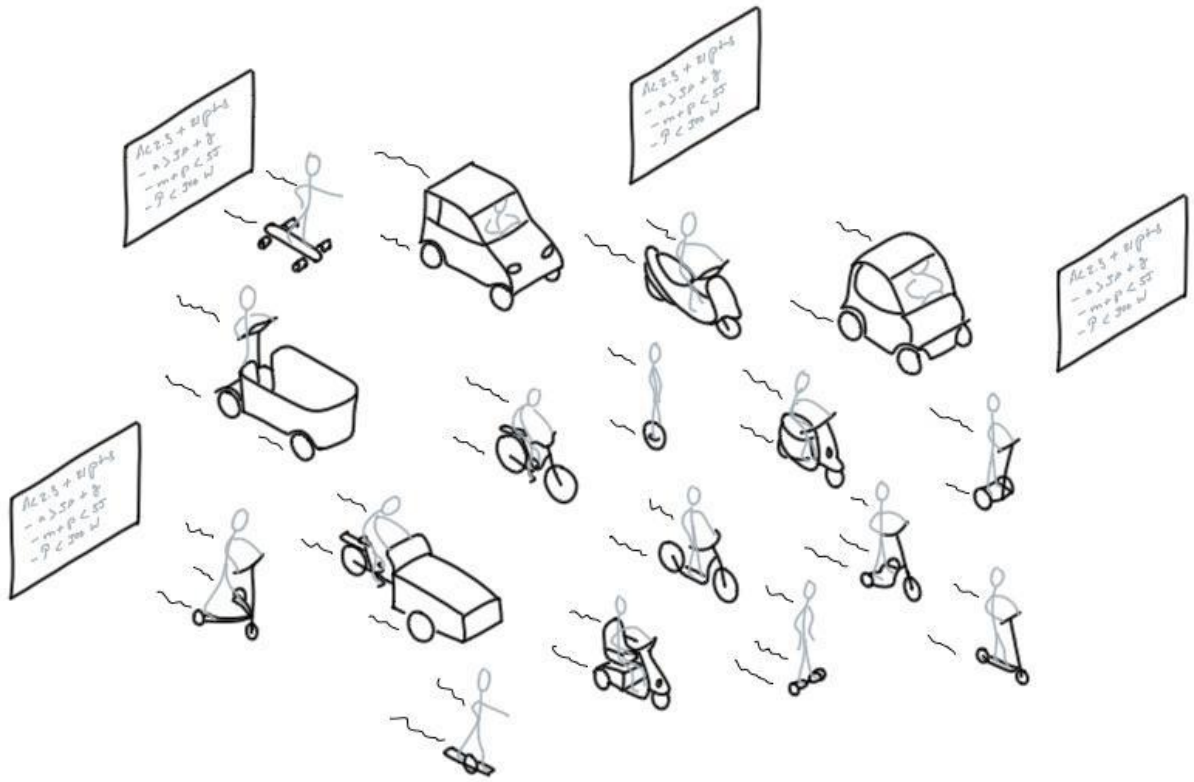
Notitie Vermogen bij LEVs

Arend L. Schwab

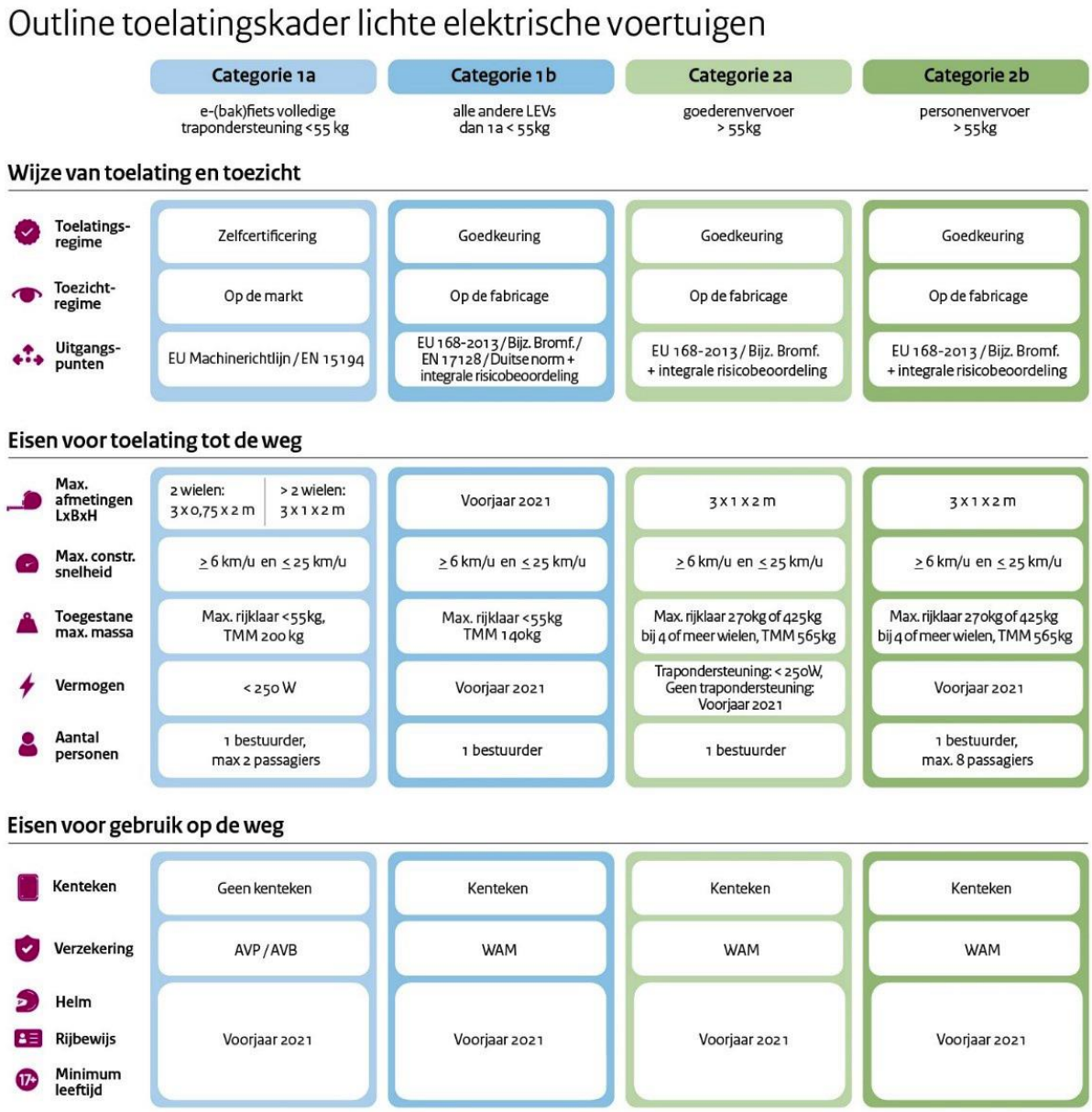
Technische Universiteit Delft
TU Delft Bicycle Lab
Biomechanical Engineering
Mekelweg 2, 2628 CD Delft
a.l.schwab@tudelft.nl
http://bicycle.tudelft.nl/schwab/



Datum: 25 november 2021
Versie: 3.1

Aanleiding en Vraagstelling

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat is bezig met een nieuw nationaal toelatingskader voor lichte elektrische voertuigen (LEVs). Voor de meest onderscheidende eisen, te weten de maximale afmetingen, de maximumconstructiesnelheid, de maximummassa, het maximaal nominaal vermogen en het maximale aantal passagiers, zijn de voorlopige keuzes opgenomen in de outline van het LEV-kader[1], zoals schematisch hieronder weergegeven.



Echter, voor het LEV-kader is het maximum nominaal vermogen nog niet voor alle categorieën bepaald. Voor de voertuigen met volledige trapondersteuning (‘zonder trappen

[1] Verzamelbrief verkeersveiligheid IENW/BSK-2020/240955

niet vooruit'), is de keuze relatief gemakkelijk. De grens voor deze voertuigen (die zowel in 1a, 2a en 2b kunnen vallen) is gezet op 250 Watt. Voertuigen met trapondersteuning met een hoger vermogen vallen namelijk in de EU-verordening 168/2013 (1000 of 4000 Watt) en daarmee buiten het LEV-kader. Voor de overige LEVs zijn de vermogensgrenzen nog niet bepaald. We hebben het dan over LEVs zonder trapondersteuning of waarbij er sprake is van beide systemen (trapondersteuning en een gashendel). Deze vallen in categorie 1b (< 55 kg) of in categorie 2a en b (goederen- en personenvervoer).

Tegelijkertijd heeft het ministerie van I enW de indruk dat - omwille van de verkeersveiligheid - niet alleen gekeken moet worden naar het vermogen, maar dat vooral in combinatie te bezien met de massa/afmetingen van voertuigen. Ook klinkt het aannemelijk dat er grenzen gesteld moeten worden ten aanzien van de maximale versnelling (en vertraging) van voertuigen. Het ontbreekt aan kennis om een goede afweging t.b.v. de verkeersveiligheid te kunnen maken.

Het ministerie wil graag antwoorden op de volgende vragen:

A. Waarom worden er grenzen gesteld t.a.v. het vermogen van voertuigen zonder trapondersteuning (LEVs of vergelijkbare modaliteiten), of zou je kunnen volstaan met maximale waarden voor de versnelling en vertraging?
B. Wat bepaalt de maximale versnelling en vertraging van LEVs (of vergelijkbare voertuigen) zonder trapondersteuning? (het vermogen, massa en aerodynamica?)
C. Welk vermogen is nodig om een bakfiets met trapondersteuning die ingezet wordt voor goederenvervoer met een maximale belasting in gang te krijgen?
D. Wat is vanuit verkeersveiligheid gezien van belang bij het bepalen van grenzen t.a.v. de maximale versnelling en vertraging? (b.v. niet los van de grond komen bij het wegrijden, of een te snelle vertraging waardoor mogelijk bestuurders het voertuig niet meer kunnen beheersen?)
E. Zijn er in het buitenland voorbeelden van regelgeving waar grenzen zijn bepaald t.a.v. de versnelling (en/of vertraging) van LEVs of vergelijkbare voertuigen? Waar zijn deze op gebaseerd?
F. Is het voor het bepalen van een maximale versnelling ook nog van belang of er sprake is van een zitplaats, of speelt bijvoorbeeld het aantal wielen ook mee? (het lijkt ons dat t.b.v. de beheersbaarheid van een licht evenwichtsvoertuig als een e-step een andere maximale versnelling/vertraging vraagt dan een stabiele 3 of 4-wielige LEV waar men op kan zitten)
G. Voor een homogeen verkeersbeeld is de gedachte dat 'fietsachtig' gedrag van LEVs nodig is. Hiermee wordt bedoeld dat LEV bestuurders geen grote verstoring veroorzaken op (een stroom) fietsers. De gedachte is dat als de snelheid, versnelling en vertraging van LEVs in de buurt liggen van de (elektrische) fiets dit o.a. bijdraagt aan een uniforme stroom (weinig inhaalbewegingen) en daarmee aan de verkeersveiligheid. Is het mogelijk 'fietsachtig' gedrag af te dwingen via het vermogen, de maximale versnelling en de vertraging? Zo ja, kan de TU Delft een inschatting maken van de waarden? Daarnaast is het de vraag of de beschrijving van 'fietsachtig' gedrag correct en volledig is. Zou de TU Delft de summiere beschrijving van 'fietsachtig' gedrag kunnen aanpassen/aanvullen? Hoe verhoudt zich dat tot het vermogen en de maximale versnelling en vertraging van LEVs?

Na overleg en bestudering van het concept zijn op 24 augustus 2021 nog de volgende vragen toegevoegd:

H. Categorie 1b: Het is niet geheel duidelijk welk vermogen nodig is om een e-step ‘fietsachtig’ gedrag te laten vertonen, met inachtneming van het risico van achterover tuimelen. Wat zou naar uw oordeel het maximale vermogen moeten zijn,uitgaande van een totaalgewicht van 140 kg? Kunt u aangeven in hoeverre voorwielaandrijving een extra risico vormt bij maximale acceleratie/piekvermogen?
I. Categorie 2a en 2b: U geeft aan dat de vermogenseis voor trapondersteuning bij categorie 2a, goederenvervoer > 55 kg, van max 250 W niet toereikend is om een ‘fietsachtig’ gedrag te hebben. Met maar 250 W trapondersteuning kan volgens u een vol beladen goederen voertuig niet snel genoeg op gang komen. Uw voorstel is om voor die gewichtsklasse, max rijklaar 425 kg, een max vermogen van 1000 W toe te staan, onafhankelijk van wel of geen trapondersteuning.
Klopt het dat dit voorstel ook geldt voor categorie 2b (personenvervoer)?
Momenteel geldt op basis van de beleidsregel bijzondere bromfietsen voor de Stint/BSO bus een maximaal vermogen van 4 kW. Mogen we concluderen dat dit vermogen te hoog is om ervoor te zorgen dat het voertuig, met name bij acceleratie vanuit stilstand, ‘fietsachtig’ gedrag te laten vertonen?

Inleiding

Omwille van de verkeersveiligheid is het verstandig grenzen te stellen aan het versnellen en vertragen van een LEV zodat er een homogene verkeersstroom ontstaat en er geen conflicten zijn met de andere weggebruikers zoals b.v. bij inhaalmanoeuvres. Zowel te snel als te langzaam optrekken kan gevaarlijke situaties creëren net als te langzaam of te snel remmen.

Los daarvan kan er een gevaar voor de beheersing van het voertuig ontstaan, bijvoorbeeld bij te snel optrekken zou het voertuig met het voorwiel(en) van de grond los kunnen komen en achterover tuimelen waardoor het niet meer bestuurbaar is en bij te hard remmen kan het voertuig voorover tuimelen. Dit geldt dan voor een zittende bestuurder, echter bij een staande bestuurder zoals b.v. op een e-step kan hetzelfde gebeuren maar dan met de bestuurder t.o.v. de LEV. Met de handen maar licht aan het stuur valt hij dan voor- of achterwaarts van het voertuig af.

In bijlage A, is een afleiding van de dynamica van de voorwaartse beweging van een LEV. In bijlage B staat een model voor het voor- of achterover kantelen van een LEV, wat bouwt op het model uit bijlage A. De beschouwing hierna bouwt op deze afleidingen.

In deze inleiding wordt eerst een algemene beschouwing gegeven met wat illustratieve voorbeelden naar aanleiding van de gestelde vragen, hierna zullen de individuele vragen een voor een beantwoord worden.

Voor het meekomen in de verkeersstroom moet er grenzen worden gesteld aan het versnellen en vertragen. Wat betreft het vertragen ligt dit al meestal vast in de technische eisen, b.v. dat de remvertraging tenminste 3 m/s^2 moet zijn. Tenzij er op de motor geremd wordt, heeft dit geen invloed op eisen aan het vermogen van de motor. Voor het versnellen is het wenselijk als de LEV meegaat in de verkeersstroom op dat wegdeel. Ik neem nu even aan dat wij praten over het fietspad en de ervaring leert dat fietsers vanuit stilstand gemiddeld binnen T = 5 seconden op een snelheid van v = 18 km/h (= 5 m/s) zijn, dat is dus een gemiddelde versnelling van a = 1 m/s^2.
Uit een simulatie, zie bijlage A, blijkt dat na 5 seconden 85% van alle energie is omgezet in kinetische energie, snelheid dus, en dat maar 15% verloren is gegaan aan rol- en luchtweerstand. Dit maakt het afschatten voor het benodigd nominaal vermogen voor het op snelheid brengen in dit geval eenvoudig, een eerste schatting waarbij we de verliezen door rol- en luchtweerstand even verwaarlozen, is dan, $P = (1/2mv^2)/T$. Let wel dit gaat over het totaal vermogen, dus bij een trapondersteuning is dit de som van het vermogen van de motor en wat de bereider toevoegt. Voor de stadsfietser met een totale massa van 100 kg voor fiets plus bereider, een eindsnelheid van rond de 18 km/h in 5 seconden vanuit stilstand komt dit uit op een eerste afschatting van het totaal vermogen van P = 250 W en als je in rekening zou brengen dat dit 85% is kom je op een totaal vermogen inclusief geschatte rol- en luchtweerstand verliezen op P = 250/0.85 = 295 W. Dit is het nominaal totaal vermogen, dus bij trapondersteuning de som van het vermogen van de fietser en die van de ondersteuning. En inderdaad, de grens voor categorie 1a is 250 W.

Uit deze afschatting is direct te zien dat voor het meekomen in de verkeersstroom m.b.t. het versnellen het benodigd vermogen evenredig is met de totale massa. Een afschatting voor het benodigd vermogen om vanuit stilstand op te trekken met een vergelijkbare versnelling als de gemiddelde verkeersstroom voor categorie 2a, goederenvervoer met een totale massa van zo'n 500 kg voor voertuig plus bereider, komt dan uit op een totaal nominaal vermogen van P = 1250 W, zie bijlage A. Stel dat de bereider zo'n 250 W trapvermogen levert (Wilson 2019) dan zou het vermogen van de motor van 1000 W voldoende zijn. Als je hier de rol- en luchtweerstandverliezen in rekening wil brengen zal deze wellicht iets meer zijn dan bij een fietser omdat de luchtweerstand een functie is van het frontaal oppervlak, welke bij een cargobike wellicht wat groter is dan bij een fietser. Bedenk echter wel dat dit nog steeds maar gaat over de 15% verliezen die dan worden vergroot. De rolweerstand is evenredig met de massa of het gewicht dus die schaalt gewoon mee binnen die 15%. Bedenk hierbij dat het hier gaat om het benodigd vermogen voor het versnellen vanuit stilstand. Om de snelheid van 18 km/h te behouden en dus rol en luchtweerstand te overwinnen, is maar zo'n 300 W vermogen nodig, zie het rekenvoorbeeld in de appendix. Dit betekent dus dat er duidelijk een snelheidsbegrenzing moet zitten op dit soort e-bakfietsen, natuurlijk bij alle LEV's.
Kijken we naar een e-step, dan zien we bij een totale massa van 80 kg voor step plus bereider een nominaal vermogen van P = 200 W, en bij een totale massa van 140 kg een nominaal vermogen van P = 350 W, wat ook weer redelijk overeenkomt met de praktijk.

Voor wat betreft de voertuigbeheersing in voorwaartse richting bestaat er het gevaar van achterover tuimelen bij een te grote versnelling of voorover tuimelen bij te hard remmen. Bij een zittende bereider tuimelt het gehele voertuig, maar bij een staande bereider, denk

hierbij b.v. aan een e-step, tuimelt de bereider t.o.v. het voertuig omdat het enige steunpunt met het voertuig zijn voeten op de plank zijn. In bijlage B zijn hiervoor de grenzen aan het versnellen en vertragen afgeleid, hierbij is ook het effect van een kleine helling meegenomen. Voor het rekenvoorbeeld van een stadsfiets op een vlakke weg, zie bijlage B, zal de fiets niet tuimelen als de versnellen $a < 5$ m/s^2 of vertragen $a > -5$ m/s^2. Bij een helling van +/-1% veranderen deze waarden met +/-0.1 m/s^2, dus versnellen heuvel op $a < 4.9$ m/s^2 en remmen heuvel af $a > -4.9$ m/s^2.
De grens aan de maximale vertraging stelt een eis aan het remsysteem. Wat betreft de grens aan het versnellen zien we dat deze bij het rekenvoorbeeld van de stadsfiets vrij hoog is. Het hangt echter sterk van het type motor af of deze hoge versnelling bereikt wordt en dan vooral bij het starten. Bepalend voor deze maximale versnelling van het systeem is het maximale koppel of moment wat de motor uit kan oefenen vanuit stilstand plus de overbrengingsverhouding van de motor naar het aangedreven wiel. Omdat dit een combinatie van factoren is, en dus niet het vermogen van de motor alleen, is het stellen van een eis aan de maximale versnelling hier dus een stuk eenvoudiger dan een eis aan het vermogen van de motor.
Voor een e-step op een vlakke weg zal de berijder niet tuimelen als de versnelling $a < 1.5$ m/s^2 of vertraging $a < -1.5$ m/s^2. Hier zijn de grenzen een stuk lager dan bij de fiets omdat bij de e-step de berijder achterover tuimelt en niet de fiets, en omdat de afstand tussen de contactpunten bij de e-step (= voeten op de plank) een stuk kleiner is dan de afstand tussen de contactpunten van de banden met de weg bij de fiets. Het effect van een helling is als hierboven, +/-1% verandert de versnellingswaarden met +/-0.1 m/s^2.

De rekenvoorbeelden laten duidelijk zien wat onze intuïtie ons al direct zegt: meer massa vraagt om meer totaal vermogen bij gelijkblijvende beweging. En een tweede conclusie is dat de wijze van besturing, zittend of staand, eisen stelt aan de maximale versnelling en vertraging en dat deze niet direct te vertalen zijn in een maximaal vermogen omdat de maximale versnelling afhankelijk is van het maximale koppel wat de motor kan leveren.

Antwoorden op de gestelde vragen

Na de algemene introductie worden hier de afzonderlijke vragen puntsgewijs beantwoord.

A. *Waarom worden er grenzen gesteld t.a.v. het vermogen van voertuigen zonder trapondersteuning (LEVs of vergelijkbare modaliteiten), of zou je kunnen volstaan met maximale waarden voor de versnelling en vertraging?*

De grenzen aan het vermogen komen voort uit de grenzen aan het versnellen, dus naar mijn idee kan je volstaan met maximale waarden voor het versnellen. Echter, in de praktijk is het nogal lastig dit te testen, en het is veel eenvoudiger om een eis te stellen aan het maximaal te leveren vermogen. Dit kan je eenvoudig aflezen aan het plaatje op de motor plus het eventuele vermogen wat de bereider toe kan voeren in het geval van trapondersteuning.

B. *Wat bepaalt de maximale versnelling en vertraging van LEVs (of vergelijkbare voertuigen) zonder trapondersteuning? (het vermogen, massa en aerodynamica?)*

De versnelling van een LEV volgt gewoon de tweede wet van Newton: kracht = massa maal versnelling. De maximale versnelling *a* in m/s^2 bij een LEV met een totale massa van *m* kg, wordt bepaald door het maximale motorkoppel *T* in Nm, de overbrengingsverhouding van de roterende motoras naar de rotatie van aangedreven wiel, *i*, en de straal van de aangedreven wielen *R* in m, volgens,

$$a = i\frac{T}{m\,R}$$

Helaas is veelal dit motorkoppel onbekend, en het gedrag van het motorkoppel als functie van de rotatiesnelheid van de motor hangt ook sterk af van het soort motor. De aerodynamica speelt hier geen rol evenmin het vermogen, alhoewel er natuurlijk wel een sterk verband is tussen het maximaal vermogen en het maximale motorkoppel.

C. *Welk vermogen is nodig om een bakfiets met trapondersteuning die ingezet wordt voor goederenvervoer met een maximale belasting in gang te krijgen?*

Zoals in het rekenvoorbeeld te zien is dit vermogen evenredig met de massa en bij vol beladen goederen bakfiets van categorie 2b met een totale massa van bereider plus bakfiets van 500 kg is het vermogen *P* = 1250 W om vanuit stilstand binnen 5 seconden op een snelheid van 18 km/h te komen.
In het algemeen kan men stellen dat voor een LEV met totale massa van *m* kg het vermogen *P* om vanuit stilstand een snelheid van *v* m/s te bereiken in *T* seconden geschat kan worden m.b.v,

$$P = 1.2(\tfrac{1}{2}mv^2)/T.$$

D. *Wat is vanuit verkeersveiligheid gezien van belang bij het bepalen van grenzen t.a.v. de maximale versnelling en vertraging? (b.v. niet los van de grond komen bij het wegrijden, of een te snelle vertraging waardoor mogelijk bestuurders het voertuig niet meer kunnen beheersen?)*

Omwille van de verkeersveiligheid is het verstandig grenzen te stellen aan het versnellen en vertragen van een LEV zodat er geen conflicten in de verkeersstroom met de andere weggebruikers kan ontstaan. Zowel te snel als te langzaam optrekken kan gevaarlijke situaties creëren net als te langzaam of te snel remmen. Los daarvan kan er een gevaar voor de beheersing van het voertuig ontstaan, bijvoorbeeld bij te snel optrekken zou het voertuig met het voorwiel(en) van de grond los kunnen komen en achterover tuimelen waardoor het niet meer bestuurbaar is en bij te hard remmen kan het voertuig voorover tuimelen. Dit geldt dan voor een zittende bestuurder, echter bij een staande bestuurder zoals b.v. op een e-step kan hetzelfde gebeuren maar dan met de bestuurder t.o.v. de LEV. Met de handen maar licht aan het stuur valt hij dan voor- of achterwaarts van het voertuig af.

Voor wat betreft het meekomen in de verkeersstroom is op gang komen vanuit stilstand tot een gewenste snelheid van 18 km/h in 5 seconden een redelijke aanname, wat neerkomt op een gemiddelde versnelling van 1 m/s^2.

Wat betreft het achterover tuimelen van een gemiddelde stadsfietser zijn de grenzen aan de versnelling een stuk hoger zo'n 5 m/s^2. Deze grens wordt veelal niet gehaald door een

fietser, zelfs niet door een met trapondersteuning. Bij brommers en scooters is dit met enige acrobatiek wel mogelijk. Bij e-scooters wordt het een stuk lastiger door het grotere gewicht t.o.v. de normale scooter. Maar hier geldt wederom: het hangt erg af van het maximale koppel wat de e-motor kan leveren, en dat is veelal onbekend.
Bij een e-step is er een veel groter gevaar voor achterover tuimelen van de bereider t.o.v. de e-step omdat, ten opzichte van de fiets, de afstand tussen de contactpunten (voeten op de plank) een stuk kleiner is en omdat de afstand van het zwaartepunt tot het steunpunt veel groter is. In het rekenvoorbeeld van bijlage B zien we dat dit al bij een versnelling van 1.5 m/s^2 kan gebeuren.

E. *Zijn er in het buitenland voorbeelden van regelgeving waar grenzen zijn bepaald t.a.v. de versnelling (en/of vertraging) van LEVs of vergelijkbare voertuigen? Waar zijn deze op gebaseerd?*

Eerlijk gezegd ben ik niet zo goed op de hoogte van de regelgeving in het buitenland Regelgeving is niet mijn expertise en het is nogal lastig om aan al die gegevens te komen als buitenstaander. Ik weet wel dat er vaak eisen worden gesteld aan het remsysteem door eisen te stellen aan de minimale vertraging, deze moet dan veelal voor de fiets zo rond de 3 m/s^2 zijn. Ik ben nog nooit iets tegengekomen over de eisen aan de maximale vertraging terwijl dat wel degelijk een gevaar kan zijn. Bij een te grote vertraging kan het voertuig voorover tuimelen, zie bijlage B. Bij de gewone stadsfietser is dit bij een vertraging die groter is dan 5 m/s^2, wat met de huidige moderne schijfremmen al snel het geval kan zijn. Bij de e-step is dit zelfs nog veel lager, al bij vertraging van 1.5 m/s^2

F. *Is het voor het bepalen van een maximale versnelling ook nog van belang of er sprake is van een zitplaats, of speelt bijvoorbeeld het aantal wielen ook mee? (het lijkt ons dat t.b.v. de beheersbaarheid van een licht evenwichtsvoertuig als een e-step een andere maximale versnelling/vertraging vraagt dan een stabiele 3 of 4- wielige LEV waar men op kan zitten)*

Inderdaad, de gewichtsverdeling en hoe de berijder op het voertuig ‘zit’ zijn beide van belang voor het bepalen van de maximale versnelling en vertraging i.v.m. tuimel gevaar. In het rekenvoorbeeld in bijlage B is duidelijk te zien dat een zittende berijder op de fiets een hogere maximale versnelling toelaat, 5 m/s^2, dan een staande berijder zoals op een e-scooter, 1.5 m/s^2. In het geval van de zittende bereider kantelt de fiets plus bereider t.o.v. de grond, terwijl in het geval van een staande bereider de berijder zelf kantelt t.o.v. de e-scooter.

Bij het voor- of achterover tuimelen is er geen onderscheidt gemaakt tussen een enkelspoor (2-wieler) en een meersporig (3- of 4-wieler) voertuig omdat in principe de voorwaartse dynamica ontkoppeld is van de zijwaartse dynamica. In het verleden is er wel wat onderzoek door ons gedaan naar het effect van vertragen en versnellen op de zijwaartse stabiliteit van 2-wielers (Schwab 2007). Hieruit blijkt dat deze koppeling zwak is en voor een eerste benadering verwaarloosd mag worden.

G. *Voor een homogeen verkeersbeeld is de gedachte dat ‘fietsachtig’ gedrag van LEVs nodig is. Hiermee wordt bedoeld dat LEV bestuurders geen grote verstoring*

veroorzaken op (een stroom) fietsers. De gedachte is dat als de snelheid, versnelling en vertraging van LEVs in de buurt liggen van de (elektrische) fiets dit o.a. bijdraagt aan een uniforme stroom (weinig inhaalbewegingen) en daarmee aan de verkeersveiligheid. Is het mogelijk 'fietsachtig' gedrag af te dwingen via het vermogen, de maximale versnelling en de vertraging? Zo ja, kan de TU Delft een inschatting maken van de waarden? Daarnaast is het de vraag of de beschrijving van 'fietsachtig' gedrag correct en volledig is. Zou de TU Delft de summiere beschrijving van 'fietsachtig' gedrag kunnen aanpassen/aanvullen? Hoe verhoudt zich dat tot het vermogen en de maximale versnelling en vertraging van LEVs?

Inderdaad, het is zeer goed mogelijk om 'fietsachtig' gedrag af te dwingen door een eis te stellen aan het vermogen. En dan praten wij hier dus vooral over versnellen, omdat het vertragen volledig wordt bepaald door het remvermogen, dus de uitvoering van de reminrichting. De vuistregel voor het maximaal vermogen *P* bij voor een LEV met totale massa van *m* kg om vanuit stilstand een snelheid van *v* m/s te bereiken in *T* seconden geschat kan worden m.b.v,

$$P = 1.2(\tfrac{1}{2}mv^2)/T.$$

In de praktijk zijn een eindsnelheid van *v* = 18 km/h (= 5 m/s) in *T* = 5 seconden redelijke waarden om te hanteren voor een 'fietsachtig' gedrag.

Als wij kijken naar de huidige richtlijnen dan zien we dat voor categorie 1a en 1b dit goed overeenkomt. Echter de vermogenseis voor trapondersteuning bij categorie 2a, goederenvervoer > 55 kg, van max 250 W is niet toereikend om een 'fietsachtig' gedrag te hebben. Met maar 250 W trapondersteuning kan een vol beladen goederen voertuig niet snel genoeg op gang komen. Mijn voorstel is om voor die gewichtsklasse, max rijklaar 425 kg, een max vermogen van 1000 W toe te staan, onafhankelijk van wel of geen trapondersteuning.

H. *Categorie 1b: Het is niet geheel duidelijk welk vermogen nodig is om een e-step 'fietsachtig' gedrag te laten vertonen, met inachtneming van het risico van achterover tuimelen. Wat zou naar uw oordeel het maximale vermogen moeten zijn,uitgaande van een totaalgewicht van 140 kg? Kunt u aangeven in hoeverre voorwielaandrijving een extra risico vormt bij maximale acceleratie/piekvermogen?*

Het gevaar voor achterover tuimelen bij de e-step is veel groter dan bij de fiets omdat bij de e-step de berijder t.o.v. de e-step tuimelt en bij de fiets de gehele fiets plus berijder. Het gaat dan bij de e-step om de afstand van de voeten op de plank welke veel kleiner is dan de afstand tussen band contactpunten bij de fiets. Het heeft tot gevolg dat de maximale versnelling bij de fiets zo'n 5 m/s^2 is terwijl die bij de e-step maar 1.5 m/s^2 kan zijn. De versnelling die optreedt bij het wegrijden hangt af van het maximale koppel dat de motor via de overbrenging uitoefent op het aangedreven wiel en niet van het maximale vermogen van de motor. Er is geen direct relatie tussen het vermogen van de motor en het maximale koppel bij stilstand, dus is het lastig om het maximaal vermogen te koppelen aan het tuimel gevaar.
Voorwielaandrijving vormt geen extra risico voor achterover tuimelen bij het maximaal

accelereren. Sterker nog, doordat er de zogenaamd 'load transfer' optreedt tijdens het versnellen zal de wieldruk bij het voorwiel lager worden en die bij het achterwiel hoger dan de statische waarden, waardoor de maximaal te behalen versnelling, voordat het voorwiel gaat slippen, omlaag zal gaan. Voorwielaandrijving vormt dus wel een extra risico voor het doorslippen van het voorwiel bij een te hoge voorwaartse versnelling.

I. *Categorie 2a en 2b: U geeft aan dat de vermogenseis voor trapondersteuning bij categorie 2a, goederenvervoer > 55 kg, van max 250 W niet toereikend is om een 'fietsachtig' gedrag te hebben. Met maar 250 W trapondersteuning kan volgens u een vol beladen goederen voertuig niet snel genoeg op gang komen. Uw voorstel is om voor die gewichtsklasse, max rijklaar 425 kg, een max vermogen van 1000 W toe te staan, onafhankelijk van wel of geen trapondersteuning.*
Klopt het dat dit voorstel ook geldt voor categorie 2b (personenvervoer)? Momenteel geldt op basis van de beleidsregel bijzondere bromfietsen voor de Stint/BSO bus een maximaal vermogen van 4 kW. Mogen we concluderen dat dit vermogen te hoog is om ervoor te zorgen dat het voertuig, met name bij acceleratie vanuit stilstand, 'fietsachtig' gedrag te laten vertonen?

Dit voorstel geldt ook voor categorie 2b (personenvervoer) en uw conclusie is juist. Bij een totale massa van 565 kg en een gewenste acceleratie om in 5 seconden op 18 km/h te rijden kom ik met de vuistregel voor het afschatten van het benodigd vermogen zoals hierboven bij G beschreven op rond P = 1700 W. Aangezien de Stint/BSO bus waarschijnlijk wat zachtere banden heeft en misschien ook wat meer luchtweerstand dan gewoonlijk zou je dit iets mogen verhogen, zeg naar P = 2000 W. Naar mijn mening is de huidige beleidsregel van 4000 W is dus te hoog om 'fietsachtig' gedrag vanuit stilstand te vertonen.

Referenties

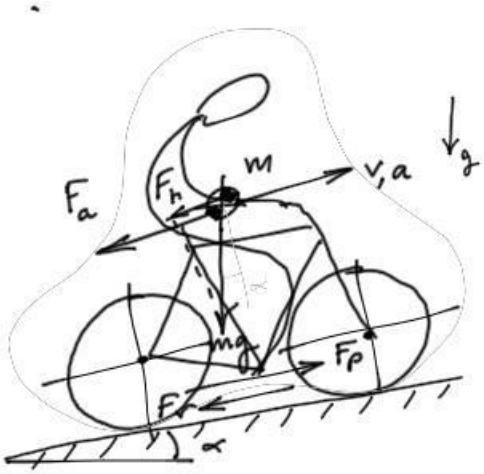
Wilson, D.G. and Schmidt, T., 2020. *Bicycling science*. MIT press.

Schwab, A. L., Meijaard, J. P., Kooijman, J. D. G., 2007. Some recent developments in bicycle dynamics, *In Proceedings of the 12th World Congress in Mechanism and Machine Science*, IFToMM 2007, June 17-21, 2007, Besancon, France, CD-ROM, 6 pp.

Bijlage

Dynamica van de voorwaartse beweging van een LEV

A - Model voor versnellen en vertragen van een LEV



Figuur A.1 Model voor voorwaartse dynamica van een LEV.

Het model voor de voorwaartse beweging van een LEV is vergelijkbaar met dat van een fiets. We beschouwen het als een start lichaam met rollende contact met de weg wat alleen maar voor- en achterwaarts kan bewegen, met snelheid v en versnelling a=dv/dt. Op dit lichaam werken krachten die de LEV doen versnellen en vertragen volgens de wet van Newton, ΣF=ma.

De krachten die we hier beschouwen zijn:

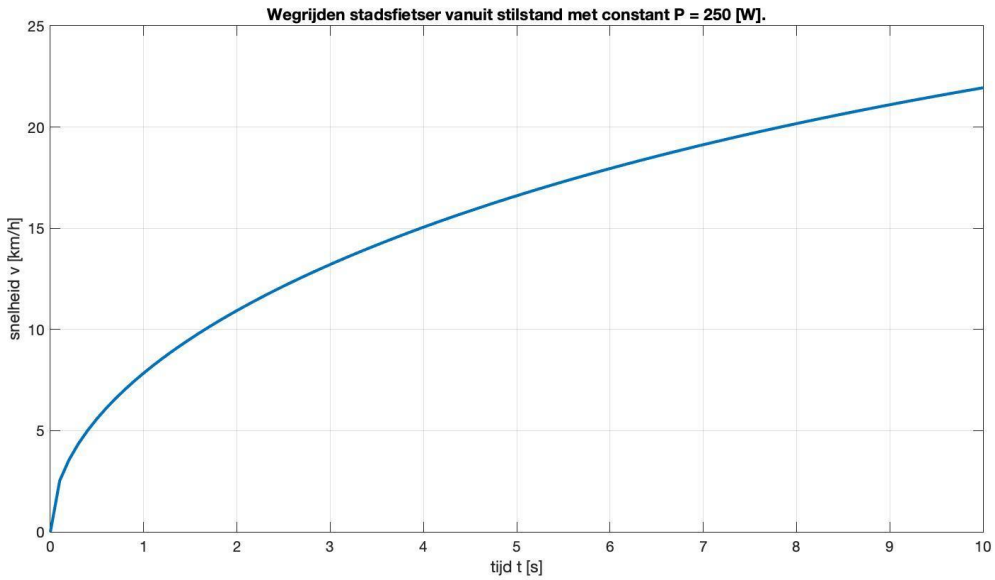
- *Fp*, de aandrijfkracht. Deze wordt of door een elektromotor of samen met een trapbeweging via een overbrenging aangebracht. Als we het totaal toegevoerde nominaal vermogen *P* als uitgangspunt nemen is deze aandrijfkracht, *Fp* = *P*/*v*.
- *Fr*, de rolweerstand. Deze is veelal evenredig met de normaal kracht in de rollende contactpunten. De totale normaalkracht is het totale gewicht in Newton, mg, en de evenredigheidsfactor is de rolweerstand *Cr*, zodat *Fr* = *Cr mg*.
- *Fa*, de luchtweestand. Deze is veelal evenredig met de snelheid in het kwadraat, v^2, het frontaal oppervlak A maal een vormfactor factor *Cd*, *CdA*, en de dichtheid van de lucht *ρ*, zodat *Fa* = ½*ρ CdA* v^2.
- *Fh*, hellingweerstand. Als wij een helling oprijden met hoek *α* dan zal de zwaartekracht de LEV proberen tegenwerken, deze kracht is evenredig met het totale gewicht, *mg*, in Newton en met *α*, in radialen, voor kleine hellingshoeken (<30 graden), zodat *Fh* = *mg α*.

De bewegingsvergelijking voor het versnellen en vertragen van een LEV rijdend op een helling is:

$$\frac{P}{v} - (Cr + \alpha)mg - \frac{1}{2}\rho CdAv^2 = ma$$

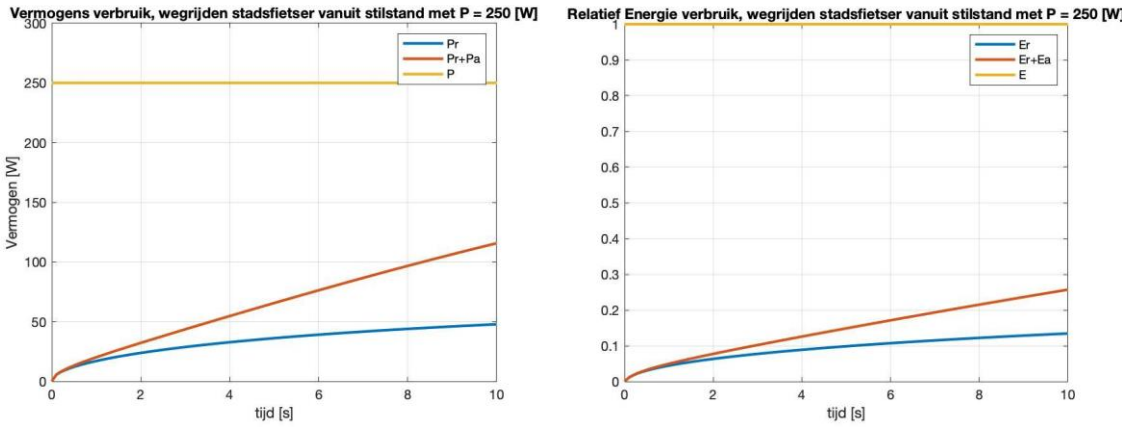
Uit deze bewegingsvergelijking kan de versnelling *a* = d*v*/d*t* worden opgelost en m.b.v. numerieke integratie kan dan de snelheid v als functie van de tijd worden bepaald.

Wat nu volgt is een rekenvoorbeeld van het wegrijden van een stadsfietser vanuit stilstand op een vlakke weg bij een constant nominaal vermogen van P = 250 W. Gebruikelijk waarden voor een rechtop fietsende stadsfietser (Wilson 2020) zijn:
Cr = 0.008, m = 80+20 kg, g = 9.81 m/s^2, ρ = 1 kg/m^3, CdA = 0.6 m^2



Figuur A.2 Snelheid v als functie van de tijd voor een stadsfietser wegrijdende vanuit stilstand met een constant totaal vermogen van P = 250 W.

In deze figuur A.2 zien we de snelheid van de fietser als functie van de tijd als er vanuit stilstand continue P = 250 W wordt toegevoegd. Na 5 seconden heeft de fietser een snelheid van 17 km/h wat neer komt op een gemiddelde versnelling van ronde de 1 m/s^2. De toename van de snelheid neemt af omdat de rol- en luchtweerstand bij toenemende snelheid steeds meer vermogen vragen. Uiteindelijk zal de fietser als hij zo vermogen blijft toevoeren na zo'n 60 seconden een eindsnelheid van 30 km/h behalen. In de praktijk zal de fietser echter stoppen met het volle vermogen toevoegen als hij zijn gewenste snelheid van rond de 18 km/h heeft behaald of het trapondersteuning systeem stopt met vermogen toevoegen als hij de 25 km/h heeft behaald.



Figuur A.3 Vermogen (links) en relatief energieverbruik (rechts) als functie van de tijd voor een stadsfietser wegrijdende vanuit stilstand met een constant totaal vermogen van *P* = 250 W, met *Pr* het rolweerstandsvermogen, en *Pa* het luchtweerstandsvermogen. Het verschil tussen *P* en *Pr+Pa* is het kinetisch vermogen, idem voor het energieverbruik *E*, *Er* en *Ea*.

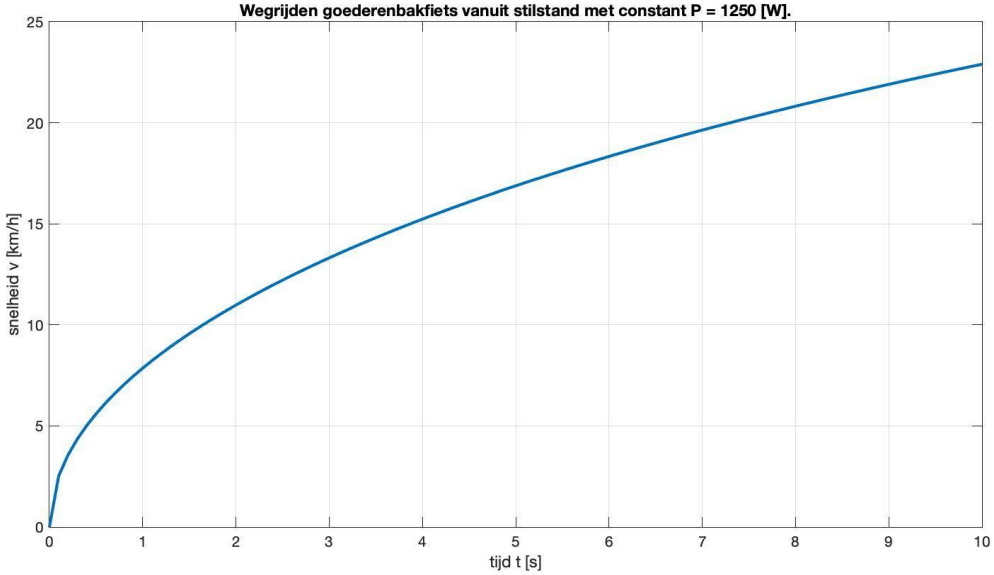
In deze twee figuren A.3 zien we links de verdeling van de vermogens bij het wegrijden vanuit stilstand met vol vermogen van 250 W, met Pr het rolweerstandsvermogen, *Pa* de luchtweerstandsvermogen en *P* het totale vermogen. Het verschil tussen het totale vermogen *P* en de som van het rol- en luchtweerstandsvermogen *Pr+Pa* is het vermogen wat in de beweging, $1/2mv^2$, wordt gestopt. In de rechter figuur staat het relatieve energieverbruik tijdens het wegrijden, met *Er* de rolweerstandsenergie, *Ea* de luchtweerstandsenergie en *E* de totale toegevoerde energie. Het verschil van de toevoer *E* en de verliezen *Er+Ea* is de kinetische energie $1/2mv^2$. In deze figuur is duidelijk te zien dat de meeste energie tijdens het wegrijden gaat zitten in de kinetische energie, dus het geheel op snelheid brengen en dat de verliezen daar nog maar een kleine bijdrage leveren. Na 5 seconden is 85% van alle energie gaan zitten in het op snelheid brengen van het systeem. De meeste energie bij het wegrijden vanuit stilstand gaat dus in de kinetische energie zitten.

Dit maakt het mogelijk om voor het wegrijden vanuit stilstand direct een relatie te leggen tussen het totaal toegevoerd vermogen P, de totale massa van het systeem m, en de eindsnelheid v die bereikt is na T seconden,

$$P = 1.2(\frac{1}{2}mv^2)/T.$$

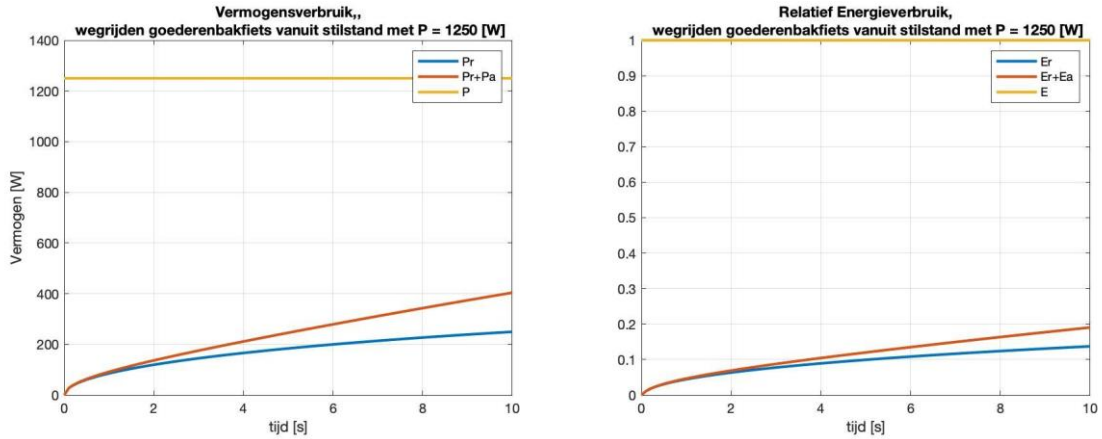
De factor 1.2 neemt de zoals hierboven besproken 85% in rekening. Met deze formule is het mogelijk om een eerste afschatting te maken voor het benodigd vermogen *P* van een LEV gegeven de totale massa *m* en de gewenste gemiddelde versnelling vanuit stilstand *v*/*T* bij een eindsnelheid van *v* in een tijd *T*.

Als tweede rekenvoorbeeld kijken we naar het wegrijden van een goederenvervoer bakfiets met trapondersteuning, categorie 2a met maximale belading dus maximaal rijklaar 425 kg. Wij bekijken dan wegrijden vanuit stilstand met een totaal vermogen van *P* = 1250 W, dus het vermogen van de trapondersteuning plus wat de bereider aan trapvermogen levert. Een bakfiets voor goederenvervoer is een stuk zwaarder dan een fiets en heeft een groter frontaal oppervlak zodat de luchtweerstand groter dan bij een fietser zal zijn. Gebruikelijk waarden voor een bakfiets (Wilson 2020) met geschat frontaal oppervalk van 1 m^2 zijn:
Cr = 0.008, *m* = 75+425 kg, *g* = 9.81 m/s^2, *ρ* = 1 kg/m^3, *CdA* = 1.2 m^2



Figuur A.4 Snelheid v als functie van de tijd voor een goederenbakfiets, categorie 2a, wegrijdende vanuit stilstand met een constant totaal vermogen van *P* = 1250 W.

In deze figuur A.4 zien we de snelheid van de goederenbakfiets, categorie 2a, als functie van de tijd als er vanuit stilstand continue *P* = 1250 W wordt toegevoegd. Na 5 seconden heeft de goederenbakfiets een snelheid van 17 km/h wat neer komt op een gemiddelde versnelling van rond de 1 m/s^2. De toename van de snelheid neemt af omdat de rol- en luchtweerstand bij toenemende snelheid steeds meer vermogen vragen. Uiteindelijk zal de bakfietser als hij zo vermogen blijft toevoeren na zo'n 120 seconden een eindsnelheid van 40 km/h behalen. In de praktijk zal de fietser echter stoppen met het volle vermogen toevoegen als hij zijn gewenste snelheid van rond de 18 km/h heeft behaald of het trapondersteuning systeem stopt met vermogen toevoegen als hij de 25 km/h heeft behaald. Om de snelheid van 18 km/h te behouden, en dus rol en luchtweerstand te overwinnen, is maar zo'n 300 W vermogen nodig, zoals te zien is in figuur A.5 link; het vermogen *Pr+Pa* na zo'n 5 seconden is daar zo'n 300 W.



Figuur A.5 Vermogen (links) en relatief energieverbruik (rechts) als functie van de tijd voor een goederenbakfiets, categorie 2a, wegrijdende vanuit stilstand met een constant totaal vermogen van

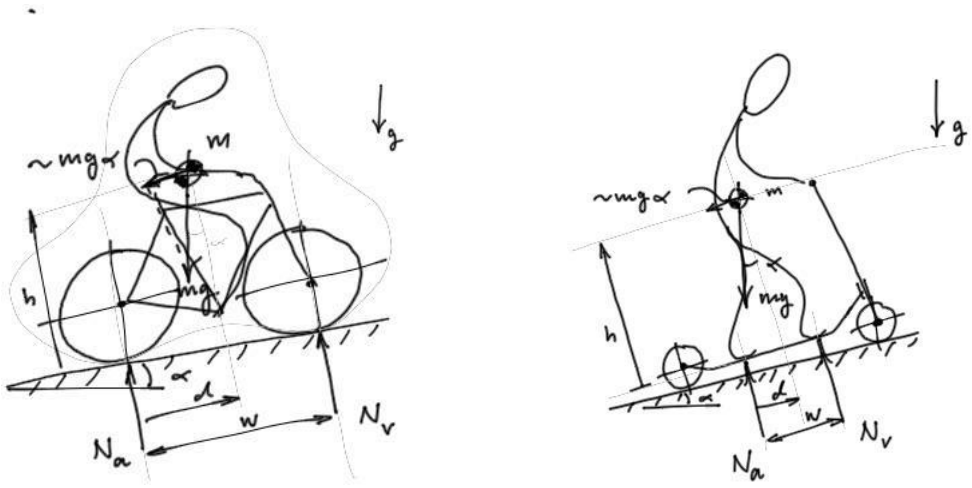
P = 1250 W, met Pr het rolweerstandsvermogen, en Pa het luchtweerstandsvermogen. Het verschil tussen P en Pr+Pa is het kinetisch vermogen, idem voor het energieverbruik *E*, *Er* en *Ea*.

In de figuur A.5, met de vermogensverdeling (links) en het totale relatieve energieverbruik (rechts), zien we weer zo'n zelfde trend als bij de stadsfietser. Na 5 seconden als de goederenbakfiets op een snelheid van 17 km/h is, is in dit geval zelfs 88% van alle energie gaan zitten in het op snelheid brengen van het systeem. De meeste energie bij het wegrijden vanuit stilstand gaat dus in de kinetische energie zitten.

Hier zien wij duidelijk dat een zware goederenbakfiets veel vermogen nodig heeft om op gang te komen en wil hij dus meekomen op het fietspad met de andere weggebruikers bij het wegrijden vanuit stilstand dan zal dit vermogen dus evenredig met de massa moeten zijn, zoals hierboven al afgeleid.

Tot slot, de rekenvoorbeelden zijn allemaal gedaan voor een vlakke weg. Een helling kan eenvoudig weg in rekening worden gebracht m.b.v. de coëfficiënt α , de hellingshoek in radialen, zoals te zien is in de bewegingsvergelijking. Dit komt er in feite op neer dat de rolweerstand vergroot of verkleind wordt. Wij hadden echter in het rekenvoorbeeld al gezien dat bij het wegrijden vanuit stilstand de meeste energie gaat zitten in de kinetische energie, zo'n 85%, en dat de rol- en luchtweerstandverliezen verwaarloosbaar zijn.

B - Model voor het voor- of achterovertuimelen bij een LEV



a b

Figuur B.1 Model voor het voor- of achterovertuimelen van een LEV, a) de LEV als geheel met zittende bestuurder, b) de staande bereider van de LEV.

Hier beschouwen wij twee gevallen, een zittende bestuurder waarbij de LEV als geheel voor- of achterover tuimelt, zoals in figuur A2.a, en een staande bestuurder met losse handen aan het stuur waarbij alleen de bestuurde voor- of achterovervalt t.o.v. de LEV, denk hierbij b.v. aan de staande bestuurder van een e-step, zoals in figuur A2.b. De analyse is voor beide gevallen hetzelfde. Er zijn twee contactpunten, achter en voor, en de normaalkracht bij deze contactpunten zijn respectievelijk *Na* en *Nv*. Wij nemen aan dat de helling een hoek α met de horizontaal maakt en dat deze klein is (<30 graden), en dat voor helling-op α positief is. De horizontale afstand tussen de contactpunten is *w* en de horizontale afstand van het massamiddelpunt van het geheel, zoals in geval (a), of van de bereider, zoals in geval (b), tot het achterste contactpunt is *d*. Het massamiddelpunt is op een hoogte *h* t.o.v. de weg.

Het gevaar voor achterover tuimelen ontstaat bij een voorwaartse versnelling van

$$a \geq \left(\frac{d}{h} - \alpha\right) g \ ,$$

met de hellingshoek α in radialen en de versnelling van de zwaartekracht *g*.

Het gevaar voor voorover tuimelen ontstaat bij een te grote vertraging (let op bij een vertraging is $a < 0$) en wel bij een vertraging van

$$a \ \leq -\left(\frac{(w-d)}{h} + \alpha\right) g \ ,$$

met wederom de hellingshoek α in radialen en de versnelling van de zwaartekracht *g*.

Gebruikelijke waarden voor een stadsfiets zijn:
w = 1 m, d = 0.5 m, h = 1 m, α = 0.018 rad, g = 9.81 m/s^2
Bij een vlakke weg komt dit dan neer op een maximale versnelling en vertraging van 5 m/s^2.
Het effect van een helling is maar gering, een helling van +/-1% veranderen deze waarde met +/-0.1 m/s^2, dus versnellen heuvel op a < 4.9 m/s^2 en remmen heuvel af a > -4.9 m/s^2.

Gebruikelijk waarden voor een e-step zijn:
w = 0.3 m, d = 0.15 m, h = 1 m, α = 0.018 rad, g = 9.81 m/s^2

Bij een e-step op een vlakke weg komt dit neer op een maximale versnelling en vertraging van 1.5 m/s^2. Hier is de grens een stuk lager dan bij een zittende bereider op de fiets omdat de afstand tussen de contactpunten (voeten op de plank) een stuk kleiner is en de verticale afstand van het zwaartepunt tot het contact punt een stuk groter. Het effect van een helling is als hierboven, +/-1% verandert de versnellingswaarden met +/-0.1 m/s^2.