

Luchtweerstand van de vijfdeursauto



Profielwerkstuk Ewout van Nimwegen
Havo 5 Farel College Amersfoort

Docenten

MW.IR.B.S.LOBREGT

DHR. ING. R. SMITSMAN

DHR. M. TER STEEGE

DHR. H. VAN WIJK

Samenvatting

Auto's ondervinden weerstand tijdens het rijden. Dit komt door de wrijvingskrachten die arbeid verrichten in de tegengestelde richting. Deze krachten zijn te berekenen waardoor men te weten komt hoe aerodynamisch een auto is. Er moet gekeken worden naar de luchtweerstand en rolweerstand. In dit profielwerkstuk wordt voornamelijk naar luchtweerstand gekeken. Door de snelheid en de frontale oppervlakte van de auto te meten kan met de formule van luchtweerstandskracht de C_w -waarde berekend worden. Hiermee kan de luchtweerstand van een auto bepaald worden. Voor deze berekening moet de luchtweerstandskracht gemeten worden in een windtunnel. Ook is het tegenwoordig mogelijk om dit soort metingen met computerprogramma's uit te voeren, bijvoorbeeld Flow Design.

Hierna kan de auto aangepast worden en opnieuw getest worden om de aerodynamica te verbeteren. Het bleek dat de vorm van het model met de minste luchtweerstand het meest leek op een druppel. Hierdoor kan de lucht het best langs de auto bewegen en is er weinig wrijving.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Inhoudsopgave.....	3
Voorwoord	4
H1 Inleiding	5
H1.1 Theoretische benadering onderzoek	5
H1.1a Het voordeel van weinig luchtweerstand	5
H1.1b De formule van luchtweerstandskracht	6
H1.1c Informatie theoretisch ontwerp van de ideale carrosserie	7
H1.1d Theoretische ontwerpen	9
H1.1e De windtunnel in theorie	17
H1.1f Schuif- en rolweerstand	19
H1.1g Het verband tussen de C_w -waarde en de luchtweerstandskracht.....	19
H1.1h Luchtstromingen	19
H1.1i Het virtueel zichtbaar maken van luchtstromingen	23
H1.2 Onderzoeksvraag	24
H2 Materiaal en methode	25
H2.1 Materiaal	25
H2.2 Methode.....	28
H3 Resultaten.....	30
H3.1 Resultatentabellen	30
H3.1a Resultatentabellen schaalmodel carrosserie met kleine wielen	30
H3.1b Resultatentabellen schaalmodel carrosserie met grote wielen	32
H3.2 Resultatentabel realistische berekening carrosserie met kleine wielen.....	33
H3.3a Resultaten rookproef in de windtunnel	34
H3.3b Resultaten rookproef in Flow Design	34
H4 Conclusies	35
H4.1 Onderzoeksvraag	35
H4.2 Hypothese.....	36
H5 Discussie	37
H5.1 Vergelijking resultaten en theorie.....	37
H5.2 Reproduceerbaar onderzoek	39
H5.3 Verbeterpunten	39
H5.4 Vervolgonderzoek	39
Bronnenlijst.....	40

Voorwoord

Dit onderzoek is bedacht door Ewout van Nimwegen. Ik ben zestien jaar oud en ik zit op het Farel College in Amersfoort. In Havo 5 is het verplicht voor het eindexamen om een profielwerkstuk te maken, in mijn geval dus over luchtweerstand van auto's. Ik ben op dit onderzoek gekomen door een opdracht van drie jaar geleden. Voor deze opdracht moest een autootje van hout gebouwd worden dat getest zou worden op de aerodynamica. Dit was erg goed gelukt en hierdoor besloot ik om dit idee verder uit te diepen in mijn profielwerkstuk. Ik ben geïnspireerd geraakt door mevrouw Krolis (zij heeft het project van de houten autootjes bedacht) en mijn natuurkunde docenten de heer Smitsman en de heer Ter Steege. De heer Smitsman heeft dit profielwerkstuk verbeterd door opbouwende kritiek en door tips te geven over de inhoud. De heer Ter Steege heeft overzicht gecreëerd in mijn werk en de heer van Wijk heeft mij geholpen met alle practica voor de resultaten van het werkstuk. Als laatste wil ik mijn familie bedanken voor de tips, ideeën en steun in de afgelopen maanden.

H1 Inleiding

H1.1 Theoretische benadering onderzoek

H1.1a Het voordeel van weinig luchtweerstand

Er zijn drie voordelen van weinig luchtweerstand op een personenauto. Wanneer de auto weinig luchtweerstand ondervindt zijn de brandstofkosten lager. Ook gaan de energiekosten omlaag omdat de motor minder arbeid hoeft te leveren. Ten derde stoten auto's minder vervuilende stoffen uit; dit is beter voor het milieu. Deze drie voordelen worden hieronder verder behandeld.

Brandstofkosten (Blok, B. (2013))

Zodra een auto minder luchtweerstand ondervindt zal de motor ook minder kracht hoeven te leveren om de tegenwerkende krachten te overwinnen. De motor van de auto heeft brandstof nodig; dit is benzine (bij niet elektrische auto's). De auto zal zuiniger gaan rijden wanneer deze minder luchtweerstand ondervindt. Met zuiniger rijden wordt bedoeld dat er minder brandstof per kilometer nodig is en de brandstofkosten dus zullen dalen. Dit is een groot voordeel in 2017 aangezien de benzineprijzen hoog liggen.

Energiekosten (Blok, B. (2013))

Deze kosten staan in verband met de brandstofkosten. Als de auto niet zo aerodynamisch is zullen de energiekosten hoog liggen en de brandstofkosten ook. Het verband tussen de energiekosten en de brandstofkosten is een evenredig verband. Dus zodra de aerodynamica wordt verbeterd zullen de energiekosten dalen en autorijden zal goedkoper worden. In het geval van een elektrische auto zullen de energiekosten lager liggen doordat de auto minder stroom verbruikt.

Milieu (Blok, B. (2013))

Het derde voordeel van lage luchtweerstand is dat de auto weinig uitstoot wanneer er zuiniger gereden wordt. Hier wordt wel uitgegaan van auto's die benzine als brandstof gebruiken. Zodra gekeken wordt naar een elektrische auto kan dit ook als een voordeel gezien worden. Dit komt omdat de stroom voor elektrische auto's ook opgewekt moet worden. Hierdoor wordt de lucht ook vervuild. Wel is elektrische energie een schonere vorm van brandstof dan benzine. Het maakt dus niet uit of een auto elektrisch is of op benzine rijdt; het is beide slecht voor het milieu. Zodra de luchtweerstand omlaag gaat stoot een auto minder uit en is dit dus beter voor het milieu.

H1.1b De formule van luchtweerstandskracht

Met de formule van luchtweerstandskracht kan men nagaan hoeveel luchtweerstand een auto ondervindt. In dit onderzoek wordt de formule toegepast door uit te rekenen wat de C_w -waarde van de carrosserie is. De C_w -waarde ook wel de luchtweerstandscoefficiënt genoemd, is een getal dat aangeeft hoe aerodynamisch de auto is. Deze waarde kan ook berekend worden met de onderstaande formule; wel moet de formule anders worden genoteerd.

$$F_{w,l} = C_w \times 0,5 \times p \times v^2 \times A \text{ (BINAS, 2015)}$$

$F_{w,l}$ = luchtweerstandskracht: Een wrijvingskracht die zorgt voor luchtweerstand op een object. De luchtweerstandskracht is dus een hoeveelheid lucht die een voorwerp tegenwerkt. De kracht wordt gemeten in Newton.

p = dichtheid: in dit geval de dichtheid van lucht waarin de auto zich voortbeweegt. De dichtheid wordt in kg/m^3 genoteerd, dit is een constante waarde van $1,293 \text{ kg/m}^3$ bij 293K of 20 graden Celsius (BINAS, 2015 tabel 8).

C_w -waarde = luchtweerstandscoefficiënt: dit getal hangt af van hoe gestroomlijnd een voorwerp is. Door de C_w -waarde te berekenen is te bepalen hoe gestroomlijnd het voorwerp is. C_w -waarde kent geen eenheid. Dit is een feit, te vinden in de BiNaS.

A = frontale oppervlakte: de frontale oppervlakte is het vooraanzicht van de carrosserie. De frontale oppervlakte is te berekenen door het vooraanzicht van de carrosserie op te meten en de oppervlakte (lengte x breedte) uit te rekenen in m^2 .

v^2 = snelheid in het kwadraat: in dit geval wordt met de snelheid de snelheid van de wind in de windtunnel bedoeld. Zodra er naar de realiteit gekeken wordt is het de snelheid van het voorwerp. De carrosserie staat immers stil en de wind wordt door de tunnel geblazen. Luchtsnelheid wordt in m/s of km/h gemeten.

$\frac{1}{2}$ = deel van de formule

(Blok. B, 2013)

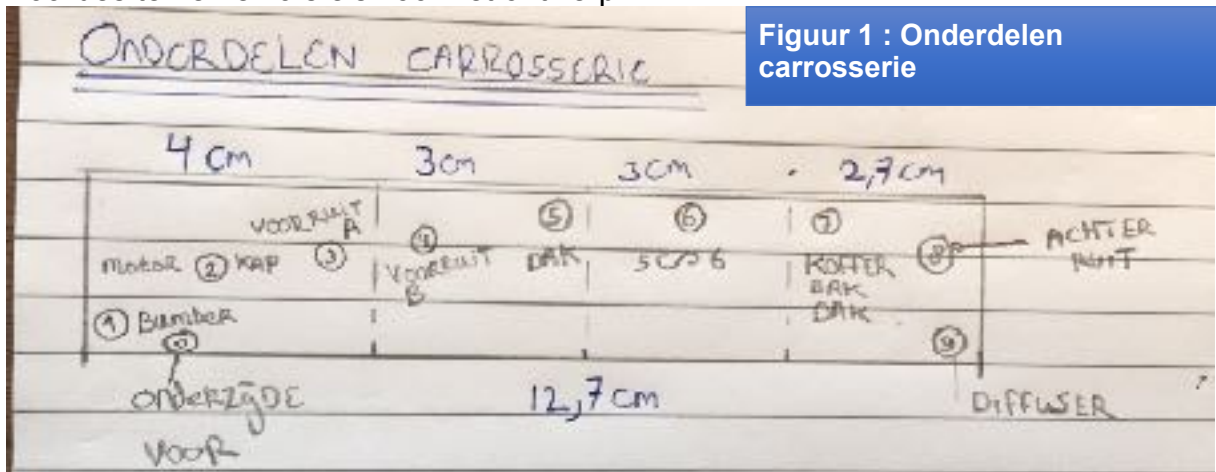
H1.1c Informatie theoretisch ontwerp van de ideale carrosserie

Voorwaarden ontwerp

Voor het ontwerp van de carrosserie wordt er van uit gegaan dat voor de formule voor de ideale auto de frontale oppervlakte ($l \times b$) zo klein mogelijk zal zijn. Dit zorgt namelijk voor een lage weerstand en is af te leiden uit de formule van luchtweerstandskracht (BINAS, 2015 tabel 35A):

$$F_{w,l} = C_w \times 0,5 \times \rho \times v^2 \times A$$

Het is een feit dat zodra A kleiner wordt en de C_w -waarde, dichtheid, de constante 0,5 en de snelheid gelijk blijven de luchtweerstandskracht kleiner is. Hierdoor is het belangrijk dat er minimale waardes vastgesteld worden. Een aantal regels die bepalen hoe klein onderdelen van de carrosserie mogen zijn. Zonder deze waardes zou de carrosserie niet de weg op kunnen omdat hij zo niet aan de eisen van een auto zal voldoen. Hierdoor is er voor gekozen om een aantal verplichte minimale waardes te nemen als eis voor het ontwerp.



Figuur 1 : Onderdelen carrosserie

Vastgestelde regels

Zijaanzicht ← verdeeld over de onderdelen 0 tot 9. De carrosserie is in totaal 12,7cm lang en wordt opgedeeld in vier delen. Deze vier worden weer opgedeeld in tien delen (zie afbeelding: 'onderdelen carrosserie').

De minimale waardes voor de carrosserieën zijn als volgt :

0. De onderzijde voor : 0,3cm
1. De bumper : 1 cm
2. De motorkap : 2 cm
3. De voorruit A : 2,5 cm (wordt officieel 3 cm door de significantie).
4. De voorruit B : 2,5cm (wordt officieel 3 cm door de significantie).
5. Het dak : 2,5cm gelijk aan 6 en 7
6. Het dak : gelijk aan 5 en 7
7. Het dak van de kofferbak : gelijk aan 6 en 7
8. De achterraut : 2 cm
9. De diffuser 0,3cm

Overige regels

Verder is de carrosserie op haar hoogste punt 2,5cm hoog en 4,4cm breed. De waardes van de lengte, breedte en hoogte zijn belangrijk voor de windtunnelproef. Zodra deze niet hetzelfde zijn past de carrosserie hoogst waarschijnlijk niet goed in de windtunnel of zal de uitslag anders zijn.

Informatie over de materialen

Voor het onderzoek worden drie carrosserieën ontworpen en gebouwd. Zo is er genoeg diversiteit in het soort ontwerpen en zal de uitslag betrouwbaarder zijn. Het materiaal dat gebruikt wordt voor de drie modellen is hout; hard hout om precies te zijn. De drie stukken hout verschillen minimaal in massa. Dit heeft geen invloed op de uitslag; dit blijkt uit de formule van luchtweerstandskracht. In de formule komt de massa 'm' niet voor en deze zal dus ook geen invloed op de uitslag van het onderzoek hebben.

Carrosserie ontwerp 1,2 en 3

De waardes voor carrosserie 1 zijn gelijk aan de minimale waardes die zijn vastgesteld hierboven. Nu is de carrosserie qua grootte zo aerodynamisch mogelijk zover de regels dit toestaan. Het is nu alleen nog mogelijk om door middel van het aanbrengen van rondingen en het wegwerken van de wervels de C_w -waarde nog lager te krijgen. Hier zijn verschillende theorieën voor daarom is ervoor gekozen om meerdere ontwerpen te maken. En bij sommige ontwerpen de theorieën te combineren.

Bij de drie ontwerpen is gekozen voor de volgende modellen (zie afbeeldingen van de theoretische modellen hieronder). Deze modellen bestaan uit verschillende delen die stuk voor stuk zijn aangepast. Deze aanpassingen zijn gebaseerd op een theoretisch onderzoek van wiskundige op universitair niveau: P. Gooijert. Ook zijn theorieën van autotechnicus R. Hogt gebruikt. In beide onderzoeken wordt gesproken over ideale waardes en over parameters. Dit zijn waardes waartussen de daadwerkelijke waarde mag zitten. Voor de theoretische ontwerpen zijn beide gebruikt aangezien voor een vijfdeursauto niet altijd de ideale waarde kan worden toegepast. Dit heeft te maken met de vastgestelde regels hierboven.

Ook zijn er onbewerkte stukken hout die getest worden. Hiervan zijn er twee even groot als de auto's en één ongeveer 1,5x zo groot. Door deze ook te testen kan gekeken worden naar de maximale luchtweerstand op een auto.

H1.1d Theoretische ontwerpen

In deze paragraaf worden de drie carrosserie ontwerpen besproken en gekoppeld aan de onderzoeken van P. Gooijert (2008) en R. Hogt (2012).

Ontwerp 1

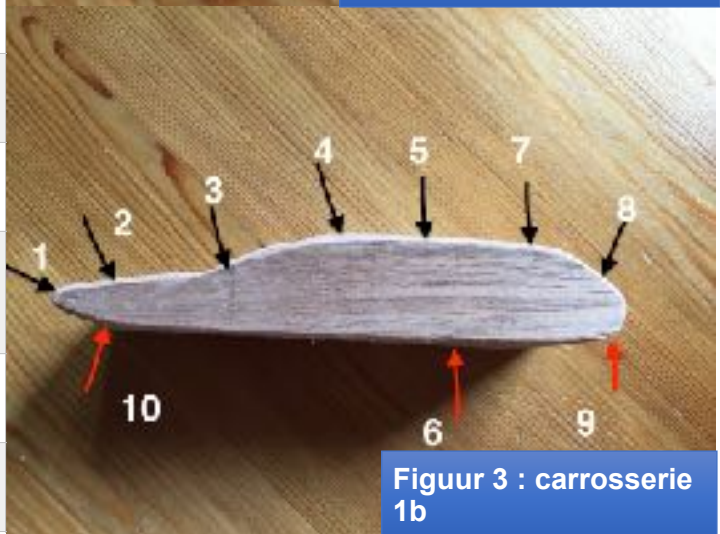
Het zijaanzicht

Tabel 1 carrosserie 1 het zijaanzicht

1	Voorkant	10 graden
2	motorkap	10 graden
3	Voorruit	45 graden
4	Dak	0 graden
5	Dak	0 graden
6	Dak	0 graden
7	Kofferbakdak	5 graden
8	Achterrauit	37 graden van 11,2 cm tot 12,7cm
9	Diffuser	3 graden
10	Onderzijde voor	3 graden



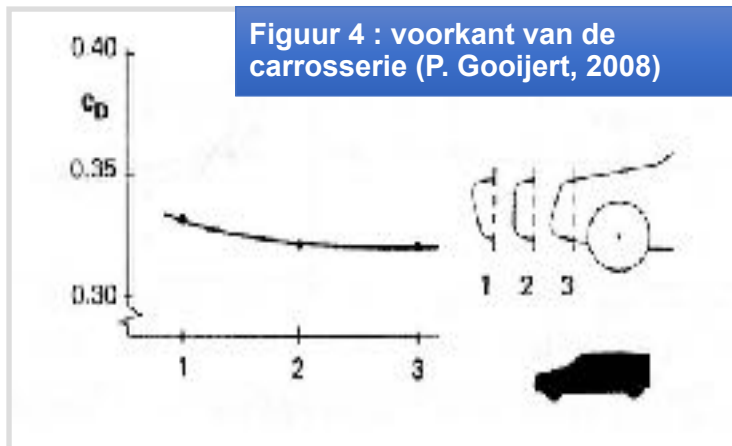
Figuur 2 : carrosserie 1a



Figuur 3 : carrosserie 1b

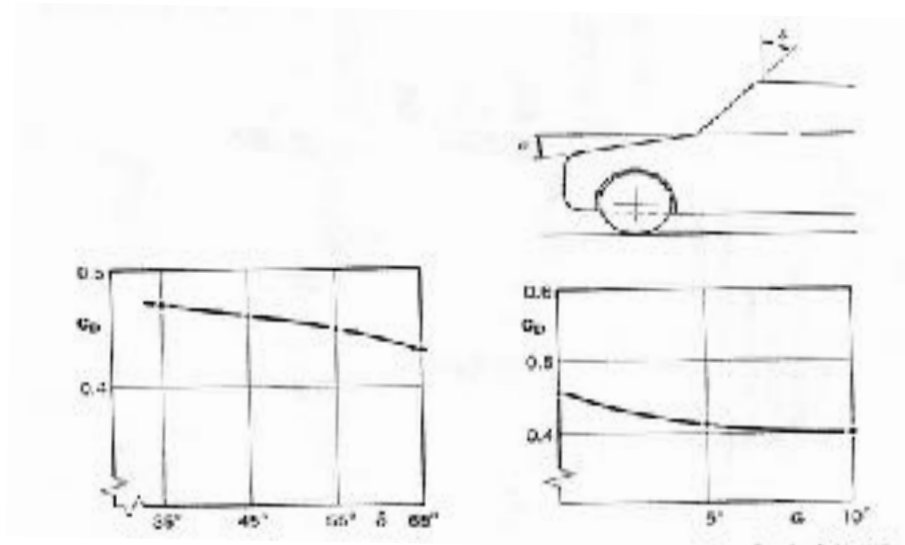
De voorkant (1/10)

Het punt waar de lucht voor het eerst tegen het materiaal van de auto slaat is de voorkant. Het is belangrijk dat de voorkant de lucht zo goed mogelijk geleid. Figuur 4 bewijst dat de ideale voorkant er zoals vorm '3' uitziet. CD staat voor de hoeveelheid luchtweerstand die de voorkant ondervindt. Voorkant drie is theoretisch gezien de ideale vorm (volgens P. Gooijert, 2008), hier is bij ontwerp 1 voor gekozen.



De motorkap (2)

Voor de motorkap is er geen duidelijke ideale vorm. Wel zijn er bepaalde parameters. Zo zal de luchtweerstand van de carrosserie afnemen als de motorkap schuiner gezet wordt. Zoals op figuur 6 te zien is zal de luchtweerstand afnemen tussen 0 en 10 graden. C_D (Y-as) staat voor de luchtweerstand afname en 'alfa' (X-as) staat voor bij welke hoek dit gebeurt. Bij carrosserie 1 is gekozen voor een motorkap onder een hoek van 10 graden. Volgens figuur 6 is de afname van de luchtweerstand dan maximaal (R. Hogt. (2012)).



Figuur : 5 (Hogt, R. (2012))

Figuur : 6 (Hogt, R. (2012))

De voorruit (3)

De ideale voorruit is ook bepaald door te kijken naar de theoretisch berekende parameters (figuur 5). Hier komt uit dat het ideale aantal graden 65 graden is, hierbij is de luchtweerstand maar 0,44. Bij carrosserie 1 is gekozen voor 45 graden vanwege de minimum waarden van de carrosserie. Zodra gekozen werd voor een waarde groter dan 45 graden zou dit niet passen wanneer er rekening met de afmetingen van de carrosserie wordt gehouden.

Het dak en de onderkant (4/5/6)

Het dak is 0 graden gedraaid en dus hetzelfde gebleven net als bij (4/5) en de onderzijde(6). Deze delen van de carrosserie hebben eigenlijk bijna geen invloed op de luchtweerstand van dit model.

Kofferbakdak (7)

Dit oppervlak gaat vijf graden naar beneden, zo sluit dit onderdeel goed aan op de achterruit. Zodra er meer dan vijf graden naar beneden gegaan wordt voldoet de carrosserie niet meer aan de regels hierboven.

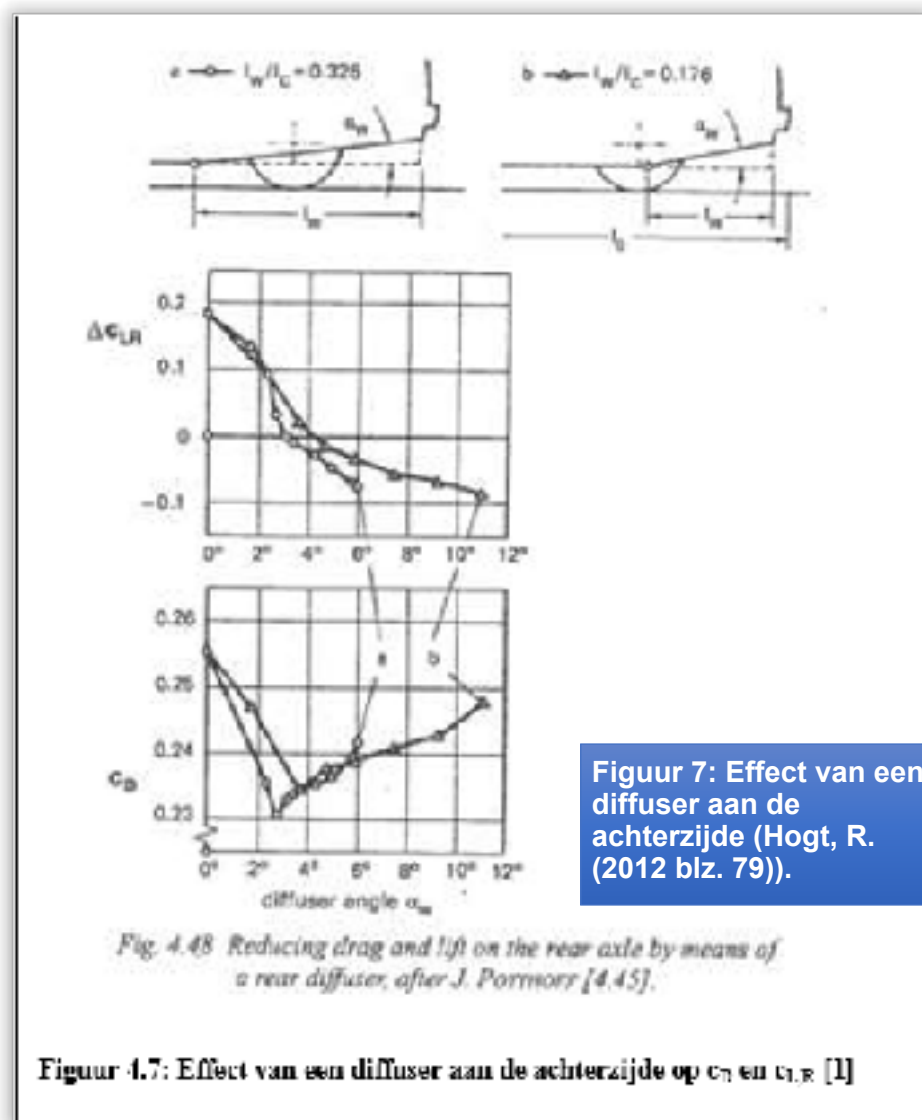
Achterrauit (8)

Het belangrijkste onderdeel van de carrosserie. Er is gekozen voor een hoek van 37 graden. Dit zou de ideale waarde moeten zijn volgens onderzoek van autotechnicus R. Hogt. P. Gooijert gaat niet specifiek in op dit punt. Hij zegt alleen dat de waarde tussen de 0 en 50 graden moet zitten. Er is gekozen voor het onderzoek van de autotechnicus aangezien hij een ideale waarde beschrijft, preciezer dus.

Het nadeel van dit aantal graden is dat de achterkant niet volledig benut kan worden. Zo kan de raaklijn niet op 2,7cm beginnen maar op 1,5cm. Dit komt doordat de regels van de vijfdeursauto niet toestaan dat de achterkant zo laag is.

Achterkant (onder) (9)

Voor de onderzijde van de carrosserie is gekozen voor een diffuser van 3 graden, onderzocht door autotechnicus R. Hogt. Dit zou de ideale waarde zijn voor carrosserie 1. De diagramberekening van de ideale diffuser is te zien op figuur 7.



Theoretische ontwerp uitleg keuzes carrosserie 1 het bovenaanzicht en onderaanzicht

De zijanten worden aerodynamisch afgerond. De hoeken worden weggewerkt en alles wordt glad gemaakt. Dit zal zorgen voor een aerodynamisch ontwerp. Volgens P. Gooijert moet elke afronding ongeveer een hoek van 10 graden hebben wil deze ideaal zijn. Hier is bij het ontwerpen zoveel mogelijk naar gestreefd.

Theoretische ontwerp uitleg keuzes carrosserie 1 het vooraanzicht en achteraanzicht

Het vooraanzicht en achteraanzicht worden niet zo veel bewerkt. Deze worden alleen zo glad mogelijk gemaakt.

Ontwerp 2



Figuur 8 : carrosserie 1c

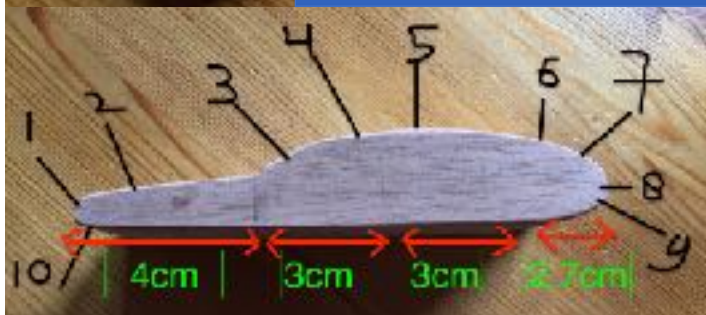


Figuur 9 : carrosserie 1d

Tabel 2 carrosserie 2 het zijaanzicht



Figuur 10 : carrosserie 2a



Figuur 11 : carrosserie 2b

1	Voorkant	15 graden
2	motorkap	10 graden
3	Voorruit	45 graden
4	Dak	0 graden
5	Dak	0 graden
6	Kofferbak dak	15 graden
7	achterraut	15 graden van 10 cm tot 12,7cm
8	Achterkant	0 graden
9	Diffuser	3 graden
10	Onderzijde voor	5 graden

Theoretische ontwerp uitleg keuzes carrosserie 2 het zijaanzicht

Ontwerp 2 lijkt heel erg op ontwerp 1. Dit komt omdat bij beide ontwerpen naar het ideale model wordt gezocht. Bij ontwerp 2 zullen niet alle delen van de carrosserie opnieuw beschreven worden, alleen de delen die anders zijn dan bij carrosserie 1.

De voorkant (1/10)

De voorkant van de tweede carrosserie is de ideale vorm volgens autotechnicus R. Hogt. Volgens zijn theorie moet er van de onderkant (van de voorkant) vijf graden af en boven 15 graden. Ook spreekt R. Hogt over een spoiler in zijn onderzoek; dit is bij dit onderzoek niet haalbaar. Dit heeft te maken met het materiaal, hard hout. Het is namelijk niet mogelijk om met hardhout een carrosserie te ontwerpen die een spoiler bevat. Het materiaal kan niet bewerkt worden tot deze vorm. Dit kan mogelijk wel met een 3D printer.

De achterraut (7)

De theorie achter de achterraut is beredeneerd vanuit de theorie van P. Gooijert. Volgens P. Gooijert zal de ideale waarde rond de 0 tot 50 graden zitten. Bij carrosserie 2 is gekozen voor 15 graden. Het grootste verschil vergeleken met carrosserie 1 is dat bij 2 de raaklijn veel verder reikt. De hoek is kleiner dus de afstand tot de maximale hoogte is groter. De achterkant van de carrosserie wordt volledig benut en loopt dus 2,7cm lang 15 graden af.

Voor, achter, boven en onderaanzichten

Deze zijn allemaal hetzelfde gebleven als bij carrosserie 1. De bewerking zit hem in het afronden van de hoeken (10 graden) en het glad maken van het hout.



Figuur 12 : carrosserie 2c



Figuur 13 : carrosserie 2d

Ontwerp 3



Figuur 14 : carrosserie 3a

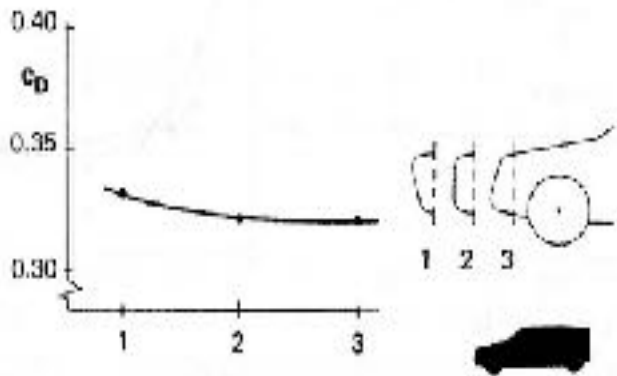
Tabel 3 carrosserie 3 het zijaanzicht

1	Voorkant	15 graden
2	motorkap	10 graden
3	Voorruit	20 graden
4	Dak	0 graden
5	Dak	0 graden
6	Kofferbak dak	0 graden
7	Achterraut	37 graden van 10 cm tot 12,7cm
8	Achterkant	0 graden
9	Diffuser	3 graden
10	Onderzijde voor	5 graden

Zijaanzicht

Dit model is ontworpen door E. van Nimwegen. Er zit wel een theorie achter het ontwerp, maar een deel van deze theorie is nog niet wetenschappelijk bewezen. Het is een aparte auto waarbij de motorkap volledig overloopt in de voorruit van de auto. Het idee van dit revolutionaire model is dat het minder luchtweerstand zal ondervinden dan een standaard vijfdeursauto, maar wel aan de eisen voldoet. Ook heeft dit model een veel grotere kofferbak en zit de motor onder de voorruit en de motorkap. De carrosserie zal minder luchtweerstand ondervinden doordat de voorruit en motorkap één geheel zijn. Hierdoor treedt er minder wrijving op en dus ook minder luchtweerstand. De carrosserie lijkt op deze manier het meest op een waterdruppel (volgens de hypothese de beste vorm).

Voorkant: (1/10) Deze is gebaseerd op de theorie van P. Gooijert. Dit is een ideale voorkant aangezien de lucht goed langs, over en onder de auto door wordt gestuurd. Zie afbeelding ideaal model door P. Gooijert.



Figuur 15 : voorkant van de carrosserie
(Gooijert, P. (2008 blz. 27))

De motorkap: (2) Deze is zoals de afbeelding van het bovenaanzicht laat zien (figuur 16 : carrosserie 3 b) helemaal vooraan in de auto gebouwd. De klep sluit niet perfect aan op de voorruit maar doordat de lucht over de auto heen stroomt zal dat deel niet voor veel luchtweerstand zorgen. Volgens de theorie van E. van Nimwegen klopt dit. Deze theorie is nog niet wetenschappelijk bewezen, maar zal wel onderzocht worden in de windtunnel met krachtmeters en rook.

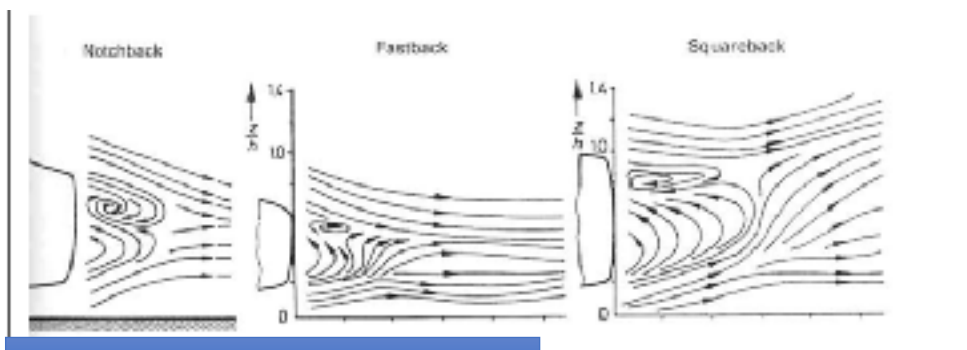


Figuur 16 : carrosserie 3b

De voorruit: (3) Deze loopt samen met de motorkap 20 graden op. Apart aan deze voorruit is dat de motor nog onder deze ruit zit.

Achterrauit: (7) Deze loopt volgens de theorie van R. Hagt ideaal af, 37 graden om precies te zijn. Hier heeft R. Hagt onderzoek naar gedaan. Deze waarde zorgt ervoor dat de carrosserie zo het meeste lijkt op een druppelvormig model. Dit model zorgt voor de minste luchtweerstand, doordat de lucht zonder veel wrijving langs de carrosserie kan stromen. Er zullen minder wervels ontstaan zoals te zien is op afbeelding 17 (wervelingen achter de auto).

Zodra er voor 37 graden gekozen wordt lijkt het model het meest op een 'fastback'. Een fastback ondervindt volgens de theorie van R. Hagt de minste luchtweerstand.



Figuur 17 : wervelingen achter de auto (Hogt, R. (2012 blz. 60))

Diffuser (9) Deze loopt 3 graden af ideaal volgens de theorie van R. Hogt.

Voor-, achter-, boven- en onderaanzichten

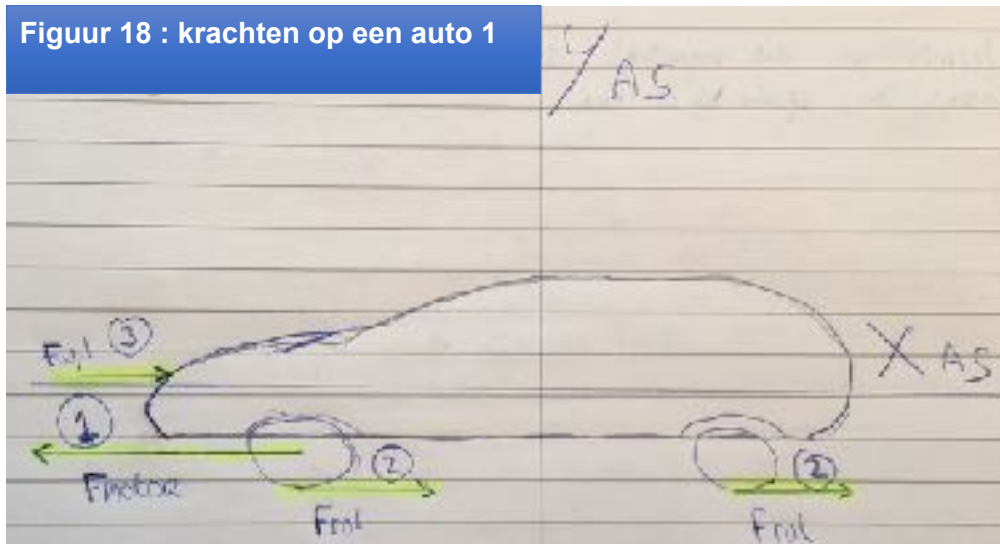
Deze zijn allemaal hetzelfde gebleven als bij carrosserie 1. De bewerking zit hem in het afronden van de hoeken (tien graden) en het glad maken van het hout.

H1.1e De windtunnel in theorie

Krachten op een auto binnen en buiten de windtunnel

De windtunnel is een speciaal apparaat waarmee de luchtweerstand op auto's berekend kan worden. Wat zo speciaal is aan de windtunnel is dat dit apparaat werkt zonder dat de auto rijdt. Wanneer een auto op de weg luchtweerstand ondervindt werken er andere krachten op een auto dan in de windtunnel. Het verschil zit in de kracht van de motor in de auto. Tijdens een windtunnelexperiment is deze kracht er niet. Er zit dus alleen een verschil in de krachten op de 'X-as'. De krachten op de 'Y-as', zwaartekracht en normaalkracht zijn even groot dus samen 0. Op de 'X-as' is de kracht voorwaarts 0 aangezien de motor uitstaat. De kracht achterwaarts is groter dan 0, dit is de weerstand. Deze weerstand kan weer onderverdeeld worden in rol- en luchtweerstand. De auto beweegt in de windtunnel dus naar achteren. Op de onderstaande afbeelding (figuur 18 : krachten op een auto 1) zijn de krachten op een personenauto met een tweewiel- aandrijving te zien, waarbij 1 de kracht van de motor is, 2 de rolweerstand en 3 de luchtweerstand. De krachten op de 'Y-as' zijn niet getekend aangezien deze samen nul zijn (normaalkracht - zwaartekracht). (Blok. B, 2013)

Figuur 18 : krachten op een auto 1

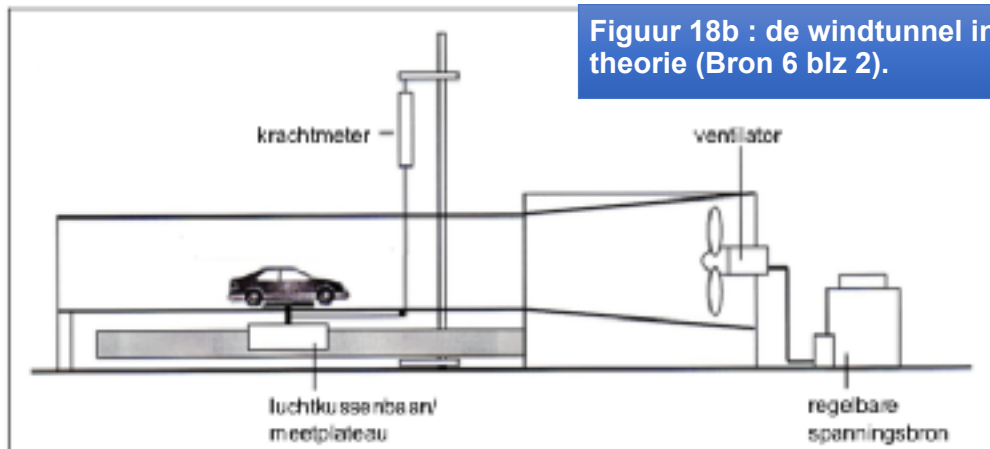


De windtunneltest

Het doel van de test is om in de praktijk te onderzoeken welk model carrosserie de laagste luchtweerstandscoefficiënt heeft. Er zijn verschillende soorten windtunnels waarbij de ene vaak nauwkeuriger is dan de ander. Voor het onderzoek wordt een simpele windtunnel gebruikt. Deze windtunnel bestaat uit een spanningsbron, een ventilator, een overdekte tunnel waar de lucht tegen de auto kan botsen, een 'veerunster' en meerdere haken waar de 'veerunster' aan bevestigd kan worden (zie figuur 18b de windtunnel in theorie).

Windtunnel

In figuur 3 is de modelwindtunnel weergegeven. Deze meetopstelling bestaat uit een tunnel met een ventilator en een meetplatform.



Figuur 18b : de windtunnel in theorie (Bron 6 blz 2).

De 'veerunster' ook wel krachtmeter genoemd kan de luchtweerstandskracht meten in Newton. Zodra de carrosserie aan de veerunster bevestigd wordt en deze aan de windtunnel kan er gemeten worden hoeveel kracht er op de veer uitgeoefend wordt. Dit kan omdat de wind tegen de voorkant van de auto wordt geblazen en deze naar achter geduwd wordt. Deze kracht is gelijk aan de rol- en luchtweerstand op de carrosserie. De carrosserie staat op wielen waardoor er een kleine rolweerstand ontstaat. Zodra de carrosserie in de windtunnel zou liggen zou er veel schuifweerstand ontstaan, dit wordt voorkomen door wielen onder het model te plaatsen. De wind die tegen de carrosserie geblazen wordt zorgt voor weerstand, de wind wordt gemeten in v^2 .

De C_w -waarde kan worden berekend door de formule van luchtweerstandskracht om te schrijven naar $C_w = 2 \times F_{w,l} : (p \times v^2 \times A)$. Belangrijk is dat p en v^2 geen variabele waarden zijn deze zijn constant. De frontale oppervlakte is wel een variabele net als de $F_{w,l}$ en de C_w . Deze worden tijdens de proef bepaald en hebben invloed op elkaar. Dit leidt direct tot een deelvraag van het onderzoek: is er een verband tussen de $F_{w,l}$ en de C_w ?

H1.1f Schuif- en rolweerstand

Aan het begin van het onderzoek was het plan om de carrosserie in de windtunnel zonder wielen te testen. Het bleek al snel dat dit niet werkte aangezien de schuifweerstand zo te groot werd. Door wielen te gebruiken en deze met een as en tape onder de carrosserie te zetten kon de luchtweerstand wel beter gemeten worden. Dit komt omdat de schuifweerstand nu vervangen wordt door rolweerstand. Wel speelde rolweerstand nu een rol. De rolweerstand is gelukkig heel klein en hoeft niet meegenomen te worden in de berekening. De rolweerstand is zo klein omdat de wielen heel dun en licht zijn en goed rollen. (Blok. B, 2013)

H1.1g Het verband tussen de C_w -waarde en de luchtweerstandskracht

Het verband tussen de C_w -waarde en de luchtweerstandskracht is uit te leggen met behulp van de formule van de luchtweerstandscoefficiënt : $C_w = 2 \times F_{w,l} : (p \times v^2 \times A)$. Er is sprake van een evenredig verband. Dit blijkt uit het volgende voorbeeld.

Voorbeeld

Zodra alle waardes behalve de C_w en de constante $\frac{1}{2}$ twee worden blijkt uit de formule het volgende :

$C_w = 2 \times 2 : (2 \times 2^2 \times 2)$ geeft $C_w = 0,25$. Wanneer de $F_{w,l} > 2$ blijkt dat de C_w groter wordt. Neem bijvoorbeeld $F_{w,l} = 4$, dit geeft $2 \times 4 : (2 \times 2^2 \times 2)$ C_w -waarde = 0,5. Dit is logisch te verklaren aangezien $\times F_{w,l} \times 2$ door een getal wordt gedeeld. Hoe groter de $F_{w,l}$ hoe hoger de C_w -waarde dus ook zal zijn. Andersom dus wanneer de C_w vergroot wordt is de formule ($F_{w,l} = C_w \times 0,5 \times p \times v^2 \times A$) $F_{w,l} = 0,5 \times 2 \times 2 \times 2^2 \times 4 = 32$. Als de C_w groter wordt zal de $F_{w,l}$ ook groter zijn. Het verband tussen de C_w -waarde en de luchtweerstandskracht wordt een evenredig verband genoemd. Als de waarde $F_{w,l}$ groter wordt, wordt C_w ook groter en andersom. (Blok. B, 2013)

H1.1h Luchtstromingen

Luchtstromingen

In deze paragraaf wordt gekeken naar luchtstromingen. Zodra men de luchtstromingen rond een auto theoretisch vast kan stellen, kan men na gaan denken over hoe de aerodynamica verbeterd kan worden op specifieke punten. Wanneer een auto luchtweerstand ondervindt zal de hoeveelheid weerstand op meerdere punten verschillen. Zo is de weerstand op de frontale oppervlakte (de voorzijde van de auto) het grootst. Dit komt omdat de auto beweegt in een bepaalde richting waardoor de lucht die de andere kant op wil op de auto 'botst' en voor veel wrijving zorgt. De hoeveelheid wrijving is dan groter omdat de auto voortbeweegt in de tegengestelde richting van de wind (die op de auto 'botst') .

Op de afbeelding 'luchtstromingen' (figuur 19 : luchtstromingen) is goed te zien hoe de wind / lucht langs de auto beweegt. Op de punten 1,2 en 3 is de meeste weerstand. De luchtstroming moet veranderen van hoogte onder een hoek van x graden. Hierdoor ontstaat er wrijving die weer zorgt voor veel luchtweerstand. Dit blijkt ook uit de afbeelding uit het programma Flow Design waarbij dit de rode / gele punten zijn in de simulatie. (Flow Design wordt in de volgende paragraaf behandeld).



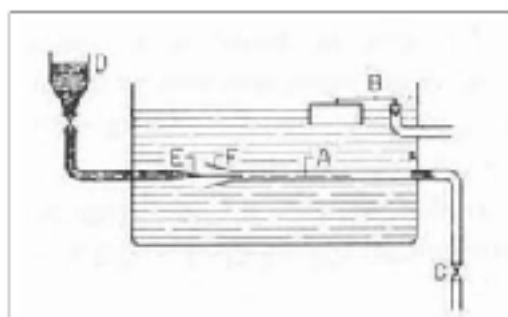
Figuur 19 : luchtstromingen

3 soorten stromingen (Hogt, R, 2012 blz 27)

De wetenschapper Reynolds heeft onderzocht dat er drie soorten stromingen zijn in de lucht. 1: Laminaire stroming: een beweging van vloeistofdeeltjes die evenwijdig aan elkaar zijn en zo ook voortbewegen. 2: Rotatiestromingen: vloeistofdeeltjes die bewegen in een cirkel. De snelheid van deze deeltjes is gelijk aan de afstand tot het middelpunt. 3: Wervelbeweging: vloeistof deeltjes bewegen in een cirkel maar de snelheid is omgekeerd evenredig aan de afstand tot het middelpunt. Dit worden ook wel wervels genoemd; deze ontstaan bij de wrijving tussen de lucht en het object. Door de wervels wordt de stroming instabiel en treden er snelheidsvariaties op, op verschillende punten van het object.

Het getal van Reynolds (Hogt, R, 2012 blz. 27)

Met het getal van Reynolds is het mogelijk om te bepalen met wat voor luchtstroming een object te maken heeft. Reynolds maakte gebruik van 'het toestel van Reynolds', zoals te zien is op figuur 20: Het toestel van Reynolds.



Figuur 20 : Het toestel van Reynolds (R, Hogt. (2012 blz. 27)).

Werking van het toestel (Hogt, R, 2012 blz. 27)

Het toestel bestaat uit een bak water met een glazen buis (A). (B) houdt het water op een constante hoogte met een 'vlatter'. Met (C) kan de snelheid van de stroming geregeld worden. (D) is de trechter hier zit een oplossing van Amiline kleurstof in, deze wordt door (E) een 'apillair' in het hard van de stroming in de buis gebracht. (F) De begintrechter is er om wervels in de buis te voorkomen.

Resultaten van het toestel (Hogt, R, 2012 blz. 27)

Wanneer men het resultaat wil begrijpen moet er goed gekeken worden naar de vloeistof. Deze vloeistof geeft namelijk de uitkomst van de stroming weer. Bij een lage snelheid zal de kleurstof recht door (E) gaan net als een draad. Zodra de snelheid verhoogd wordt zal de vloeistof zich aan het einde van de draad verspreiden over de doorsnede van de buis. Bij een nog hogere snelheid zal de vloeistof zich verspreiden over de inhoud van de buis. Dit zijn de wervelende draden. Uit onderzoek van Reynolds blijkt dat bij een lage snelheid de vloeistof laminair is en bij een hoge turbulent. De laminaire vloeistof beweegt met verschillende snelheden ten opzichte van elkaar. Maar de turbulente vloeistof geeft wervelingen die van vorm veranderen.

De vloeistof die gebruikt wordt in het toestel van Reynolds is vergelijkbaar met de luchtstromingen die op een auto werken. Hierdoor is het zeer belangrijk dat men goed begrijpt hoe de lucht in elkaar zit wanneer er verbetering in de aerodynamica van een auto moet worden aangebracht.

Grenslaag (Hogt, R, 2012 blz. 27)

De grenslaag van een stroming kan laminair of turbulent zijn. De grenslaag laat los en hierdoor ontstaat weerstand. Bij de laminaire grenslaag ontstaat veel meer weerstand doordat deze veel sneller loslaat dan de turbulente grenslaag. Zodra de weerstand verkleind moet worden is het belangrijk dat er een turbulente grenslaag is. Dit kan alleen wanneer de auto boven een specifiek snelheidsniveau zit. Uit het onderzoek van Reynolds blijkt dat bij voertuigaerodynamica het getal van Reynolds $3,5 \times 10^6$ is. Er mag geconcludeerd worden dat de grenslaag altijd turbulent is. Het verschil in de grenslaag van de stroming zal dus geen invloed hebben op de weerstand van de auto. Toch is het wel belangrijk om naar het stromingsbeeld zelf te kijken. Zo kan men zien op welk punt de auto de meeste weerstand ondervindt en of hier wat aan te veranderen is.

Rook in de windtunnel

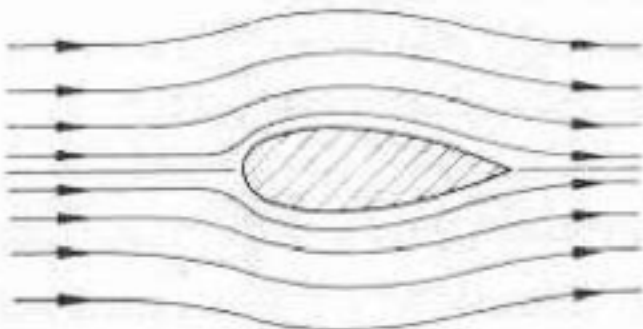
In de labtest van dit onderzoek zal ook een extra proef gedaan worden waarbij men probeert om met rook de luchtstromingen zichtbaar te maken. Er zal een klein buisje geplaatst worden voor de carrosserie. Hier kan de rook doorheen die hierna mengt met de wind uit de ventilator van de windtunnel. Hierna zal als de proef lukt goed te zien zijn hoe de rook langs de carrosserie beweegt. En of de stroming laminair of turbulent is. Op figuur 21: rookstromingen is goed te zien hoe de rook mengt met de lucht uit de ventilator. De groene pijltjes stellen de lucht uit de ventilator voor en de blauwe zijn de rook. De blauwe pijltjes mengen zich met de groene wanneer deze elkaar overlappen. De rook kan gezien worden als 'zichtbare lucht / wind'. De scheikundige reactie van de rook en wind en waarom deze wind zichtbaar wordt zal niet behandeld worden in dit onderzoek.



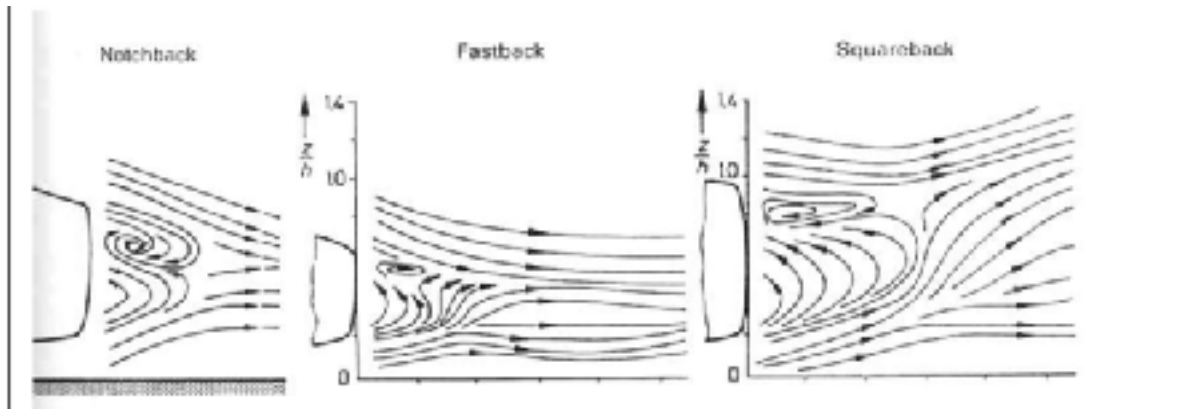
**Figuur 21 :
Rookstromingen**

Aerodynamica

Wanneer er met een windtunnel- of virtuele proef geconstateerd kan worden hoe de luchtstromingen invloed uitoefenen op de auto. Het gaat er dus om hoe de lucht langs de auto beweegt en of hier veel wrijving bij komt kijken. Is het mogelijk om te gaan testen hoe de aerodynamica verbeterd kan worden. Zo zouden er verschillende aanpassingen gedaan kunnen worden en kan de auto hierna nogmaals getest worden. Ook is het belangrijk om te kijken wanneer de stroming turbulent zal worden. Vanaf dit moment zullen er meer wervelingen ontstaan achter de auto en zal er dus meer weerstand zijn. Op figuur 22: 'Wervelvrije stroming om een ideaal -visvormig - lichaam' is te zien hoe het ideale stromingsbeeld eruit ziet. Zodra men de turbulente stroming bereikt verschillen de soorten wervels per auto. Dit is te zien op figuur 23: Wervelingen achter de auto.



Figuur 22 : Wervelvrije stroming om een ideaal -visvormig - lichaam (Hogt, R. (2012 blz. 17))



Figuur 23 : Wervelingen achter de auto

H1.1i Het virtueel zichtbaar maken van luchtstromingen

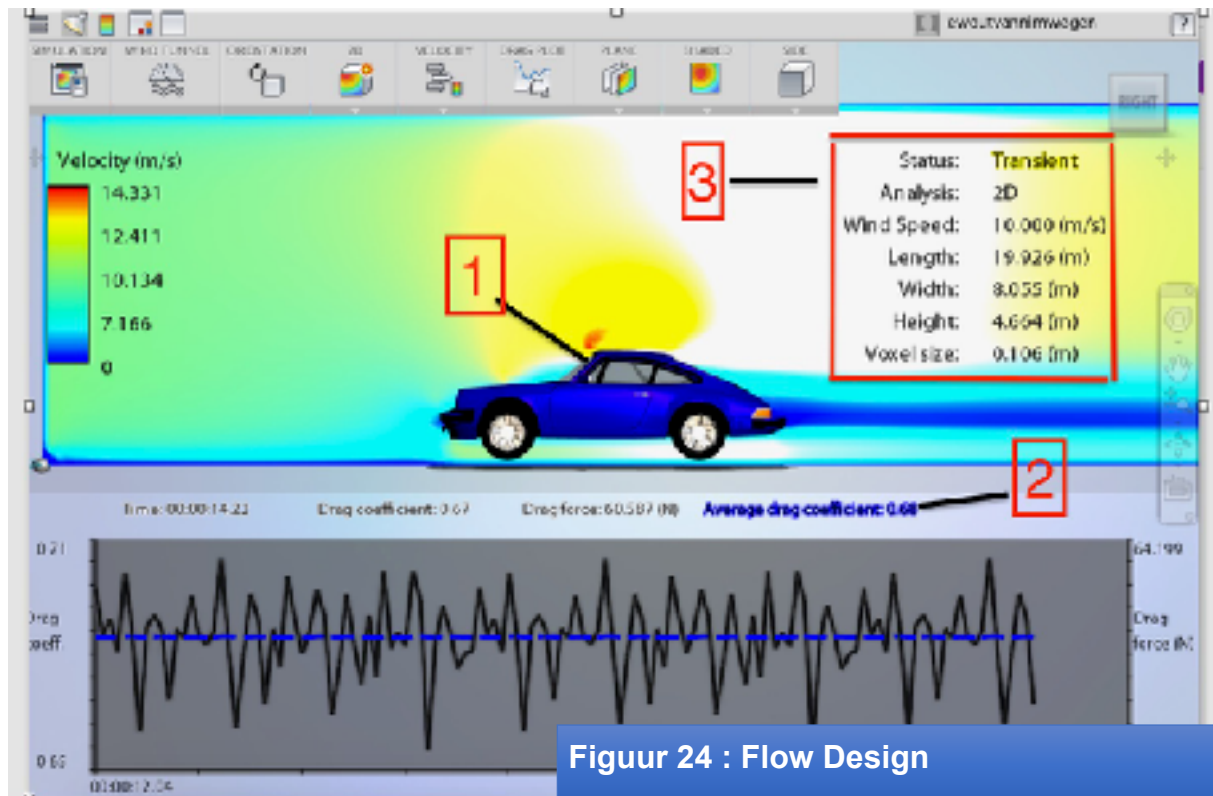
Luchtstromingen in Flow Design

Er zijn twee manieren om de luchtstromingen die langs de auto bewegen zichtbaar te maken. Dit kan virtueel of met rook in een windtunnel. In dit hoofdstuk wordt de luchtweerstand van een auto verder bekeken in het programma Flow Design. Dit programma is van Auto Desk en kan goed gebruikt worden om de C_w -waarde van een auto te meten. Het programma voert precieze berekeningen uit die gaan over de luchtweerstand op de auto. Flow Design is door professionals ontworpen en zal dus correcte resultaten geven. Flow Design zet een auto in een virtuele windtunnel. In figuur 24 (Flow Design) is goed te zien hoe de lucht langs de auto beweegt. Het grote voordeel van dit programma is dat de C_w -waarde berekend wordt. Wel moet er een 3D model van een auto ingevoegd worden. Dit kost veel tijd om te maken, maar is wel preciezer dan de houten modellen. Ook is het mogelijk om de auto op ware grootte na te maken, dit wordt door auto-ontwerpers ook veel gedaan. Zo wordt de auto ontworpen met CAD software en geïmporteerd in Flow Design (of in een ander programma).

Korte toelichting Flow Design

Hier worden kort drie belangrijke punten van het programma toegelicht.

1. Hier is goed te zien hoeveel luchtweerstand de auto ondervindt. Hoe roder hoe meer luchtweerstand; dit is belangrijk als de C_w -waarde verbeterd moet worden.
2. De C_w -waarde: het programma berekent de C_w -waarde voor de gebruiker. Deze is op dit deel van het scherm te zien (De C_w -waarde is momenteel 0,68).
3. Hier worden alle variabelen weergegeven die stuk voor stuk aanpasbaar zijn. Deze waarden laten zien onder welke omstandigheden de auto zich bevindt.



H1.2 Onderzoeksvraag

Onderzoeksvraag

Welke carrosserievorm geeft de minste luchtweerstand bij een vijfdeursauto?

Deelvragen

- ✚ Wat is het voordeel van weinig luchtweerstand?
- ✚ Welke carrosserievorm is theoretisch gezien het beste?
- ✚ Is er een verband tussen luchtweerstandskracht en luchtweerstandscoefficiënt?
- ✚ Wat is de ideale hoogte voor een carrosserie op de weg? En hangt de ideale hoogte van de carrosserie op de weg af van de vorm?
- ✚ Hoe kunnen luchtstromingen zichtbaar gemaakt worden voor het oog?
- ✚ Hoe kan de luchtweerstandscoefficiënt verlaagd worden?

H2 Materiaal en methode

H2.1 Materiaal

In deze paragraaf wordt uitgelegd wat er nodig is qua materiaal om verschillende proeven na te doen uit dit onderzoek en hoe hetzelfde resultaat behaald kan worden. Er wordt eerst uitgelegd waar de windtunnel uit bestaat; hierna wordt de bouw van de carrosserie besproken. Ten derde wordt uitgelegd wat er nodig is om de rook in de windtunnel te krijgen.

Opstelling windtunnelproef

Benodigheden windtunnel

- 1) Een spanningsbron (met alle andere onderdelen voor de schakeling)
- 2) Een ventilator
- 3) Een tunnel
- 4) Verschillende krachtmeters
- 5) Een carrosserie met ingebouwde haak
- 6) Haakjes waar carrosserie, windtunnel en krachtmeter aan bevestigd kunnen worden.



Figuur 25 : de windtunnel



Figuur 26 / 27 : de krachtmeters



Figuur 28 : een carrosserie



Figuur 29 : onderaanzicht van een carrosserie



Figuur 30 : windtunnel met carrosserie

Bouw van de carrosserieën

Benodigdheden carrosserie

- 1) Hard hout 5 stuks van 12,7cm (lengte) bij 4,4cm (breedte) bij 2,5cm (hoogte).
- 2) Hard hout 1 stuk van 12,7cm (lengte) bij 5,5cm (breedte) bij 4,4cm (hoogte).
- 3) Bewerkingsmiddelen in dit geval
 - Een ruwe vijl
 - Een schuurmachine
 - Schuurpapier
 - Een zaag
- 3) Workmate
- 4) 'Fischertechnik'
 - 2 assen voor de wielen
 - 8 plastic wielen (4 grote en 4 kleine)
 - Plastic dopjes om de wieltjes op de as te houden.
- 5) Tape 1 rol
- 6) Geodriehoek, potloden, gum en een pen.
- 7) Rechthoekige driehoek (een 90,60,30 graden driehoek)
- 8) Tekenpapier / bouwtekeningen



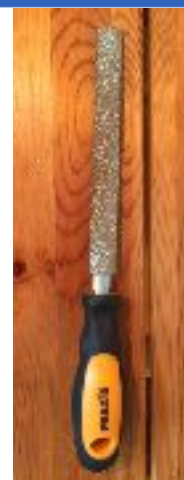
Figuur 31 : onderstel van de carrosserie



Figuur 32 : alle carrosserieën



Figuur 33 : de workmate



Figuur 34 / 35 : de houtvijl en het schuurpapier

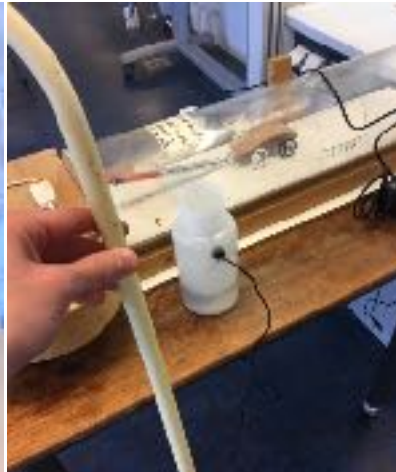
Rook in de windtunnel

Benodigdheden:

- 1) The mist maker (een apparaatje dat mist maakt van water).
- 2) Lontjes (bij dit onderzoek zijn vuurwerklonten gebruikt).
- 3) Een aansteker
- 4) De windtunnel + carrosserie van de vorige experimenten.
- 5) Een cilindervormige bak waar het water van 'the mist maker' in kan.
- 6) Een buisje waar de rook doorheen kan.



Figuur 36 : de mistmaker



Figuur 37 : de windtunnel met de mistmaker

H2.2 Methode

Stappenplan windtunnelproef

Zorg dat voordat de stappen uitgevoerd worden alle nodig onderdelen aanwezig zijn die hierboven bij de benodigde onderdelen genoteerd zijn.

Carrosserie bouwen

Stap 1 Zorg voor een rustige werkplek en leg alle benodigdheden voor het maken van de carrosserie klaar. Ook wordt de workmate uitgekapt.

Stap 2 Bekijk de theorie voor de bouw van de carrosserie en teken de vorm van de auto op het houtblok. Teken volledig in 3D dit is bij het zagen belangrijk.

Stap 3a Breng raaklijnen aan zodat hierlangs gezaagd kan worden.

Stap 3b Zaag boven de motorkap en voorruit een deel van het hout weg.

Stap 3c Zaag een deel boven de achterrauit weg.

Stap 4 Gebruik de vijl en de schuurmachine om de auto in de gewenste vorm te krijgen.

Stap 5 Boor midden in het vooraanzicht een gaatje en plaats een haakje hierin.

Stap 6 Neem een as van de Fischertechnik en plaats hier aan beide zijanten één wieltje met 2 dopjes omheen, zorg wel dat het wieltje kan bewegen maar niet verschuift.

Stap 7 Herhaal stap 6 en plak as 1 vast aan de voorkant van de carrosserie onder de motorkap.

Stap 8 plaats as 2 vast onder de kofferbak met tape.

Bouw de andere twee carrosserieën door de stappen te herhalen, met de wijzigingen van de verschillende modellen.

Windtunneltest uitvoeren

Stap 1 Zet de windtunnel op een tafel en plaats de stekker van de spanningsbron in het stopcontact.

Stap 2 Plaats de carrosserie in de tunnel (met de voorkant richting de kant waar de wind uit zal komen).

Stap 3 Plaats de krachtmeter in de tunnel en maak deze aan de carrosserie en de windtunnel zelf vast (zorg dat de krachtmeter op nul Newton staat).

Stap 4 Neem de windsnelheidsmeter en houdt deze op een plek waar de luchtsnelheid te meten is

Stap 5 Zet de windtunnel aan

Stap 6 Meet meerdere snelheden en lees bij elke snelheid de krachtmeter af. Meet 10 seconden lang snelheid en luchtweerstandskracht en neem van beide het gemiddelde.

Stap 7 Noteer de gemeten waardes en schakel de tunnel weer uit.

Test de andere carrosserieën

Herhaal deze stappen nog vijf keer, alleen nu met een andere carrosserie.

Herhaal deze stappen nog vijf keer, alleen nu met andere wielen.

Rooktest in de windtunnel uitvoeren

Stap 1 Zet de windtunnel klaar en zet de rookmachine ernaast.

Stap 2 Zet de rookmachine in de waterbak en doe water erbij.

Stap 3 Zorg dat een plastic buisje van de waterbak naar de windtunnel loopt.

Stap 4 Sluit de waterbak zo af dat de rook alleen door het buisje gaat. (Bij dit onderzoek is een dop gebruikt en hier is een gaatje in gemaakt waar de buis doorheen gaat).

Stap 5 Sluit de rookmachine aan op een stopcontact en zet de carrosserie in de windtunnel.

Stap 6 Zet de windtunnel aan en observeer wat er gebeurt in de tunnel.

Stap 7 Maak een filmpje, foto of een tekening van hoe de rook langs de carrosserie stroomde. Zodra de proef goed gelukt is zal er een mooi resultaat uitkomen waarin goed te zien is hoe de luchtstroming reageert op de carrosserie.

In figuur 38: rookstromingen, is te zien waar de buis neergezet is waar de rook uitkomt (1). Zo kan de rook opgaan in de wind van de ventilator.



Figuur 38 : rookstromingen

Virtuele windtunnel in Flow Design

Stap 1 Vraag een licentie aan op de website van Autodesk (niet voor iedereen mogelijk) of koop Flow Design (\$220 per jaar).

Stap 2 Open het programma en zet een auto in de windtunnel.

Stap 3 Bekijk hoe de lucht reageert op de auto en observeer wat er gebeurt met de lucht.

Stap 4 Maak een screenshot, video of foto van de gebeurtenis en gebruik dit als resultaat. Het is nu duidelijk waar de luchtweerstand het grootst is en waar het kleinst.

H3 Resultaten

H3.1 Resultatentabellen

H3.1a Resultatentabellen schaalmodel carrosserie met kleine wielen

Toegepaste formules en vastgestelde waarden

$$F_{w,l} = 0,5 \times p \times C_w \times A \times v^2$$

$$C_w = 2 \times F_{w,l} : (p \times A \times v^2) \text{ (BINAS, 2015)}$$

v^2 constante waarde

Berekend met snelheidsmeter die meerdere snelheden meet. Hierna is de gemiddelde snelheid genomen. V_{gem} = snelheden in m/s : aantal gemeten waardes.

p = constante waarde 1,293 kg/m³

A = variabele waarde, in dit geval 11cm² = 11 x 10⁻⁴ m² voor carrosserie 1,2,3,5,6.
Voor carrosserie 4 is het 24,08cm² = 24,08 x 10⁻⁴ m².

$F_{w,l}$ is een gemeten waarde, verschilt per carrosserie.

v in km/h	Gemiddelde snelheid berekening
4,6	(4,6 + 5,8 + 6,8 + 7,5 + 8,1)
5,8	_____ :
6,8	2
7,5	= 6,56 km/ h —> 1,82m/s
8,1	

Tabel 4 resultaten krachtmetingen

Carrosserie nummer	Gemeten $F_{w,l}$ (N) waarde
1	0,19
2	0,18
3	0,16
4	0,40
5	0,30
6	0,26

Resultaten metingen

Voorbeeldberekening carrosserie 1 met kleine wielen

1) Gegeven waardes noteren

$$v = 6,56 \text{ km/h}$$

$$\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 11 \text{ cm}^2$$

2) Omzetten naar juiste eenheid

$$v = 1,82 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 11 \text{ cm}^2 = 11 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

3) Formule omschrijven

$$F_{w,l} = 0,5 \times \rho \times C_w \times A \times v^2 \rightarrow C_w = 2 \times F_{w,l} : (\rho \times A \times v^2)$$

4) Waardes invullen in de formule en uitrekenen

$$C_w = (2 \times 0,19) : (1,293 \times (11 \times 10^{-4}) \times (1,82222...)^2) = 80$$

Uitkomst: Deze C_w -waarde is een waarde voor een schaalmodel en nog niet bruikbaar voor een echte vijfdeursauto. De waarde moet in verhouding staan tot de waardes van een echte auto.

Tabel 5 Resultatentabel schaalmodel carrosserie kleine wielen

Carrosserie nummer	$F_{w,l}$ (in N)	ρ (in kg/m ³)	A (in m ²) $\times 10^{-4}$	v (in m/s)	C_w (geen eenheid)	$C_w \times 10^2$ (afgerond)
1	0,19	1,293	11	1,82 m/s	80,46181 323	0,80
2	0,18	1,293	11	1,82 m/s	76,22714 828	0,76
3	0,16	1,293	11	1,82 m/s	67,75730 153	0,68
4	0,40	1,293	24	1,82 m/s	169,3932 538	1,7
5	0,30	1,293	11	1,82 m/s	127,0449 404	1,3
6	0,26	1,293	11	1,82 m/s	110,10561 5	1,1

H3.1b Resultatentabellen schaalmodel carrosserie met grote wielen

Resultaten schaalmodel carrosserie grote wielen

Bij de carrosserieën met grote wielen bleek uit de windtunnelproef dat de $F_{w,l}$ nogal verschilt per meting. Er is voor een gemiddelde waarde gekozen. Deze wordt berekend zoals het voorbeeld laat zien. Bij de proef met kleine wielen was dit niet nodig aangezien hier de $F_{w,l}$ waarde niet schommelde.

Resultaten metingen

*Voorbeeldberekening carrosserie 1
gemiddelde luchtweerstandskracht*

$$(0,18 + 0,14N + 0,16N) : 3 = 0,16N$$

Tabel 6 Resultaten krachtmetingen

Carrosserie nummer	Gemeten $F_{w,l}$ (in N) waarde
1	0,16N
2	0,15N
3	0,14N
4	0,34N
5	0,25N
6	0,20N

Tabel 7 Resultatentabel schaalmodel carrosserie met grote wielen

Carrosserie nummer	$F_{w,l}$ (in N)	ρ (in kg/m ³)	A (in m ²) x 10 ⁻⁴	v (in m/s)	C_w (geen eenheid)	$C_w \times 10^2$ (afgerond)
1	0,16	1,293	11	1,82	67,75730153	0,68
2	0,15	1,293	11	1,82	63,52247018	0,64
3	0,14	1,293	11	1,82	59,28763884	0,59
4	0,337	1,293	24	1,82	142,7138163	1,4
5	0,25	1,293	11	1,82	105,8707836	1,1
6	0,195	1,293	11	1,82	82,57921124	0,83

H3.2 Resultatentabel realistische berekening carrosserie met kleine wielen

Realistische berekeningen

De luchtweerstandcoëfficiënt die berekend is, is niet hetzelfde als de C_w voor een echte auto met deze vorm. Hiervoor moet de berekening worden aangepast. De volgende waardes moeten veranderd worden om tot de juiste waarde te komen: A , $F_{w,l}$ en v^2 . Deze waardes moeten vergroot worden; dit kan met de vergrotingsfactor. Waarbij beeld : geheel de factor is waarmee een waarde vergroot moet worden. Als voorbeeld wordt carrosserie 1 genomen met kleine wielen. Het lastige bij deze berekening is dat de luchtweerstandskracht een andere vergrotingsfactor heeft dan de frontale oppervlakte en de lichtsnelheid.

Voorbeeld realistische berekening carrosserie 1 met kleine wielen

De formule voor carrosserie 1

$$C_w = 2 \times F_{w,l} : (\rho \times A \times v^2)$$

$$C_w = (2 \times 0,19) : (1,293 \times (11 \times 10^{-4}) \times (1,82222...^2)) = 80,46181323...$$

$$\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 11 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v = 1,82 \text{ m/s}$$

Voor de realistische waarde worden verschillende vergrotingsfactoren gebruikt. Wel moeten eerst de waardes voor de echte auto bekend zijn. Als echt model is gekozen voor een series 3 BMW. Met de afmetingen $l \times b \times h = 4262\text{mm} \times 1751\text{mm} \times 1408\text{mm} = 10,5075689\text{m}^3$

$$A \text{ realistische auto} = 1751 \times 1408 = 2465408\text{mm}^2 \text{ of } 24654,08\text{cm}^2$$

$$\text{Frontale oppervlakte vergroting} = 24654,08\text{cm}^2 : 11\text{cm}^2 = 2241,28$$

$$A = 11 \times 10^{-4} \times 2241,28 = 2,465408\text{m}^2$$

$$v = 1,822222\text{m/s} \times 2241,28 = 4084,110222\text{m/s} \rightarrow 4,1 \times 10^3\text{m/s}$$

Vergrotingsfactor volume is gelijk aan vergrotingsfactor $F_{w,l} \times 10$.

$$10,5... \text{m}^3 : (1,397 \times 10^{-4}) = 75215,23908 \times 10 = 752152,3908\text{N} \rightarrow 7,5 \times 10^5\text{N}$$

$$F_{w,l} = (752152,3908 \times 0,19\text{N}) = 142908,9543\text{N}$$

$$v = 4084,110222\text{m/s}$$

$$A = 2,465408\text{m}^2$$

$$C_w = (2 \times 142908,9543\text{N}) : (1,293 \times (4084,110222^2) \times 2,465408) = 0,0053753556$$

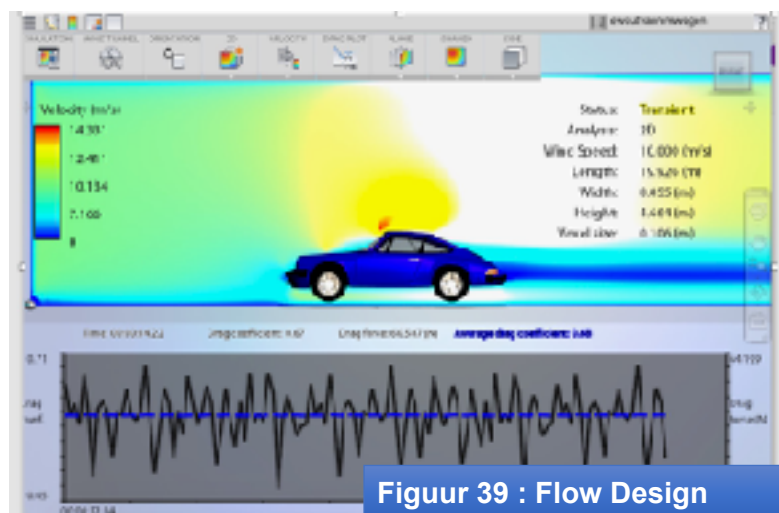
$$C_w = 5,3 \times 10^{-4}$$

H3.3a Resultaten rookproef in de windtunnel

De rookproef is helaas niet optimaal gelukt. Het bleek niet mogelijk om genoeg rook te produceren met de rookmachine + windtunnel. De rook was niet goed zichtbaar en hierdoor kon het resultaat niet goed beoordeeld worden. Wel was er rook zichtbaar maar kon er niet gekeken worden naar hoe de rook over de auto stroomde. Hierdoor was er geen zichtbare luchtstroming en is het resultaat niet goed genoeg om te kunnen gebruiken

H3.3b Resultaten rookproef in Flow Design

De luchtstromingen zijn in het programma Flow Design goed zichtbaar. Het is zelfs zo duidelijk dat men het goed kan gebruiken om minder aerodynamische punten van een auto aan te geven. Zo kunnen deze punten verbeterd worden. Het is dus goed mogelijk om de luchtstromingen weer te geven en zo na te gaan hoe de lucht reageert op de carrosserie. Deze informatie is van belang om de laatste twee deelvragen te beantwoorden.



Figuur 39 : Flow Design

H4 Conclusies

H4.1 Onderzoeksvraag

Onderzoeksvraag

Welke carrosserievorm geeft de minste luchtweerstand bij een vijfdeursauto?

Het derde carrosserie- ontwerp gaf de minste luchtweerstand bij beide wielgroottes. Ook bleek uit de proef dat zodra carrosserie 3 op wielen stond het niet uitmaakte voor de luchtweerstand, in verhouding tot de andere carrosserieën. Carrosserie 3 was het beste met grote en kleine wielen (0.16N en 0.14N). Het interessante aan deze uitkomst is dat deze auto volgens de theorieën van de geleerden niet het ideale model was. Dit komt waarschijnlijk doordat het een aparte auto is die nog niet eerder ontworpen is (zie ontwerp carrosserie 3). De auto is nog niet met zekerheid de beste doordat hij nog niet op veiligheid etc. getest is. Hierdoor zou het ontwerp gewijzigd kunnen worden waardoor de C_w -waarde omhoog gaat. Ontwerp twee is dan toch de uiteindelijke winnaar met de laagste C_w -waarde. Dit ontwerp is namelijk een bestaande auto en is dus al getest en voldoet aan elke voorwaarde om de weg op te gaan. Ook klopt dit ontwerp met de theorie aangezien de ideale waardes zoveel mogelijk zijn toegepast.

Deelvragen



Wat is het voordeel van weinig luchtweerstand?

Zodra een auto weinig luchtweerstand ondervindt zijn er drie belangrijke voordelen op het gebied van: brandstofverbruik, energiegebruik en het milieu. Zodra een auto minder luchtweerstand heeft zijn de brandstofkosten lager. Ook neemt het energiegebruik van de auto af; dit is beter voor het brandstofgebruik. Ook zorgt de vermindering van de luchtweerstand voor minder uitstoot van brandstof dit is beter voor het milieu (voor meer toelichting zie H1.1a).



Welke carrosserievorm is theoretisch gezien het beste?

De carrosserieën die het beste zijn volgens de theorie zijn carrosserie 1 en 2. Dit zijn beide ideale carrosserieën die zijn onderzocht door universitaire wetenschappers. Het verschil tussen de twee auto's is dat de twee wetenschappers beide andere theorieën hebben over de ideale waardes of parameters. Hierdoor zijn er twee ontwerpen gemaakt die beide het beste zouden moeten zijn volgens de betreffende theorie. Het is belangrijk om te onthouden dat de ontwerpen van de wetenschappers in mijn onderzoek soms samengevoegd zijn. Er wordt immers altijd gezocht naar de ideale waarde. De ene wetenschapper gaf bij bepaalde delen van de carrosserie bijvoorbeeld alleen een parameter en de ander een ideale waarde. Hier is gekozen voor de ideale, meest exacte waarde.



Is er een verband tussen luchtweerstandskracht en luchtwrijvingscoëfficiënt?

Er is een verband tussen de $F_{w,l}$ en de C_w -waarde. Het verband tussen de C_w -waarde en de luchtweerstandskracht wordt een evenredig verband genoemd. Wanneer de $F_{w,l}$ groter wordt, wordt de C_w -waarde ook groter en andersom. Zie de berekening en het voorbeeld in hoofdstuk 1.1f.



Hoe kunnen luchtstromingen zichtbaar gemaakt worden voor het oog?

Luchtstromingen kunnen zichtbaar gemaakt worden voor het oog. Dit kan op twee manieren gebeuren: 1. Door een rookmachine en een windtunnel. Hier is het wel lastig om veel rook in de windtunnel te krijgen. 2. Door Flow Design of een programma dat hier op lijkt te gebruiken. Met dit programma is het mogelijk om een virtuele windtunnel te gebruiken om te kijken hoe de luchtstromingen reageren op een object. Er kunnen verschillende auto's ingevoegd worden. Flow Design is een stuk simpeler en preciezer dan optie één.



Hoe kan de luchtweerstandcoëfficiënt verlaagd worden?

Om de aerodynamica van een auto te verbeteren en dus de luchtweerstandcoëfficiënt te verlagen moet men kijken naar de luchtstromingen. Deze stromingen zorgen namelijk voor wrijving en zodra het duidelijk is op welke punten de meeste wrijving ontstaat kunnen deze punten verbeterd worden. Hierdoor zal er minder luchtweerstand zijn.

H4.2 Hypothese

Hypothese uit het onderzoeksvoorstel

De verwachtingen van het onderzoek waarbij onderzocht wordt welke carrosserievorm de minste luchtweerstand ondervindt bij een vijfdeursauto zijn als volgt: de 'meest optimale' auto zal veel rondingen bevatten die de lucht goed geleiden waardoor de lucht zo goed mogelijk langs de auto gaat. Dit zal ervoor zorgen dat de auto weinig weerstand ondervindt. De druppelvorm is volgens meerdere onderzoeken de meest aerodynamische vorm. De beste carrosserie zal waarschijnlijk ook het meest op die vorm lijken. Volgens wetenschapper P. Gooijert van universiteit Groningen is het belangrijk dat bij een ontwerp van de carrosserie de wervels van de auto goed weggewerkt worden. Hier zal bij het bouwen van de carrosserie veel aandacht aan besteed worden. Het is immers al bewezen dat het resultaat hierdoor verbetert.

Klopt de hypothese

De hypothese is juist; dit blijkt uit de resultaten. Zo is de carrosserie die het meeste op de druppelvorm lijkt (carrosserie 3) ook het beste uit de test gekomen. Ook is het duidelijk dat zodra de wervels worden weggewerkt de luchtweerstand zal afnemen. Dit komt omdat de lucht zo gemakkelijker langs de carrosserie zal bewegen. Hierdoor zullen er weinig wervels ontstaan en zal de C_w -waarde afnemen. Ook bleek de wetenschapper P. Gooijert gelijk te hebben. Het tweede model (carrosserie 2) was het beste model dat wetenschappelijk onderbouwd was. Dit model is bedacht door P. Gooijert en bewijst zijn theorie.

H5 Discussie

H5.1 Vergelijking resultaten en theorie

Dit onderzoek heeft veel resultaten opgeleverd. De theoretische benadering voor de resultaten is juist als het op de formules en berekeningen aankomt. Zo komen al deze formules en ideeën over hoe iets berekend moet worden uit de BINAS (BINAS, 2015) en uit Newton natuurkunde voor de bovenbouw. De formules uit de BINAS zijn door universitaire wetenschappers bedacht en gecontroleerd. De resultaten zelf zullen niet voor de volle honderd procent juist zijn wanneer de resultaten in de realiteit gebruikt zouden worden. Dit komt omdat de beschikbare materialen voor het onderzoek niet precies genoeg zijn. Wel is het mogelijk om de resultaten te gebruiken voor de onderzoeksvraag. Ook kan de theorie hieraan gekoppeld worden.

Niet kloppende waarden in de realiteit

Hierbij wordt ingegaan op de windtunnelproef en de carrosserieën in de realiteit. Er wordt uitgelegd in hoeverre de schaalmodellen kloppen vergeleken met realistische auto's of andere windtunnelproeven.

De windtunnel

De windtunnel is eigenlijk te eenvoudig vormgegeven om exact kloppende waarden te verkrijgen. Zo rijdt de auto naar achteren doordat hij niet vastgezet kan worden in deze tunnel. Dit zou de resultaten kunnen beïnvloeden. Ook verschilt de windsnelheid teveel per proef en moet hier een gemiddelde van genomen worden. Het is dus geen exacte constante waarde. Het resultaat zou waarschijnlijk goed geweest zijn zodra de windsnelheid constant zou zijn. De problemen van deze windtunnel komen voornamelijk doordat het model te eenvoudig is in vergelijking met professionele windtunnels zoals die van bedrijven als BMW. Het budget van dit onderzoek was te laag om een windtunnel te bemachtigen die de windsnelheid constant houdt. Hierdoor zal het onderzoek dus minder betrouwbaar zijn.

De carrosserie

De verschillende carrosserie modellen zijn niet optimaal als het op de aerodynamica aankomt. Zo zijn de carrosserieën niet exact symmetrisch, van hout gemaakt en bewerkt met een vijl en een schuurmachine. Dit maakt het niet mogelijk om van alle theoretische waarden 'de ideale waarde' te verwerken in het materiaal. Zo is het te lastig om precies te werken en zullen er snel foutjes gemaakt worden bijvoorbeeld een hoek van 37 graden die 30 graden wordt. Ook dit probleem heeft te maken met budgettekort. Zo is het mogelijk om met een 3D printer of met een andere machine preciezere modellen te maken.

Warmte in het lab

De dichtheid van de lucht is $1,293 \text{ kg/m}^3$ zodra de temperatuur in de ruimte van de lucht 20 graden Celsius is. Tijdens de windtunnelproef is hier geen rekening mee gehouden. Hierdoor is de C_w -waarde mogelijk ook beïnvloed. Het probleem was dat de ruimte waar de windtunnel stond waarschijnlijk een stuk warmer was dan 20 graden Celsius. De temperatuur kon niet aangepast worden (hier was geen toestemming voor). Verder is de luchtdichtheid niet gemeten of berekend. Doordat de

temperatuur hoger is zullen de luchtdeeltjes sneller bewegen en zal de luchtdichtheid hoger zijn.

De bruikbaarheid van de resultaten windtunnelproef

Wanneer de resultaten in de formules verwerkt worden zal er niet dezelfde weerstandscoefficiënt uitkomen als in de theorie. Volgens de theorie zal de weerstandscoefficiënt tussen 0.1 en 0,9 uitkomen; dit bleek niet het geval (zie resultatentabel). Wel zijn de formules en waardes exact genoeg om de kunnen bepalen welk model carrosserie het beste is. De waardes zijn in verhouding tot elkaar juist, dus kunnen gebruikt worden om de onderzoeksvraag te beantwoorden. Het is dus alleen niet mogelijk om de resultaten te gebruiken voor een realistische auto want hier zijn de waardes niet exact genoeg voor.

Theorie van de wetenschappers

Volgens de theoretische ontwerpen van P. Gooijert en R. Hogt zou carrosserie 1 of twee het beste zijn. Dit is ook gebleken uit het onderzoek deze stonden op plek 2 en 3. De theorie klopte dus als het om de meest ideale vormen ging. Het bleek dat het verschil tussen carrosserie 1 en 2 ook minimaal was. Slechts 0,01N in de windtunnelproef, dit bewijst ook direct dat de theorieën allebei naar een ideaal model streefde.

Carrosserie 3

Carrosserie 3 had weliswaar de laagste C_w -waarde in dit onderzoek, maar deze carrosserie is nooit echt gebouwd. Hierdoor kan het gebeuren dat zodra deze auto daadwerkelijk de weg op gaat dat de C_w -waarde toch hoger is dan die van carrosserie 1 en carrosserie 2. Bijvoorbeeld doordat de veiligheidseisen verbeterd moeten worden of door de wielen. Hierdoor is carrosserie 3 misschien wel de beste in de proef maar is het lastig te zeggen of dit in de realiteit ook zo zal zijn. Hierdoor mag er gezegd worden dat carrosserie 3 'het beste' was in de windtunnel. Toch zal ontwerp twee waarschijnlijk het beste zijn buiten de windtunnel, dit is immers in twee andere wetenschappelijke onderzoeken (van P. Gooijert en R. Hogt) bewezen.

Verskil wielgrootte carrosserieën

Het is lastig te bepalen wat nou de ideale wielhoogte is met de resultaten uit de labtest. Dit komt omdat er twee soorten wielen zijn gebruikt die niet dezelfde dikte of profiel hebben. Hierdoor is het niet mogelijk om te zeggen dat de carrosserie op hoge wielen minder luchtweerstand ondervindt. Dit komt omdat rolweerstand ook invloed kan hebben gehad op de resultaten. Ook zou het zo kunnen zijn dat de frontale oppervlakte bij de kleine wielen groter was doordat deze wielen veel dikker zijn dan de grote wielen.

H5.2 Reproduceerbaar onderzoek

Het onderzoek is reproduceerbaar; wel moet exact dezelfde opstelling gebruikt worden en moet het op dezelfde locatie worden uitgevoerd. Het onderzoek is niet reproduceerbaar als iemand besluit zelf een windtunnel te bouwen en zelf de carrosserieën probeert na te maken. Dit komt omdat het eigenlijk zo goed als onmogelijk is om alles exact na te bouwen en als dit niet gebeurt, zal het de resultaten zeker beïnvloeden. Het onderzoek is dus reproduceerbaar als het met exact dezelfde materialen uitgevoerd wordt. En het op dezelfde locatie gebeurt met een temperatuur van ongeveer 25 graden. Anders klopt de 'foute' luchtdichtheid niet en zullen de berekeningen onjuist zijn. Dit onderzoek is niet uitgevoerd bij de juiste temperatuur (ongeveer 25 graden terwijl het 20 graden moest zijn). Wanneer men het onderzoek juist wil uitvoeren moet de temperatuur in de ruimte 20 graden zijn.

H5.3 Verbeterpunten

Bij een volgend onderzoek is het van belang een betere windtunnel te gebruiken. Tijdens het onderzoek is er contact geweest met studenten van de TU Delft. Deze universiteit beschikt over betere en veel preciezere windtunnels. Het probleem was dat er te weinig tijd was om een andere carrosserie te bouwen en die te testen. Dit was nodig aangezien de TU Delft windtunnels had waar mijn carrosserieën niet in pasten. Het zou een mooi verbeterpunt zijn om de resultaten nog preciezer te maken. Ook zou het interessant zijn om carrosserieën te testen van bijvoorbeeld schaal 1 op 5. Dit zou een veel realistischer resultaat opleveren.

H5.4 Vervolgonderzoek

In een vervolgonderzoek zou de luchtweerstand op vliegtuigen of vrachtauto's bekeken kunnen worden. Dit sluit goed aan op dit onderzoek. Ook zou het interessant zijn om luchtstromingen op een hoger niveau te betrekken in een vervolgonderzoek. Zo zijn in dit onderzoek het getal van Reynolds en viscositeit niet aan bod gekomen. Deze onderwerpen sloten niet goed aan bij de stof die op het Havo van het Farel College wordt aangeboden. Ook zou een raket of drone ideaal zijn voor vervolgonderzoek. Deze objecten krijgen ook veel te maken met luchtweerstand. Ook is hier nog een verdieping in te vinden aangezien deze objecten zelf te bouwen zijn. Hier komen de vakken scheikunde, natuurkunde en informatica (programmeren) bij kijken. Ook zouden de drie modellen in CAD software ontworpen kunnen worden en er kan gekeken worden welke carrosserie het beste zal zijn.

Bronnenlijst

Bron 1

Gooijert, P. (2008, augustus). *Luchtstroming rondom een auto*. Geraadpleegd op 18 november 2017, van <http://www.math.rug.nl/~veldman/Scripties/Gooijert-BachelorTechWisk.pdf>

Bron 2

Hogt, R. (2012, 6 november). *Reader voertuigaerodynamica*. Geraadpleegd op 11 november 2017, van https://www.fabulo.nl/Reader%20ADY03_Voertuigaerodynamica_v031c.pdf

Bron 3

NVON-commissie (2015). *BINAS havo / vwo (zesde editie)*. Groningen, Nederland: Noordhoff Uitgevers.

Bron 4

Nimwegen van, E. (2017, december). *Aerodynamica van Carrosserieën*. Geraadpleegd op 18 december 2017, van evncompany.000webhostapp.com

Bron 5

Blok, B. (2013). *Werken met Newton* (4e ed.). Amersfoort, Nederland: ThiemeMeulenhoff.

Bron 6

Onbekend (2017). *VWO Bovenbouwpracticum Natuurkunde*. Amsterdam, Nederland: onbekend.