

Voorstel voor een praktische, nieuwe richtlijn

Ontwerpen van hellingen voor fietsers

Ir. A. J. M. van Laarhoven*

Provincie Gelderland, dienst Wegen, Verkeer en Grondzaken

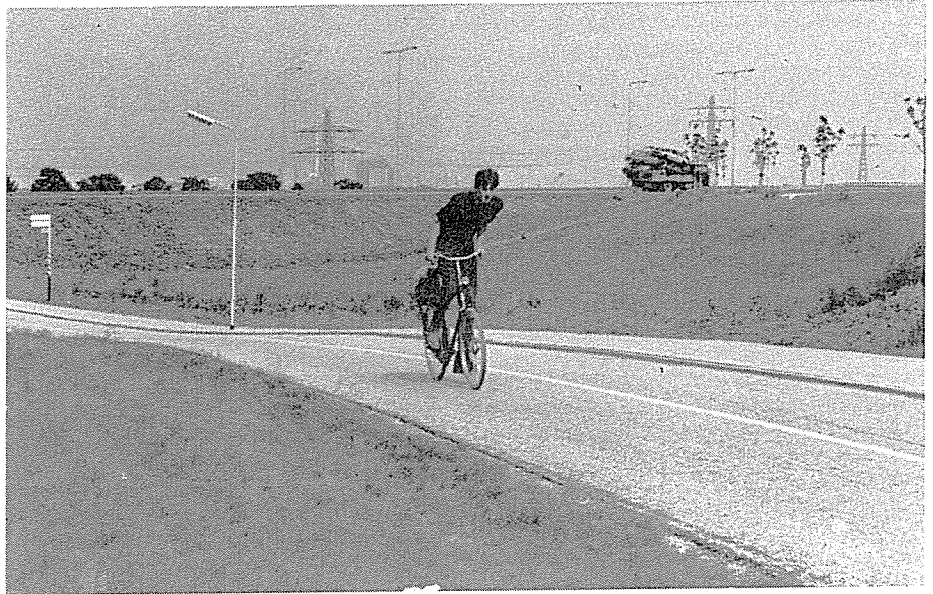
1. Inleiding

1.1 Algemeen

Dit artikel vormt de follow-up van een enkele jaren geleden gepubliceerd onderzoek aan de TH-Delft (Van Laarhoven en Ploeger, 1980). Dat onderzoek heeft een verkennend karakter en geeft onvoldoende houvast om te komen tot verantwoorde ontwerpen van hellingen voor fietsers (fietshellingen). Sindsdien hebben enkele vervolgonderzoeken plaatsgevonden (Jager, 1980; Bijlsma, 1981 en Van Zuilekom, 1980). Geen van deze onderzoeken leidt echter tot aanbevelingen voor het ontwerpen van fiets-hellingen.

De thans beschikbare aanbevelingen vloeien min of meer voort uit publikaties van Roos (1946, 1947). In deze publikaties zijn op basis van toepassingen in en subjectieve beoordelingen van de praktijk, aanbevelingen gedaan voor de gemiddelde percentages voor het ontwerpen van fiets-hellingen. Aangezien deze aanbevelingen reeds 40 jaar geleden zijn gedaan op basis van zeer gevoelsmatige gronden, is het gewenst nieuwe aanbevelingen op te stellen die zijn geënt op de huidige fietsende populatie. Gezien de wetenschappelijke vooruitgang van de laatste jaren in de kennis van de fysiologie en de mechanica van het fietsen is het thans mogelijk een steviger basis te vormen voor het ontwerpen van fiets-hellingen dan de tot op heden gebruikte aanbevelingen.

De beschikbare literatuur geeft veel achtergrondinformatie, die bruikbaar is voor een onderbouwing. Deze informatie is zodanig geordend dat op basis hiervan een fundamenteel onderbouwd ontwerp kan worden gegeven. Ten behoeve van dit ontwerp worden aanbevelingen gedaan voor het gemiddelde hellingpercentage, gegeven een bepaald hoogteverschil en voor het verloop van het hellingpercentage aan de voet tot aan de top van de helling. De aanbevelingen moeten leiden tot een optimale aanpassing van het ontwerp aan de fysiologische eigenschappen van maatgevend geachte fietsers, gegeven het feit dat de fietsers bepaalde, maatgevende mechanische weerstanden op de fiets-hellingen moeten overwinnen. Het hier te beschrijven onderzoek beperkt zich tot relatief korte hellingen (hoogteverschillen tot 10 m); voor grotere hoogteverschillen is aanvullend onderzoek



noodzakelijk. In Van Laarhoven en Ploeger (1978) worden aanbevelingen gedaan voor het maximale hellingpercentage voor neerwaartse fiets-hellingen. Voor zeer korte hellingen bedraagt dit 8% en voor de overige hellingen 6%. In dit artikel komen alleen opwaartse fiets-hellingen aan de orde, omdat deze voor de modale toerfiets (zonder versnellingen) maatgevend zijn.

1.2 Aanpak

Op basis van literatuurbeschouwingen is nagegaan welke weerstanden moeten worden overwonnen bij het tegen een helling opfietsen. Via een weerstandsformule kan de grootte van de te verwachten weerstanden worden geschat.

Tevens is uit de beschikbare literatuur (zie een overzicht in Van Laarhoven, 1984a) inzicht verkregen in de fysiologische eigenschappen van de belangrijkste categorieën fietsers. Hierbij spelen de belastbaarheid van de berijders, de voorkeur voor bepaalde trapfrequenties en de beperking bij het voortbrengen van pedaalcrachten de hoofdrol. Daar de hellingen niet voor elke potentiële categorie fietsers onder alle omstandigheden even aantrekkelijk gemaakt kunnen worden, zijn een maatgevende categorie fietsers en dito omstandigheden gedefinieerd. Deze dienen als uitgangspunt voor de onderbouwing van het ontwerp-voorstel.

Op basis van maatgevende trapfrequenties en stabiliteitsvoorwaarden bij het fietsen zijn ontwerp-snelheden gedefinieerd.

Uit de gelijkstelling van de formule voor het benodigde vermogen en die voor het beschikbare vermogen van de maatgevende categorie fietsers, worden voor de maatgevende omstandigheden gemiddelde hellingpercentages afgeleid. Hiervoor vindt een controle op de pedaalkrachten plaats. Door gebruik te maken van gedragsmodellen voor de snelheid kan een nadere detaillering van het hellingontwerp plaatsvinden. Hierbij wordt als uitgangspunt gekozen dat de fietsers met een nagenoeg constante (ontwerp-)rijnsnelheid bij afnemende prestatie de helling kunnen oprijden. Dit artikel geeft een samenvatting van vooral de methodiek van het onderzoek. In het verslag (Van Laarhoven, 1984a) wordt uitgebreid ingegaan op alle achtergronden. Indien behoefte bestaat aan meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar dit verslag.

2. Mechanische aspecten

2.1. Weerstandsformule

Bij het fietsen op hellingen treden weerstandskrachten op zoals de hellingweerstand, de luchtweerstand, de rolweerstand, de wrijvingsweerstand van de overbrengring, de trillingsweerstand in het frame en eventueel dynamoweerstanden of traagheidsweerstand van de te versnellen bewegende delen. Daar bij het ontwerpen van fiets-hellingen (vanwege de min of meer constante ontwerp-snelheden) geen rekening hoeft te worden gehouden met het accelereren op de hellingen, blijven de

* Hierbij dank ik prof. dr. R. A. Binkhorst van de vakgroep inspanningsfysiologie van de Medische Faculteit van de Katholieke Universiteit van Nijmegen voor zijn bijdrage aan het hierbij beschreven onderzoek.

traagheidsweerstand buiten beschouwing.

Uitgaande van de genoemde weerstanden kan het uitwendig (benodigde) vermogen voor het tegen een helling opfietsen met een nagenoeg constante snelheid worden berekend:

$$P_{\text{uitw.}} = (F_G + F_T + F_R + F_{WR} + F_L + F_D) \cdot v \quad (1)$$

waarin:

- $P_{\text{uitw.}}$ is het uitwendig (benodigde) vermogen (watt)
 F_G is de ontbondene van de zwaartekracht evenwijdig aan de helling (N)
 F_T is de trillingsweerstand ($\approx 0,12$ N)
 F_R is de rolweerstand (N)
 F_{WR} is de wrijvingsweerstand (N)
 F_L is de luchtweerstand (N)
 F_D is de dynamoweerstand (≈ 3 N)
 v is de constante (ontwerp-)snelheid (m/s)

Uitgewerkt ziet de formule er bij wind tegen als volgt uit:

$$P_{\text{uitw.}} = (i \cdot m \cdot g \cdot 100 + F_T + m \cdot C_r + m \cdot C_{wr} + k \cdot A \cdot v_{\text{rel}}^2 \cdot \cos \tau + F_D) \cdot v \quad (2)$$

waarin:

- i is het gemiddelde hellingpercentage (%)
 m is de totale massa van fiets en berijder (kg)
 g is de zwaartekrachtsversnelling (9,81 m/s²)
 C_r is de specifieke rolweerstand (N/kg)
 C_{wr} is de specifieke wrijvingsweerstand ($\approx 0,0108$ N/kg)
 k is de specifieke luchtwetstand (Ns²/m⁴)
 A is het frontale oppervlak van de berijder en zijn voertuig (m²)
 v_{rel} is de relatieve snelheid ten opzichte van stilstaande lucht (m/s)
 τ is de hoek waaruit de wind waait ten opzichte van de bewegingsrichting (rad)

2.2. Verband snelheid en trapfrequentie

Voor de omrekening van de trapfrequenties naar gereden snelheden en andersom geldt het volgende verband:

$$v = \omega \cdot \pi \cdot D \cdot R \cdot a \quad (3)$$

waarin:

- ω is de trapfrequentie (t.p.m.)
 D is de wiel diameter (inch)
 R is de overbrengingsverhouding
 a is de correctie voor dimensies (4,2 · 10⁻⁴)

3. Fysiologische aspecten

3.1. Belastbaarheid

Onder fysiologische belastbaarheid kan worden verstaan de maximale hoeveelheid beschikbaar (uitwendig) vermogen, dat mensen gedurende een bepaalde tijd kunnen leveren. De maximale zuurstofopname speelt hierbij een belangrijke rol en vormt tevens de vergelijkingsbasis voor de fysiologische belastbaarheid van de mensen. De toestand van maximale zuurstofopname wordt de absolute belastbaarheid genoemd. Deze hangt af van onder andere lichaamsbouw, leeftijd, geslacht en mate

van getraindheid van de persoon. Naarmate de leeftijd toeneemt, neemt de absolute belastbaarheid af en voor vrouwen bedraagt de absolute belastbaarheid gemiddeld 80% van die van vergelijkbare mannen.

Voor de omrekening van de zuurstofopname naar het bijbehorende uitwendig vermogen (\dot{A}_{max}) is een conversiefactor ($1 \text{ l VO}_2 \triangleq 20,5 \text{ kJ}$) en een factor voor het zogenaamde netto rendement ($\approx 23,6\%$ bij flinke inspanning) toegepast. De maximale hoeveelheid beschikbaar uitwendig vermogen hangt af van de belastingduur (ofwel de hellinglengte) en wordt relatieve belastbaarheid genoemd. Naarmate de belastingduur toeneemt, vermindert het beschikbare (maximale) uitwendig vermogen. Op basis van een bewerking van literatuur is voor de relatieve belastbaarheid het volgende verband gevonden (Van Laarhoven, 1984a, § B 3.2.6):

$$\dot{M}_{\text{max}}(T) = (1,519 - 0,407 \cdot \ln T + 0,060 \cdot \ln^2 T) \cdot \dot{A}_{\text{max}} \quad (4)$$

waarin:

- $\dot{M}_{\text{max}}(T)$ is de relatieve belastbaarheid uitgedrukt in het beschikbaar uitwendig vermogen (watt)
 T is de belastingduur ($T \leq 29$ min)
 \dot{A}_{max} is de absolute belastbaarheid uitgedrukt in het uitwendig vermogen (watt)

3.2. Trapfrequentie

Het fietsen op hellingen kan onder bepaalde omstandigheden zware inspanningen tot gevolg hebben. Het is gewenst deze op een efficiënte wijze te laten plaatsvinden. Zoals uit de literatuur blijkt bestaan er, gegeven een uitwendig vermogen, convexe verbanden tussen het energieverbruik en de trapfrequentie. Dit betekent dat gegeven het uitwendig vermogen er minimale waarden voor het energieverbruik kunnen worden gevonden. De bijbehorende trapfrequenties worden optimale trapfrequenties genoemd. Deze variëren afhankelijk van het uitwendig vermogen van 40 tot 62 t.p.m. Aangezien bij een bepaald uitwendig vermogen lagere trapfrequenties dan de optimale veel sneller tot verlies aan efficiency leiden dan hogere trapfrequenties (vooral bij hoge vermogens-outputs) dient uit efficiency-overwegingen een praktische ondergrens aan de trapfrequenties te worden gesteld. Hiervoor wordt op basis van de verbanden 30 t.p.m. aangehouden.

3.3. Pedaalkrachten

Er bestaat een verband tussen de gemiddelde pedaalkrachten en de combinatie van het uitwendig vermogen en de trapfrequentie:

$$F_{\text{agem}} = 60 \cdot P_{\text{uitw.}} / (\omega \cdot 2 \cdot C_1) \quad (5)$$

waarin:

- F_{agem} is de gemiddelde (axiale) pedaalkracht (N)
 ω is de trapfrequentie (t.p.m.)
 C_1 is de cranklengte (m)

Voor de onderbouwing van het hellingontwerp worden de (relatieve) belastbaarheid en de trapfrequentie als uitgangspunt gekozen. Derhalve kan vanwege het vorenstaande verband worden volstaan met de controle van de grootte van de optredende

pedaalkracht. De maximaal te leveren pedaalkrachten hangen, indien de fietsers op het zadel blijven zitten, onder andere af van leeftijd en geslacht. Voor jonge mannen is het maximum ongeveer gelijk aan het lichaamsgewicht. De maximale waarde van de gemiddelde te leveren pedaalkrachten volgt uit:

$$F_{\text{agem}} = f_L \cdot f_G \cdot g \cdot m_B / r \quad (6)$$

waarin:

- F_{agem} is de maximale waarde van de gemiddelde te leveren pedaalkracht (N)
 f_L en f_G zijn de correctiefactoren voor leeftijd en geslacht
 m_B is de massa van de berijder (kg)
 g is de zwaartekrachtsversnelling (9,81 m/s²)
 r is de verhouding tussen de maximale en de gemiddelde pedaalkracht tijdens een omwenteling van de trappers (bij hoge uitwendige belastingen bedraagt deze 1,4 à 1,5)

4. Uitgangspunten bij gemiddeld hellingpercentage

4.1. Algemeen

Om te komen tot aanvaardbare gemiddelde hellingpercentages worden enkele uitgangspunten geformuleerd met betrekking tot de maatgevende categorie fietsers, het type fiets en de klimatologische omstandigheden.

Veel van de gegevens die hier als uitgangspunt dienen vertonen een zekere spreiding rond een gemiddelde. Om redelijkerwijs maatgevend geachte waarden voor deze gegevens te verkrijgen worden afhankelijk van het feit of het om een boven- of een ondergrens gaat, voor het ontwerp in principe het 85- respectievelijk het 15-percentielpunt aangehouden.

Op basis van een bewerking van de literatuur inzake het gebruik van de fiets en de fysiologische eigenschappen van de verschillende categorieën mensen kan worden geconcludeerd dat de groep mannen in de leeftijd van 60-69 jaar als maatgevend kan worden beschouwd.

4.2. Fysiologische uitgangspunten

Voor de maatgevende groep (mannen van 60-69 jaar) bedraagt de maatgevende waarde (15%-punt) van de absolute belastbaarheid $\dot{A}_{\text{max}} = 107$ watt en het bijbehorende lichaamsgewicht 66,9 kg. Om deze groep fietsers op de hellingen enige reserve (tot uitputting) te bieden wordt voor de belastingduur van 0,1 tot 6 minuten de maatgevende waarde van de relatieve belastbaarheid vermenigvuldigd met een factor van 0,85. Deze factor is bepaald op basis van literatuurbeschouwingen over de functionele belastbaarheid (de mate waarin mensen redelijkerwijs in de praktijk kunnen worden belast).

Ten aanzien van de trapfrequentie wordt voor 'ideale' hellingontwerpen de 90%-efficiencywaarde van de optimale trapfrequentie (in het gebied van de lagere dan de optimale trapfrequenties) aangehouden. Deze waarde bedraagt gemiddeld 50 t.p.m. Voor de aanbevolen hellingontwerpen wordt de eerder genoemde ondergrens van efficiency aangehouden (30 t.p.m.).

Het maatgevende frontale oppervlak A bedraagt voor de maatgevende groep fietsers gemiddeld $0,80 \text{ m}^2$.

4.3. Maatgevende fiets

Het is gebleken dat de toerfietsers met een vaste overbrenging maatgevend kunnen worden geacht voor de hellingontwerpen. Het gewicht van deze fiets (inclusief een fictieve bagage van $2,5 \text{ kg}$) bedraagt $26,6 \text{ kg}$. Hiervoor bedragen de cranklengte $0,17 \text{ m}$, de overbrengingsverhouding $R=2,4$ en de wielmaat $D=27 \text{ inch}$. Voor de bandenspanning wordt de maatgevende waarde van $3,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ aangehouden, waarvoor op relatief vlakke wegdekken een specifieke rolweerstand van ongeveer $C_r=0,083 \text{ N/kg}$ geldt.

4.4. Klimatologische uitgangspunten

Voor het ontwerp van de hellingen wordt voorshands uitgegaan van de in ons land algemeen heersende windsnelheden. Hiervoor blijkt de regio Groningen redelijk representatief te zijn. Voor ideale hellingontwerpen wordt het 15%-punt gekozen ($1,4 \text{ m/s}$), voor de aanbevolen hellingontwerpen het gemiddelde ($4,3 \text{ m/s}$) en voor de maximale het 95%-punt ($8,8 \text{ m/s}$).

Uitgangspunt bij de laatstgenoemde keuze is dat de (utilitaire) maatgevende fietsers onder alle omstandigheden van de helling gebruik moeten kunnen maken. De ontwerpvoorstellen kunnen naar behoefte worden onderverdeeld naar verschillen in regio's, daarbij rekening houdend met de aldaar heersende windomstandigheden. Het onderscheid per regio is immers het best te baseren op de windsnelheden, omdat de luchtweerstand naast de hellingweerstand de belangrijkste invloed op de totale weerstand bij het fietsen op hellingen heeft.

Voor de onderbouwing van het ontwerp wordt de situatie met wind tegen als maatgevend beschouwd zodat $\tau=0$ (rad). De temperatuur blijkt van weinig invloed op de luchtweerstand te zijn. De maatgevende waarde wordt op 10° C aangehouden, zodat de specifieke luchtweerstand $k=0,544 \text{ N s}^2/\text{m}^4$ bedraagt. In verband met de winterperiode wordt de duisternis als maatgevende lichtgesteldheid beschouwd.

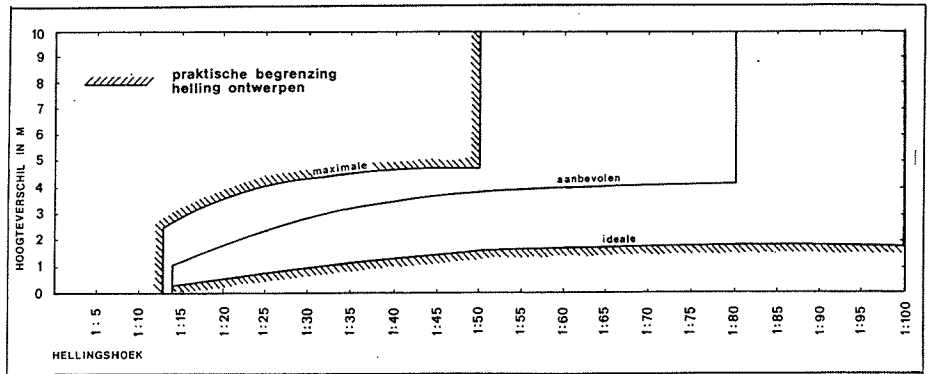
4.5. Ontwerpsnelheden

Uitgaande van de maatgevende trapfrequenties voor de ideale en aanbevolen hellingontwerpen zijn met formule (3) de bijbehorende ontwerpsnelheden uit te rekenen. Hierbij worden de 'optimale' en de acceptabele ontwerpsnelheden gevonden van $4,27$ respectievelijk $2,56 \text{ m/s}$.

Voor het bepalen van de absoluut maximale hellingpercentages wordt voorgesteld de praktisch minimale snelheid, in verband met het vermijden van instabiliteit tijdens het fietsen op de hellingen, aan te houden; deze bedraagt $v_{\min}=1,39 \text{ m/s}$.

Voor de ontwerpen van de typen fiets-hellingen wordt uitgegaan van de volgende reële combinaties van ontwerp- en windsnelheden (deze combinaties worden in Van Laarhoven (1984b) gemotiveerd):

type hellingontwerp	fietsnelheid	windsnelheids-waarden
ideale helling	'optimale'	15%-punt
aanbevolen helling	acceptabele	50%-punt
maximale helling	minimale	95%-punt



Richtlijn voor verband tussen hoogteverschil en gemiddelde hellingshoek

Gemiddelde hellingpercentages

5.1. Methodiek

Indien de uitgangspunten uit het voorgaande hoofdstuk in de weerstandsformule (2) worden ingevuld, volgt een vergelijking waarin het benodigde uitwendig vermogen wordt uitgedrukt in het gemiddelde hellingpercentage. Het verband tussen het te overwinnen hoogteverschil (h) en de tijd (belastingduur) om de bijbehorende fietshelling op te rijden volgt uit:

$$h = i \cdot v \cdot t / 100 = 0,6 \cdot i \cdot v \cdot T \text{ waarin:}$$

- h is het totale hoogteverschil (m)
- i is het gemiddelde hellingpercentage
- v is de ontwerp-snelheid (m/s)
- t is de belastingduur in sec. (of T in min.)

Dit verband en de waarde voor de maatgevende absolute belastbaarheid vermenigvuldigd met de factor voor functionele belasting worden in het belastbaarheidsmodel (4) ingevuld. Daarbij wordt een vergelijking gevonden tussen het beschikbare uitwendig vermogen en de combinatie van het gemiddelde hellingpercentage en het hoogteverschil.

Door per soort hellingontwerp de vergelijking voor het beschikbare en die van het benodigde uitwendig vermogen aan elkaar gelijk te stellen worden (impliciete) vergelijkingen verkregen tussen i en h . Hieruit is per soort hellingontwerp voor elke waarde van het hoogteverschil de waarde voor het gemiddelde hellingpercentage te bepalen.

5.2. Voorstel richtlijn

Bij het berekenen van de verbanden tussen i en h blijkt dat voor elk hoogteverschil een set van wortels voor het gemiddelde hellingpercentage wordt gevonden. Alleen de wortels met de hoogste waarden zijn voor het ontwerp bruikbaar, omdat deze bij een toenemend hoogteverschil een afnemend hellingpercentage te zien geven. Echter bij een bepaalde combinatie van i en h vallen de beide wortels samen. Het bij deze combinatie gevonden hellingpercentage vormt in feite de praktisch minimale waarde voor dit soort hellingontwerp.

In de richtlijn wordt het hellingpercentage bij een groter hoogteverschil constant gehouden op de waarde die behoort bij de bedoelde combinatie. De uitwendige belasting blijft hierbij in principe constant terwijl de belastingduur toeneemt. Deze toename wordt beperkt door de absolute grenzen van de belastingduur, gegeven de uitwendige belasting. Wordt hiermee rekening gehouden dan bedragen de maximale hoogteverschillen voor het maximale en het aanbevolen hellingtype $\pm 10 \text{ m}$ en dat voor het

ideale type $\pm 4 \text{ m}$. Praktisch gezien kan bij het ideale hellingtype zonder problemen een hoogteverschil van 10 m worden overwonnen; daarbij hoort echter een lagere ontwerpsnelheid dan die voor dit type bij de berekening is aangehouden. Aangezien de windsnelheden bij dit type op het 15%-punt worden aangehouden, zal de 'lagere' ontwerpsnelheid altijd groter dan de minimale zijn. Voor grotere hoogteverschillen is met betrekking tot de (functionele) belastbaarheid nader onderzoek gewenst.

Indien het hoogteverschil meer dan 4 à 5 m bedraagt is het gewenst in de helling een horizontaal gedeelte op te nemen (een hellingplateau).

Voor het vlakke gedeelte voorafgaande aan een fietshelling worden over het algemeen hogere ontwerpsnelheden dan die op de hellingen aangehouden. Dit verschil in ontwerpsnelheden bergt een overmaat aan kinetische energie in zich, die op de helling vrijkomt. Wordt bij het ontwerp met deze overmaat rekening gehouden, dan kan hiermee een extra hoogteverschil worden overwonnen. Voor de ideale en aanbevolen helling bedraagt dit ongeveer 1 m en voor de maximale $0,5 \text{ m}$.

Op basis van een controle van de pedaalcrachten wordt voor de maximale hellingen een maximale waarde voor het (gemiddelde) hellingpercentage van 8% en voor de aanbevolen en ideale hellingen een waarde van 6% gevonden. Het voorgaande samengevat leidt tot een richtlijn voor het verband tussen het hoogteverschil en de gemiddelde hellingshoek (zie figuur 1). In de figuur vormen de lijnen voor het maximale en ideale hellingtype de praktische boven- respectievelijk ondergrens voor het gebied waarbinnen een keuze moet worden gedaan voor een combinatie van hoogteverschil en hellingpercentage.

6. Nadere detaillering

6.1. Methodiek

Uit Van Laarhoven en Ploeger (1978) is gebleken dat het in verband met de soms grote snelheidssterugval niet is aan te bevelen om het hellingpercentage over de lengte van de helling constant te houden. Het verdient aanbeveling om voor relatief korte hellingen ($h < 10 \text{ m}$) het laagste gedeelte van de fietshelling te ontwerpen volgens een groter hellingpercentage dan dat volgt uit de richtlijn en het hoogste gedeelte volgens een kleiner percentage. Hierbij kan de fietssnelheid op de helling nagenoeg constant blijven. In verband hiermee wordt

voor de nadere detaillering van de hellingen gebruik gemaakt van de modellen voor het snelheidsgedrag verkregen uit verkenningen voor hellingen met een nageoog constant hellingpercentage. Voor deze nadere detaillering is het volgende gedragsmodel (voor mannen) als uitgangspunt gekozen (Van Laarhoven, 1984a, § 7.2):

$$v = 5,58 - 0,97 \cdot L + 0,95 \cdot T - 0,21 \cdot i_b - 0,11 \cdot h_b \quad (8)$$

waarin:

- v is de rijnsnelheid op een bepaald punt h_b op de helling (m/s)
- L en T zijn dummy-variabelen voor de leeftijd van de fietsers respectievelijk het fietstype
 L=0 voor 21-50 jr.
 L=1 voor 51-70 jr.
 T=0 voor toerfietsers
 T=1 voor racefietsers
- i_b is het hellingpercentage voor het beschouwde hellinggedeelte
- h_b is de gemiddelde hoogteligging van dit gedeelte (m)

Wordt voor de nadere detaillering uitgegaan van de maatgevende categorie fietsers (mannen van 60-69 jaar) en de toerfiets als maatgevend fietstype gekozen, dan gaat formule 8 over in:

$$v = 4,61 - 0,21 \cdot i_b - 0,11 \cdot h_b \quad (9)$$

Voor het ontwerp dient een ontwerp (rij)snelheid v_{ontw} te worden gekozen. Gegeven de ontwerpssnelheid kan met een bewerking van formule 9 voor elke (gemiddelde) hoogteligging h_b van een beschouwd hellinggedeelte het bijbehorende hellingpercentage worden berekend uit:

$$i_b(h_b) = (4,61 - v_{ontw} - 0,11 \cdot h_b) / 0,21$$

$$i_b \geq 1,0\% \quad (10)$$

De keuze van de ontwerpssnelheid dient in overeenstemming te zijn met het gemiddelde hellingpercentage en het totale hoogteverschil. Om dit te bereiken wordt in formule 9 voor i_b het bepaalde gemiddelde hellingpercentage uit de richtlijn (figuur 1) en voor h_b de helft van het te overwinnen hoogteverschil (de gemiddelde hoogteligging van de helling of hellinggedeelte) ingevuld. De randvoorwaarde bij formule 10 bestaat op de volgende praktische overweging-

gen. Bij zeer flauwe hellingen ($i_b < 1,0\%$) wordt het ruimtebeslag erg groot; dit is voor de praktijk niet aanvaardbaar. Ook uit de berekeningen voor het gemiddelde hellingpercentage volgt een minimale waarde van 1%. Indien voor een bepaald hooggelegen hellinggedeelte de randvoorwaarde voor het hellingpercentage maatgevend wordt, zal hierop een geleidelijke snelheids-terugval optreden.

Dit levert nauwelijks bezwaar op, daar de snelheidsterugval voor een helling (onderdeel) in principe dan alleen optreedt voor bijvoorbeeld de laatste één à twee meter hoogteverschil van de helling. Door voor elke halve meter verschil in hoogteligging (h_b) met formule 10 het bijbehorende hellingpercentage uit te rekenen ontstaat een vloeiend verloop van de helling. Bij een totaal hoogteverschil van meer dan 4 à 5 m wordt een hellingplateau toegepast. Hierbij kan de nadere detaillering op twee verschillende wijzen geschieden.

- a. beide hellingonderdelen worden ontworpen volgens eenzelfde hellingverloop
- b. beide hellingonderdelen worden ontworpen volgens een permanent aflopend hellingpercentage

Het hellingplateau zal uit praktische overwegingen meestal kort worden gehouden, zodat tijdens het berijden van dit plateau geen volledige recuperatie zal optreden. Derhalve bestaat gevoelsmatig een voorkeur voor detailleringwijze b. Een nader onderzoek zal moeten aantonen aan welke wijze door de fietsers de voorkeur wordt gegeven.

6.2. Voorbeeld

Stel dat voor een fietsbrug een hoogteverschil moet worden overwonnen van 6,0 m. Volgens de richtlijn bedraagt het aanbevolen gemiddelde hellingpercentage 1,25%. De helling wordt in twee onderdelen van 3 m opgesplitst, die zijn gescheiden door een plateau. Bij de detailleringwijze a bedraagt de gemiddelde hoogteligging van het onderste en het bovenste hellingonderdeel 1,5 respectievelijk 4,5 m. Voor wijze b bedraagt deze voor de gehele helling 3 m. Worden deze waarden in formules 9 en 10 ingevuld dan worden voor beide detailleringwijzen de resultaten van tabel 1 gevonden.

In de tabel valt op dat voor geval a bij het onderste hellinggedeelte een hogere ontwerpssnelheid wordt gevonden dan voor het bovenste; het gemiddelde van beide snelheden is gelijk aan de ontwerpssnelheid voor geval b. Voor geval b is de helling

aanvankelijk steiler dan voor geval a, aan het einde van de helling is dit juist omgekeerd. In geval b wordt tussen het hoogteverschil van 3,5 à 6 m het minimale hellingpercentage maatgevend. Volgens formule 9 bedraagt de geschatte ontwerpssnelheid aan de top van de helling in geval b ongeveer 3,77 m/s; deze is wat lager dan de initiële ontwerpssnelheid, hetgeen niet bezwaarlijk is. Tevens valt op dat de gevonden ontwerpssnelheden dicht bij de zogenaamde optimale ontwerpssnelheid van 4,27 m/s liggen. Dit is correct omdat het gedragsmodel is bepaald in situaties met weinig wind (gemiddeld 1,8 m/s), hetgeen ook als uitgangspunt geldt voor situaties waarbij optimale fietssnelheden kunnen worden bereikt op fietshellingen.

7. Literatuur

- Bijlsma, U.G. (1981), Onderzoek naar de invloed van wind op het snelheidsgedrag van fietsers, stageverslag HTS-Leeuwarden, Technische Hogeschool Delft, afdeling der Civiele Techniek, Laboratorium voor Verkeerskunde, Delft.
- Jager, S. (1980), Onderzoek naar het gedrag van fietsers op hellingen 2, stageverslag HTS-Leeuwarden, Technische Hogeschool Delft, afdeling der Civiele Techniek, Laboratorium voor Verkeerskunde, Delft.
- Van Laarhoven, A. J. M. en J. Ploeger (1978), Onderzoek naar het gedrag van fietsers op hellingen, afstudeerverslag, Technische Hogeschool Delft, afdeling der Civiele Techniek, vakgroep Verkeerskunde/Verkeersbouwkunde, Delft.
- Van Laarhoven, A. J. M. en J. Ploeger (1980), Fietsers op hellingen, Verkeerskunde (31), ANWB, Den Haag, pp. 59-62.
- Van Laarhoven, A. J. M. (1984a), Grondslagen voor het ontwerpen van hellingen ten behoeve van het fietsverkeer, onderzoeksverslag, provincie Gelderland, dienst Wegen, Verkeer en Grondzaken, Nijmegen.
- Van Laarhoven, A. J. M. (1984b), Uitgangspunten voor het ontwerpen van fietshellingen, Wegen (58), Vereniging Het Nederlandse Wegencongres, Den Haag.
- Roos, L. (1946/1947), Rijkwielpaden en Voetpaden, Wegen (20), nrs. 23 en 24, pp. 21-24 en Wegen (21) nr. 1/2, pp. 6-9.
- Van Zuilekom, K. (1980), Fietsers op hellingen, afstudeerverslag Verkeersakademie, Tilburg.

TABEL 1

Berekeningsresultaten nadere detaillering

hoogteligging h_b (m)	detailleringwijze	
	geval a i_b (%)	geval b i_b (%)
0 -0,5	1,9	$i_b = 2,05 - 0,52 \cdot h_b$
0,5-1,0	1,7	
1,0-1,5	1,4	$v_{ontw} = 4,18 \text{ m/s}$
1,5-2,0	1,1	
2,0-2,5	1,0	
2,5-3,0	1,0	$i_b = 2,81 - 0,52 \cdot h_b$
hellingplateau		
3,0-3,5	1,9	$v_{ontw} = 4,02 \text{ m/s}$
3,5-4,0	1,7	
4,0-4,5	1,4	$i_b = 3,62 - 0,52 \cdot h_b$
4,5-5,0	1,1	
5,0-5,5	1,0	$v_{ontw} = 3,85 \text{ m/s}$
5,5-6,0	1,0	

