

Een nieuw nomogram voor het berekenen van waterlopen

Inleiding

In de praktijk van de ontwerptechniek voor waterbeheersingsplannen doet zich vaak de behoefte gevoelen aan een nomogram, waarmee op eenvoudige wijze de afmetingen van de leidingen kunnen worden bepaald. Daarbij gaat het dan veelal niet alleen om het natte profiel, maar ook om het totale profiel met het oog op het grondverzet, dat in hoge mate de kosten bepaalt. Daarnaast speelt uiteraard als kostenfactor de bovenbreedte, die het landverlies aangeeft, een belangrijke rol. Voor de ontwerper is het nuttig snel een indruk te kunnen krijgen van de omvang van het grondverzet en het landverlies en met name van de invloed van bepaalde normen zoals taludhelling, bodembreedte-waterdiepte verhouding en de drooglegging op deze kostenbepalende factoren.

De grafieken behorende bij het rapport van de Commissie Waterlopen zijn voor het verkrijgen van een snel overzicht echter minder geschikt. Om deze reden leek het wenselijk een nomogram te ontwikkelen, dat daartoe wel mogelijkheden biedt.

Gemeenend is, dat het in dit artikel beschreven monogram hieraan zal blijken te voldoen.

De opzet van het nomogram

a. De formule

Uitgangspunt voor het nomogram vormt uiteraard de formule van Manning

$$Q = k_M A R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

hierin is: Q = debiet in $m^3/sec.$

k_M = wandruwheidsfactor $m^{1/3}/sec.$

P = natte omtrek in m'

R = hydraulische straal in $m' = \frac{A}{P}$

A = natte profiel in m^2

S = verhang in ‰.

b. De relatie k_{Manning} en waterdiepte

In de praktijk van de toepassingen blijkt, dat de keuze van de wandruweheidsfactor k_{Manning} wordt bepaald door 2 factoren, namelijk de waterdiepte en het groeiseizoen (winter en zomer). Voor de waterdiepte wordt in het meergenoemde rapport van de Commissie Waterlopen een klasse-indeling aangehouden van kleine leidingen (waterdiepte $d < 0,80$ m), middelgrote leidingen ($d = 0,70$ — $1,70$ m) en grote leidingen ($d > 1,50$ m). De hierbij aangegeven waarden voor k_{Manning} zijn te diskontinu om er in de praktijk bevredigend mee te werken.

Als gevolg hiervan zijn thans grafieken in gebruik, die een geleidelijk verband weergeven tussen de waterdiepte en de wandruweheidsfactor. Deze relatie, die ten naaste bij overeenkomt met de normen van de Commissie Waterlopen, is voor respectievelijk winter en zomer weergegeven in figuur 1. De kromme beantwoordt aan de vergelijking

$$k_M = a_1 \sqrt[3]{d} \quad (2)$$

Voor de winter is $a_1 = 33,79$ en voor de zomer is $a_1 = 22,53$.

Deze functie is in het nomogram verwerkt. In eerst instantie moge dit een beperking lijken in de keuzevrijheid van de ontwerper. In de praktijk van het ontwerpen zal dit nauwelijks als een bezwaar worden gevoeld, omdat men enerzijds toch uitgaat van de normen van de Commissie Waterlopen, die ook aan deze grafiek ten grondslag liggen en men anderzijds niet beschikt over resultaten van eigen metingen die tot afwijkende normen zouden leiden.

De verwerking van de functie van (d) in het rekenproces een niet onbelangrijk voordeel, omdat hiermede het tijdrovende reïteratieproces wordt vermeden. Een ieder, die met de bestaande grafieken op de hoogte is, weet, dat na de nomografische bepaling van de waterdiepte (d) en de bodembreedte (b) men steeds moet nagaan of de eerder aangenomen k_{Manning} overeenkomt met de gevonden waterdiepte. Is dit niet het geval dan kiest men een aangepaste k_{Manning} , waarna men de bewerking moet herhalen, of men zoekt de oplossing in een gewijzigde bodembreedte-waterdiepte, waarbij dan aan het gerechtvaardigd zijn van dit motief voor de betreffende keus ernstig moet worden getwijfeld.

Invoering van bovengenoemde functie komt aan deze bezwaren tegemoet en werkt tijd besparend.

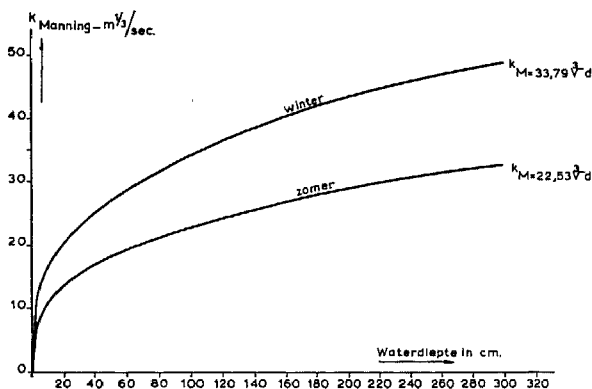


Fig. 1. Relatie tussen wandruwheid en waterdiepte.

e. De bodembreedte-waterdiepte verhouding

Bij de grafieken van de Commissie Waterlopen vindt de keuze van de bodembreedte-waterdiepte verhouding aan het eind van de procedure plaats. In dit nomogram dient dit vooraf te geschieden.

De ontwerper zal voor het doen van een zinvolle keus enig inzicht moeten hebben in de orde van grootte van afmetingen van het dwarsprofiel op grond van het debiet en het beschikbare of toelaatbare verhang. In het algemeen zal dit nauwelijks op bezwaren stuiten. Zelfs kan het als een voordeel worden aangemerkt, dat men van te voren wordt gedwongen een keus te doen, omdat men zich dan eerder zal gaan verdiepen in de consequenties van de keus op de hydraulische eigenschappen (R) van het dwarsprofiel, het grondverzet, het landverlies en de peilfluctuaties.

d. Het grondverzet

Tot het ontwerpen van een waterlopenstelsel moet worden gerekend een berekening van het grondverzet. In de huidige procedure ontbreekt de vastlegging van het grondverzet. Deze berekening vindt later plaats als de dwarsprofielen zijn gewaterpast ten behoeve van een kostenbegroting. Ten tijde van het ontwerpen en het invullen van de M2p-staten is het echter gewenst snel een inzicht te verkrijgen in de omvang van het grondverzet en de invloed van de verschillende normen hierop. Deze normen kunnen betrekking hebben op de keuze van het verhang, van de taludhelling, de bodembreedte-waterdiepte verhouding en de drooglegging (HW-hoogte beneden maaiveld). Om deze redenen is behalve het natte profiel ook het totale profiel in het nomogram opgenomen.

e. Het landverlies

Hoewel van minder importantie dan het grondverzet is ook het landverlies een kostenfactor, die in de ontwerpen een rol speelt. Als zodanig is dan ook de bovenbreedte in het nomogram verwerkt.

De afleidingen

1. De symbolen

d_1 = drooglegging in m¹.

b = bodembreedte in m¹.

d = waterdiepte in m¹.

h = $(d + d_1)$ in m.

$c = \frac{b}{d}$ = bodembreedte-waterdiepte verhouding

$c_1 = \frac{d}{d_1 + d}$ $c = \frac{\text{bodembreedte}}{\text{totale diepte}} = \frac{b}{h}$

$$n = \text{taludhelling} = \frac{\text{horizontaal}}{\text{verticaal}}$$

$$a_1 = \text{coëfficiënt} = \frac{k_M}{d^{1/3}} \text{ in sec.}^{-1}$$

$$a = a_1 \frac{(c+n)^{5/3}}{(c+2\sqrt{n^2+1})^{2/3}} \text{ in sec.}^{-1}$$

$$v = \text{gemiddelde stroomsnelheid in m'/sec.}$$

2. Het natte profiel

De formule

$$Q = k_M A R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

kan worden geschreven als functie van de waterdiepte (d) en de bodembreedte $b = cd$, dus ook als functie (d).

Het natte profiel is

$$A = bd + nd^2 = (c+n)d^2 \quad (3)$$

$$P = b + (2\sqrt{n^2+1})d = (c+2\sqrt{n^2+1})d \quad (4)$$

$$R = \frac{c+n}{c+2\sqrt{n^2+1}} d \quad (5)$$

ingevuld in (1) geeft:

$$Q = a_1 d^{1/3} (c+n) d^2 \frac{(c+n)^{2/3}}{(c+2\sqrt{n^2+1})^{2/3}} d^{2/3} S^{1/2} \quad (6)$$

of

$$Q = a_1 \frac{(c+n)^{5/3}}{(c+2\sqrt{n^2+1})^{2/3}} d^3 S^{1/2} \quad (7)$$

$$Q = ad^3 S^{1/2} \quad (8)$$

Voor de verschillende combinaties van c en n is a uit te rekenen. De waarden zijn weergegeven in tabel 1 voor de winter (waterafvoer) en voor de zomer (wateraanvoer). In het nomogram is dit verwerkt in een puntenveld rechts in de figuur. Door van de S -schaal een dubbelschaal (zomer en winter) te maken, zijn de verschillende k_M -waarden in het nomogram verwerkt.

Stelt men

$$aS^{1/2} = p \quad (9)$$

dan is

$$Q = p d^3 \quad (10)$$

Hierin vormt p de hulpschaal, waarom men scharniert.

De werkwijze is verder eenvoudig. Men kiest de taludhelling en de bodembreedte-waterdiepte verhouding. Dit bepaalt de plaats op de a -schaal.

Verbinding met S (het verhang) geeft een punt op de p schaal, waarom men scharniert naar het gegeven debiet Q met aflezing van de waterdiepte op de d -schaal.

In principe is hiermede het natte profiel bepaald ($b = cd$).

Ter controle van de gemiddelde stroomsnelheid, die een bepaalde kritische waarde niet mag overschrijden, dient dan nog A te worden bepaald.

Volgens (3) is $A = (c + n) d^2$. Verbinding van d met de $(c + n)$ -waarde geeft A , waarna verbinding met de Q -as rechts in het nomogram ($v = \frac{A}{Q}$) de gemiddelde stroomsnelheid v oplevert.

Overschrijdt deze de maximum toelaatbare stroomsnelheid dan zal Q verbonden met v maximaal een grotere natte doorsnede A geven. Daarna kan men 2 wegen volgen:

- a. $(c + n)$ -waarde handhaven; dit resulteert in een grotere d -waarde en daarmee in een grotere bodembreedte ($b = cd$). Het verhang van de waterspiegel vermindert dan zodanig, dat bij maatgevende afvoer de maximaal toelaatbare stroomsnelheid optreedt.

TABEL 1. a -waarden. ($Q = ad^3S^{1/2}$)

$\downarrow n$	$\rightarrow c = \frac{b}{d}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		1	winter	29,79	43,84	58,59	73,81	89,37	105,17
	zomer	19,87	29,23	39,07	49,21	59,50	70,10	78,70	91,60
1,5	winter	41,83	56,21	71,11	86,39	101,95	117,72	133,67	149,74
	zomer	27,89	37,48	47,41	57,61	67,80	78,20	88,90	99,60
2	winter	53,42	67,90	82,82	98,06	113,55	129,25	145,11	161,08
	zomer	35,62	45,27	55,22	65,38	75,60	86,10	96,70	107,40
2,5	winter	64,69	79,20	94,11	109,28	124,70	140,30	156,05	171,93
	zomer	43,14	52,81	62,75	72,87	82,90	93,40	104,00	114,70
3	winter	75,78	90,30	105,18	120,28	135,61	151,12	166,77	182,55
	zomer	50,53	60,21	70,13	80,20	90,20	100,80	111,00	121,70

- b. d handhaven en de $(c + n)$ -waarde aflezen. Dit zal zich voordoen indien men om redenen van bodemgesteldheid geen diepere ingraving wenst. Bij dezelfde taludhelling (n -waarde) verandert dan de bodembreedte-waterdiepte verhouding. Het punt op de a -schaal verschuift naar boven, hetgeen bij een vast punt op de p -schaal $\left(\frac{Q}{d^3}\right)$ resulteert in een geringer verhang (S) van de waterspiegel.

3. Het grondverzet

De formule (3) voor het natte profiel kan ook worden toegepast voor het totale profiel en daarmee voor het grondverzet. In de symbolen vermeldt sub 1 is

$$A_{\text{totaal}} = c d (d + d_1) + n (d + d_1)^2 \quad (11)$$

Invoering hierin van $c_1 = \frac{dc}{h}$ en $h = d + d_1$ geeft

$$A = c_1 h^2 + n h^2 = (c_1 + n) h^2 \quad (12)$$

Als d bepaald is kan bij bekende drooglegging (d_1) de waarden van c_1 en h eenvoudig worden berekend. Verbinding van h op de d -as met $(c_1 + n)$ -waarde op de $(c + n)$ -as geeft dan op de A -as het grondverzet.

De invloed van de keuze van het talud (n) en de bodembreedte-waterdiepte verhouding (c) op het grondverzet kan snel worden bepaald door uitgaande van 2 aannamen de bewerking uit te voeren.

In bepaalde gevallen kan men dan voor een leidingvak de meerdere kosten van grondverzet en landverlies (hierna te bespreken) bij een flauwer talud of bij een grotere bodembreedte-waterdiepte verhouding afwegen tegen de geringere kans op betuiningen respectievelijk de voordelen van een geringere peilfluctuatie (be-malen gebieden).

4. Het landverlies

$$\text{De bovenbreedte } B = b + 2n (d + d_1) = cd + 2n (d + d_1) \quad (13)$$

Invoering van $c_1 = \frac{dc}{h}$ en $h = d + d_1$ geeft:

$$B = c_1 h + 2nh = (c_1 + 2n) h \quad (14)$$

Door verbinding van h met $(c_1 + 2n)$ op de $(c + n)$ -as kan op de B -as de bovenbreedte in m' worden afgelezen.

De invloed van de keuze van de c - en n -waarde op de bovenbreedte kan hiermede snel worden achterhaald.

Een voorbeeld:

Gegeven: $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{sec}$. $S = 0,1 \text{ ‰}$ $d_1 = 0,50 \text{ m}$.

a. Keuze: $n = 2$ $c = 2,5$

Oplossing: Verbind het punt op de a-schaal met $S = 0,1 \text{ ‰}$. Scharnieren om p-schaal naar $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{sec}$. geeft de waterdiepte $d = 1,30 \text{ m}$ met bodembreedte $b = 3,25 \text{ m}$. De gemiddelde stroomsnelheid v wordt bepaald door $d = 1,30$ te verbinden met $c + n = 4,5$ op de $(c + n)$ -schaal, waarmee $A_{\text{nat}} = 7,60 \text{ m}^2$ wordt gevonden.

Verbinding met:

$Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{sec}$. rechts geeft $v = 0,33 \text{ m/sec}$.

Grondverzet: $c_1 = \frac{1,30}{1,80} \times 2,5 = 1,80$. Verbinding van $h = 1,80$

met $(c_1 + n) = 3,80$ geeft $A_{\text{totaal}} = 12,3 \text{ m}^2/\text{m}'$

Landverlies: Verbinding van $(c_1 + 2n) = 5,80$ met $h = 1,80$ geeft een bovenbreedte van $10,5 \text{ m}^2/\text{m}'$.

Kostenraming: $12,30 \times 2,5 + 10,5 \times 1 = f 40,75/\text{m}'$.

b. Keuze: $n = 3$ $c = 3,5$ (vrees voor taludafschuiving)

Oplossing: $d = 1,15 \text{ m}$ $b = 4,00 \text{ m}$ $A_{\text{nat}} = 8,5 \text{ m}^2$ $v = 0,30 \text{ m/sec}$.

Grondverzet: $c_1 = \frac{1,15}{1,65} \times 3,5 = 2,44$; $A_{\text{totaal}} = 15,0 \text{ m}^2/\text{m}'$

Landverlies: $14 \text{ m}^2/\text{m}'$

Kostenraming: $15,0 \times 2,5 + 14 \times 1 = f 51,50/\text{m}'$

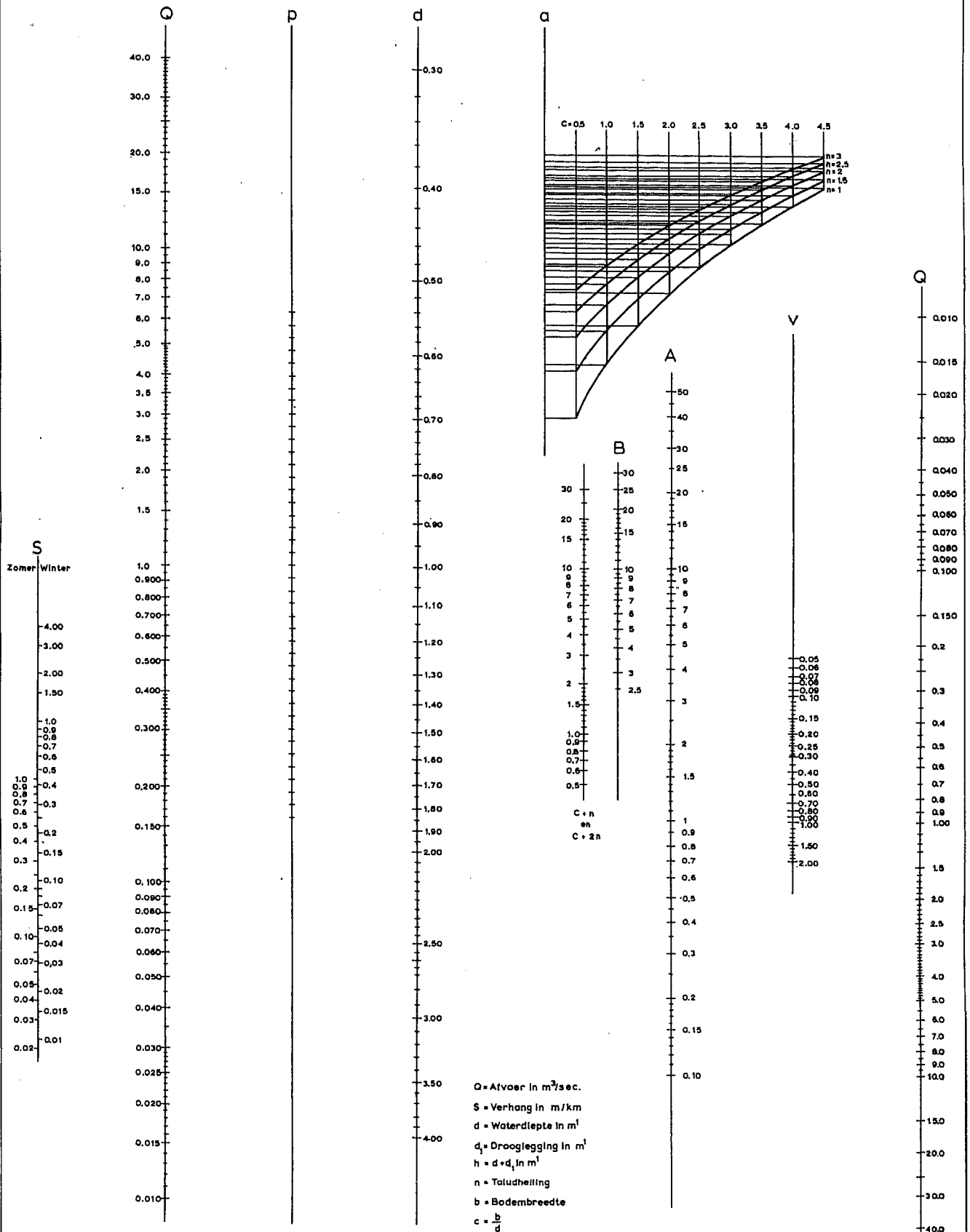
De extra kosten bedragen in dit geval ca. $f 11,-/\text{m}'$.

De beslissing inzake de keus dient dan verder mede te worden bepaald door de verwachting van de noodzaak van betuining, de bezwaren van betuining uit een oogpunt van machinaal onderhoud en de grotere oppervlakte van onderhoud ($3 \text{ m}^2/\text{m}'$).

Conclusies

1. Het systeem van afzonderlijke grafieken voor elke taludhelling wordt vervangen door één grafiek.
2. Door het verwerken in het nomogram van de k_M -waarde voor de winter en zomer als functie van de waterdiepte wordt de discontinuïteit in deze normen vermeden. Tevens wordt hiermede het tijdrovende reïteratie-proces onderwerpen.
3. Het nomogram voorziet in de mogelijkheid van berekening van het grondverzet en het landverlies.
4. De invloed van de keuze van de taludhelling en de bodembreedte-waterdiepte-verhouding op het grondverzet en het landverlies kan snel worden bepaald, hetgeen de economie van het ontwerp ten goede kan komen.

NOMOGRAM VOOR HET BEREKENEN VAN WATERLOPEN



$Q = A \cdot v$ in $m^3/sec.$
 $S =$ Verhang in m/km
 $d =$ Waterdiepte in m^1
 $d_1 =$ Drooglegging in m^1
 $h = d + d_1$ in m^1
 $n =$ Taludheiling
 $b =$ Bodembreedte
 $c = \frac{b}{d}$
 $c_1 = \frac{b}{h}$
 $A =$ Nette of totale opp. dwarsprofiel
 $B =$ Bodembreedte nette of totale profiel
 $v =$ Snelheid in $m/sec.$