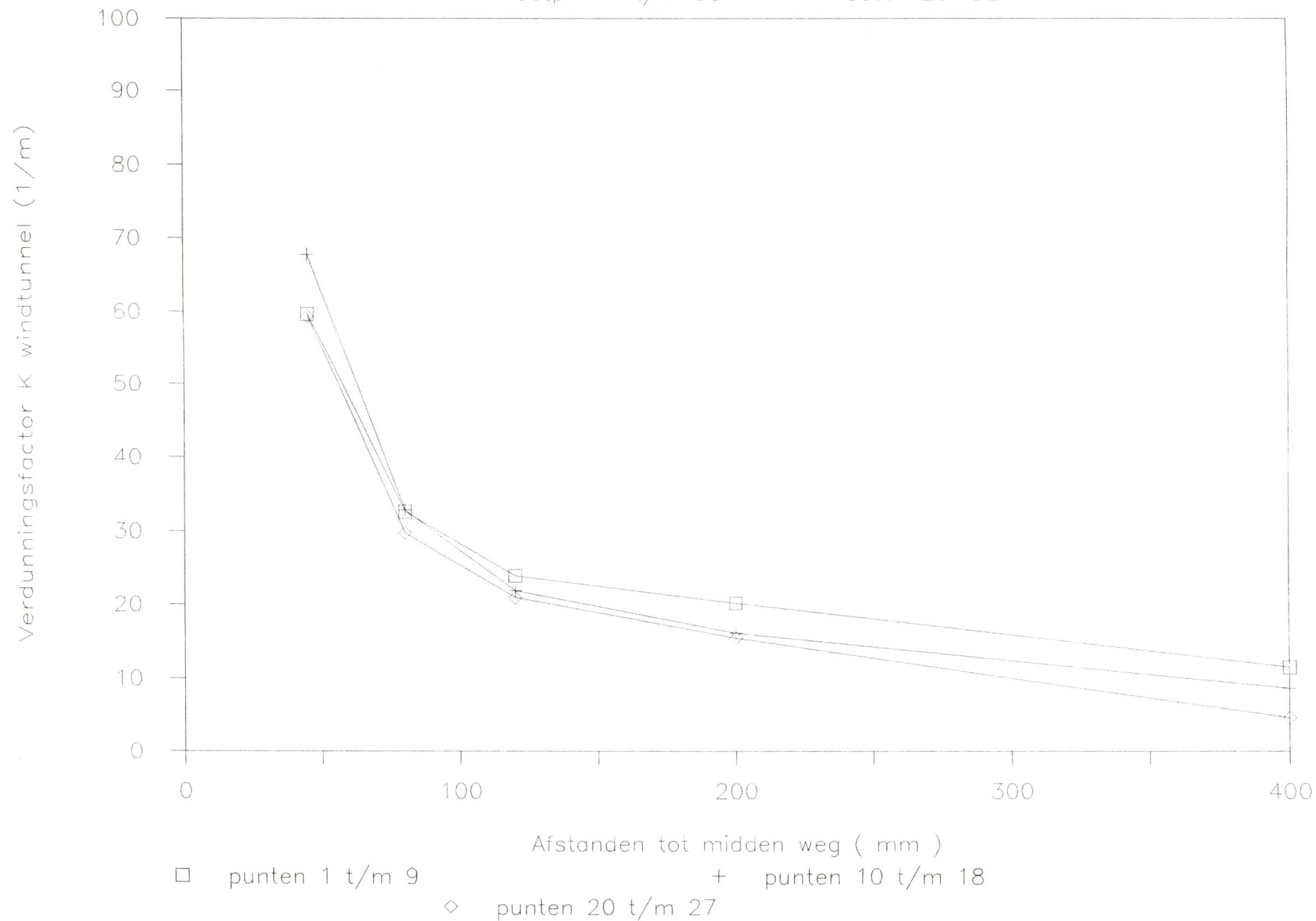
HOEK 200 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 29-32



HOEK 220 gr. WEG 18 mm diep $W/U = 4$

H meetp.=11 t/m 30 mm Meetbl. 29-32



Tabellen A1 - A8 Verdunningsfactor voor windtunnelmetingen

U500 tunnel = 4.5 m/s

Verduunningsfactor K (90/70±c)															
hoeft	1	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	27
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
50	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
60	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0
70	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	19.7	0.4	0.0	0.0	0.0
80	9.4	0.4	0.0	0.0	0.0	42.8	1.7	0.0	0.0	0.0	58.6	2.7	0.0	0.0	0.0
90	21.3	1.6	0.3	0.0	0.0	79.0	16.9	1.9	0.0	0.0	126.2	36.4	8.1	0.4	0.0
100	37.3	7.1	0.8	0.0	0.0	101.2	47.2	17.1	1.2	0.0	137.4	71.3	44.3	9.3	0.0
110	51.6	17.1	3.8	0.2	0.0	113.2	63.3	37.8	9.6	0.0	132.5	84.4	59.8	30.6	1.0
120	63.8	27.6	8.9	1.1	0.0	109.4	68.1	49.6	23.8	0.6	115.7	76.6	58.7	42.8	9.6
130	72.6	35.6	16.1	3.0	0.0	100.1	64.9	49.7	34.3	4.1	98.2	68.3	57.1	42.4	22.7
140	74.8	41.9	24.2	7.3	0.4	94.5	61.8	47.0	36.1	13.8	90.6	62.6	50.5	39.2	26.2
150	75.7	45.1	30.8	13.9	1.6	87.2	60.0	46.5	34.8	21.5	85.2	58.3	47.7	37.2	26.7
160	73.7	45.8	33.4	20.3	4.9	82.0	56.4	44.1	33.2	23.6	78.3	54.5	45.1	34.9	24.6
170	72.2	47.8	35.2	25.1	11.0	79.0	56.0	43.5	33.9	23.7	76.9	53.7	43.0	34.8	25.0
180	73.5	49.3	37.2	27.2	17.5	80.6	55.3	43.5	33.1	23.3	76.2	51.4	41.3	32.3	24.2
190	75.7	51.0	39.0	30.0	20.9	79.9	55.8	43.0	32.9	24.0	74.1	50.2	39.6	30.6	22.2
200	78.5	52.3	39.4	31.2	23.0	80.6	56.5	43.9	33.2	23.6	73.7	50.1	38.5	29.1	18.8
210	80.6	52.9	40.8	32.6	23.0	83.8	57.2	43.4	32.6	23.2	74.1	48.6	36.5	26.2	12.2
220	85.9	57.9	44.6	35.0	24.6	89.9	59.7	46.4	34.9	22.7	76.5	48.7	34.7	23.5	6.9
230	89.4	60.7	48.8	37.0	25.4	94.3	63.5	47.8	36.6	19.7	75.7	47.7	34.1	20.6	3.7
240	94.2	65.2	51.9	39.5	23.1	101.4	66.7	51.9	34.1	11.2	5.8	47.5	32.1	15.3	0.8
250	91.6	65.9	52.1	37.8	13.5	101.6	67.5	47.5	29.6	4.8	78.5	46.4	29.4	12.1	0.0
260	77.9	56.1	43.9	26.1	3.1	91.8	58.1	37.7	18.0	0.0	72.2	40.9	25.2	4.5	0.0
270	59.8	41.8	30.8	12.1	0.4	74.3	45.6	27.7	7.2	0.0	63.8	36.4	15.7	0.4	0.0
280	62.5	35.6	16.2	2.2	0.0	84.1	45.1	15.3	0.9	0.0	85.4	32.6	6.4	0.0	0.0
290	44.4	10.7	1.4	0.0	0.0	69.8	13.2	2.9	0.0	0.0	74.0	9.5	0.6	0.0	0.0
300	23.1	0.6	0.0	0.0	0.0	34.4	0.4	0.0	0.0	0.0	35.6	1.8	0.0	0.0	0.0
310	10.3	0.3	0.0	0.0	0.0	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	18.7	0.3	0.0	0.0	0.0
320	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0
330	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
350	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

U500 tunnel = 4.5 m/s

[illegible]

U500 tunnel = 4.5 m/s

50

transportband is 18 mm gezakt
transportband draait niet
meetpunten staan op 6 mm hoogte
meetbladen 17 t/m 20
bronhoeveelheid=100 l/h (8 l/h isob. en 92 l/h lucht)
U500 tunnel = 4.5 m/s

hoek	Verduunningsfactor K (90720*c)														
	1	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	27
0	432.2	6.0	0.0	0.0	0.0	373.4	54.3	0.0	0.0	0.0	351.4	2.9	0.0	0.0	0.0
10	347.5	5.0	0.0	0.0	0.0	327.7	35.7	0.0	0.0	0.0	400.7	2.2	0.0	0.0	0.0
20	303.7	4.6	0.0	0.0	0.0	331.9	48.7	0.0	0.0	0.0	415.3	3.8	0.0	0.0	0.0
30	261.4	2.0	0.0	0.0	0.0	340.8	53.0	0.0	0.0	0.0	393.7	4.2	0.0	0.0	0.0
40	190.9	0.0	0.0	0.0	0.0	371.3	46.9	0.0	0.0	0.0	394.6	4.6	0.0	0.0	0.0
50	102.7	0.0	0.0	0.0	0.0	360.7	34.1	0.0	0.0	0.0	371.7	4.6	0.0	0.0	0.0
60	52.1	0.0	0.0	0.0	0.0	264.7	8.8	0.0	0.0	0.0	258.2	2.2	0.0	0.0	0.0
70	23.6	0.0	0.0	0.0	0.0	92.9	0.9	0.0	0.0	0.0	121.9	9.9	0.0	0.0	0.0
80	17.8	0.0	0.0	0.0	0.0	88.1	2.4	0.0	0.0	0.0	80.6	26.8	5.1	0.0	0.0
90	45.1	0.9	0.0	0.0	0.0	126.1	14.6	1.7	0.0	0.0	174.5	24.4	4.6	0.0	0.0
100	77.5	6.6	0.6	0.0	0.0	213.4	48.0	11.4	0.6	0.0	308.8	98.0	41.0	5.8	0.0
110	98.5	16.5	2.1	0.0	0.0	276.3	76.3	33.4	6.3	0.0	358.2	134.2	72.6	29.6	0.8
120	109.6	21.5	5.1	0.0	0.0	241.9	90.6	52.1	15.3	0.0	286.5	111.1	72.7	40.4	5.5
130	127.9	27.3	11.5	9.2	0.0	174.7	69.9	48.4	25.7	2.0	231.9	100.4	65.9	41.5	17.7
140	132.4	30.7	13.8	4.0	0.0	170.1	59.9	42.3	26.9	8.8	195.4	80.6	62.9	44.3	20.0
150	125.1	28.2	18.0	10.4	0.3	158.3	68.7	48.2	31.1	12.7	181.2	65.2	58.5	42.9	24.8
160	132.0	31.8	18.8	12.7	4.6	147.1	72.7	51.2	35.5	23.9	176.5	63.9	47.1	43.0	28.1
170	131.3	46.1	31.1	20.2	10.7	151.0	65.3	47.2	37.4	25.0	164.4	69.9	50.3	36.4	25.5
180	151.5	61.8	44.4	35.6	22.5	151.0	68.2	46.5	37.1	23.7	165.6	67.9	52.4	38.5	24.1
190	167.5	70.1	52.1	43.9	29.2	150.6	62.4	47.5	39.2	26.0	139.3	48.7	34.0	26.1	12.5
200	195.1	65.3	44.9	38.5	24.0	164.4	64.2	45.4	36.2	22.0	112.4	32.0	24.5	15.1	6.1
210	239.5	71.7	54.3	42.8	27.0	186.5	73.3	54.3	38.9	17.9	103.3	31.6	20.9	12.1	0.7
220	258.2	79.8	58.1	42.9	26.2	185.3	69.9	45.7	26.0	11.3	116.0	34.9	19.4	5.5	0.0
230	300.9	84.4	59.9	45.1	19.3	168.7	69.5	41.7	28.5	4.5	128.7	29.7	13.2	0.7	0.0
240	322.8	89.7	64.9	46.9	12.5	217.7	91.9	53.7	24.2	0.0	121.9	19.4	5.8	0.0	0.0
250	390.3	117.9	79.2	40.2	1.5	265.3	82.3	43.8	10.5	0.0	114.1	17.3	1.5	0.0	0.0
260	377.6	97.0	59.9	11.7	0.0	250.6	56.1	23.6	1.1	0.0	90.6	6.5	0.0	0.0	0.0
270	279.0	42.0	10.2	1.1	0.0	140.6	24.6	2.9	0.0	0.0	47.2	2.0	0.0	0.0	0.0
280	118.8	7.7	0.0	0.0	0.0	87.3	3.7	0.0	0.0	0.0	26.2	0.4	0.0	0.0	0.0
290	121.0	1.5	0.0	0.0	0.0	74.5	1.0	0.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0
300	307.7	4.5	0.0	0.0	0.0	165.3	4.1	0.0	0.0	0.0	41.5	0.0	0.0	0.0	0.0
310	460.5	9.7	0.0	0.0	0.0	316.8	19.4	0.0	0.0	0.0	78.8	0.3	0.0	0.0	0.0
320	472.2	10.5	0.0	0.0	0.0	327.0	36.2	0.0	0.0	0.0	129.1	0.9	0.0	0.0	0.0
330	458.1	11.1	0.0	0.0	0.0	353.4	57.1	0.0	0.0	0.0	205.4	0.8	0.0	0.0	0.0
340	439.6	9.8	0.0	0.0	0.0	373.8	74.8	0.0	0.0	0.0	290.6	1.6	0.0	0.0	0.0
350	424.4	6.9	0.0	0.0	0.0	397.2	83.1	0.0	0.0	0.0	330.8	1.4	0.0	0.0	0.0

transportband is 18 mm gezakt
transportband draait met 1430 rpm (12 m/s)
meetpunten staan op 6 mm hoogte
meetbladen 21 t/m 24
branhoeveelheid=100 l/h (8 l/h isob. en 92 l/h lucht)
U500 tunnel = 4.5 m/s

hoek	Verduunningsfactor K (90720*c)														
	1	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	27
0	50.8	1.3	-0.0	-0.0	-0.0	94.6	11.3	-0.0	-0.0	-0.0	125.1	3.0	-0.0	-0.0	-0.0
10	42.8	0.7	-0.0	-0.0	-0.0	84.3	11.5	-0.0	-0.0	-0.0	128.8	2.7	-0.0	-0.0	-0.0
20	41.5	0.6	-0.0	-0.0	-0.0	93.5	12.7	-0.0	-0.0	-0.0	127.7	2.5	-0.0	-0.0	-0.0
30	31.4	0.4	-0.0	-0.0	-0.0	93.3	11.4	-0.0	-0.0	-0.0	122.1	2.2	-0.0	-0.0	-0.0
40	23.6	0.3	-0.0	-0.0	-0.0	92.9	8.9	-0.0	-0.0	-0.0	115.8	1.8	-0.0	-0.0	-0.0
50	16.4	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	85.0	5.3	-0.0	-0.0	-0.0	109.4	1.5	-0.0	-0.0	-0.0
60	12.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	70.0	2.4	-0.0	-0.0	-0.0	105.9	1.3	-0.0	-0.0	-0.0
70	12.2	0.3	-0.0	-0.0	-0.0	62.1	1.1	-0.0	-0.0	-0.0	99.1	1.1	-0.0	-0.0	-0.0
80	15.1	1.3	-0.0	-0.0	-0.0	66.4	3.6	-0.0	-0.0	-0.0	109.2	7.9	-0.0	-0.0	-0.0
90	22.3	1.5	-0.0	-0.0	-0.0	84.2	21.0	1.5	-0.0	-0.0	131.0	41.6	5.7	0.3	-0.0
100	30.4	5.2	0.7	-0.0	-0.0	94.0	34.4	10.6	0.6	-0.0	135.0	56.7	29.2	4.2	-0.0
110	38.8	10.9	3.9	-0.0	-0.0	103.7	47.1	26.2	4.5	-0.0	135.7	67.1	45.1	18.4	0.6
120	42.9	13.9	7.2	1.2	-0.0	111.1	54.9	34.6	13.1	0.4	137.5	73.2	50.3	31.4	5.8
130	48.3	17.8	10.2	3.7	-0.0	114.3	57.2	39.6	21.9	3.1	129.0	69.5	51.2	36.1	15.5
140	55.0	23.9	14.3	7.0	0.4	110.2	56.9	41.5	27.2	9.2	119.1	64.0	47.3	35.3	20.2
150	58.9	27.4	18.4	11.0	2.7	106.3	54.6	39.2	28.0	15.0	108.0	55.0	42.4	32.1	22.2
160	61.3	30.3	20.9	14.0	6.6	103.3	53.4	39.5	28.8	17.8	98.9	49.7	37.3	29.2	20.4
170	61.2	31.5	22.6	16.4	9.3	99.9	51.3	37.1	28.3	18.8	92.0	45.5	33.4	27.2	19.6
180	61.9	32.7	23.7	18.6	18.6	95.9	51.6	36.0	26.6	19.2	85.6	41.0	30.3	23.2	16.7
190	61.2	32.4	24.7	19.5	14.2	91.8	47.3	33.9	24.8	17.6	77.5	36.4	26.7	19.9	14.2
200	63.3	34.2	26.0	21.3	15.6	91.5	48.6	34.1	25.0	16.4	80.7	37.6	28.1	20.5	13.7
210	65.6	36.7	28.5	23.2	17.7	92.2	48.4	33.5	23.8	15.0	83.6	40.6	28.7	20.9	11.4
220	70.5	42.4	32.4	26.8	17.6	90.0	45.3	30.5	21.5	14.2	83.6	42.0	29.6	20.2	6.6
230	74.8	45.9	35.1	26.9	16.4	92.6	47.7	33.1	24.6	14.5	89.3	44.3	30.5	17.3	3.4
240	75.2	46.7	34.4	26.5	17.2	99.3	53.6	38.4	26.9	9.1	92.4	46.9	27.0	13.0	0.9
250	79.4	50.1	38.8	28.0	10.4	107.0	58.5	39.3	22.5	2.8	94.0	45.1	25.0	9.2	0.2
260	76.3	46.7	33.4	19.8	2.1	96.1	52.4	32.2	14.5	-0.0	87.5	39.0	18.4	3.9	-0.0
270	69.5	41.8	24.9	8.4	-0.0	86.6	47.3	21.9	3.5	-0.0	74.5	37.6	11.6	0.3	-0.0
280	75.0	38.1	13.0	0.9	-0.0	105.7	52.3	14.1	0.4	-0.0	103.5	41.5	5.6	-0.0	-0.0
290	65.1	21.3	1.2	-0.0	-0.0	109.4	35.7	2.0	-0.0	-0.0	114.9	32.7	1.5	-0.0	-0.0
300	56.6	9.9	-0.0	-0.0	-0.0	98.7	20.7	0.3	-0.0	-0.0	111.1	18.9	0.3	-0.0	-0.0
310	54.3	6.4	-0.0	-0.0	-0.0	90.9	13.5	-0.0	-0.0	-0.0	106.3	12.3	-0.0	-0.0	-0.0
320	53.1	4.4	-0.0	-0.0	-0.0	89.5	14.1	-0.0	-0.0	-0.0	104.7	8.0	-0.0	-0.0	-0.0
330	52.9	2.7	-0.0	-0.0	-0.0	91.5	12.6	-0.0	-0.0	-0.0	109.4	5.3	-0.0	-0.0	-0.0
340	50.9	1.9	-0.0	-0.0	-0.0	94.4	12.7	-0.0	-0.0	-0.0	115.6	3.7	-0.0	-0.0	-0.0
350	50.9	1.5	-0.0	-0.0	-0.0	98.1	12.1	-0.0	-0.0	-0.0	119.9	3.3	-0.0	-0.0	-0.0

transportband is 18 mm gezakt
transportband draait niet
meetpunten staan op verschillende hoogtes
meetbladen 25 t/m 28
bronhoeveelheid=100 l/h (8 l/h isob. en 92 l/h lucht)
U500 tunnel = 4.5 m/s

hoek	Verdunningsfactor K (90720*c)														
	1	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	27
0	242.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	223.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	257.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
10	228.6	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	245.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	276.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
20	166.2	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	248.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	278.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
30	114.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	229.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	280.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
40	65.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	206.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	266.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
50	29.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	185.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	222.6	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
60	13.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	111.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	179.6	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
70	8.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	41.9	0.2	-0.0	-0.0	-0.0	67.5	0.3	-0.0	-0.0	-0.0
80	9.2	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	45.1	1.0	-0.0	-0.0	-0.0	61.6	2.3	-0.0	-0.0	-0.0
90	25.0	0.7	-0.0	-0.0	-0.0	86.1	11.0	1.0	-0.0	-0.0	119.1	19.8	3.3	-0.0	-0.0
100	40.2	2.4	-0.0	-0.0	-0.0	147.3	28.5	9.5	0.3	-0.0	222.6	70.8	28.2	4.7	-0.0
110	50.8	6.0	-0.0	-0.0	-0.0	149.3	41.8	20.7	3.2	-0.0	194.8	85.4	48.1	17.8	0.6
120	55.6	9.2	1.9	-0.0	-0.0	127.0	45.9	27.5	10.3	-0.0	155.3	54.4	40.6	28.2	5.4
130	73.0	11.9	4.8	-0.0	-0.0	95.7	29.6	21.4	16.4	1.1	151.2	46.5	32.2	25.5	8.8
140	72.4	17.3	8.4	2.0	-0.0	115.8	34.6	20.3	13.6	5.7	156.3	49.5	30.6	26.7	9.8
150	71.4	17.9	9.2	5.7	-0.0	126.8	39.7	26.7	18.9	7.3	145.4	50.1	33.3	23.9	13.7
160	65.4	17.5	10.7	7.0	2.1	127.7	45.3	28.3	22.2	12.1	145.7	52.0	28.7	24.6	14.0
170	93.3	30.6	16.6	14.1	4.3	125.7	45.5	31.5	23.0	14.8	129.7	53.4	32.8	23.4	14.3
180	119.3	42.3	26.6	26.7	11.7	117.4	46.7	29.6	24.8	15.1	126.6	47.5	33.9	24.3	14.2
190	116.2	43.3	31.1	26.6	15.1	127.9	46.0	34.4	24.4	14.2	119.9	42.7	24.3	17.3	7.2
200	119.3	51.3	33.1	23.1	13.0	140.3	47.9	30.1	20.7	13.8	80.0	19.1	13.4	8.2	2.6
210	151.2	54.3	31.0	23.9	14.4	140.1	45.2	23.8	20.1	10.3	51.2	16.3	9.4	5.9	-0.0
220	166.2	52.3	30.8	23.3	11.4	116.6	33.4	20.9	17.4	6.3	56.9	16.9	9.4	2.8	-0.0
230	164.9	53.1	32.8	23.9	10.5	94.4	29.8	22.8	18.7	2.0	65.4	12.6	5.9	0.5	-0.0
240	171.1	49.2	31.8	22.9	8.5	105.7	47.3	34.2	11.1	0.4	51.3	9.5	2.1	-0.0	-0.0
250	188.6	62.2	38.3	24.8	1.0	145.0	56.6	25.8	5.7	-0.0	55.0	9.0	1.0	-0.0	-0.0
260	227.6	66.7	37.9	10.4	-0.0	155.1	44.7	13.1	0.6	-0.0	53.3	3.2	-0.0	-0.0	-0.0
270	166.7	37.7	11.1	0.3	-0.0	113.7	17.5	2.4	-0.0	-0.0	37.8	0.7	-0.0	-0.0	-0.0
280	83.6	6.6	-0.0	-0.0	-0.0	60.1	2.8	-0.0	-0.0	-0.0	17.4	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
290	60.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	37.6	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	8.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
300	135.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	92.6	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	16.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
310	213.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	172.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	26.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
320	259.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	200.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	58.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
330	283.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	229.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	104.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
340	279.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	245.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	141.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
350	292.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	260.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	202.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0

transportband is 18 mm gezakt
transportband draait met 1430 rpm (12 m/s)
meetpunten staan op verschillende hoogtes
meetbladen 29 t/m 32
bronhoeveelheid=100 l/h (8 l/h isob. en 92 l/h lucht)
U500 tunnel = 4.5 m/s

Verduunningsfactor K (90720±e)															
hoek	1	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	27
0	31.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	69.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	94.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
10	29.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	68.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	93.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
20	23.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	67.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	93.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
30	18.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	67.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	89.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
40	11.6	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	65.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	88.2	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
50	8.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	60.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	83.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
60	6.9	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	48.4	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	80.9	0.4	-0.0	-0.0	-0.0
70	7.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	42.2	0.3	-0.0	-0.0	-0.0	78.2	0.4	-0.0	-0.0	-0.0
80	10.1	0.3	-0.0	-0.0	-0.0	51.2	2.2	-0.0	-0.0	-0.0	90.2	5.6	-0.0	-0.0	-0.0
90	17.4	1.5	0.3	-0.0	-0.0	65.7	13.0	1.4	-0.0	-0.0	108.6	34.8	6.8	0.3	-0.0
100	25.6	4.8	1.0	-0.0	-0.0	76.8	26.5	9.7	0.6	-0.0	111.3	46.8	24.2	4.5	-0.0
110	30.4	8.6	3.1	0.4	-0.0	86.1	35.5	17.5	4.5	-0.0	115.1	57.3	36.4	15.9	0.7
120	36.1	11.6	6.2	1.2	-0.0	92.6	41.8	25.0	10.1	0.6	111.9	57.9	40.1	23.6	4.2
130	42.9	15.1	8.7	3.0	-0.0	92.0	41.9	29.1	16.4	2.5	102.5	51.7	37.2	26.1	10.4
140	46.4	18.3	9.8	5.5	0.5	91.3	41.1	28.1	18.8	6.6	95.0	47.5	33.6	23.7	13.4
150	51.5	21.5	13.6	8.0	2.6	85.9	39.2	27.0	21.0	9.7	83.8	42.3	28.2	22.6	14.5
160	53.1	22.7	15.3	10.4	4.8	83.6	36.7	26.1	21.8	10.3	75.2	36.3	25.9	20.7	12.6
170	53.7	23.9	17.0	12.0	6.0	79.7	35.7	25.0	21.0	11.9	69.2	31.7	24.1	18.3	11.9
180	54.1	25.3	17.2	13.0	7.5	76.2	33.5	25.2	18.4	11.5	64.4	29.4	20.4	16.6	10.0
190	53.3	25.5	17.3	14.4	8.6	70.5	31.9	23.4	17.7	11.4	60.1	26.4	17.5	13.2	8.6
200	53.4	25.6	18.6	15.1	9.6	72.9	32.2	23.7	18.7	10.7	61.8	29.0	18.4	14.4	7.9
210	54.6	28.0	19.8	15.6	11.3	70.8	34.0	23.1	16.6	9.1	62.1	29.2	19.4	14.8	7.0
220	59.7	32.5	23.9	20.2	11.5	67.8	32.8	21.9	16.1	8.7	59.4	29.7	20.9	15.5	4.6
230	63.4	35.2	26.4	19.8	10.7	67.3	32.8	23.0	16.8	9.1	61.8	33.9	22.5	11.6	2.3
240	61.5	36.1	25.5	19.6	11.6	70.0	40.0	28.1	20.6	6.0	65.1	33.1	20.2	9.2	0.4
250	63.7	40.7	30.8	22.6	7.3	81.1	42.9	30.4	16.9	1.8	69.8	34.1	19.2	6.9	-0.0
260	61.5	39.7	28.3	15.3	1.2	73.9	39.5	24.3	10.4	-0.0	57.6	31.0	15.9	2.3	-0.0
270	52.2	36.1	21.9	6.7	-0.0	59.2	36.8	18.7	3.0	-0.0	50.5	26.4	7.4	0.4	-0.0
280	61.2	32.1	11.0	1.0	-0.0	78.7	43.7	10.2	0.4	-0.0	74.8	32.4	4.0	-0.0	-0.0
290	54.0	14.1	1.1	-0.0	-0.0	88.0	25.0	1.1	-0.0	-0.0	89.7	22.9	0.7	-0.0	-0.0
300	44.5	4.6	-0.0	-0.0	-0.0	77.2	10.4	-0.0	-0.0	-0.0	87.0	9.0	-0.0	-0.0	-0.0
310	38.4	1.3	-0.0	-0.0	-0.0	69.4	2.8	-0.0	-0.0	-0.0	82.1	2.6	-0.0	-0.0	-0.0
320	36.7	0.3	-0.0	-0.0	-0.0	64.5	0.5	-0.0	-0.0	-0.0	78.5	1.1	-0.0	-0.0	-0.0
330	35.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	65.1	0.4	-0.0	-0.0	-0.0	82.9	0.5	-0.0	-0.0	-0.0
340	34.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	67.9	0.3	-0.0	-0.0	-0.0	87.7	0.3	-0.0	-0.0	-0.0
350	34.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	69.7	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	92.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

Tabel A9 Resultaten van luchtsnelheids- en turbulentiemetingen
(verkeerssnelheid $V = 12$ m/s)

ANEMO Versie 5.4 DD : 2:18 PM WED., 19 JAN., 1994

POSITIE COORDINATEN(MM)				Ux	Uy	Ix	Iy
NR	X	Y	Z	(M/S)	(M/S)	(%)	(%)
1	0.	0.	20.0	3.05	.04	20.4	16.2
2	0.	0.	20.0	2.98	.11	21.0	15.1
3	0.	0.	20.0	3.15	-.07	20.2	15.7
4	0.	0.	20.0	3.03	.01	21.3	16.4
5	0.	0.	25.0	3.13	.03	16.6	13.5
1	0.	0.	30.0	3.11	.09	15.1	12.3
2	0.	0.	35.0	3.14	.12	14.3	10.9
3	0.	0.	40.0	3.20	.05	14.3	11.7
4	0.	0.	45.0	3.18	.09	14.0	10.6
5	0.	0.	50.0	3.54	.03	11.7	11.1
1	12.	0.	20.0	3.10	.00	25.6	16.6
2	12.	0.	20.0	3.08	.01	24.7	16.1
3	12.	0.	20.0	3.20	-.08	22.7	17.2
4	12.	0.	20.0	3.01	.06	24.6	17.2
5	12.	0.	25.0	3.22	.06	14.9	13.0
1	12.	0.	30.0	3.10	-.05	15.1	12.9
2	12.	0.	35.0	3.17	.04	14.6	13.3
3	12.	0.	40.0	3.15	.02	13.5	11.9
4	12.	0.	45.0	3.20	.01	12.7	11.1
5	12.	0.	50.0	3.34	-.03	14.3	11.2
1	24.	0.	5.0	2.94	-.76	36.1	29.7
2	24.	0.	10.0	2.80	-.38	33.8	28.8
3	24.	0.	15.0	2.87	.00	26.9	22.8
4	24.	0.	20.0	2.83	.05	21.1	17.6
5	24.	0.	25.0	2.92	.03	18.5	13.9
1	24.	0.	30.0	3.08	.10	15.1	14.2
2	24.	0.	35.0	3.16	-.03	13.4	11.1
3	24.	0.	40.0	3.29	.06	12.5	10.6
4	24.	0.	45.0	3.05	.03	13.0	12.5
5	24.	0.	50.0	3.25	-.05	16.3	10.8
1	36.	0.	5.0	2.66	-.81	33.9	28.2
2	36.	0.	10.0	2.71	-.45	29.5	26.7
3	36.	0.	15.0	2.92	-.06	24.2	21.7
4	36.	0.	20.0	3.00	.07	20.2	16.8
5	36.	0.	25.0	2.93	.07	16.7	14.3
1	36.	0.	30.0	3.13	-.09	14.4	14.3
2	36.	0.	35.0	3.03	.03	14.1	11.5
3	36.	0.	40.0	3.26	.10	14.3	11.0
4	36.	0.	45.0	3.06	.05	14.3	11.7
5	36.	0.	50.0	3.39	.07	13.6	12.2
1	48.	0.	5.0	2.65	-.77	28.8	26.1
2	48.	0.	10.0	2.71	-.49	27.5	25.9
3	48.	0.	15.0	2.76	-.33	21.5	22.1
4	48.	0.	20.0	2.90	-.02	20.1	17.0
5	48.	0.	25.0	3.09	.05	15.9	14.2
1	48.	0.	30.0	3.11	.06	14.0	12.5
2	48.	0.	35.0	3.19	.10	14.4	11.9
3	48.	0.	40.0	3.22	-.15	13.9	12.2
4	48.	0.	45.0	3.56	.00	14.1	9.6
5	48.	0.	50.0	3.35	.08	13.8	11.0

Invloed van weggeometrie op de concentratie van luchtverontreinigende stoffen op en langs de weg

Tabel A10 Resultaten van luchtsnelheids- en turbulentiemetingen
(verkeerssnelheid $V = 0$ m/s)

ANEMO Versie 5.4 DD : 1:36 PM WED., 19 JAN., 1994

POSITIE COORDINATEN(MM)				Ux	Uy	Ix	Iy
NR	X	Y	Z	(M/S)	(M/S)	(%)	(%)
1	0.	0.	5.0	2.39	-.00	17.5	13.1
2	0.	0.	10.0	2.54	.08	16.2	14.2
3	0.	0.	15.0	2.75	.06	14.1	11.9
4	0.	0.	20.0	2.95	.07	13.9	11.8
5	0.	0.	25.0	3.32	.18	12.7	11.8
1	0.	0.	30.0	3.12	.05	13.6	12.1
2	0.	0.	35.0	3.22	-.02	13.5	12.7
3	0.	0.	40.0	3.15	.05	15.0	10.1
4	0.	0.	45.0	3.36	.06	12.4	11.4
5	0.	0.	50.0	3.32	.01	13.2	11.6
1	12.	0.	5.0	2.66	-.03	17.0	14.0
2	12.	0.	10.0	2.51	.08	15.9	12.5
3	12.	0.	15.0	2.94	.12	14.4	11.9
4	12.	0.	20.0	2.92	-.00	15.1	13.5
5	12.	0.	25.0	3.10	-.08	14.8	11.9
1	12.	0.	30.0	3.34	-.03	15.7	10.4
2	12.	0.	35.0	3.25	-.04	14.0	10.7
3	12.	0.	40.0	3.09	-.03	13.8	12.0
4	12.	0.	45.0	3.23	.02	14.6	11.9
5	12.	0.	50.0	3.33	-.05	13.3	10.3
1	24.	0.	5.0	2.43	.02	16.8	14.3
2	24.	0.	10.0	2.67	.05	16.4	14.2
3	24.	0.	15.0	2.79	.07	15.0	13.5
4	24.	0.	20.0	2.88	.05	15.1	13.7
5	24.	0.	25.0	3.15	-.09	14.5	12.6
1	24.	0.	30.0	3.18	-.00	14.5	11.8
2	24.	0.	35.0	3.14	.04	15.2	11.5
3	24.	0.	40.0	3.16	.00	13.7	12.0
4	24.	0.	45.0	3.16	.04	13.9	10.2
5	24.	0.	50.0	3.29	-.01	14.1	10.7
1	36.	0.	5.0	2.43	.01	17.0	14.5
2	36.	0.	10.0	2.47	.03	15.9	12.6
3	36.	0.	15.0	2.64	.02	15.9	12.6
4	36.	0.	20.0	2.88	-.00	15.8	11.3
5	36.	0.	25.0	3.02	-.07	13.9	11.5
1	36.	0.	30.0	3.05	-.07	14.8	11.5
2	36.	0.	35.0	3.13	.02	12.9	11.4
3	36.	0.	40.0	3.22	.15	15.2	10.2
4	36.	0.	45.0	3.20	.02	14.5	10.9
5	36.	0.	50.0	3.42	.02	14.0	12.3
1	48.	0.	5.0	2.29	.04	17.7	14.1
2	48.	0.	10.0	2.66	-.04	15.9	14.0
3	48.	0.	15.0	2.82	.09	15.6	13.8
4	48.	0.	20.0	3.01	.05	14.6	12.0
5	48.	0.	25.0	2.96	-.00	16.2	11.5
1	48.	0.	30.0	3.08	-.05	12.7	12.3
2	48.	0.	35.0	3.13	.09	14.5	11.5
3	48.	0.	40.0	3.25	.05	13.9	10.6
4	48.	0.	45.0	3.43	.07	13.7	11.3
5	48.	0.	50.0	3.21	.02	14.2	11.4