

Windhinder

Door ir. M. van der Voorden

Voorwoord

Aan het windklimaat in de gebouwde omgeving worden door de mens uit oogpunt van behaaglijkheid en veiligheid eisen gesteld, die hebben geresulteerd in het opstel van enkele internationaal gehanteerde windhindercriteria.

Ondanks het feit dat met name ontwerpers zich onder andere als doel stellen een voor de mens zo behaaglijk mogelijk leefmilieu te creëren, zijn (en worden) steden en wijken ontworpen waarin tengevolge van de gekozen stedenbouwkundige opzet een windklimaat heerst dat slecht- en soms zelfs onaanvaardbaar is. Dit komt omdat een groot deel van de “ontwerpwereld” zich niet of te weinig realiseert dat de mate waarin het windklimaat in de gebouwde omgeving afwijkt van dat in het omringende vrije veld uitsluitend wordt bepaald door gedane keuzen met betrekking tot afmetingen, vorm, oriëntatie en plaatsing van gebouwmassa's. Bovendien is bij nagenoeg alle ontwerpers het bestaan onbekend van richtlijnen, waarin wordt aangegeven hoe een windhindertechnisch slecht ontwerp kan worden vermeden of op grond waarvan met grote zekerheid kan worden gesteld dat het testen van het ontwerp in een windtunnel noodzakelijk is.

Gezien de invloed van de ontwerper op het uiteindelijk optredende windklimaat en gezien de bestaande hulpmiddelen waarmee hij een slecht windklimaat kan voorkomen, is enige kennis met betrekking tot het onderwerp “windhinder” nuttig, zo niet noodzakelijk. Het belang hiervan kan nog eens worden onderstreept door op te merken dat de klachten, die het gevolg zijn van het windklimaat dat in de gebouwde omgeving heerst, in de praktijk dan ook in veel gevallen hebben geleid tot het aan brengen van veelal matig effectieve, maar zeer kostbare voorzieningen.

Doel van de SBR-brochure is in de eerste plaats (toekomstige) ontwerpers op te hoogte te stellen van de zojuist genoemde richtlijnen en van de bestaande windhindercriteria. Beide ontwerpen komen in de hoofdstukken 4 t/m 6 aan de orde.

In hoofdstuk 2 wordt uitvoerig aandacht besteed aan het windklimaat in het vrije veld. Dit omdat het windklimaat in de gebouwde omgeving – samen met de stedenbouwkundig opzet van een gebied – hierdoor wordt bepaald en omdat deze kennis voor een goed begrip van hoofdstuk 4 essentieel is.

Omdat het windklimaat in de gebouwde omgeving alleen met behulp van een windtunnel met voldoende betrouwbaarheid is te bepalen – en omdat dit voor ontwerpers betekent dat zij bij het laten testen van hun maquettes hiermee te maken krijgen – wordt hierover in hoofdstuk 3 nog één en ander gezegd.

De in hoofdzaak theoretische kennis, die voor een volledig begrip van de hoofdstukken 1 t/m 6 niet noodzakelijk, maar wel nuttig is, is in de vorm van appendices opgenomen.

Prof.ir. A.C. Verhoeven

Delft, april 1982

Het belang van het onderwerp ‘Windhinder’ bij het voorbereiden en uitwerken van bouwkundige en stedenbouwkundige ontwerpen was voor ons aanleiding om tot de uitgave van deze publicatie over te gaan.

Wij zijn de auteur, alsmede de Afdeling der Civiele Techniek van de Technische Hogeschool Delft, erkentelijk voor het beschikbaar stellen van het manuscript waardoor deze uitgave mogelijk werd.

Wij wensen het werkstuk in de handen van vele ontwerpers en beslissers in de bouw.

Stichting Bouwresearch

Voorwoord	ii
1. Inleiding	1
1.1. Stedebouwfysica	1
1.2. Windinvloeden	1
1.3. Belang van kennis met betrekking tot het verschijnsel "wind"	2
1.4. Verantwoord ontwerpen uit oogpunt van windhinder	2
2. Windklimaat in het vrije veld	5
2.1. Algemeen	5
2.2. Windsnelheid	6
2.3. Windsnelheidsmetingen	7
2.4. Karakteristieke grootheden	9
2.5. Statistische verwerking	12
2.6. Windklimaat	19
3. Windtunnelproeven	25
3.1. Algemeen	25
3.2. Gelijkvormige stroming	26
3.3. Meetinstrumenten	28
3.4. Voorspelling van het windklimaat in de gebouwde omgeving	30
4. Windklimaat in de bebouwde omgeving	36
4.1. Windhinder rondom alleenstaande hoogbouw	36
4.2. Windhinder rondom enkele veel toegepaste gebouw- en verkavelingsvormen	39
4.3. Algemene opmerkingen met betrekking tot het windklimaat in de gebouwde omgeving	51
4.4. Praktijkvoorbeelden	55
5. Windhinder	61
5.1. Windeffecten	61
5.2. Criteria	64
6. Ontwerpregels	67
Appendix A: Begrippen uit de stromingsleer	70
Appendix B: Grenslagen	74
Appendix C: Afleiding $v_{(z)}$	82
Appendix D: Afleiding $C_{(\theta)}$ en $k_{(\theta)}$	83
Appendix E: Voorbeeld berekening $P(>v)$	84
Appendix F: Balansvergelijkingen	87
Appendix G: Stromingsveld rond een obstakel	91
Appendix H: Modelregel van Reynolds	93
Literatuurlijst	95

1. Inleiding

De invloed van het verschijnsel “wind op mens en omgeving” wordt in deze inleiding beknopt besproken.

Verder wordt aannemelijk gemaakt dat enige kennis met betrekking tot het onderwerp “windhinder” onontbeerlijk is voor zowel stedenbouwkundig – als architectonisch ontwerper, wanneer zij rekening willen of moeten houden met de eis dat het windklimaat in de gebouwde omgeving voldoet aan bestaande criteria.

1.1. Stedebouwfysica

Een belangrijke menselijke activiteit is “bouwen”.

Het directe gevolg van deze activiteit is dat in ruimten rondom en tussen de gebouwen “obstakels” fysische verschijnselen zoals bezonning, geluidvoortplanting en luchtstroming zich anders afspelen dan in het vrije veld, met andere woorden: het klimaat in deze ruimten verschilt ten opzichte van het klimaat in het vrije veld.

Vorm, afmetingen, oriëntatie en onderlinge situering van de gebouwmassa's – of te wel stedenbouwkundig – en vaak ook architectonisch ontwerp – zijn bepalend voor de mate waarin dit micro-klimaat verandert.

In de stedebouwfysica wordt aangegeven welke invloed bovenstaande ontwerpfactoren hebben op de eerder genoemde fysische verschijnselen. Voor het creëren van een voorspelbaar goed micro-klimaat is het dan ook onvermijdelijk dat stedebouwkundige en architect enige stedebouwfysische kennis bezitten.

Voor de volledigheid wordt nog opgemerkt dat in de bouwfysica de invloed wordt onderzocht, die zowel de zojuist genoemde ontwerpfactoren als de keuze ten aanzien van gevel- en dakconstructie hebben op het binnenklimaat en op de energiebehoefte van gebouwen. Bovendien wordt bekeken welke invloed de optredende warmte – en vochttransporten hebben op de duurzaamheid van de constructie.

1.2. Windinvloeden

Zoals de mens uit ervaring weet, is het natuurverschijnsel “wind” van invloed op mens en omgeving.

Allereerst kunnen worden genoemd de krachten, die door de wind op mens en constructie worden uitgeoefend. Het gevolg hiervan voor de mens is dat het voorbewegen wordt bemoeilijkt en soms onmiddellijk wordt gemaakt. Zie Figuur 1.2.

De op en constructie uitgeoefende krachten kunnen bezwijken ervan tot gevolg hebben of kunnen – in extreme gevallen – resulteren in het geheel of gedeeltelijk wegblazen van de constructie.

Een andere invloed, die kan worden genoemd, is de afkoeling, die de langsstrijkende, koelere lucht zowel binnen- als buitenshuis tot gevolg kan hebben.

Het gevolg kan dat de behaaglijkheid van de mens duidelijk wordt beïnvloed.

Tenslotte wordt als eigenschap genoemd het meevoeren van afvoergrassen en – stoffen met de luchtstroming.

Vooraf in de geïndustrialiseerde gebieden kan deze eigenschap voor de mens zowel buiten- als binnenshuis hinderlijk of gevaarlijk zijn. Ook bij alleenstaande gebouwen kunnen hierdoor afvoergassen, die het gebouw via de schoorsteen hebben verlaten, door kieren in de gevel het gebouw weer binnendringen bij foutieve plaatsing van de schoorsteen.



Figuur 1.1 Windhinder

1.3. Belang van kennis met betrekking tot het verschijnsel “wind”

Uit de zojuist genoemde effecten blijkt dat het verschijnsel “wind” van grote invloed kan zijn op zaken als veiligheid en behaaglijkheid. Het zal dan ook duidelijk zijn dat binnen een aantal technische disciplines enige kennis met betrekking tot dit verschijnsel aanwezig zal moeten zijn om – wanneer aan gestelde veiligheids- en behaaglijkheidseisen moet worden voldaan – voldoende nauwkeurig aan te kunnen geven in welke mate genoemde effecten op kunnen treden.

Zo zal de constructeur de belastingen moeten kennen, die door de wind op constructies en op gebouwen worden uitgeoefend, om een verantwoorde, maar vooral ook zinnige, sterkte- en stijfheidsberekening uit te kunnen voeren.

Voor (stede)bouwkundig ontwerpers heeft bovenstaande als consequentie dat zij enig idee zullen moeten hebben van de veranderingen, die in het stromingsbeeld rondom gebouwen op zullen treden, en de mate waarin deze veranderingen afhangen van ontwerpbeslissingen ten aanzien van oriëntatie, afmetingen, vorm en onderlinge positie van gebouwmassa's. Pas dan is de ontwerper in staat om de mens een – uit oogpunt van windhinder veilige en behaaglijke – gebouwde omgeving te bieden.

Voor de volledigheid wordt nog opgemerkt dat een ander, al eeuwen bekend aspect van het verschijnsel “wind” is het benutten ervan als energiebronnen, die op grote schaal kunnen worden toegepast, is dit een van de mogelijkheden, die worden onderzocht.

Op kleine schaal worden en werden windmolens al toegepast.

1.4. Verantwoord ontwerpen uit oogpunt van windhinder

Zoals hiervoor al is aangegeven, brengen eenmaal aanwezige gebouwmassa's veranderingen teweeg in het windklimaat, zoals dat in het vrije veld heerst.

Dit betekent dat de ontwerper – wanneer hij deze veranderingen op hun juiste waarde wil schatten – allereerst enig idee moet hebben van de grootheden waarmee het windklimaat kan worden gekarakteriseerd, en van de vorm, waarin zij doorgaans worden gepresenteerd. Bovendien zal hij op de hoogte moeten zijn van bestaande criteria met betrekking tot veiligheid en behaaglijkheid voor wat betreft windhinder.

Zoals later zal blijken, kunnen genoemde veranderingen alleen met voldoende betrouwbaarheid worden voorspeld met behulp van windtunnels. Dit is de reden dat ook één en ander wordt verteld over de minimale voorwaarden, waaraan bij een windtunnelproef zal moeten worden voldaan ter verkrijging van zinnige resultaten.

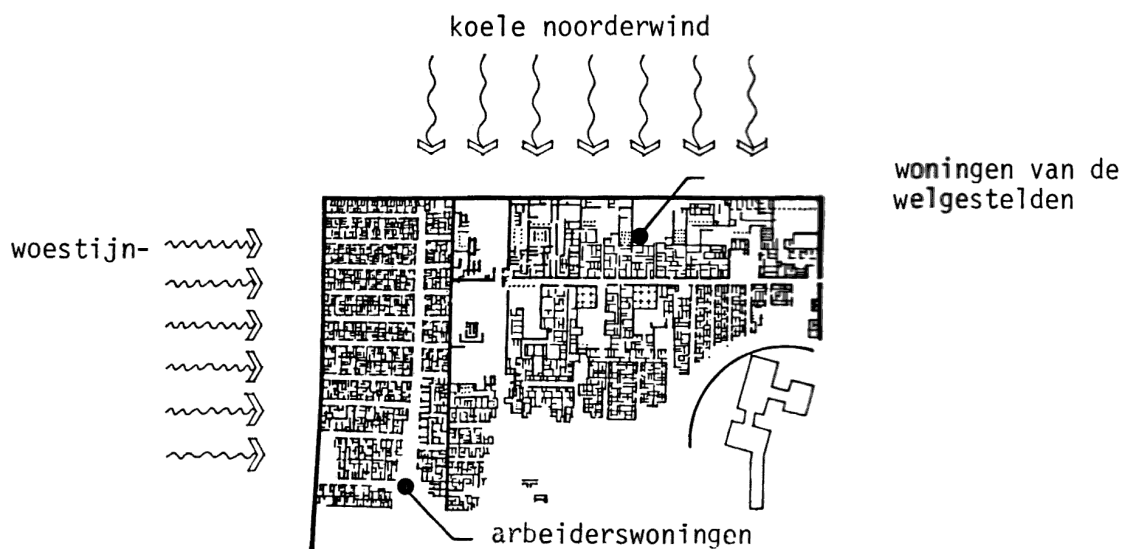
Duidelijk zal zijn dat bij de behandeling van een stromingsverschijnsel zoals “wind” begrippen zullen worden gehanteerd, die uit de stromingsleer afkomstig zijn. Hoewel een aantal van deze begrippen vertrouwd in de oren zal klinken, is voor geïnteresseerden de nauwkeurige omschrijving ervan opgenomen in appendixvorm. Zie appendix A.

Na lezing van dit stuk inleiding bestaat misschien nog de indruk dat de hier geschetste problematiek voor de huidige ontwerppraktijk niet of nauwelijks van belang is.

In de ontwerpwereld is echter maar al te goed bekend dat het toepassen van hoogbouw nagenoeg altijd tot gevolg heeft dat in grote gebieden het windklimaat in de gebouwde omgeving zeer veel slechter is dan in het vrije veld. Eveneens bekend zijn de pogingen om achteraf – meestal tegen enorme kosten – maatregelen te treffen om het windklimaat te verbeteren. Zie bijvoorbeeld I1.

Dat vele ontwerpers windhindercriteria niet langer op de tweede plaats stellen, mag ook blijken uit de oprichting in nagenoeg alle westerse landen van onderzoeksinstituten waar, veelal in opdracht van ontwerpers, windtunnelonderzoek wordt verricht. Hierbij kan nog worden opgemerkt dat de kosten van een dergelijk onderzoek bijna altijd veel kleiner zijn dan de kosten, die gepaard gaan met het treffen van voorzieningen achteraf. Bovendien wordt het oorspronkelijke ontwerp door dit achteraf ingrijpen veelal geweld aangedaan en is de klimaatverbetering slechts gering.

Dat al sinds lang door ontwerpers rekening wordt gehouden met het verschijnsel “wind” wordt door het volgende voorbeeld geïllustreerd. De in Figuur 1.2 geschetste situatie toont een plattegrond van de Egyptische plaats Kahun rond 2000 jaar v. Chr.

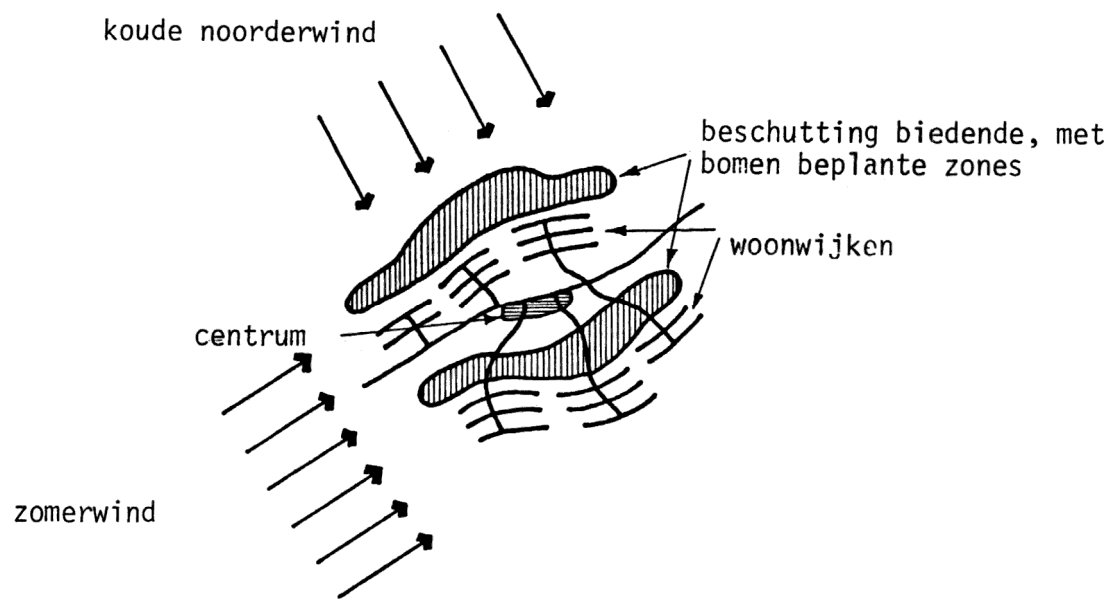


Figuur 1.2 Schets van het stedenbouwkundig plan van Egyptische plaats Kahun, ongeveer 2000 v. Chr

De grote huizen van de “notabelen” zijn zo geplaatst dat de koele noorderwind er “vrije toegang” heeft. De arbeiderswoningen zijn zodanig geplaatst dat zij worden blootgesteld aan de hete woestijnwind I2.

Een recenter voorbeeld is tenslotte het stedenbouwkundig ontwerp van een plaatsje in New Jersey, waar in langgerekte zones bomen zijn geplaatst als afscherming tegen de koude winterwind. De koele zomerwind heeft vrije toegang I3.

Zie Figuur 1.3.



Figuur 1.3 Gebruik van beschutting bieden zones als bescherming tegen de koude winterwind

2. Windklimaat in het vrije veld

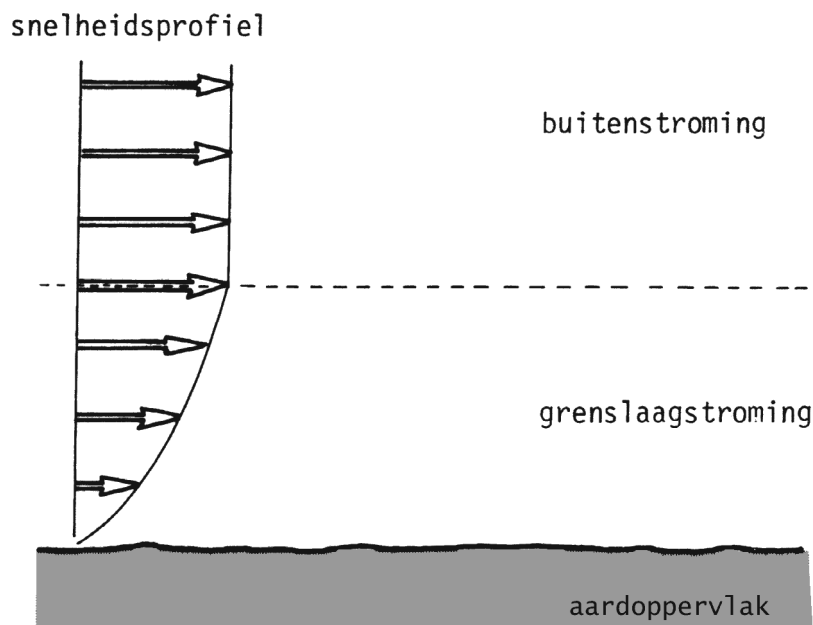
In dit hoofdstuk zullen diverse grootheden worden besproken, die nodig zijn om het windklimaat in het vrije veld te kunnen karakteriseren.

Tevens zal worden aangegeven hoe met behulp van de statistiek voorspellingen kunnen worden gedaan ten aanzien van deze “karakteristieke grootheden” en dus ten aanzien van het windklimaat.

Ook de wijze, waarop gegevens betreffende het windklimaat doorgaans worden gepresenteerd, zal aan de orde komen.

2.1. Algemeen

In de luchtstroming, die plaatsvindt in de onderste lagen van de atmosfeer, kan het in appendix B behandelde onderscheid worden gemaakt tussen “buitenstroming” en “grenslaagstroming”. Zie Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Onderverdeling in buitenstroming en grenslaagstroming

De drukverschillen in de buitenstroming – en daarmee het optredende stromingsbeeld zijn het gevolg van verschillen in opwarming van de diverse gebieden van het aardoppervlak onder invloed van zonnestraling en van de rotatie van de aardbol.

Tengevolge hiervan ontstaan druksystemen, die gedurende langere tijd het stromingsbeeld kunnen beheersen.

Tengevolge van de aardrotatie ontstaan de zogenaamde “krachten van Coriolis”. Hier wordt volstaan met de opmerking dat deze krachten werkzaam zijn op elk massadeeltje waarvan de bewegingsrichting niet samenvalt met de oost-westlijn.

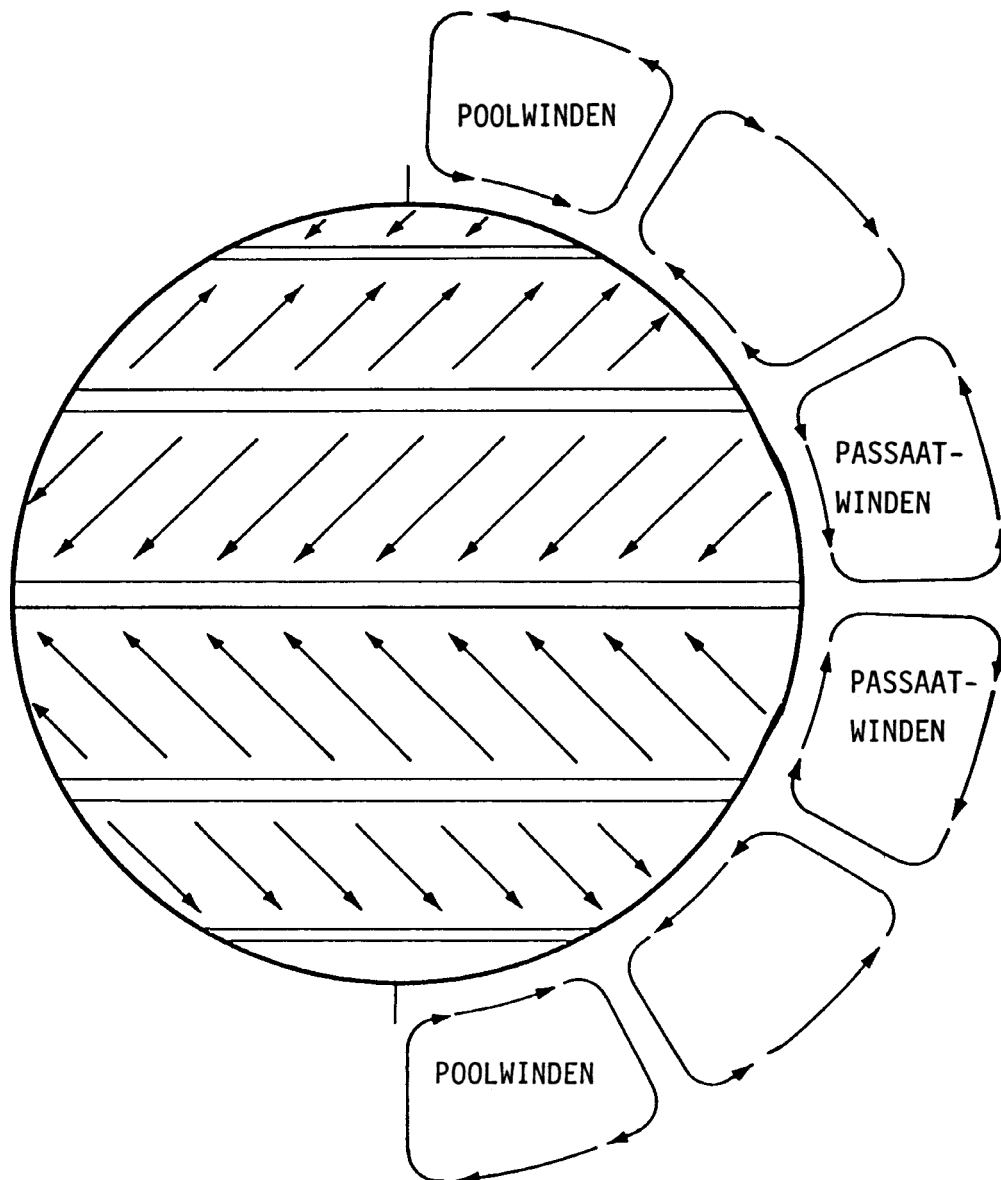
De buitenstroming, zoals deze onder invloed van zowel thermische- als Corioliskrachten tot stand komt, verschilt voor een aantal zones van het aardoppervlak.

In Figuur 2.2 is één en ander schetsmatig aangegeven.

Het stromingsbeeld in de grenslaag wordt behalve door de buitenstroming ook nog bepaald door de terreingesteldheid. De ruwheid van het aardoppervlak is namelijk van invloed op het zogenaamde “snelheidsprofiel” in de turbulente grenslaagstroming (zie appendices A en B) langs het aardoppervlak en op de grenslaagdikte.

Hierop wordt in het vervolg van dit hoofdstuk nog nader ingegaan.

Opgemerkt wordt nog dat overal op aarde plaatselijke verstoringen in de zojuist genoemde grenslaagstroming op kunnen treden tengevolge van zeer lokale, grote temperatuurverschillen tussen gedeelten van het aardoppervlak.



Figuur 2.2 Verschillen in richting van de buitenstroming over het aardoppervlak

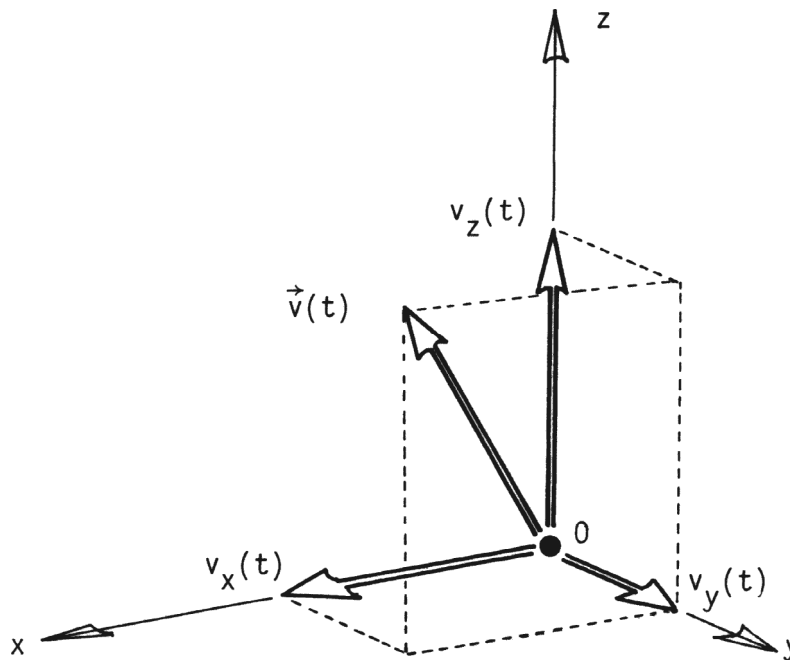
2.2. Windsnelheid

De windsnelheid in een gegeven punt boven het aardoppervlak kan op ieder gewenst tijdstip worden beschreven met behulp van een snelheidsvector $\vec{v}(t)$.

Gezien het turbulente karakter van de luchtstroming zullen grootte en richting van $\vec{v}(t)$ van moment tot moment sterk kunnen veranderen.

Door middel van de kentallen $v_x(t)$, $v_y(t)$ en $v_z(t)$, die in een zogenaamd “orthonormaal assenstelsel” rechtstreeks worden gevonden door ontbinding van $\vec{v}(t)$ langs respectievelijk x-, y- en z-as, zijn grootte en richting volledig bepaald.

Zie Figuur 2.3.



Figuur 2.3 Ontbinding van de snelheidsvector $\vec{v}(t)$

Voor de grootte van $\vec{v}(t)$, aangegeven met $|\vec{v}(t)|$, geldt:

$$|\vec{v}(t)| = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} \quad (2.1)$$

Opmerking:

Onder een orthonormaal assenstelsel wordt verstaan een assenstelsel, waarvoor geldt dat de lengte van de basisvectoren langs de drie, onderling loodrechte assen gelijk is aan de eenheid van de betreffende vectorgrootheid (in dit geval dus 1 m/s)

2.3. Windsnelheidsmetingen

Om inzicht te verkrijgen in de variatie van de windsnelheden binnen een bepaald gebied van het aardoppervlak is het noodzakelijk dat in een aantal punten binnen dit gebied windsnelheidsmetingen worden verricht.

In enkele van de zeer vele landen, waar momenteel deze metingen plaatsvinden, zijn over een zeer lange periode meetresultaten beschikbaar. Ook Nederland is bedekt met een vrij dicht netwerk van waarnemingsstations, waaronder een vijftal hoofdwaarnemingsstations, waar al gedurende ruim een halve eeuw wordt gemeten. Zie Figuur 2.4.

In alle waarnemingsstations wordt gemeten op een hoogte van 10 m boven maaiveld.

In het waarnemingsstation Cabauw staat echter een meetmast van 200 m hoogte opgesteld, waarop om de 10 m windsnelheidsmeters zijn aangebracht.

Voor windsnelheidsmetingen op zeer grote hoogten (bijvoorbeeld 800 m) wordt gebruik gemaakt van weerballonnen.

In alle kleinere stations wordt de grootte van de snelheid in horizontale richting gemeten, ongeacht de richting waarin de wind waait.

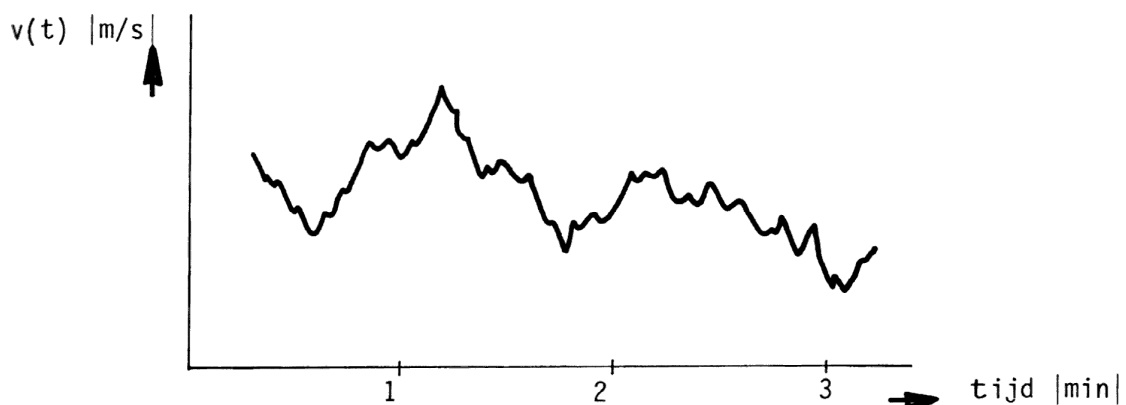
Hiervoor kan met behulp van (2.1) worden geschreven:

$$v(t) = |\vec{v}(t)|_{\text{hor. vlak}} = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} \quad (2.2)$$



Figuur 2.4 Waarnemingsstations van het KNMI voor windmetingen | 7 |

In de hoofdwaarnemingsstations wordt de grootte van de windsnelheid in het horizontale vlak gemeten in een zevental windrichtingen. Dat de windsnelheidsvariëaties in de tijd zeer groot kunnen zijn, is te zien in Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Voorbeeld van $v(t)$

Als afsluiting van deze paragraaf wordt nog een toelichting gegeven op het feit, dat nagenoeg altijd wordt volstaan met windsnelheidsmetingen in het horizontale vlak. In elk willekeurig punt kan doormiddel van metingen worden bepaald hoe de in 2.1 genoemde kentallen van de snelheidsvector $\vec{v}(t)$ variëren in de tijd. Wanneer dit eenmaal is gebeurd dan kan de zogenaamde “gemiddelde snelheidsvector” $\vec{v} - \text{gem}$ worden bepaald, gedefinieerd als:

$$\vec{v} - \text{gem} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{v}(t) dt \quad (2.3)$$

T : tijdsinterval waarbinnen wordt gemeten

Gebleken is nu dat, ongeacht de waarde van T , de gemiddelde snelheidsvector in een horizontaal vlak is gelegen en een constante grootte heeft zolang de luchtsnelheid in de buitenstrooming niet verandert. Dit betekent dat “wind” kan worden opgevat als een quasi-stationaire turbulente luchtstrooming. Zie appendix A.

Vooruitlopend op de in de volgende paragraaf gedefinieerde “gemiddelde snelheid $\bar{v}$ ” wordt nu al opgemerkt dat er een principiële verschil bestaat tussen de in (2.3) en (2.4) gedefinieerde grootheden.

Met behulp van (2.3) kunnen zowel grootte als richting worden bepaald van een gemiddelde snelheidsvector, die in het algemeen niet in het horizontale vlak is gelegen. Met behulp van (2.4) wordt uitsluitend de gemiddelde grootte gevonden van de in het horizontale vlak gelegen componenten van de snelheidsvector.

2.4. Karakteristieke grootheden

Aan de hand van de gevonden meetresultaten kunnen een aantal grootheden worden bepaald, die karakteristiek zijn voor grootte van en veranderingen in de optredende windsnelheden. In deze paragraaf zal hier nader op worden ingegaan.

Gemiddelde windsnelheid

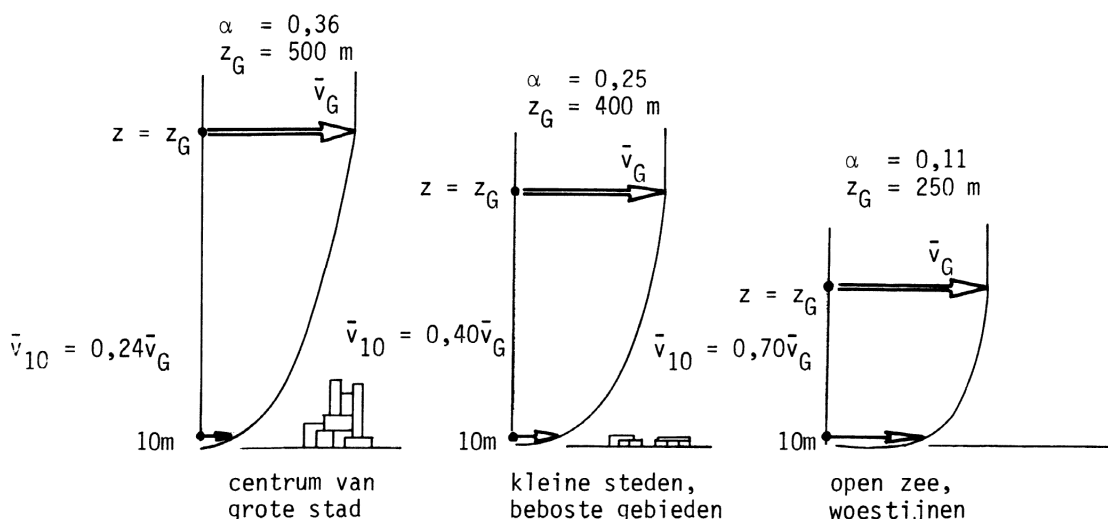
De gemiddelde windsnelheid $\bar{v}$ wordt met behulp van (2.2) gedefinieerd als:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2.4)$$

T : tijdsinterval waarbinnen wordt gemeten.

Deze snelheid neemt geleidelijk toe van een waarde nul langs het aardoppervlak tot een eindwaarde op de scheiding tussen grenslaag en buitenstrooming, de zogenaamde “gemiddelde gradiëntsnelheid $\bar{v}_G$ ”. Wanneer het verloop van $\bar{v}$ wordt uitgezet als functie van de hoogte ontstaat het zogenaamde “snelheidsprofiel”.

Opgemerkt is reeds dat de terreinruwheid hierop van invloed is. In Figuur 2.6 is voor diverse terreintypen het snelheidsprofiel geschetst.



Figuur 2.6 Snelheidsprofiel voor drie terreintypen

Bekend is dat dit profiel zeer goed kan worden beschreven door zowel een logaritmisch- als een exponentieel verloop. Zie appendix B.

1. Exponentieel snelheidsverloop (ook wel: “machtswet”)
Dit verloop ziet er als volgt uit:

$$\bar{v}(z) = \bar{v}_G \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (2.5)$$

z_G : hoogste boven aardoppervlak van de scheiding tussen grenslaagstroming en buitenstroming. Deze hoogte wordt meestal gradiënthoogte genoemd en hangt af van de terreinruwheid.

$\bar{v}_G$: gemiddelde windsnelheid op gradiënthoogte

α : coëfficiënt, die afhangt van de terreinruwheid.

In Tabel 2.1 is voor een aantal terreintypen aangegeven welke waarden α en z_G aan kunnen nemen.

Tabel 2.1 De waarde van coëfficiënten – nodig voor de bepaling van snelheidsprofielen – voor diverse terreintypen.

	z_G [m]	z_0 [m]	α	β
Open zee, ijsvlakten, woestijn	250	10^{-3}	0,11	0,07
Open terrein met lage begroeiing of enkele bomen	300	$3 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,09
Kleine steden, dicht beboste gebieden	400	$3 \cdot 10^{-1}$	0,25	0,14
Stadscentra, groot aantal hoge gebouwen, sterk geïndustrialiseerde gebieden	500	3	0,36	0,20

2. Logaritmisch snelheidsverloop

Voor de wiskundige uitdrukking, met behulp waarvan het logaritmisch verloop wordt beschreven, word wederom verwezen naar appendix B.

Wel wordt hier de uitdrukking vermeld, die uitgaande van dit verloop kan worden afgeleid en waarvan in de praktijk gebruik wordt gemaakt voor de bepaling van het windsnelheidsprofiel:

$$\bar{v}(z) = \bar{v}(z_1) \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \quad (2.6)$$

z_0 : maat voor de terreinruwheid [m]

z_1 : bekende referentiehogte [m]

$\bar{v}(z_1)$: bekende gemiddelde windsnelheid op referentiehogte [m/s]

In Tabel 2.1 staat een aantal waarden van z_0 vermeld. Als vuistregel geldt dat z_0 overeenkomt met de waarde, die wordt gevonden wanneer 5 à 10% wordt genomen van de gemiddelde hoogte van de terreinruwheidselementen.

Opgemerkt wordt nog dat uitdrukking (2.6), in tegenstelling tot uitdrukking (2.5), geldig is voor waarden van z , die voldoen aan de voorwaarde:

$$z_0 \leq z \leq z_G$$

Dit betekent dat bij toenemende afmetingen van de ruwheidselementen wordt aangenomen dat het vlak, waarin geldt dat $\bar{v} = 0$, steeds hoger boven het vlak komt te liggen waarop de ruwheidselementen zijn gelegen.

Turbulentie

Tengevolge van het turbulente karakter van de wind kan de grootte van de windsnelheid soms heel sterk variëren.

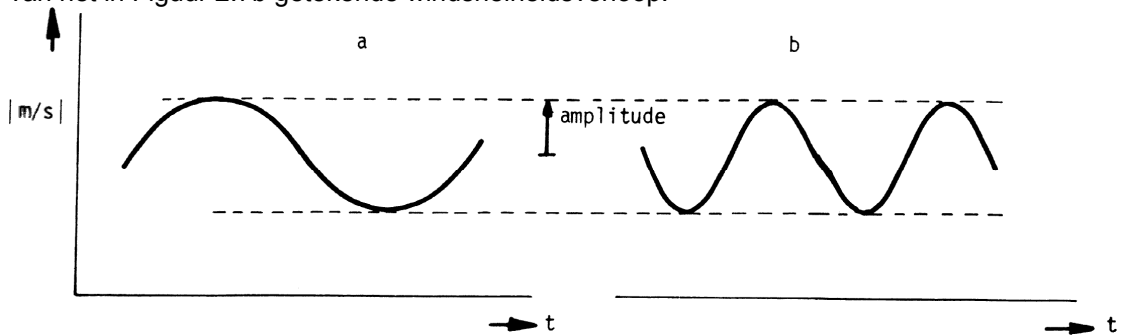
Als maat voor de grootte van deze snelheidsvariëaties wordt gebruik gemaakt van het begrip “turbulentie”, gedefinieerd als:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (v(t) - \bar{v})^2 dt \quad (2.7)$$

T : tijdsinterval waarbinnen wordt gemeten

Uitdrukking (2.7) laat duidelijk zien dat grotere schommelingen van de windsnelheid rond de gemiddelde windsnelheid resulteren in een toename van de turbulentie.

De turbulentie zegt echter niet over het aantal schommelingen wat plaatsvindt in een gegeven periode. In Figuur 2.7a is het theoretische geval bekeken van een sinusvormig verloop van de windsnelheid. De turbulentie, die na berekening wordt gevonden, is gelijk aan de turbulentie van het in Figuur 2.7b getekende windsnelheidsverloop.



Figuur 2.7 Sinusvorming verloop van $v(t)$

Hieruit blijkt dat alleen de amplitude (maat voor het verschil tussen $v(t)$ en $\bar{v}$) van belang is. Gebleken is dat er met betrekking tot σ_v enkele belangrijke opmerkingen kunnen worden gemaakt:

- de afname van σ_v bij toenemende hoogte is zo gering dat σ_v over de hoogte als constant mag worden beschouwd,
- σ_v blijkt tevens nagenoeg onafhankelijk te zijn van de terreinruwheid,
- in het vrije veld blijkt dat:

$$\sigma_v \approx 0,1 \bar{v}_G \quad (2.8)$$

- het optredende windsnelheidsverloop $v(t)$ kan met behulp van een Fourieranalyse worden ontleed in een aantal sinusvormige “rimpels”, die zowel wat periode als wat amplitude betreft onderling sterk kunnen verschillen.

In een zogenaamd “turbulentie-spectrum” kan nu worden aangegeven bij welke periode(n) van de voorkomende rimpels de grootste bijdrage wordt geleverd tot de turbulentie. Hierop wordt verder niet ingegaan.

Turbulentie-intensiteit

Naast de variaties in grootte treden ook variaties op in richting van de windsnelheid. Deze richtingsvariaties blijken samen te hangen met de zogenaamde “turbulentie-intensiteit”, gedefinieerd als:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \quad (2.9)$$

Omdat de gemiddelde windsnelheid wel afhankelijk is van hoogte en terreinruwheid, is dit ook het geval met de turbulentie-intensiteit en wel zodanig dat:

- bij toenemende hoogte I_v afneemt
- bij toenemende terreinruwheid I_v eveneens toeneemt.

Gebleken is dat voor gladde oppervlakken gerekend kan worden op richtingsveranderingen, die gemiddeld ongeveer 20° en maximaal ongeveer 40° bedragen. Voor zeer ruwe “vlakken” kunnen deze waarden respectievelijk 60° en 180° bedragen, hetgeen betekent dat zo nu en dan de windrichting volledig omslaat.

Vlaagsnelheid

Gebleken is dat voor tijdsintervallen T , variërend van 10 minuten tot 1 uur, de in dit tijdsinterval optredende maximale snelheid afhangt van de waarde van σ_v . Deze maximale snelheid, meestal aangeduid als laag- of pieksnelheid, kan namelijk worden geschreven als:

$$\hat{v}(z) = \bar{v}(z) + 3,5\sigma_v \quad (2.10)$$

In appendix C is afgeleid dat met behulp van de uitdrukkingen (2.5), (2.8) en (2.10) kan worden gevonden dat het vlaagsnelheidsprofiel als volgt kan worden beschreven:

$$\frac{\hat{v}(z)}{\hat{v}_G} = \frac{\left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha + 0,35}{1,35} \quad (2.11)$$

$\hat{v}_G$: vlaagsnelheid op gradiënthoogte

In plaats van de zojuist gevonden uitdrukking wordt echter meestal gebruik gemaakt van een uitdrukking van eenvoudiger vorm:

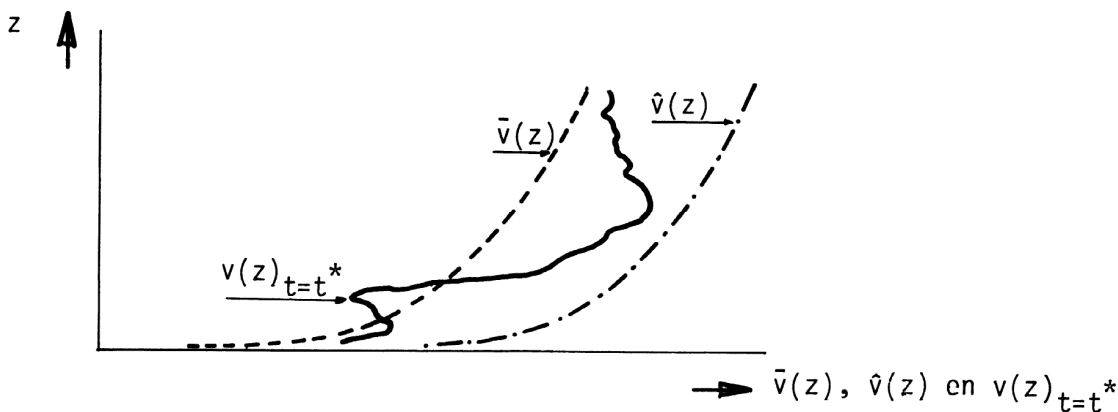
$$\frac{\hat{v}(z)}{\hat{v}_G} = \left(\frac{z}{z_G}\right)^\beta \quad (2.12)$$

De verschillen, die bestaan tussen de uitkomsten van de uitdrukkingen (2.11) en (2.12), zijn bij een juiste keuze van β aanvaardbaar.

In Tabel 2.1 zijn de voor β aan te houden waarden vermeld. Hieraan is te zien dat een goede benadering voor β wordt gevonden wanneer geldt:

$$\beta \approx 0,6\alpha \quad (2.13)$$

Tot slot van deze paragraaf wordt nog opgemerkt dat het snelheidsprofiel op een bepaald tijdstip t zeer grillig is en altijd binnen het profiel van de vlaagsnelheid is gelegen. In Figuur 2.8 is één en ander te zien.



Figuur 2.8 Diverse snelheden als functie van de hoogte

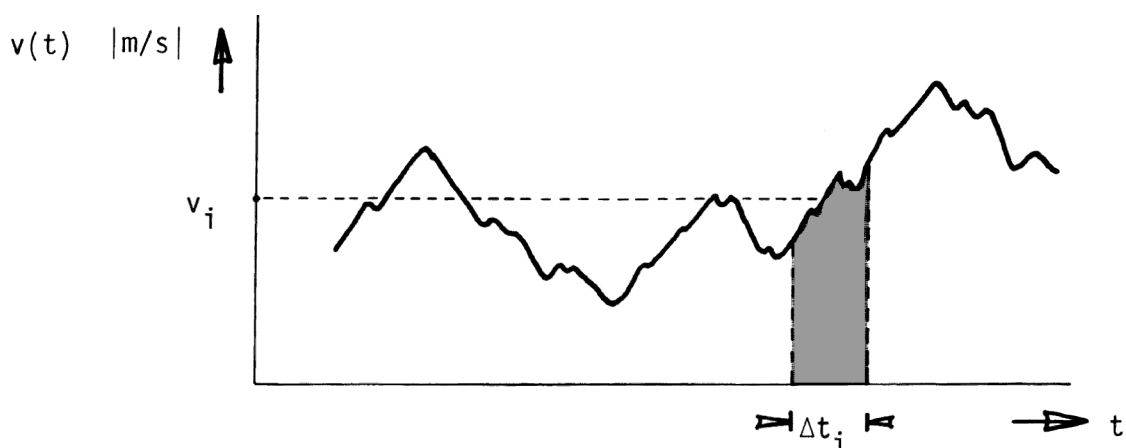
2.5. Statistische verwerking

In de vorige paragraaf is aangegeven hoe aan de hand van meetresultaten binnen een gegeven tijdsinterval T de waarde kan worden bepaald van een aantal karakteristieke grootheden. Wanneer dit voor een groot aantal identieke tijdsintervallen wordt gedaan, zal blijken dat de waarde, die voor elk van deze grootheden wordt gevonden, een spreiding vertoont.

Met behulp van de statistiek blijkt het mogelijk te zijn de kans te berekenen dat zo'n karakteristieke grootte (bijvoorbeeld een door het KNMI bepaald uurgemiddelde) een voorgeschreven waarde aanneemt of overschrijdt. Ook de kans dat binnen het gemeten tijdsinterval een voorgeschreven waarde van de windsnelheid optreedt of wordt overschreden, kan eveneens door statistische verwerking van de meetgegevens worden berekend.

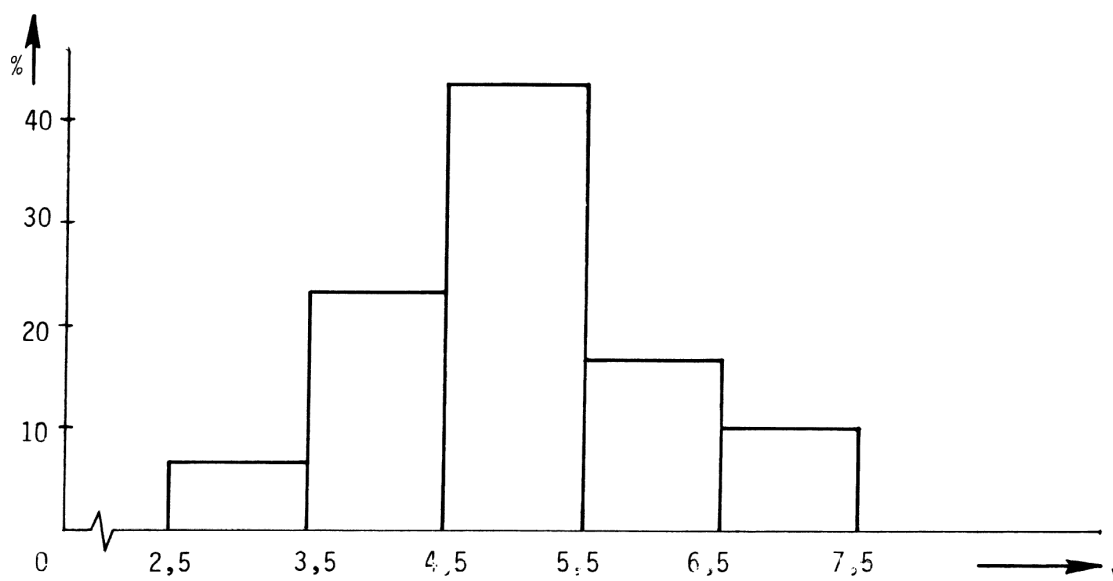
Het principe van deze statistische verwerking wordt nu besproken.

Uitgaande van het gemeten verloop van $v(t)$ kan een zogenaamd "histogram" worden getekend. Om dit te kunnen doen, is allereerst noodzakelijk dat het tijdsinterval T wordt opgedeeld in een aantal kleine, even grote tijdstappen en dat binnen elke tijdstap Δt_i zo nauwkeurig mogelijk de waarde wordt geschat van de gemiddelde windsnelheid v_i . Zie Figuur 2.9.



Figuur 2.9 Bepaling van v_i per tijdsinterval Δt_i

Wanneer nu in een grafiek de horizontale as, waarlangs de windsnelheid staat uitgezet, wordt opgedeeld in een aantal even grote snelheidsklassen, kan vervolgens per snelheidsklasse in verticale richting worden aangegeven (absoluut of procentueel) hoeveel van de gevonden waarden v_i in deze snelheidsklassen zijn gelegen. Zie Figuur 2.10.



Figuur 2.10 Histogram

Met behulp van een dergelijk histogram kan dus de kans worden aangegeven op een windsnelheid die binnen een voorgeschreven snelheidsklasse is gelegen.

Uit statistische verwerking van zeer vele meetresultaten is gebleken dat deze kans voldoende nauwkeurig kan worden berekend met behulp van een zogenaamde “kansdichtheidsfunctie” $p(v)$, die verloopt volgens de in de statistiek zeer vaak toegepaste “normale verdeling”:

$$p(v) = (\sigma_v \sqrt{2\pi})^{-1} \cdot \exp \left\{ -\frac{(v - \bar{v})^2}{2\sigma_v^2} \right\} \quad (2.14)$$

De eerder gegeven uitdrukkingen voor $\bar{v}$ en σ_v worden, in verband met het eindig aantal waarnemingen, vervangen door respectievelijk:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (2.15)$$

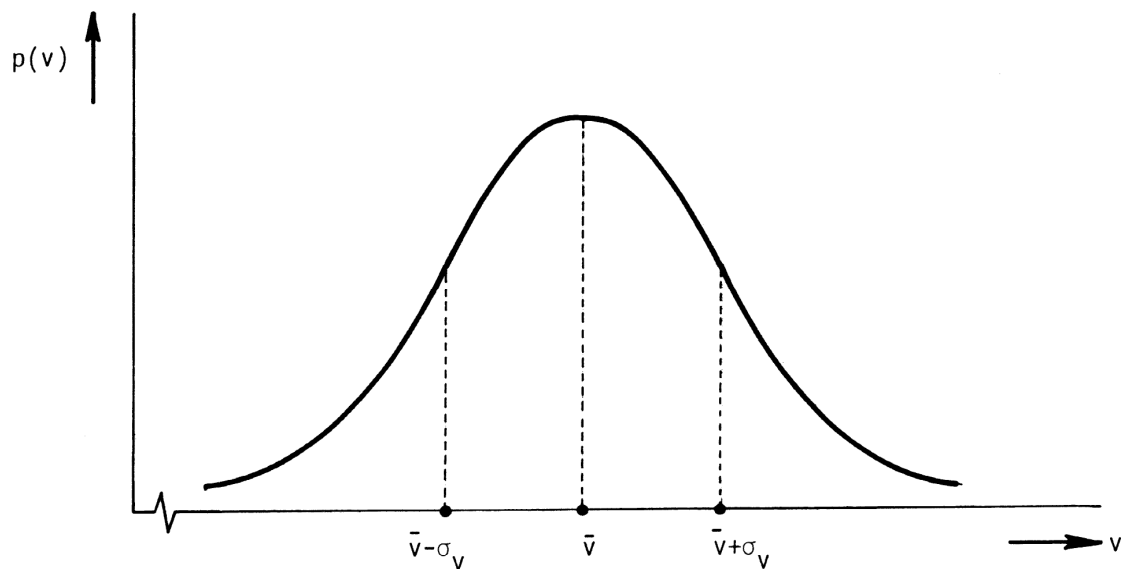
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n}} \quad (2.16)$$

Met behulp van $p(v)$ kan de kans worden berekend dat de windsnelheid een waarde aanneemt, die ligt in een snelheidsklasse met grootte dv rond een voorgeschreven waarde van v . Deze kans is gelijk aan $p(v) dv$.

Hieruit volgt dat deze kans gelijk is aan $p(v)$, wanneer de grootte van de snelheidsklasse gelijk is aan 1‰.

Uit het nog te behandelen voorbeeld zal blijken dat in dat geval histogram en kansdichtheidsfunctie goed overeenkomen.

In Figuur 2.11 is het verloop van $p(v)$ in beeld gebracht.



Figuur 2.11 Verloop van $p(v)$

Met betrekking tot dit verloop kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

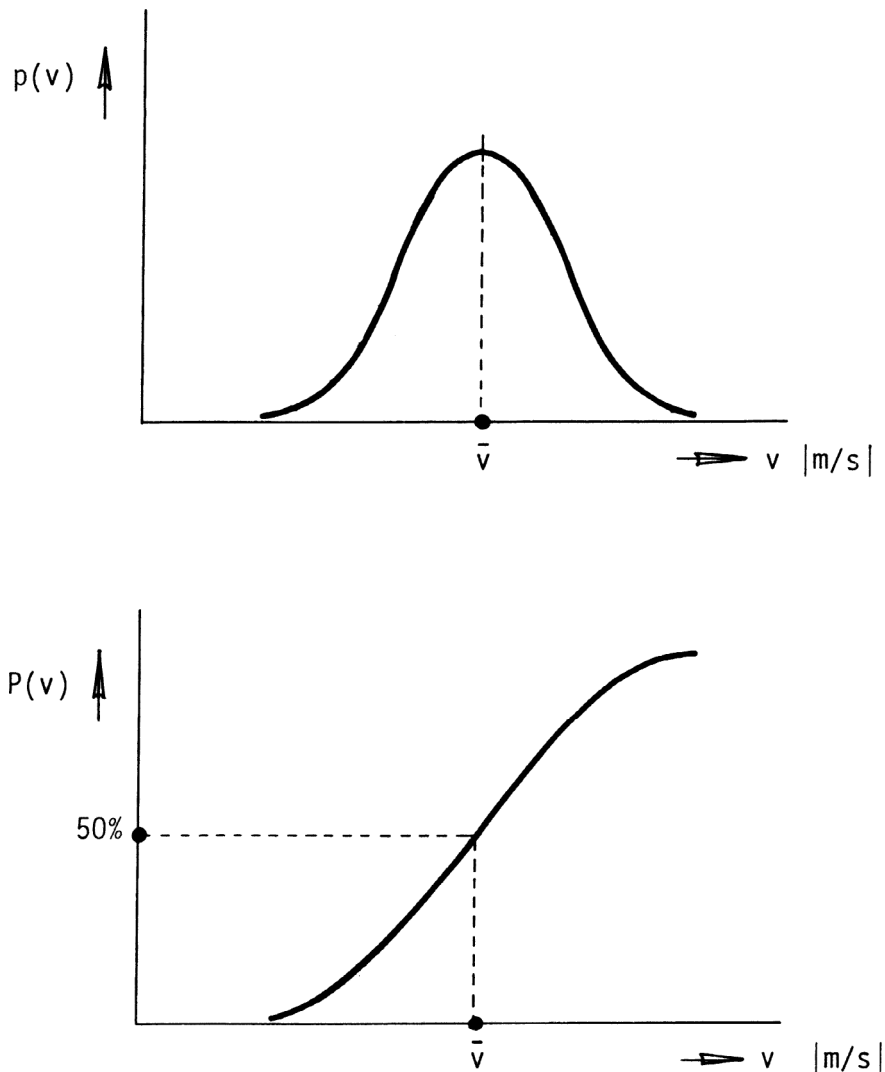
- het verloop van $p(v)$ wordt uitsluitend bepaald door de eerder genoemde karakteristieke grootheden $\bar{v}$ en σ_v
- naarmate de waarde van de windsnelheid meer verschilt van $\bar{v}$, neemt de kans op deze snelheid af.

- voor waarden van $v = \bar{v} \pm \sigma_v$ vertoont de kromme een buigpunt. Berekend kan worden dat de kans op een snelheid, gelegen tussen $\bar{v} - \sigma_v$ en $\bar{v} + \sigma_v$, gelijk is aan 68,2%.

De kans op een windsnelheid, die ligt beneden een voorgeschreven waarde $v = v^*$, kan nu uitgaande van $p(v)$ worden berekend met behulp van de zogenaamde “kansfunctie”:

$$P(v^*) = \int_{-\infty}^{v^*} p(v) dv \quad (2.17)$$

In Figuur 2.12 is schetsmatig het verloop van zowel $p(v)$ als van $P(v)$ aangegeven.



Figuur 2.12 Verloop van $p(v)$ en $P(v)$

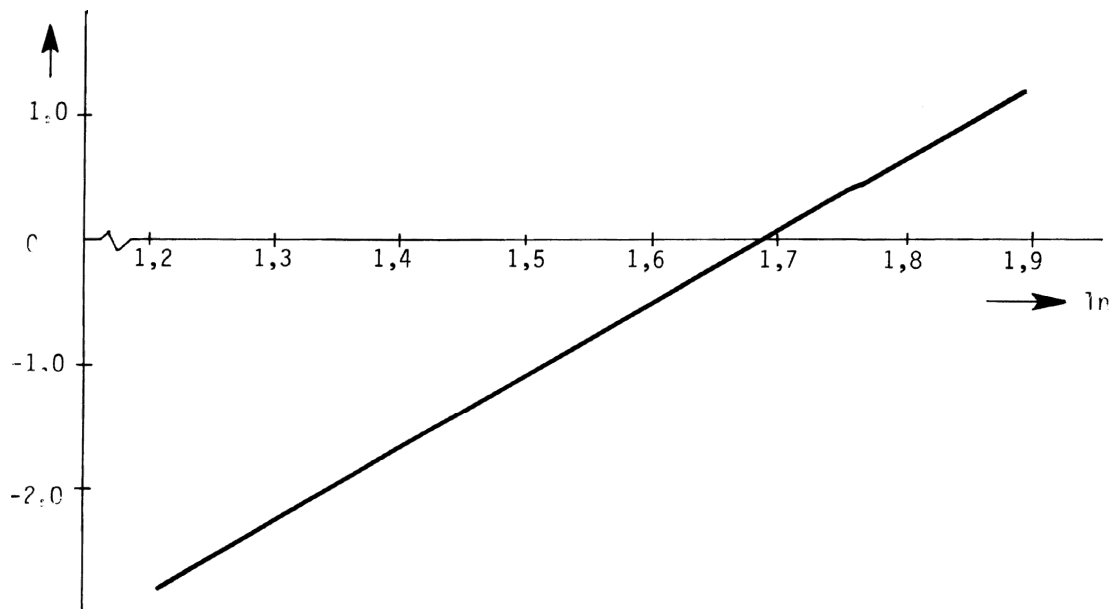
De zogenaamde “overschrijdingskans” van een voorgeschreven waarde $v = v^*$ is nu gelijk aan:

$$P(> v^*) = 1 - P(v^*) \quad (2.18)$$

Voor de berekening van de overschrijdingskans wordt meestal gebruik gemaakt van de zogenaamde “Weibullverdeling”:

$$P(> v) = \exp\left\{-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right\} \quad (2.19)$$

Hierin zijn C en k de zogenaamde “Weibull-parameters”, die aan de hand van meetresultaten kunnen worden bepaald (zie het nog te behandelen voorbeeld). Het in (2.19) beschreven verband tussen v en $P(>v)$ kan worden weergegeven met behulp van een rechte lijn, wanneer in een grafiek langs de horizontale as de waarde wordt uitgezet van $\ln v$ en langs de verticale as de waarde van de $\ln(-\ln(P(>v)))$. Zie figuur 2.13.



Figuur 2.13 Verband tussen $\ln(-\ln(P(>v)))$ en $\ln v$

Elke rechte lijn is te beschrijven met behulp van de functie $y = ax + b$. De constante b wordt gevonden door het snijpunt te bepalen van de rechte lijn met de y -as. De constante a is gelijk aan de tangens van de hellingshoek van de rechte lijn. Bewezen kan worden dat nu voor de Weibull-parameters geldt:

$$k = a \quad (2.20)$$

$$C = \exp \frac{-b}{a} \quad (2.21)$$

In appendix D wordt voor een iets ingewikkelder probleem beschreven hoe voor de Weibull-parameters k en C uitdrukkingen kunnen worden afgeleid.

Opmerking:

Omdat $P(>v)$ moeilijk is te bepalen uitgaande van de uitdrukkingen (2.14), (2.17) en (2.18), wordt gebruik gemaakt van de zojuist genoemde Weibull-verdeling. Omdat echter uit (2.17) tot en met (2.19) blijkt dat:

$$p(v) = \frac{k}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \exp \left\{ -\left(\frac{v}{C}\right)^k \right\} \quad (2.22)$$

betekent dat formeel gezien tussen (2.14) en (2.19) niet de relatie bestaat zoals die volgens (2.17) moet gelden.

Praktisch gezien is dit echter geen bezwaar omdat voor niet al te kleine waarden van k de verschillen tussen de uitkomsten van (2.14) en (2.22) niet van betekenis zijn.

Voorbeeld

Het tijdsinterval T , waarbinnen een snelheidsmeting is verricht, wordt opgedeeld in dertig even grote tijdstapjes. Binnen elk van deze tijdstapjes wordt de waarde bepaald van de gemiddelde snelheid v_i .

De aldus gevonden waarden staan vermeld in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Waarde van v_i voor elk van de vermelde tijdstapjes

#	v_i	#	v_i	#	v_i
1	5,3	11	4,3	21	6,2
2	4,7	12	3,0	22	5,5
3	3,8	13	5,7	23	4,5
4	5,1	14	4,4	24	3,9
5	4,2	15	7,3	25	5,3
6	3,3	16	5,2	26	4,9
7	6,0	17	4,9	27	6,3
8	4,8	18	7,1	28	5,4
9	7,1	19	5,2	29	4,7
10	5,8	20	4,6	30	3,9

In Tabel 2.3 zowel absoluut als procentueel aangegeven hoeveel van de kans in Tabel 2.2 vermelde waarden voorkomen in elk van de vermelde snelheidsklassen.

Tabel 2.3 Aantal waarden dat in een gegeven snelheidsklasse is gelegen

Snelheidsklasse	Aantal	Procentueel
2,5 – 3,5	2	6,7
3,5 – 4,5	7	23,3
4,5 – 5,5	13	43,3
5,5 – 6,5	5	16,7
6,5 – 7,5	3	10,0

In Figuur 2.14 is Tabel 2.3 in de vorm van een histogram weergegeven.

De kans op een bepaalde windsnelheid kan worden berekend zodra $\bar{v}$ en σ_v bekend zijn. Met behulp van (2.15) en (2.16) wordt gevonden:

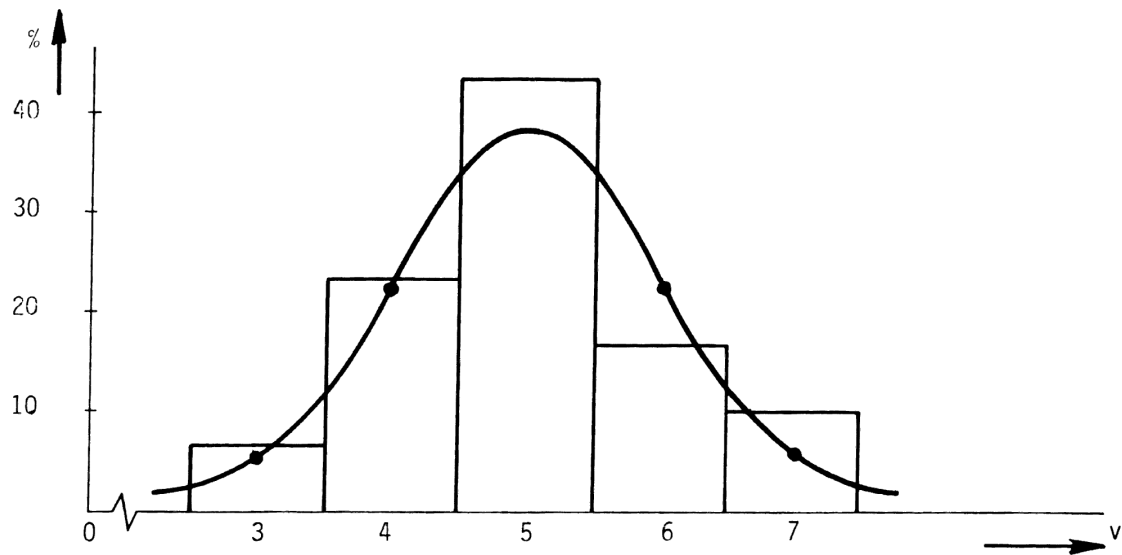
$$\bar{v} = \frac{(5,3+4,7+\dots+3,9)}{30} = 5,08 \text{ m/s}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(5,0-5,08)^2+(4,70-5,08)^2+\dots+(3,90-5,08)^2}{30}} = 1,04 \text{ m/s}$$

De kans op bijvoorbeeld een windsnelheid $v = 4,0 \text{ m/s}$ is nu:

$$p(4,0) = (1,04\sqrt{2\pi})^{-1} \cdot \exp\left\{-\frac{(4,00-5,08)^2}{2(1,04)^2}\right\} = 0,224 = 22,4\%$$

Op deze manier kan de kans worden berekend op windsnelheden van 3, 4, 5, 6, en 7 m/s . Deze kansen zijn in Figuur 2.14 door middel van een stip aangegeven. Het verloop van $p(v)$ is eveneens in deze figuur geschetst.



Figuur 2.14 Histogram met bijbehorend verloop van $p(v)$

Opmerking:

Omdat de hier vermelde waarden gelijk zijn aan de waarden die de windsnelheid aanneemt op een aantal tijdstippen binnen het tijdsinterval waarover wordt gemeten, kan nu ook met behulp van (2.10) worden aangegeven hoe groot de in de gemeten periode te verwachten, vlaagsnelheid is:

$$\hat{v} = \bar{v} + 3,5\sigma_v = 5,08 + 3,5 \cdot 1,04 = 8,72 \text{ m/s}$$

Uitgaande van Tabel 2.3 kan nu ook worden aangegeven hoeveel van de voor v_i gegeven waarden groter zijn dan een gegeven snelheid. Zie Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Aantal overschrijdingen van een gegeven snelheidsgrens

Snelheidsgrenzen	aantal overschrijdingen	
	Absoluut	Percentueel
7,5	0	0
6,5	3	10,0
5,5	8	26,7
4,5	21	70,0
3,5	28	93,3
2,5	3	100,0

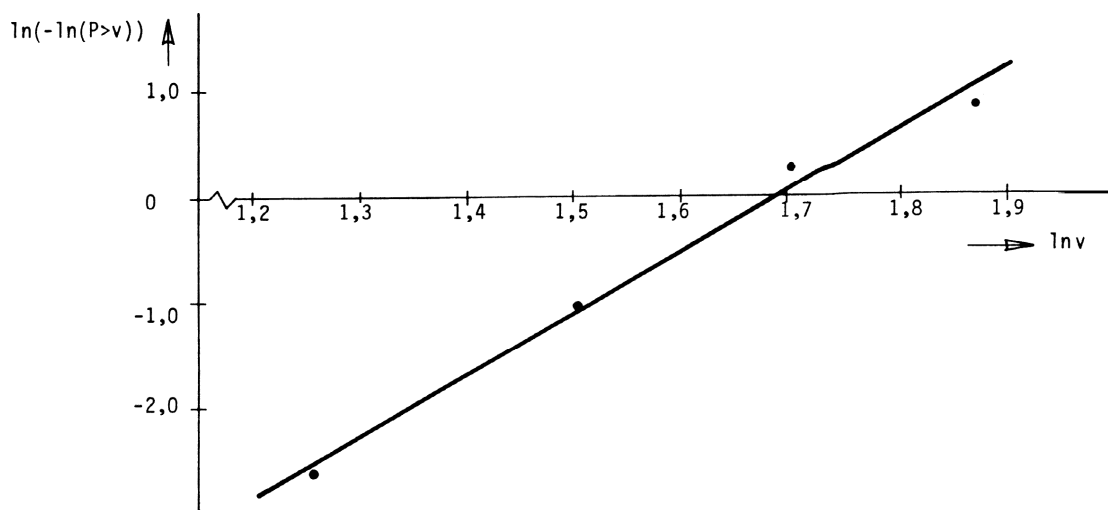
Om de overschrijvingskans te kunnen berekenen moet, wanneer de hier besproken Weibull-verdeling wordt aangehouden, voor de in Tabel 2.4 vermelde snelheidsgrenzen de waarde worden berekend van $\ln v$ en van de bijbehorende $\ln(-\ln(P > v))$.

Voor bijvoorbeeld $v = 3,5 \text{ m/s}$ wordt gevonden dat $\ln 3,5 = 1,2528$ en dat $\ln(-\ln(0,933)) = -2,6686$. In Tabel 2.5 is één en ander vermeld.

In Figuur 2.15 zijn deze waarden in een grafiek uitgezet.

Tabel 2.5 $\ln v$ en $\ln(-\ln(P(>v)))$ voor gegeven snelheidsgrenzen

snelheidsgrenzen	$\ln v$	$\ln(-\ln(P > v))$
6,5	1,8718	0,8340
5,5	1,7047	0,2780
4,5	1,5041	-1,0309
3,5	1,2528	-2,6686



Figuur 2.15 Bepaling van de rechte lijn aan de hand de gevonden waarden

Eerder is gesteld dat wanneer de gegeven snelheidsverdeling exact voldoet aan (2.19) dit betekent dat de in Figuur 2.15 uitgezette waarden precies op een rechte lijn moeten zijn gelegen.

Wanneer nu door de gevonden punten op het oog (of met behulp van de in de wiskunde bekende methode der kleinste kwadranten) een rechte lijn wordt getrokken, wordt duidelijk dat die hier gegeven snelheidsverdeling zeer goed aan (2.19) voldoet.

Voor de constanten a en b uit de vergelijking $y = ax + b$ wordt in dit geval gevonden met respectievelijk 5,80 en -9,83.

Met behulp van (2.20) en (2.21) wordt nu gevonden:

$$k = 5,80$$

$$C = \exp\left(\frac{-9,83}{5,80}\right) = 5,45$$

De overschrijdingskans van bijvoorbeeld de vlaagsnelheid ($\hat{v} = 8,72 \frac{m}{s}$) is nu:

$$P(> 8,72) = \exp\left\{-\left(\frac{8,72}{5,45}\right)^{5,80}\right\} = 2,3 \cdot 10^{-7} \equiv 0,000023 \% \approx 0 \%$$

Opgemerkt wordt nog dat in appendix E een iets ingewikkelder voorbeeld wordt behandeld.

2.6. Windklimaat

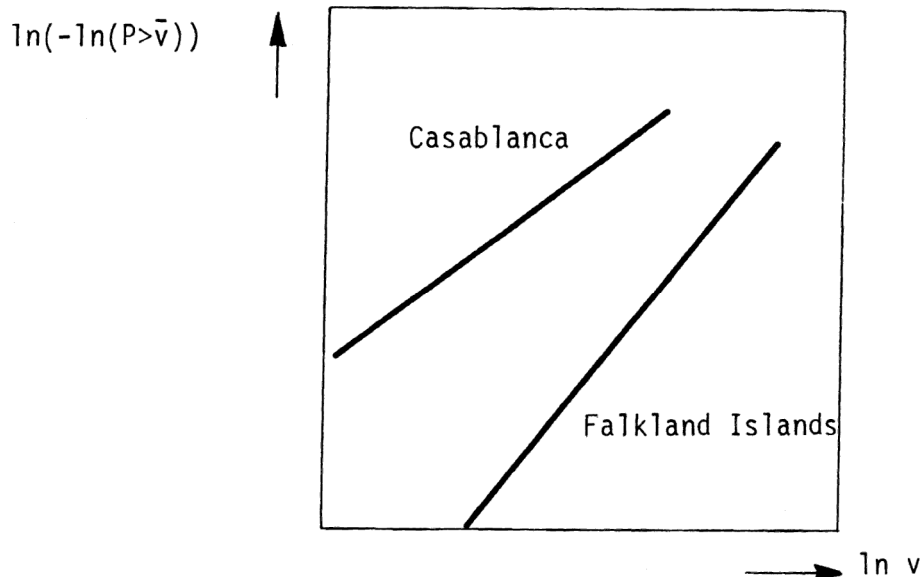
De overschrijvingskans van bijvoorbeeld een gegeven uurgemiddelde zal voor gebieden met een verschillend windklimaat eveneens verschillen.

Vandaar dat voor de typering van het windklimaat in een bepaalde streek gebruik wordt gemaakt van de overschrijdingskansen, zoals dezen zijn gevonden aan de hand van verkregen meetresultaten.

De gegevens, die worden gebruikt om het windklimaat te typeren, kunnen op verschillende manieren worden gepresenteerd. De belangrijkste zullen hier worden genoemd.

Grafieken

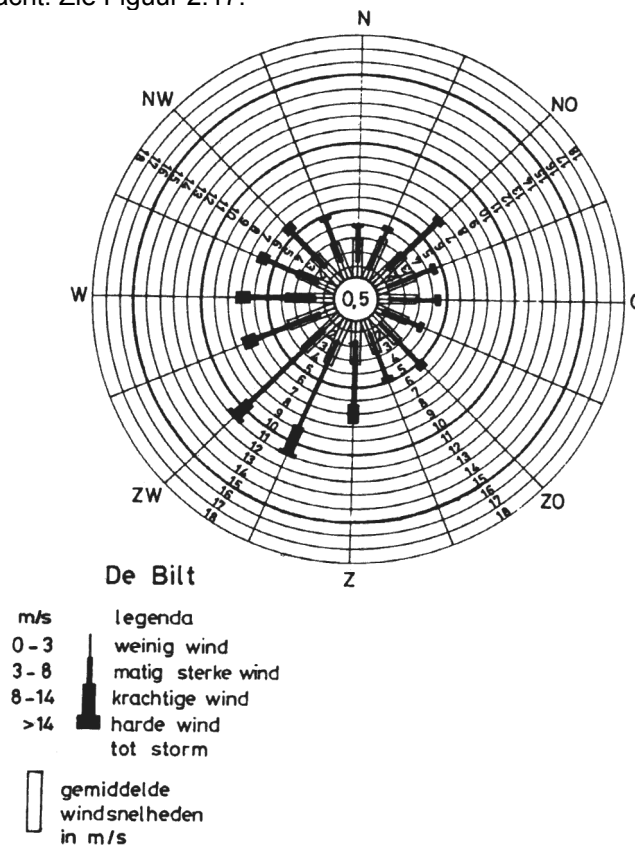
In Figuur 2.16 is op de hiervóór besproken wijze aangegeven hoe groot de overschrijdingskans is van het uurgemiddelde van de windsnelheid in twee verschillende plaatsen op aarde. De verschillen in windklimaat spreken voor zich.



Figuur 2.16 Verband tussen $\ln(-\ln(P > v))$ en $\ln(v)$ voor twee verschillende plaatsen op aarde [9]

Windrozen

Met behulp hiervan kan de kans op een gegeven windsnelheid in een aantal windrichtingen in beeld worden gebracht. Zie Figuur 2.17.



Figuur 2.17 Windroos [10]

In elk van de zestien windrichtingen is af te lezen hoe groot de kans is op een windsnelheid, die is gelegen in één van de vier vermelde snelheidsklassen. Zo is bijvoorbeeld te zien dat de kans op een windsnelheid tussen de 3 en 8 m/s bij ZO-wind gelijk is aan $5 - 1 = 4\%$

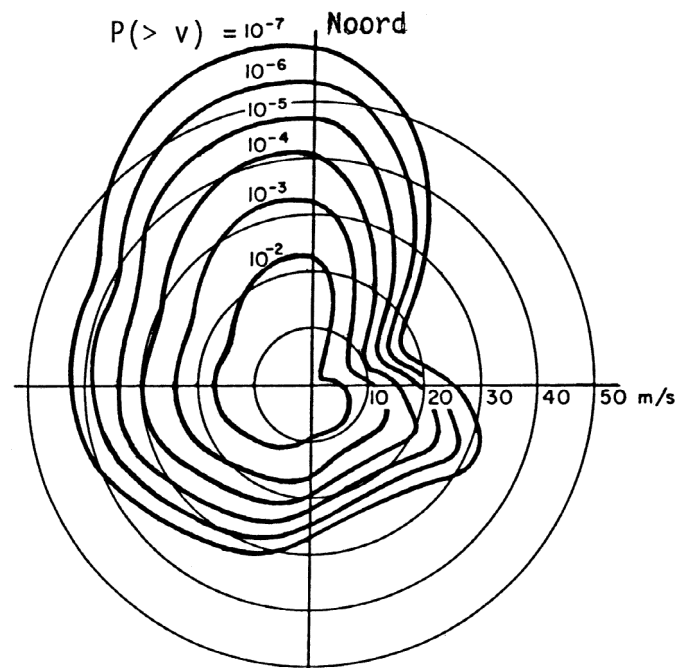
Eveneens is te zien dat de kans op ZO-wind circa 5,6% bedraagt.

In het midden van de windroos staat het percentage windstil weer vermeld. Bovendien is in alle richtingen de waarde gemiddelde windsnelheid af te lezen.

Diagram

In de windroos kan voor een gegeven snelheidsklassen de kans worden afgelezen op een windsnelheid, die hierin is gelegen. Het is echter ook mogelijk om een diagram te construeren waarin kan worden afgelezen hoe groot in elke windrichting de snelheid is die hoort bij een gegeven overschrijdingskans. Zie Figuur 2.18.

Deze vorm van presentatie wordt veel in het buitenland toegepast.



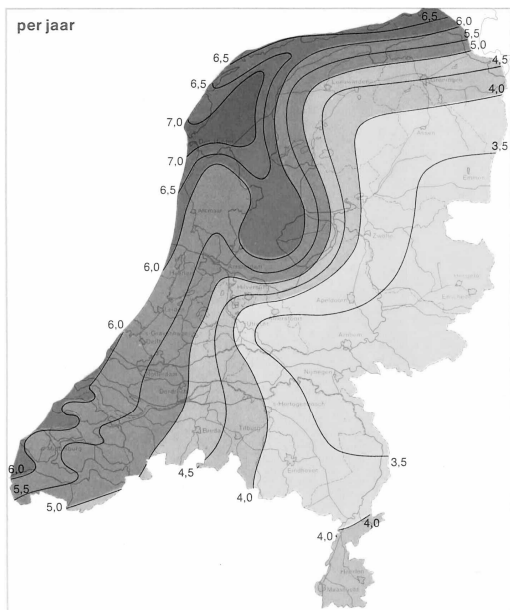
Figuur 2.18 Windsnelheden afhankelijk van overschrijdingskans en windrichting [9]

Het windklimaat zal in principe van plaats tot plaats verschillen. Deze verschillen kunnen in beeld worden gebracht door aan te geven in welke gebieden de gemiddelde windsnelheid tussen twee gegeven waarden is gelegen. Zie Figuur 2.19.

Een andere manier is het intekenen van de bekende windrozen zoals is te zien in Figuur 2.20. Uit beide figuren is te zien dat de verschillende groot kunnen zijn.

Soms is het van belang dat rekening wordt gehouden met de verschillende in windklimaat, die in één bepaald gebied op kunnen treden van seizoen tot seizoen.

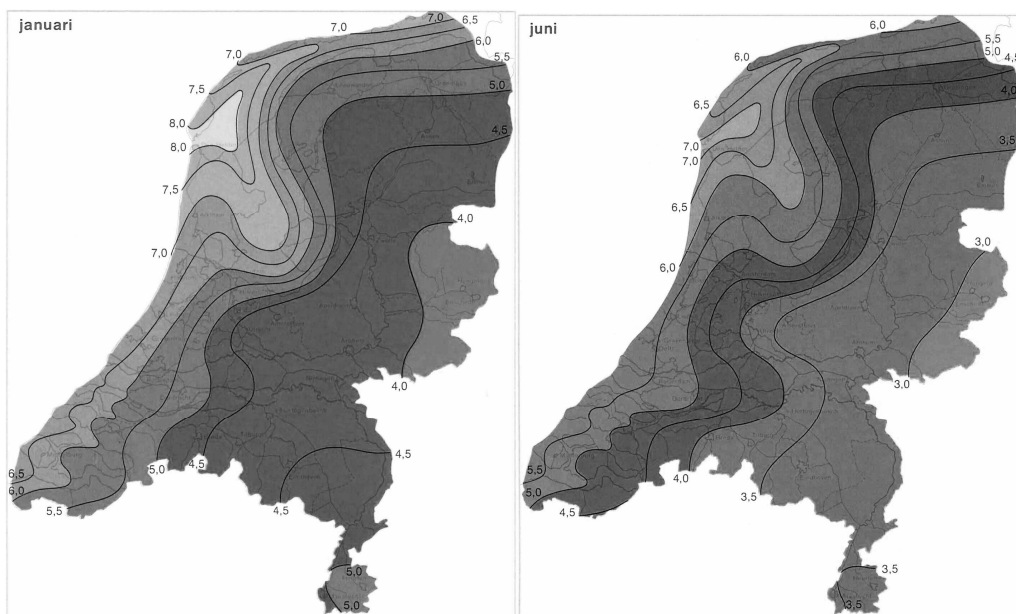
Vergelijk Figuur 2.21 met Figuur 2.19 en Figuur 2.22 met Figuur 2.20.



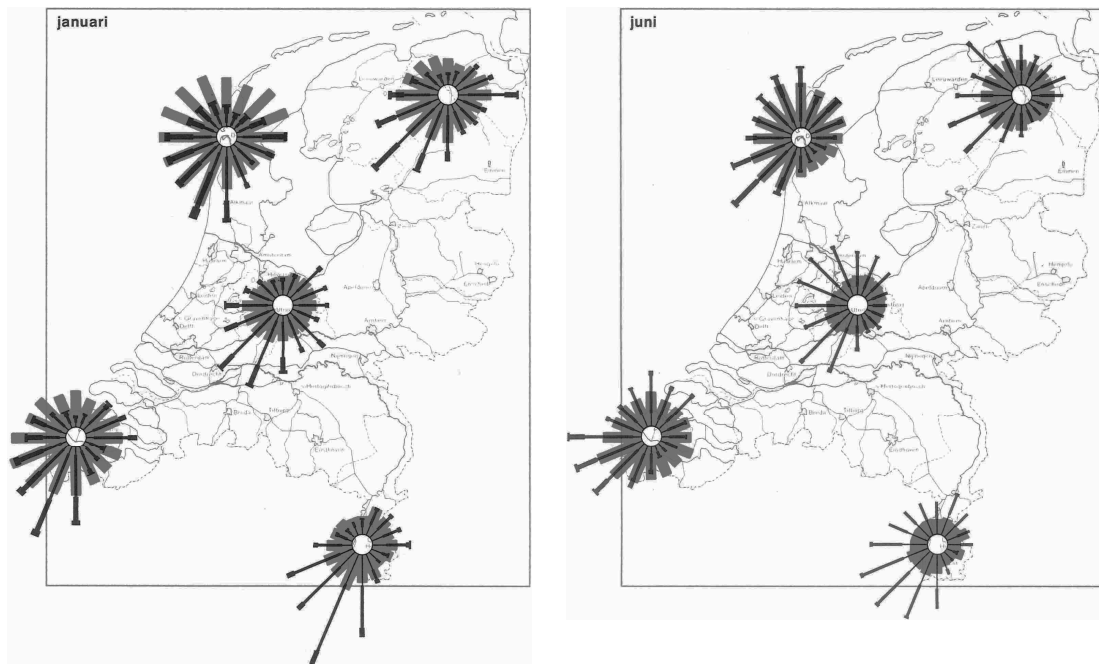
Figuur 2.19 Gemiddelde windsnelheid in m/s [7]



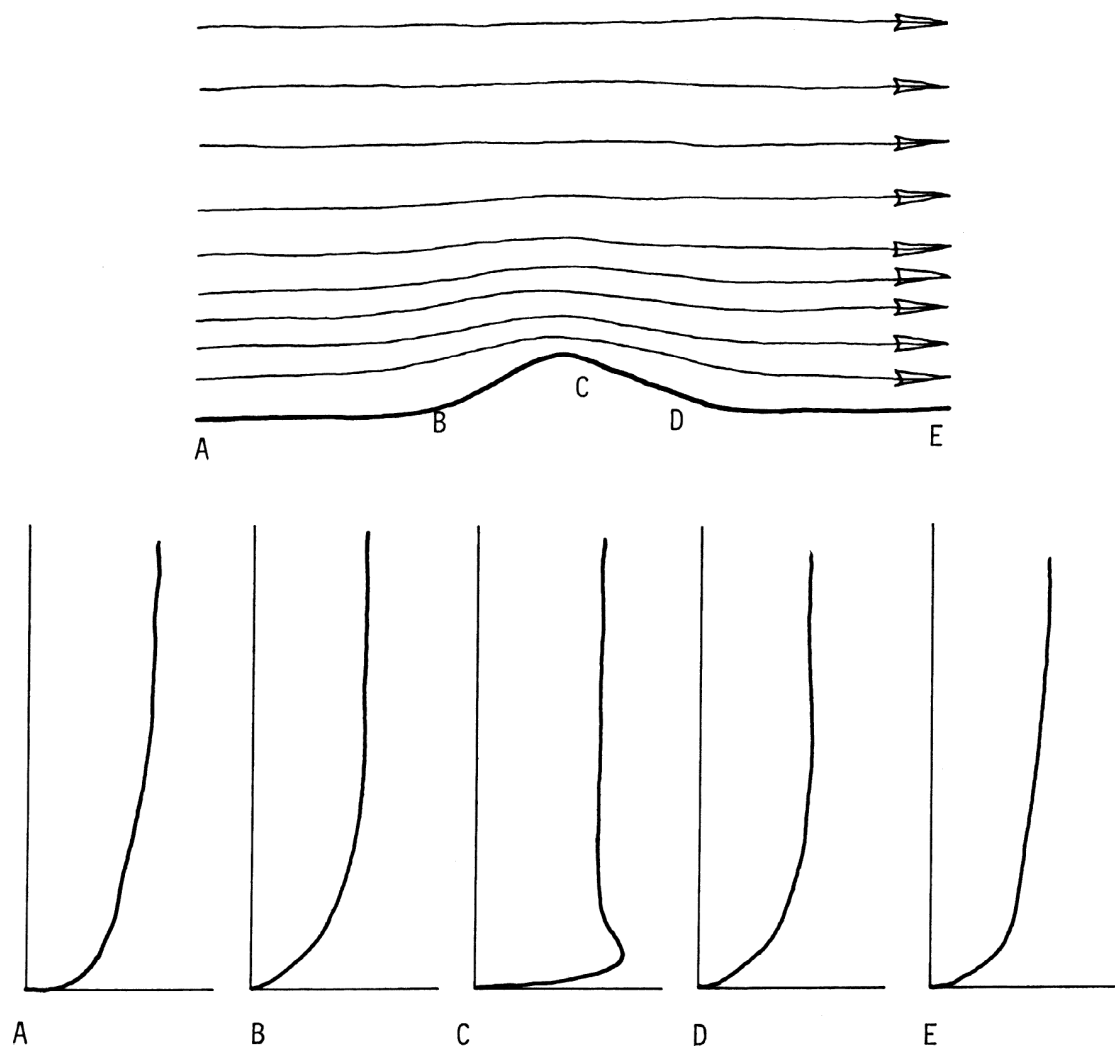
Figuur 2.20 Wind uit aangegeven richtingen in procenten van de tijd. Gemiddelde windsnelheid in m/s [7]



Figuur 2.21 Verschillen in windklimaat zoals deze van maand tot maand kunnen optreden



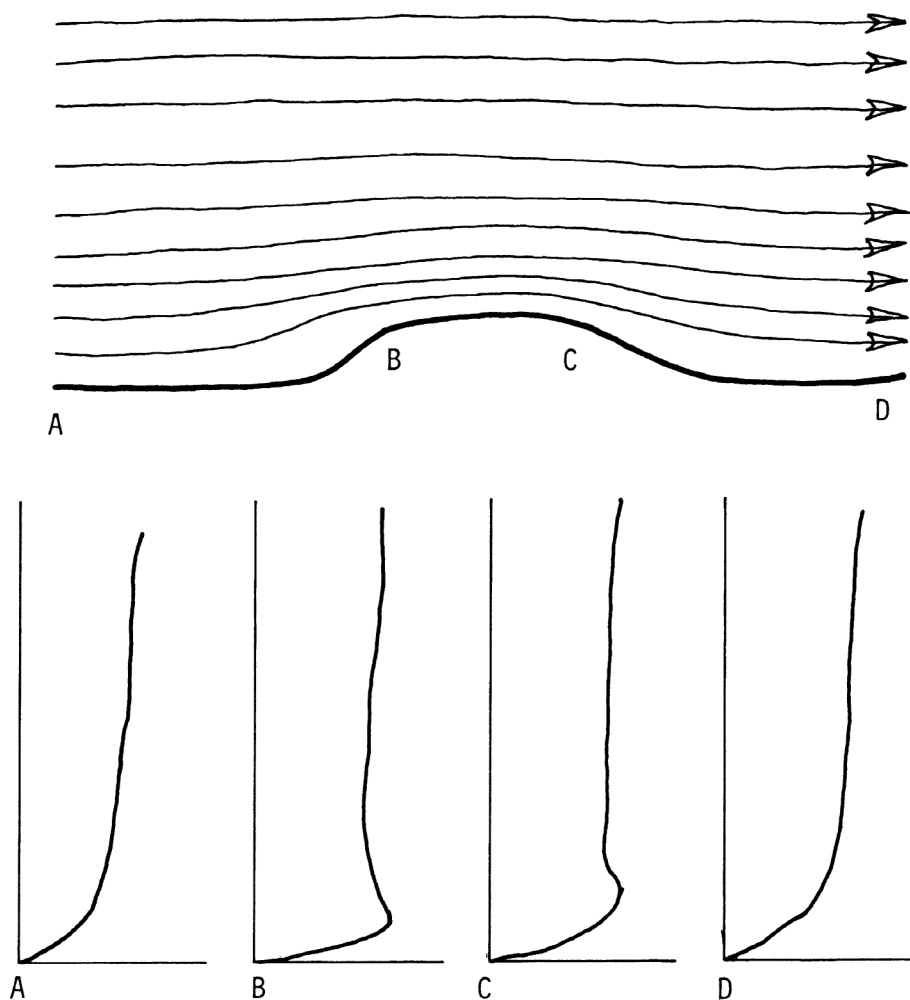
Figuur 2.22 Verschillen in windklimaat zoals deze van maand tot maand kunnen optreden



Figuur 2.23 Stroomlijnen en snelheidsprofielen nabij lokale verstoringen [8]

Tenslotte wordt er nog op gewezen dat in heuvelachtig terrein – of bij zeer abrupte verschillen in terreinhoogte – het windprofiel in naburig gelegen punten onderling sterk kan verschillen. In Figuur 2.23 en Figuur 2.24 zijn voor twee verschillende gevallen de optredende veranderingen in windprofiel in beeld gebracht.

Het zal duidelijk zijn dat tengevolge van deze veranderingen – ook wel aangeduid met “topografische effecten” – het windklimaat in de punten onderling sterk kan variëren.



Figuur 2.24 Stroomlijnen en snelheidsprofielen nabij lokale verstoringen [8]

3. Windtunnelproeven

In dit hoofdstuk wordt één en ander gezegd over de noodzaak van windtunnelproeven, de voorwaarden waaraan bij uitvoer van deze proeven minimaal moet zijn voldaan en over de meetinstrumenten, die voor de bepaling van luchtsnelheden kunnen worden gebruikt.

Behalve over deze punten zal ook een en antwoorden gezegd over de gangbare methoden, die worden toegepast om te komen tot een voorspelling van het te verwachten windklimaat in de gebouwde omgeving.

3.1. Algemeen

Zoals reeds is vermeld, wijkt het stromingsbeeld rondom een gebouw altijd sterk af van dat in het vrije veld. Duidelijk zal zijn dat wanneer aan het windklimaat rondom een gebouw eisen worden gesteld, het stromingsbeeld in voldoende mate bekend moet zijn om te kunnen beoordelen of aan deze eisen wordt voldaan.

De vraag is nu hoe dit stromingsbeeld – zowel in bestaande als in nog te realiseren situaties – kan worden bepaald.

In appendix F is aangegeven hoe bij bepaalde stromingsproblemen onmogelijk is gebleken de in de stromingsleer bekende differentiaalvergelijkingen met bijbehorende randvoorwaarden op te lossen, valt “berekeningen” met behulp van de stromingsleer als een mogelijkheid af.

In appendix F is aangegeven hoe bij bepaalde stromingsproblemen – door het opstellen van een aantal macro-balansvergelijkingen – wel enig inzicht kan worden verkregen in de samenhang tussen optredende drukken en snelheden in het stromingsveld, zonder dat het zojuist genoemde, ingewikkelde stelsel differentiaalvergelijkingen hoeft te worden opgelost. Met behulp van deze balansvergelijkingen kan een globale indruk worden verkregen van de optredende drukken en snelheden rond een gebouwblok. Zie appendix G.

Een andere mogelijkheid is het verkrijgen van inzicht aan de hand van metingen, waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen metingen in bestaande situaties en metingen in modellen.

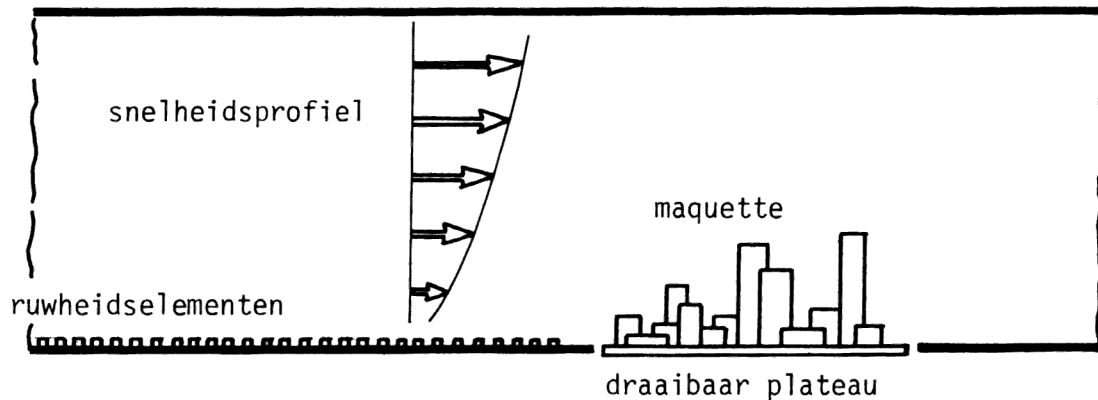
Aan metingen in bestaande situaties zitten een aantal nadelen zoals:

- een groot aantal meetpunten is benodigd voor het verkrijgen van een indruk van het stromingsbeeld rond een gebouw,
- de niet te elimineren invloed van bestaande, omringde gebouwmassa's op het stromingsbeeld,
- de noodzaak om bij alle overheersende windrichtingen deze metingen te verrichten
- de noodzaak om over een langere periode te meten omdat niet met een momentopname kan worden volstaan.

Mede tengevolge van deze bezwaren hebben Kernot en Irminger in respectievelijk 1890 en 1893 voor het eerst metingen verricht aan schaalmodellen in een windtunnel [9]. Geleidelijk aan werd duidelijk dat voor het verkrijgen van betrouwbare resultaten aan bepaalde “modelregels” moet worden voldaan, hetgeen betekende dat gebruik moest worden gemaakt van een zogenaamde “grenslaagtunnel”. De benaming “grenslaagtunnel” komt voort uit het feit dat bij dit type tunnel de lucht wordt aangevoerd over een zogenaamd “voorland”, bestaande uit zeer vele ruwheidelementen, waardoor geleidelijk een turbulente grenslaagstroming van voldoende dikte wordt opgebouwd.

Nadat dit voorland is gepasseerd, strijkt de grenslaagstroming over een draaibaar plateau, waarop maquettes kunnen worden geplaatst. Door draaiing van dit plateau kan voor alle gewenste windrichtingen de windinvloed worden onderzocht.

Zie Figuur 3.1.

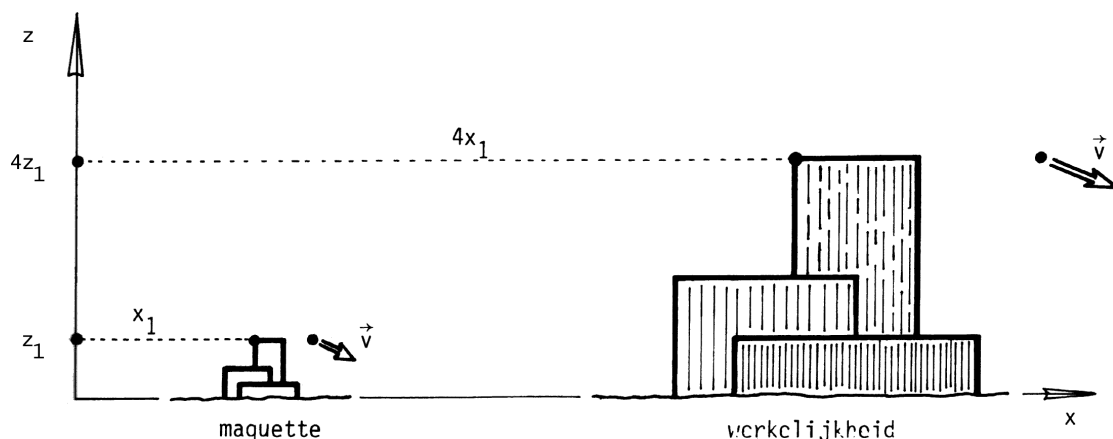


Figuur 3.1 Windtunnelsectie met een gedeelte van het voorland en het draaibare plateau

3.2. *Gelijkvormige stroming*

Het model – de maquette – waaraan wordt gemeten, ontstaat door “lineaire afbeelding” van de werkelijke situatie. Hieronder wordt verstaan dat alle werkelijke afstanden tussen willekeurige punten van gebouwen (of van de omgeving) en de oorsprong van een willekeurig gekozen assenstelsel worden vermenigvuldigd met een factor, die gelijk is aan de gekozen schaal.

Bij wijze van voorbeeld is in Figuur 3.2 één en ander in beeld gebracht voor schaalfactor 1:4.



Figuur 3.2 Lineaire afbeelding met schaalfactor 1:4

Het doel dat bij windtunnelproeven na wordt gestreefd, is het verkrijgen van een “gelijkvormig” stromingsbeeld.

Dit betekent dat in overeenkomstige punten van het stromingsveld de richting van de snelheid en de temperatuur niet mogen verschillen. Zie Figuur 3.2.

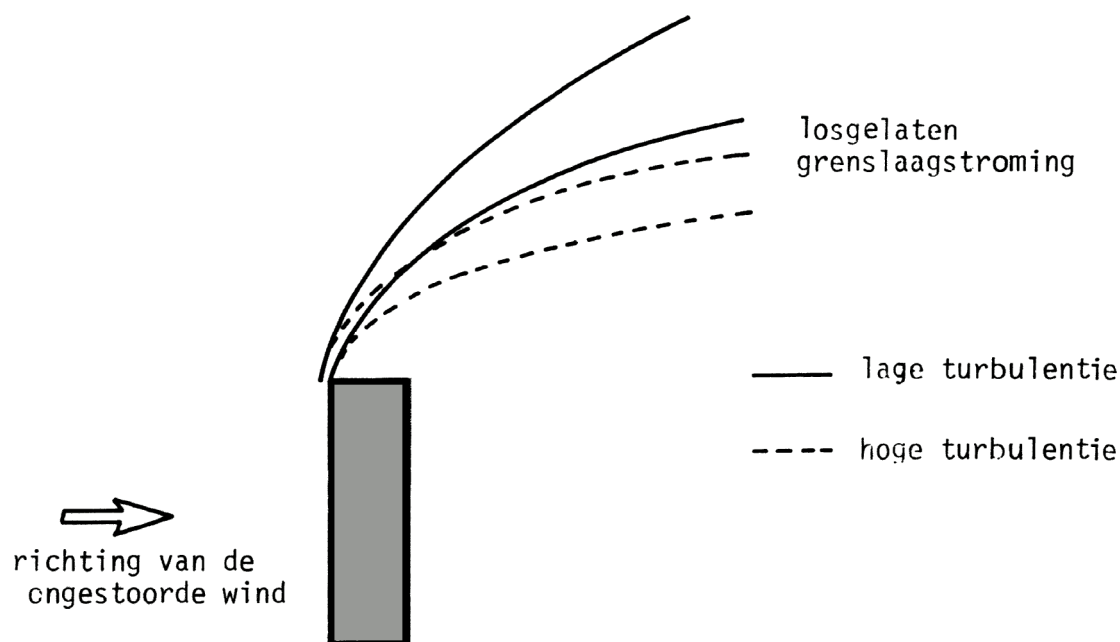
In de windtunnel moet de vorm van het snelheidsprofiel dus overeenkomen met het profiel dat ontstaat na lineaire afbeelding van het werkelijke snelheidsprofiel.

In de stromingsleer wordt aangetoond dat voor het verkrijgen van een gelijkvormige stroming moet worden voldaan aan de “modelregel van Reynolds”. In appendix H is te lezen dat bij het testen van stedenbouwkundige maquettes niet aan deze regel kan worden voldaan maar dat, wanneer “hoekige” gebouwvormen worden getest, toch met behulp van windtunnelproeven betrouwbare resultaten kunnen worden verkregen. Zonder nader te formuleren wat nu onder “hoekige” gebouwvormen moet worden verstaan, wordt hier volstaan met de opmerking dat nagenoeg alle gangbare gebouwvormen voor deze kwalificatie in aanmerking komen, en dus in de windtunnel kunnen worden getest. Voorbeeld van vormen, die niet hieronder vallen, zijn torenflats met cirkelvormige plattegronden en “koepels”. Hier zal het in de windtunnel optredende stromingsbeeld dus afwijken van at in werkelijkheid.

Bij het bespreken van het stromingsbeeld dat optreedt rondom een alleenstaand gebouw (hoofdstuk 4) zal blijken dat de luchtstroming langs de, door de ongestoorde wind getroffen

gevel ter plaatse van de gebouwhoeken “loslaat” en vervolgens in windrichting wordt afgebogen (zie ook appendix G).

Uit windtunnelonderzoekingen is nu gebleken dat de mate, waarin deze kromming optreedt, sterk afhangt van de turbulentie in de aankomende luchtstroming. Een toename van de turbulentie heeft een toename tot gevolg van de kromming en de daarmee een verandering van het stromingspatroon. Zie Figuur 3.3.



Figuur 3.3 Invloed van de turbulentie op de kromming van de losgelaten grenslaagstroming

De verschillen in stromingsbeeld – en dus in optredende luchtsnelheden – onder invloed van verschillende in turbulentie worden voor een praktijkgeval besproken in [11].

Samenvattend kan worden geteld dat voor het verkrijgen van een gelijkvormig stromingsbeeld:

- de maquette een lineaire afbeelding moet zijn van de werkelijkheid.
- de vorm van het ongestoorde snelheidsprofiel een lineaire afbeelding moet zijn van het werkelijke snelheidsprofiel.
- de turbulentie van de luchtstroming in de tunnel dezelfde moet zijn als die van de werkelijke luchtstroming
- alleen “hoekige” gebouwvormen getest kunnen worden.

Tot slot nog de volgende opmerkingen:

- de vraag, die zich bij het maken van maquettes voor zal doen, is hoe nauwkeurig te werk moet worden gegaan. Wat de nauwkeurigheid van de afzonderlijke gebouwblokken betreft is gebleken dat “uitsteeksels” en “inhammen” kleiner dan ongeveer 1 m geen invloed van betekenis hebben op het stromingspatroon rondom het gebouw. In de directe omgeving van deze “oneffenheden” is de invloed uiteraard wél merkbaar. De hier genoemde vuistregel kan ook worden gehanteerd wanneer het gaat om zeer incidentele sprongen in het terrein.
- in het algemeen zal het bij modelproeven nooit volledig lukken om aan de modelregel(s) te voldoen, om het juiste snelheidsprofiel te verkrijgen of om te zorgen voor de juiste turbulentie. Hoofdzakelijk tengevolge van deze invloeden zal het nooit mogelijk zijn om volledig te voldoen aan de eis van gelijkvormigheid. Deze “storende” invloeden worden schaalafecten genoemd.
- bij nauwkeurige windtunnelproeven wordt er ook nog naar gestreefd om het in werkelijkheid optredende “turbulentiespectrum” (zie 2.4) na te bootsen. Omdat hoogbouw, die buiten het plateau valt waarop de maquette is geplaatst, wel van

invloed is op het stromingsbeeld moet alle hoogbouw binnen een straal van ongeveer 800m in het voorland worden opgenomen.

3.3. Meetinstrumenten

Bij windtunnelproeven wordt gebruik gemaakt van een aantal meetinstrumenten, waarvan de belangrijkste hier zullen worden genoemd.

Gloeidraadanemometer

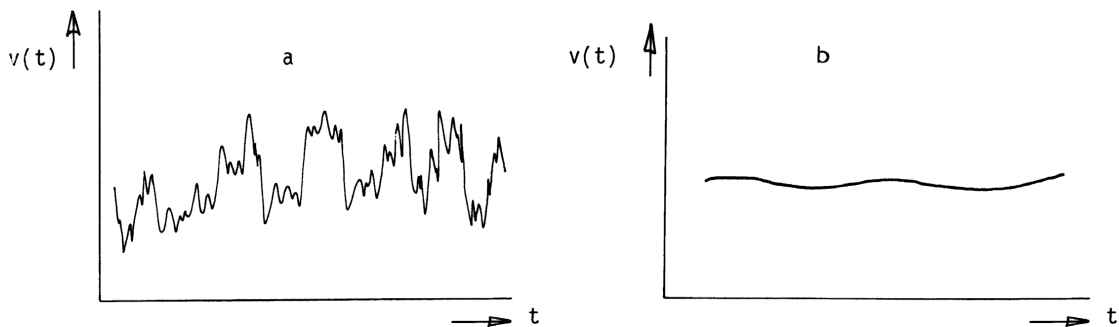
De werking van dit meetinstrument berust op de verandering van de elektrische weerstand van een metaal draadje tengevolge van de afkoeling, die optreedt onder invloed van de langsstijkende luchtstroming.

Over dit draadje bestaat een constant spanningsverschil, zodat de afkoeling resulteert in een verandering in stroomsterkte. Deze verandering is een maat voor de optredende luchtsnelheid.

Bij een stand van het metaal draadje loodrecht op de hoofdstroomrichting kan met behulp van dit meetinstrument de grote worden bepaald van de luchtsnelheid in die richting.

Zelfs zeer snelle snelheidswisselingen kunnen hiermee worden geregistreerd.

Zie Figuur 3.4a.



Figuur 3.4 Bepaling van $v(t)$ met behulp van respectievelijk een gloeidraadanemometer (a) en een N.T.C. - weerstand (b)

Naast de grote kwetsbaarheid heeft de gloeidraadanemometer als nadeel dat de richting van de snelheid niet kan worden bepaald.

Nog een nadeel is dat de gloeidraadanemometer slechts dan mag worden gebruikt voor de bepaling van de gemiddelde grootte van de luchtsnelheid in de hoofdstroomrichting, wanneer de turbulentie-intensiteit in de stroming beneden de 20% blijft.

Zowel in het vrije veld als in de gebouwde omgeving kan dit percentage hoger uitvallen en moet dus met het hier genoemde nadeel rekening worden gehouden.

N.T.C.-weerstand

De werking van deze weerstanden komt overeen met die van de gloeidraadanemometer. Het verschil is echter dat zich in dit geval om het metaal draadje een glasbolletje bevindt waardoor snelheidswisselingen – dus temperatuurwisselingen veel minder direct kunnen worden geregistreerd. De N.T.C.-weerstand (Negatieve Temperatuur Coëfficiënt) worden daarom alleen gebruik voor de bepaling van de gemiddelde grootte van luchtsnelheden. Zie Figuur 3.4b.

De richting van de luchtstroming is nu volledig onbekend.

Vaantjes

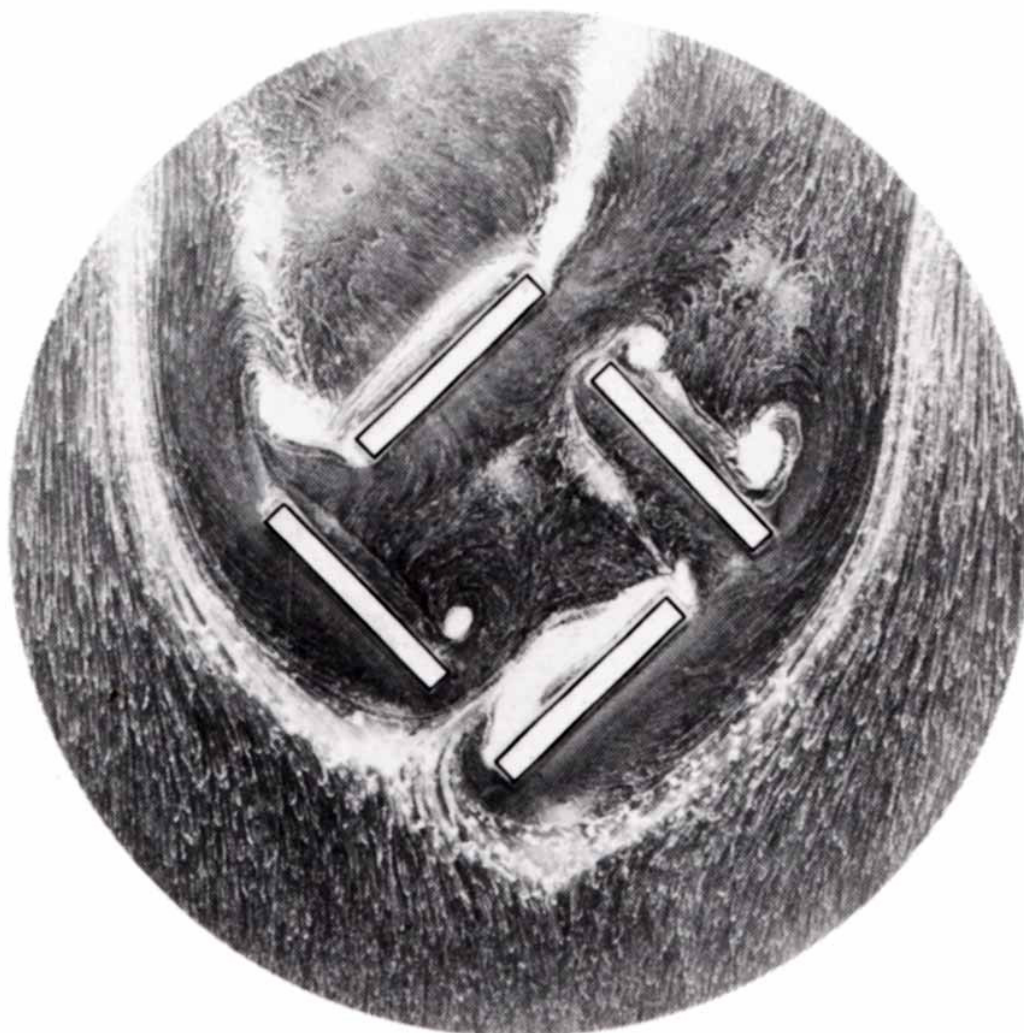
Met behulp van zeer dunne draadjes kan een globale indruk worden verkregen van de richting van de gemiddelde windsnelheid in een bepaald punt.

De mate waarin de stand van het “vaantje” verandert is een indicatie voor de mate van turbulentie.

Duidelijk zal zijn dat geen informatie wordt verkregen over de grootte van de snelheid.

Olielaagje

De grondplaat van de maquette kan worden ingesmeerd met een mengsel van olie en kaolien. Wanneer nu de lucht over dit mengsel strijkt, verdampt de olie en wordt een strepenpatroon zichtbaar waaruit vrij duidelijk de richting van de luchtstroming is af te lezen en elk punt van de grondplaat. Zie figuur 3.5.



Figuur 3.5 Oliefilmmeting. [10]

Zandlaagje

Zoals in 3.4 zal blijken, wordt bij toepassing van de “korrelerosiemethode” gebruik gemaakt van de zandlaag om de waarde te bepalen van de zogenaamde “windhinderparameter” en de omvang van de gebieden, waarbinnen deze parameter van toepassing is. Één en ander wordt verder toegelicht in 3.4.

“Model”-poppetje

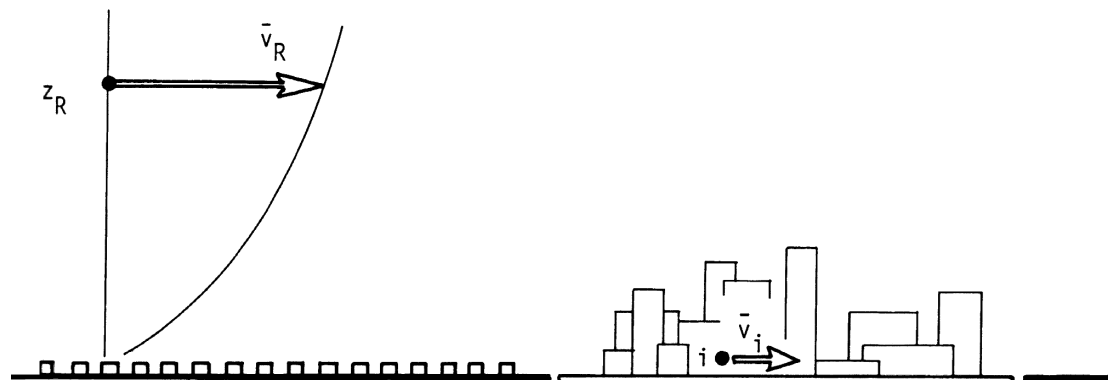
Omdat bij windhinder in hoofdzaak wordt gekeken naar de krachten, die door de wind op de mens worden uitgeoefend, ligt het idee voor de hand om deze krachten in de maquette te meten met behulp van een “model”-poppetje. Gezien de zeer kleine afmetingen van een dergelijk poppetje bij de gangbare schaalfactoren (bijvoorbeeld 1:250) is het realiseren van een nauwkeurige instrumentatie nogal moeilijk en daarom wordt deze meettechniek dan ook in het algemeen afgeraden. [9]

3.4. Voorspelling van het windklimaat in de gebouwde omgeving

De gangbare methoden, die worden toegepast om te komen tot een voorspelling van het windklimaat in de gebouwde omgeving, komen in deze paragraaf aan de orde.

Bepaling van het windklimaat in een aantal meetpunten

In het ongestoorde windprofiel (bovenstrooms van de maquette) wordt in een vast referentiepunt R , gelegen op een referentiehoogte Z_R . Zie Figuur 3.6.



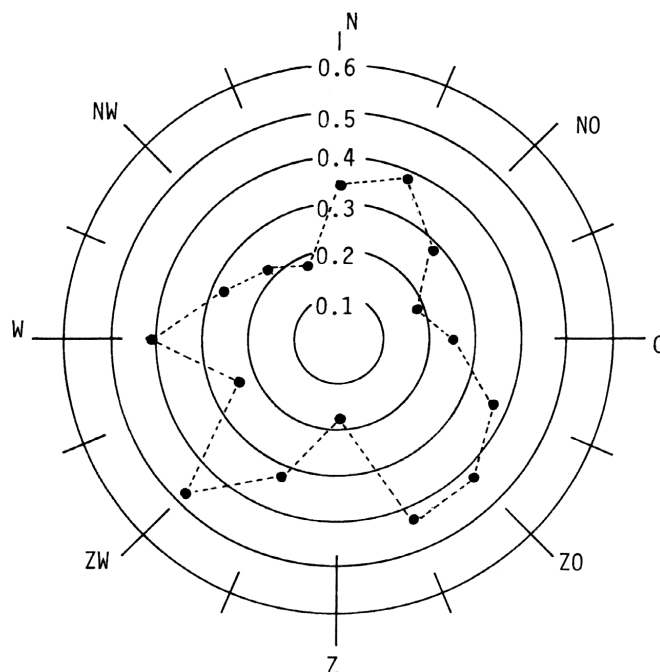
Figuur 3.6 Bepaling van de gemiddelde luchtsnelheid in referentie- en meetpunt

In de meetpunten, die in de maquette worden geplaatst, kan met behulp van de windtunnel voor elke gewenste windrichtingen het verhoudingsgetal $c_i = \frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_R}$ worden bepaald. Hierin stelt

$\bar{v}_i$ de gemeten gemiddelde luchtsnelheid voor in het i^{de} meetpunt. Zie eveneens Figuur 3.6.

In Figuur 3.7 is te zien hoe voor elk meetpunt de waarde van c_i kan worden weergegeven.

Wanneer er over gegevens wordt beschikt met betrekking tot het windklimaat in het vrije veld (zie 2.6) op een hoogte, overeenkomend met de in de windtunnel aangehouden referentiehoogte, kan met behulp van de gevonden c_i -waarden de kans worden bepaald dat in het meetpunt een als norm gestelde windsnelheid wordt overschreden. De te volgen werkwijze zal worden geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld.



Figuur 3.7 De in een meetpunt bepaalde c_i -waarden voor een 16-tal windrichtingen

In Tabel 3.1 staan voor enkele windsnelheden de overschrijdingskansen vermeld zoals deze aan de hand van windsnelheidsmetingen in een bepaalde windrichting (ZW) op 10m hoogte zijn bepaald (zie hoofdstuk 2).

Tabel 3.1 Overschrijdingskansen op 10 m hoogte

v	$P > v$
3	0,093
8	0,046
14	0,005

Gegeven is dat de referentiehoogte in de tunnel overeenkomt met een werkelijke hoogte van 200m.

Om te kunnen bepalen bij welke windsnelheden op 200m hoogte de in Tabel 3.1 vermelde overschrijdingskansen behoren, moet de verhouding bekend zijn tussen de windsnelheden op 10 en 200m hoogte.

Dit kan alleen wanneer het snelheidsprofiel bekend is.

In het hier gegeven voorbeeld geldt dat $\alpha = 0,11$ en $z_G = 250\text{m}$. Hieruit volgt dat $\frac{\bar{V}_{(200\text{m})}}{\bar{V}_{(10\text{m})}} \approx 1,4$.

Op 200m hoogte gelden dat ook de in Tabel 3.2 vermelde waarden.

Tabel 3.2 Overschrijdingskansen op 200 m hoogte

v	$P > v$
4,2	0,093
11,2	0,046
19,6	0,005

Stel nu dat met behulp van de windtunnel is gevonden dat bij ZW-wind voor meetpunt 1 geldt

dat $c_1 = \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_R} = 0,34$. De waarden voor $\bar{V}_1$, die horen bij de in Tabel 3.2 vermelde

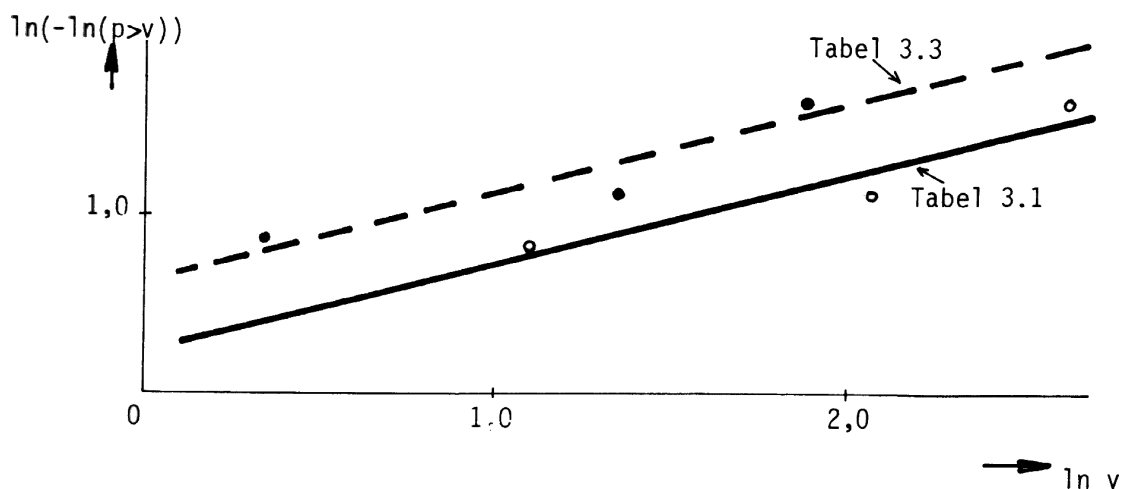
overschrijdingskansen, kunnen nu worden gevonden door de in dezelfde tabel vermelde snelheden met c_1 te kunnen vermenigvuldigen. Het resultaat is vermeld in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Overschrijdingskansen in meetpunt 1

v	$P > v$
1,43	0,093
3,81	0,046
6,66	0,005

Aan de hand van de gegevens, vermeld in Tabel 3.1 en Tabel 3.3, kan dus de overschrijdingskans worden bepaald als functie van de snelheid. In hoofdstuk 2 is hier

uitvoerig op ingegaan. Hier wordt volstaan met het voermelden van het resultaat. Zie Figuur 3.8.



Figuur 3.8 Verloop van $\ln(-\ln(P>v))$ op 10 en 200 m hoogte

Voor de overschrijdingskans van de bijvoorbeeld een windsnelheid $v = 5 \frac{m}{s}$, zowel in het vrije veld als in meetpunt 1, wordt respectievelijk gevonden $P > 5 = 0,056$ en $P > 5 = 0,016$.

De uiteindelijke overschrijdingskans P_1 van deze snelheid wordt voor meetpunt 1 nu gevonden door op dezelfde wijze in elke windrichting de daarbij behorende overschrijdingskans te berekenen en door vervolgens al deze uitkomsten te sommeren.

Ook in het vrije veld kan de uiteindelijke overschrijdingskans $P_{v,v}$ op analoge wijze worden berekend. Wanneer nu per meetpunt de totale overschrijdingskans P_1 wordt gedeeld door

$P_{v,v}$, is hier sprake van klimaatverbetering wanneer geldt dat $\frac{P_1}{P_{v,v}} < 1$.

Opmerkingen:

- In dit voorbeeld is stilzwijgend aangenomen dat de hoogte van de meetpunten in de maquette eveneens 10 m bedraagt, omdat het bepalen van de verhoudingen $\frac{P_i}{P_{v,v}}$

anders nauwelijks zinvol is.

In de werkelijkheid echter ligt het meetpunt op loophoogte ($\pm 1,75m$) en moet dus ook de $P_{v,v}$ worden berekend voor deze hoogte.

Omdat het snelheidsprofiel bekend is, levert dit totaal geen problemen op. Op dezelfde wijze als Tabel 3.2 ontstaat uit Tabel 3.1 de windsnelheden te vermenigvuldigen met een factor $\frac{\bar{v}(200m)}{\bar{v}(10m)}$. In dit voorbeeld is deze factor gelijk aan 0,81.

De $P_{v,v}$ op loophoogte kan nu op de bekende manier worden berekend.

- wanneer het terreintype, waarover de aanstromende wind strijkt, sterk per windrichting verschilt, moeten per windrichting andere waarde voor α en z_g worden aangehouden.
- omdat in de maquette slechts een beperkt aantal meetpunten kan worden geplaatst, moet van te voren zo goed mogelijk worden ingeschat op welke plaatsen dit het beste kan geschieden. Een totaalbeeld van de snelheden op loophoogte wordt dus niet verkregen.

Aan de hand van de bekende klimaatsgegevens in het vrije veld en de gemeten c_i -waarden in de afzonderlijke windrichtingen kan op een eenvoudiger, maar grovere manier worden bepaald of in de meetpunten al dan niet sprake is van een klimaatverbetering.

Uitgaande van de windsnelheidsgegevens in het vrije veld op referentiehoogte kan in elke windrichting de grootte van de gemiddelde windsnelheid $\bar{v}_{R(v,v)}$ worden bepaald. Voor het hiervoor besproken voorbeeld zal deze snelheid nog worden berekend.

Wanneer nu als norm wordt uitgegaan van een toelaatbare gemiddelde snelheid $\bar{v}_N$, dan is

per windrichting de verhouding $\frac{\bar{v}_N}{\bar{v}_{R(v,v)}}$ bekend. De gevonden c_i -waarden geven de

verhouding $\frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_{R(tunnel)}}$ weer.

Per windrichting kan nu worden bekeken of geldt:

$$\frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_{R(tunnel)}} > \frac{\bar{v}_N}{\bar{v}_{R(v,v)}}$$

Is dit het geval dan is er in deze richting dus sprake van een verslechtering. Omdat nu over de overschrijdingskans van $\bar{v}_N$ niets bekend is, wordt op de hier beschreven wijze een globaal beeld van het windklimaat verkregen. Alleen wanneer blijkt dat in de overheersende windrichtingen van een verbetering sprake is, kan met vrij grote zekerheid van een verbetering van het windklimaat worden gesproken. Bovenstaande werkwijze zal nu aan de hand van het eerder behandelde voorbeeld worden toegelicht:

De gemiddelde snelheid in een gegeven windrichting is de snelheid, die gedurende 50% van de tijd dat de wind in deze richting waait, wordt overschreden.

Wanneer, zoals in dit voorbeeld, geldt dat ZW-wind 10% van de tijd voorkomt, overeen, met $0,1 \cdot 0,5 = 0,05 \equiv 5\%$ van de totale tijd.

Aan de hand van de waarden, zoals die in tabel 3.2 staan vermeld, kan nu dus op de hiervoor al enkele malen aangegeven wijze worden bepaald welke snelheid hoort bij een

$P > v = 0,05$. Dan is $\frac{\bar{v}_N}{\bar{v}_{R(v,v)}} = 66$.

Gevonden is $c = 34$.

In ZW-richting is nu dus sprake van een verbetering.

Korrelerosiemethode

De werkwijze is als volgt. In de windtunnel wordt op het lege, voor maquettes bestemde draaibare plateau een zeer dun laagje fijn gedroogd zand ($\leq 0,4\text{mm}$) gestrooid. Door stapsgewijs opvoeren van de luchtsnelheid wordt nu op referentiehoogte de gemiddelde snelheid $\bar{v}_R^*$ bepaald waarbij binnen een tijdsduur van 2 minuten als het zand van het plateau is verdwenen.

Vervolgens wordt de maquette, nadat de bodemplaat eveneens van een zandlaagje is voorzien, in de windtunnel geplaatst en wordt de referentiesnelheid stapsgewijs opgevoerd.

Bij referentiesnelheid, die ver beneden de voor $\bar{v}_R^*$ gevonden waarde liggen, blijken er al gebieden te ontstaan waarin het zand binnen 2 minuten wordt weggeblazen. Ruwweg betekent dit dat het binnen deze gebieden bij een referentiesnelheid $\bar{v}_R < \bar{v}_R^*$ nabij de bodem even hard waait als in het vrije veld bij referentiesnelheid $\bar{v}_R = \bar{v}_R^*$.

Naarmate $\bar{v}_R$ toeneemt, neemt de omvang van de schoongeblazen gebieden toe. Er blijken echter ook gebieden te bestaan waarin het zandlaagje blijft liggen bij referentiesnelheden $\bar{v}_R > \bar{v}_R^*$. Dit zijn dus duidelijk gebieden waarin beschutting wordt ondervonden door de omringende gebouwmassa's.

Gedefinieerd wordt nu de zogenaamde "windhinderparameter" γ , die ontstaat door waarde van $\bar{v}_R^*$ te delen door de waarde van $\bar{v}_R$, zoals die in de tunnel is ingesteld:

$$\gamma = \frac{\bar{v}_R^*}{\bar{v}_R} \quad (3.1)$$

Door juiste instelling van $\bar{v}_R$ wordt ervoor gezorgd dat de waarde van γ een vaste reeks van waarden doorloopt, bijvoorbeeld $\gamma = 2,0 - 1,8 - 1,6 - 1,4 - 1,2 - 1,0 - 0,8 - 0,6$.

Door nu bij een waarde van $\gamma = \gamma_0$ fotografisch vast te leggen binnen welke gebieden het zandlaagje is weggeblazen, zijn nu de gebieden bekend waarvoor geldt dat $\gamma \geq \gamma_0$.

In Figuur 3.9 is het één en ander weergegeven.

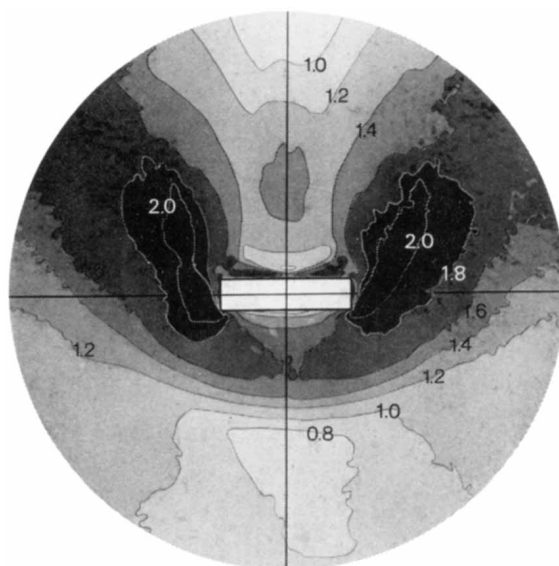


Figuur 3.9 Leeggewaarde gebieden bij een waarde van $\gamma > \gamma_0$

Wanneer nu na elke snelheidsstap (dus voor elke γ -waarde) op hetzelfde negatieve een foto wordt gemaakt, worden de als eerste schoongebazen gebieden het meest belicht. Door de verschillen in "zwarting", die hierdoor ontstaan, worden gebieden kaart gebracht waardoor geldt dat de γ -waarde tussen twee opeenvolgende γ -waarden is gelegen. Zie Figuur 3.10.

Met betrekking tot de korrelerosiemethode kunnen nog een aantal opmerkingen worden gemaakt:

- het wegblazen van de zandlaag blijkt sterk te worden beïnvloed door de grootste van de vlaagsnelheid op loophoogte. In gebieden met grote turbulentie, zoals deze nu juist in de gebouwde omgeving voorkomen, blijkt deze koppeling echter minder sterk te zijn en geeft deze methode een te ongunstig beeld [10]. De waarde, die aan de verkregen resultaten kan worden toegekend, is dat die schoongebazen gebieden een indruk geven van de gebieden, waarin een kritische waarde van de vlaagsnelheid wordt overschreden.
- deze methode geeft geen informatie over de grootte van de gemiddelde snelheden. Dit is een nadeel omdat nu juist uit windonderzoek is gebleken dat gebieden met grote windhinder grote gemiddelde snelheden worden gemeten [9]. In verband hiermee is het in het algemeen dan ook moeilijk om per windrichting voor een willekeurig punt in de gebouwde omgeving aan te geven in welke mate hier nu sprake is van klimaatverbetering of – verslechtering.
- duidelijk zal zijn dat deze methode zich niet leent voor gevallen waarin het maaiveld niet horizontaal ligt of niet vlak is.
- de richting van de snelheden is onbekend. Deze informatie kan echter vlot worden verkregen met behulp van de reeds genoemde "oliefilmtechniek".
- de methode leent zich niet voor automatische verwerking met behulp van een computer en is daardoor tijdrovend.
- een voordeel van deze methode is het sterk visuele karakter ervan.
- als tweede voordeel kan worden genoemd dat niet in enkele punten, maar over het gehele horizontale vlak, informatie wordt verkregen over de grootte van de (vlaag)snelheden.



$20 \times 80 \times 100 \text{ m}$

Figuur 3.10 Gebieden waarvan de γ -waarden tussen twee opeenvolgende waarden is gelegen

4. Windklimaat in de bebouwde omgeving

Aan de hand van de vele windtunnelproeven, die in de loop der jaren zijn verricht, is duidelijk geworden waarom hoogbouw het ontstaan van veelal grote gebieden met ernstige windhinder tot gevolg kan hebben.

Bovendien is gebleken dat enkele gangbare gebouw- en verkavelingvormen nagenoeg altijd met windhinder gepaard gaan.

In dit hoofdstuk zal hier nader op worden ingegaan en zal bovendien nog één en ander worden gezegd over de verschillen tussen elke – voor het windklimaat karakteristieke – grootheden in de gebouwde omgeving enerzijds en in het vrije veld anderzijds.

4.1. Windhinder rondom alleenstaande hoogbouw

Het stromingsbeeld dat rondom hoge, rechthoekige gebouwmassa's ontstaat bij loodrechte inval van de aanstromende wind op een van de lange gevels blijkt te worden beheerst door twee druksystemen.

Het eerste druksysteem ontstaat op de gevel, die direct door de ongestoorde wind tot aan het zogenaamde “stuwpunt” S geleidelijk toenemen. Punt S blijkt te liggen op een hoogte, die overeenkomt met 70 à 80% van de gebouwhoogte. Zie Figuur 4.1a.

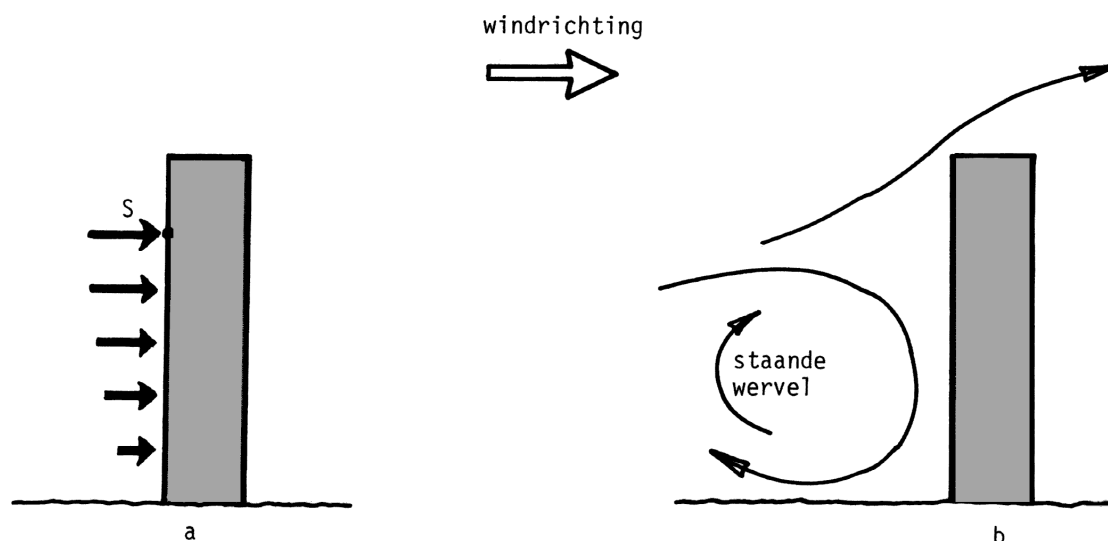
Hierdoor wordt het ombuigen in neerwaartse richting van de aankomende luchtstroming verklaard. Zie Figuur 4.1b.

Bij grote gebouwhoogten ontstaat in het algemeen tengevolge van deze neerwaartse stroming aan de voet van de gevel een “staande wervel”, die tengevolge van de hoge optredende luchtsnelheden op loophoogte windhinder veroorzaakt. De stromingsrichting in dit hindergebied is dus tegengesteld aan de windrichting in het vrije veld. Zie nogmaals Figuur 4.1b.

Gebleken is dat de maximale waarde van de snelheid in dit gebied min of meer recht evenredig is met de waarde van de ongestoorde windsnelheid op gebouwhoogte.

Toename van de gebouwhoogte het dan ook een toenemende windhinder tot gevolg.

Het tweede druksysteem wordt gevormd door het reeds genoemde gebied met overdruk aan de loefzijde van het gebouw en door een gebied met onderdruk aan de lijzijde, het zogenaamde “zogebied”. Zie Figuur 4.2.

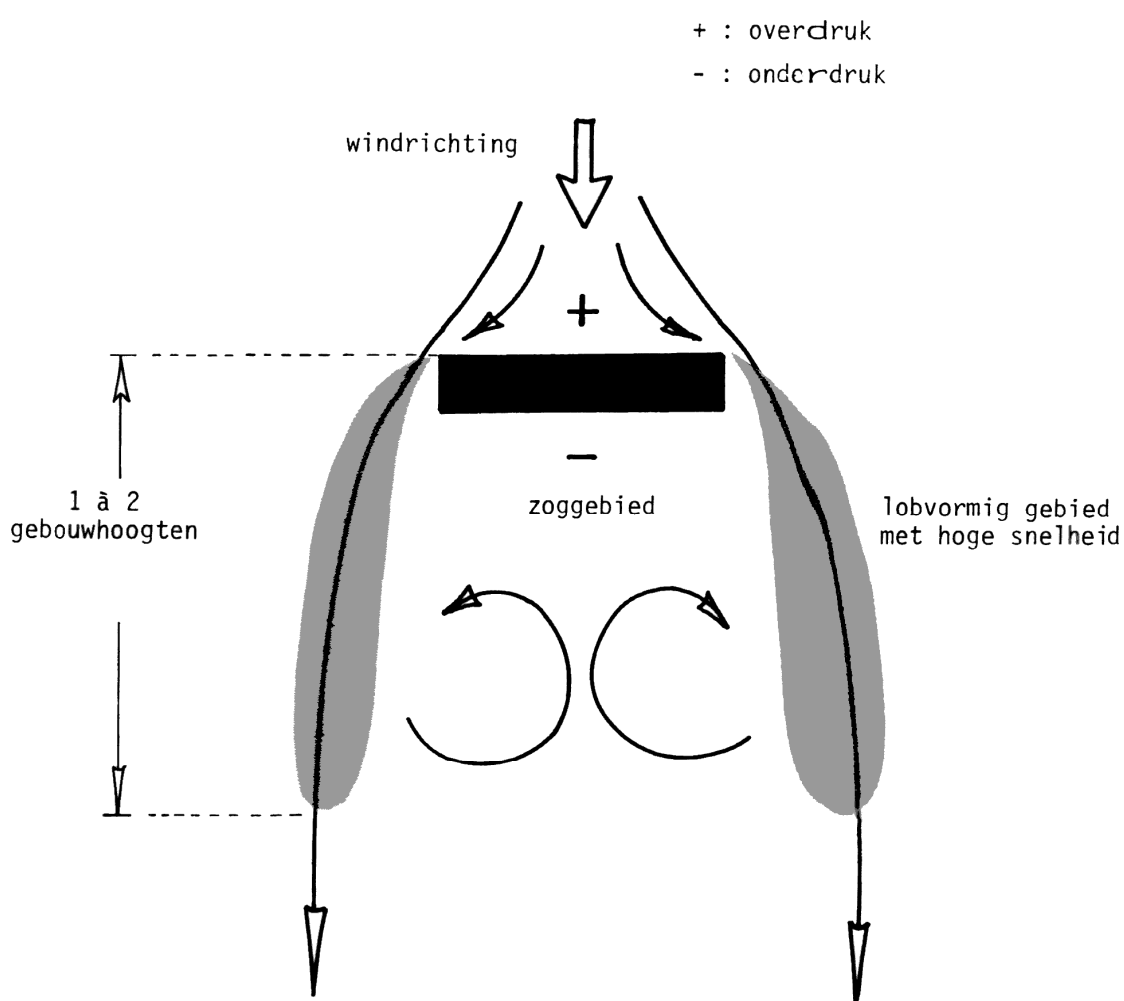


Figuur 4.1 Overdrukken en lichtstroming respectievelijk op en voor de gevel aan de loefzijde

Deze onderdruk wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de hoge snelheden, die direct na het passeren van het gebouw optreden in de over het gebouw heen slaande luchtstroming. Zie Figuur 4.3 en appendix G.

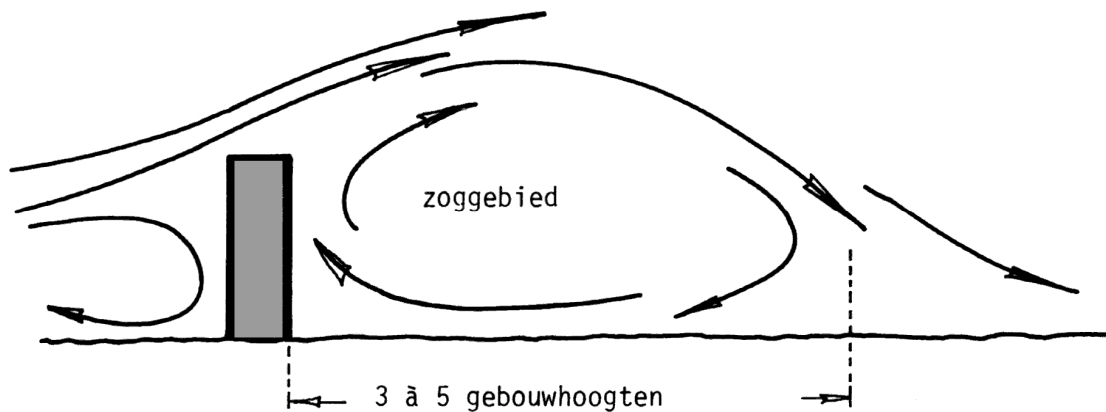
Omdat bij de toenemende gebouwhoogte deze snelheden zullen toenemen, zal de onderdruk in het zoggebied eveneens groter worden.

Tengevolge van het drukverschil tussen loef- en lijzijden ontstaat om de gebouwhoeken heen een sterke luchtstroming. De hierin optredende hoge tot zeer hoge snelheden komen voor in langgerekte, lobvormige gebieden die zich over een afstand van 1 à 2 gebouwen in de richting van de wind uitstrekken. Zie Figuur 4.2. Bij toenemende gebouwhoogten – en dus bij toenemende onderdruk – zullen deze snelheden worden vergroot en zal het windklimaat dus verslechteren. Gebleken is dat de maximale waarde van de snelheid in deze hindergebieden ligt tussen de 90 à 100% van de waarde van de ongestoorde windsnelheid op gebouwhoogte. De lengte van deze gebieden met maximale luchtsnelheden varieert – afhankelijk van de gebouwhoogte – van 25 tot 40 m, hetgeen overeenkomt met een oppervlak van respectievelijk 500 tot 1000 m² [12].



Figuur 4.2 Gebieden met over- en onderdruk en met hoge luchtsnelheden rondom hoge gebouwmassa's

De luchtmassa in het zoggebied wordt over de over het gebouw heen slaande luchtstroming “aangedreven”, waardoor over een afstand gelijk aan 3 à 5 gebouwhoogten op loophoogte een terugstroomgebied ontstaat. Zie Figuur 4.3. De snelheden in dit gebied zijn zodanig dat zij in het algemeen geen aanleiding geven tot windhinder.



Figuur 4.3 Luchtstroming boven en achter hoge gebouwmassa's

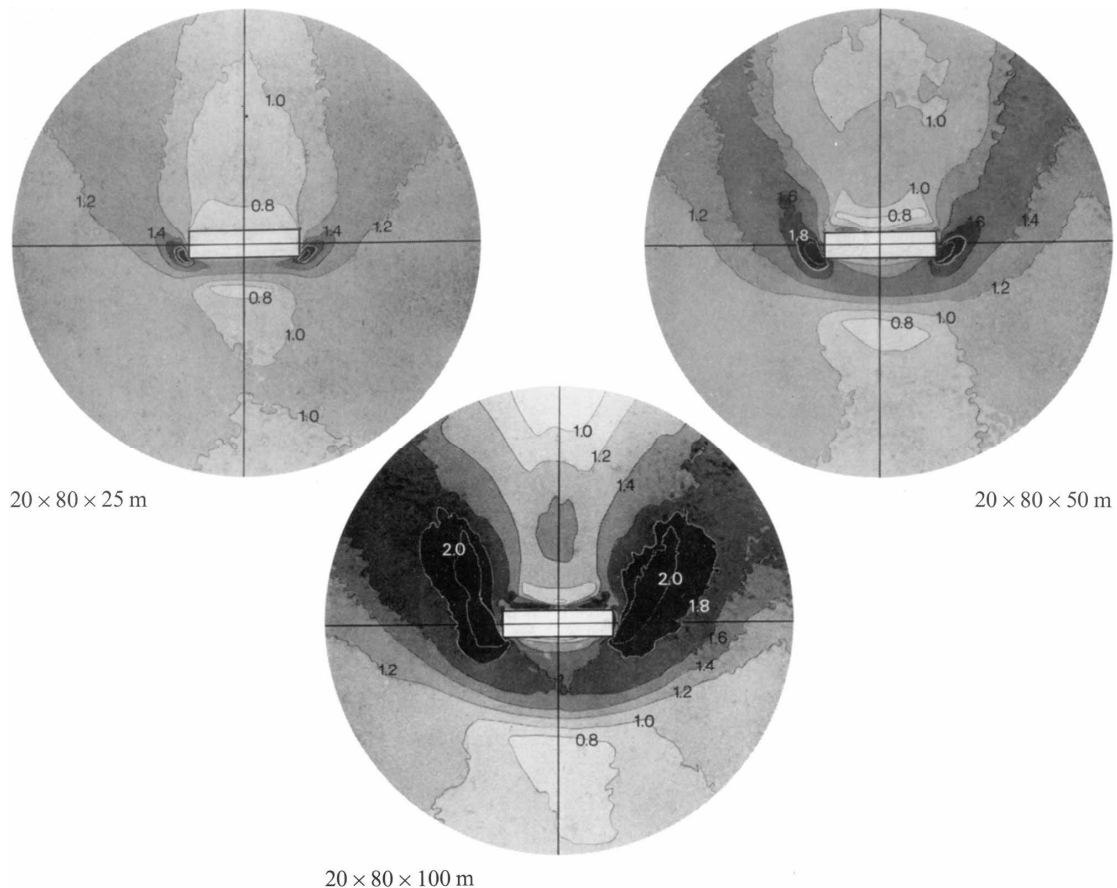
Het windklimaat zoals dit bij hoogbouw in en nabij onderdoorgangen blijkt te heersen, kan nu eenvoudig worden verklaard met behulp van hetgeen zojuist is besproken.

Opgemerkt is dat de onderdruk in het zoggebied in hoofdzaak wordt veroorzaakt door de over het gebouw heen slaande luchtstroming en dat deze toeneemt bij toenemende gebouwhoogte. Het aanbrengen van een onderdoorgang heeft dan ook geen enkele invloed op de grootte van de onderdruk, hetgeen betekent dat over de uiteinden van de onderdoorgang een drukverschil bestaat dat overeenkomt met het drukverschil op loophoogte tussen loef- en lijzijde van dit gebouw, maar dan zonder onderdoorgang.

Het is dan ook niet verwonderlijk, dat dit drukverschil, dat rond gebouwhoeken grote luchtsnelheden tot gevolg heeft, in onderdoorgangen eveneens grote snelheden veroorzaakt. Het gevolg is dat het windklimaat in onderdoorgangen bij hoogbouw nagenoeg altijd zeer slecht is. De hoge snelheden, die in een onderdoorgang optreden, treden ook op in een gebied dat zich tenminste over een afstand van 1 à 2 tunnelhoogten 'benedenstrooms' van de onderdoorgang uitstrekt.

Als afsluiting van deze – in hoofdzaak kwalitatieve – beschrijving van stromingsbeeld en bijbehorende windklimaat, worden nog enkele opmerkingen gemaakt:

- wanneer de lange gevel van een hoog gebouw niet loodrecht door de aanstromende wind wordt getroffen, zal in het algemeen bij toenemende invalshoek het windhindergebied, dat aan de voet van het gebouw door de staande wervel wordt veroorzaakt, in omvang afnemen en uiteindelijk geheel verdwijnen. Ook vorm en afmetingen van de lobvormige gebieden bij de gebouwhoeken variëren bij veranderende invalshoek. De waarde van de maximale gemiddelde snelheid in deze gebieden blijft echter ruwweg schommelen rond de waarde, die bij loodrechte inval wordt gevonden. [15]. De mate van windhinder is bij gegeven gebouwvorm sterk afhankelijk van de gebouwafmetingen. In Figuur 4.4 wordt dit geïllustreerd aan de hand van resultaten zoals deze zijn verkregen met behulp van de korrelerosiemethode.
- Ook bij andere gebouwvormen dan de hier besproken rechthoekige gebouwmassa's zullen rond de gebouwhoeken lobvormige windhindergebieden optreden. De staande wervel zal echter niet in alle gevallen ontstaan, bijvoorbeeld bij cilindervormige en smalle gebouwmassa's. Vorm en afmetingen van de hindergebieden zullen ook nu per gebouwvorm sterk kunnen variëren.
- de hier beschreven druksystemen met bijbehorende hindergebieden treden bij alleenstaande hoogbouw pas op bij gebouwhoogten boven de 15 m.
- Ook het windklimaat in een nabij doorgangen tussen hoge gebouwen is slecht en is nauwelijks beter dan in onderdoorgangen.



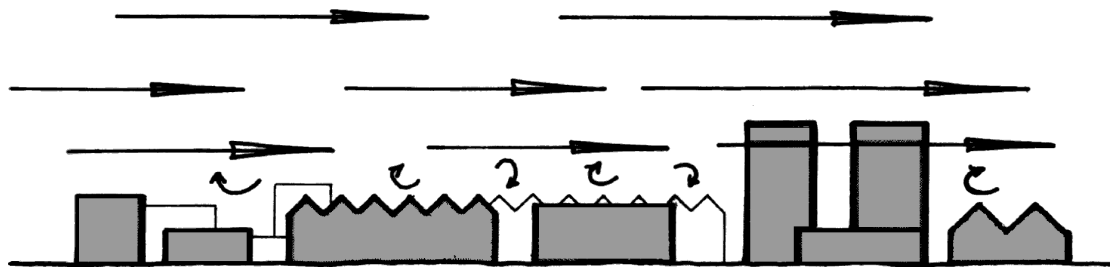
Figuur 4.4 Invloed gebouwhoogte op de mate van windhinder [10]

4.2. Windhinder rondom enkele veel toegepaste gebouw- en verkavelingsvormen

Voor een aantal gebouw- en verkavelingsvormen zal worden aangegeven onder welke voorwaarden windhinder in de omgeving ervan zal ontstaan. Om de mate van windhinder te illustreren zal in de diverse hindergebieden de maximale waarde worden vermeld van de “versterkingsfactor” c_i , zoals dezen aan de hand van zeer vele windtunnelproeven zijn gevonden. Hieronder wordt het in hoofdstuk 3 genoemde verhoudingsgetal verstaan dat wordt gevonden wanneer zowel $\bar{v}_i$ als $\bar{v}_R$ op loophoogte gelden. Voor een goed begrip van de betekenis van deze c_i -waarden wordt met nadruk verwezen naar 4.4 (eerste voorbeeld). Opgemerkt wordt alvast dat in 4.3 nader word ingegaan op de conclusie, die aan de hand van een gegeven c_i -waarde ten aanzien van het windklimaat kan worden getrokken. Het zal duidelijk zijn dat de voor c_i gevonden waarden in het algemeen zullen toenemen bij toenemende gebouwhoogte en daardoor per situatie zullen verschillen. De aan de hand van deze waarden te signaleren tendensen zijn echter algemeen.

Hoogbouw te midden van laagbouw

Gebleken is dat plaatsing van hoge gebouwmassa's te midden van omringende laagbouw niet in alle gevallen de windhinder veroorzaakt, die ontstaat bij plaatsing van deze gebouwmassa's in het vrije veld. Dit heeft te maken met het feit dat de aankomende luchtstroming voor de “bovenstrooms” aanwezige laagbouw omhoog wordt “getild” waardoor het gedeelte van de hoogbouw dat door de ongestoorde wind wordt getroffen te klein is om een sterke, naar beneden gerichte luchtstroom te doen ontstaan. Zie Figuur 4.5.



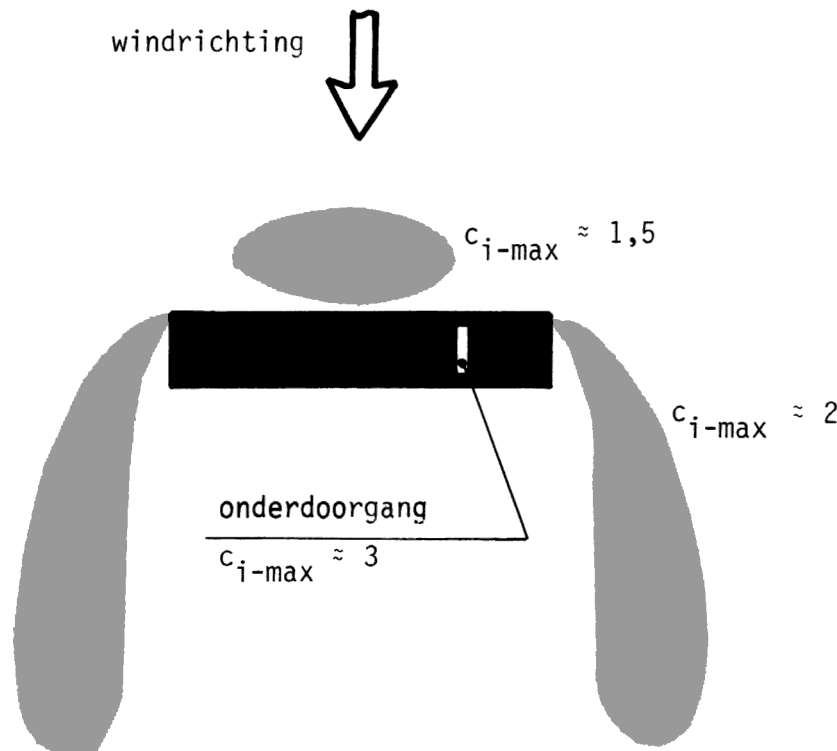
Figuur 4.5 Hoogbouw, waarbij tengevolge van de omringende laagbouw geen windhinder ontstaat

Wanneer de hoogte van de hoogbouw en de omringende laagbouw wordt aangeduid door middel van respectievelijk H en h dan blijkt dat er in het algemeen geen sprake zal zijn van windhinder als $H \leq 2h$. Voor de versterkingsfactor c_i , die zoals gezegd betrekking heeft op snelheden op loophoogte in het vrije veld en in de gebouwde omgeving, geldt nagenoeg altijd $c_i \leq 1$. In die gevallen, waarin de hoogbouw voor meer dan de helft van zijn hoogte – en over tenminste 15m – uitsteekt boven de laagbouw, ontstaat dezelfde windhindergebieden als bij alleenstaande hoogbouw. In Figuur 4.6 zijn waarden vermeld, die bij windtunnelproeven zijn gevonden voor het geval waarin $H = 4h$. Zie [11].

Uit bovenstaande volgt dat de windhinder rondom een gebouw in het vrije veld met een hoogte van 20m veel groter kan zijn dan rondom een gebouw van bijvoorbeeld 60m hoogte in een stadcentrum.

Naar aanleiding van resultaten, zoals deze door middel van diverse windtunnelonderzoeken zijn gevonden, kunnen nog enkele belangrijke opmerkingen worden gemaakt:

- de aanwezigheid van grote pleinen rondom één of meerdere hoge gebouwmassa's kan ook in gevallen, waarin geldt dat $H < 2h$, aanleiding geven tot ernstige windhinder.



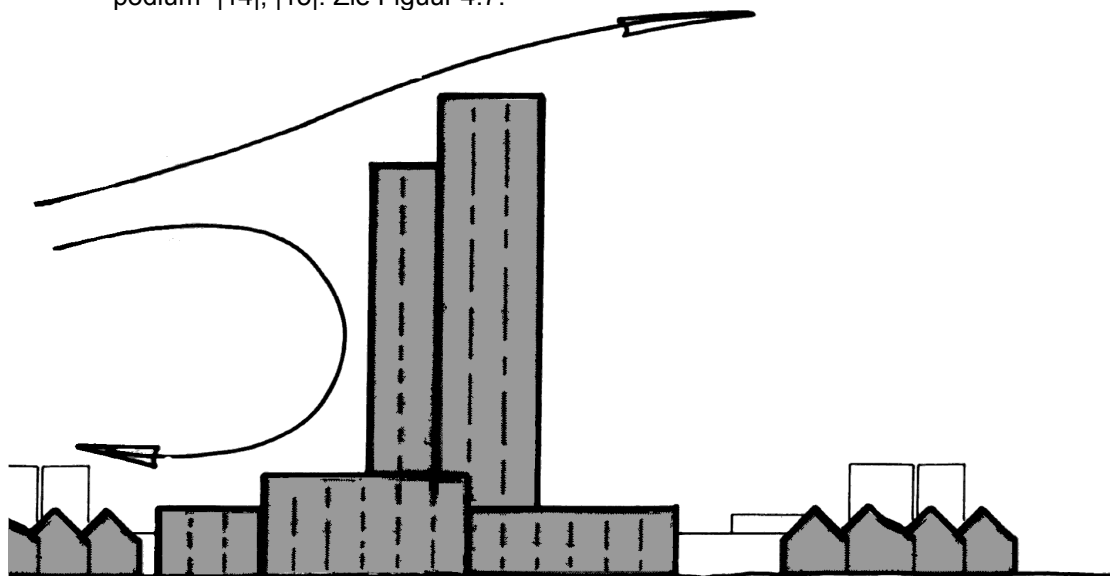
Figuur 4.6 Maximale c_i -waarden in de diverse hindergebieden

- Uit windtunnelproeven aan 10 hoogbouwconfiguraties met gebouwhoogten, variërend van 100 tot 400 m, is gebleken dat de hoogste gemiddelde lichtsnelheden

voorkomen in onderdoorgangen, doorgangen tussen gebouwen en in andere zones met een sterk geleide luchtstroming (bijvoorbeeld de lobvormige gebieden) [11]. Deze snelheden zijn ruwweg twee maal zo hoog als de hoogste waarden die optreden in de overige, rondom de hoogbouw gelegen gebieden.

Zie nogmaals de in Figuur 4.6 geven waarden. Ook bij “hoogbouw op poten” treden deze hoge snelheden op.

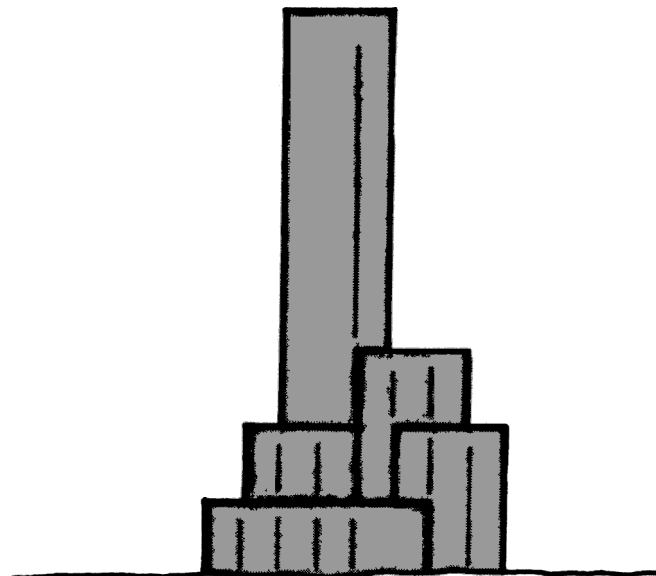
- Bij hoge gebouwmassa's van bijzondere afmetingen of vorm of bij hoogbouw te midden van ingewikkelde stedenbouwkundige structuren is een windtunnelproef altijd noodzakelijk.
Zo is voor de maximale waarde van de versterkingsfactor rondom twee zeer hoge gebouwen gevonden $c_f = 5$. Op pleinen rondom hoogbouw is ooit gevonden $c_f = 4$. [11].
- De hinder aan de voet van hoogbouw tengevolge van de staande wervel kan door “bovenstreams” gelegen hoogbouw, die evenwijdig loopt aan de hoogbouw, aanzienlijk worden versterkt. Zie bijvoorbeeld [9] en [11].
- Het windklimaat in ondergrondgangen blijkt nagenoeg onafhankelijk te zijn van vorm en afmetingen van de doorsneden ervan. Hetzelfde geldt voor de keuze ten aanzien van de positie van de onderdoorgang in de gebouwmassa. Het gevolg is dan ook dat verbetering van het windklimaat in onderdoorgangen niet goed mogelijk is [13]. Opgemerkt wordt nog dat door plaatsing van dichte (glazen) schermen over nagenoeg de gehele breedte van de onderdoorgang een aanzienlijke snelheidsreductie kan worden verkregen. Het is dan echter wel de vraag of in zo'n situatie nog van een onderdoorgang kan worden gesproken.
- Uit windtunnelonderzoek is gebleken dat de snelheden, die optreden in onderdoorgangen, ongeveer gelijk zijn aan 1,2-maal de snelheid, die boven de bovenstreams gelegen laagbouw voorkomt op gebouwhoogte [15].
- De windhinder, die ontstaat tengevolge van de neerwaartse luchtstroming langs een gevel aan loefzijde, kan door middel van ingrijpende, kostbare maatregelen worden verminderd.
Als eerste maatregel kan worden genoemd het plaatsen van de hoogbouw op een “podium” [14], [15]. Zie Figuur 4.7.



Figuur 4.7 Hoogbouw op “podium” temidden van laagbouw

De tweede, soortgelijke maatregel, is het plaatsen van een overkappingsconstructie rondom de voet van de hoogbouw.

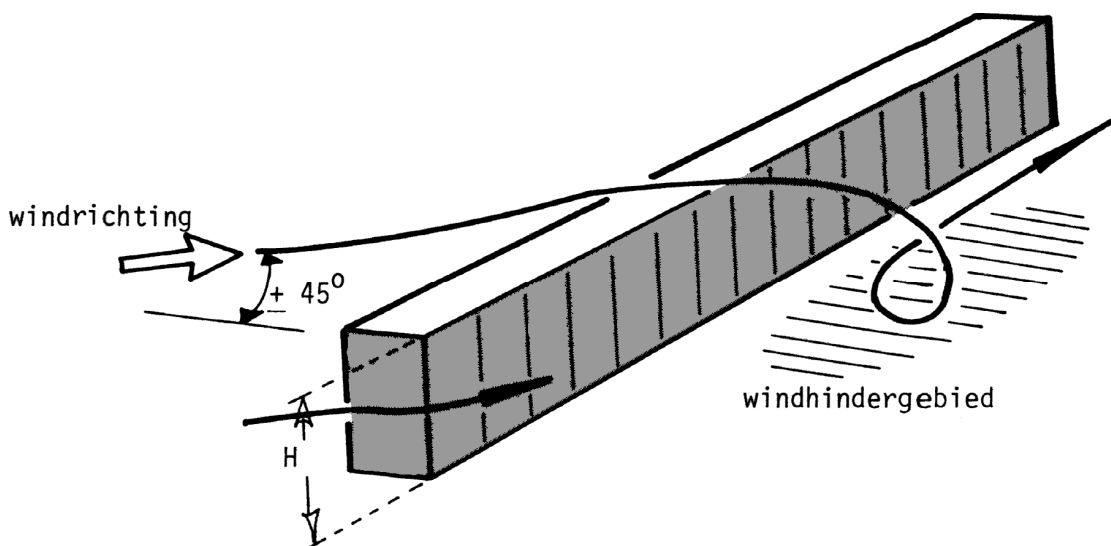
Voor het windklimaat rondom de omringende laagbouw is het raadzaam de afstand tussen bijvoorbeeld het podium en de laagbouw klein te houden (ongeveer gelijk aan halve podiumhoogte [14]).



Figuur 4.8 “Versmallen” van hoogbouw

Drempelvormige gebouwmassa's

Onder bepaalde voorwaarden kunnen langgerekte, relatief smalle gebouwmassa's aanleiding geven tot windhinder [16]. Deze hinder ontstaat doordat de onder een hoek van 45° aanstromende wind over het gebouw heen slaat en in het middengebied aan lijzijde windhinder veroorzaakt. Zie Figuur 4.9.



Figuur 4.9 Drempelvormige gebouwmassa met bijbehorende windhindergebied

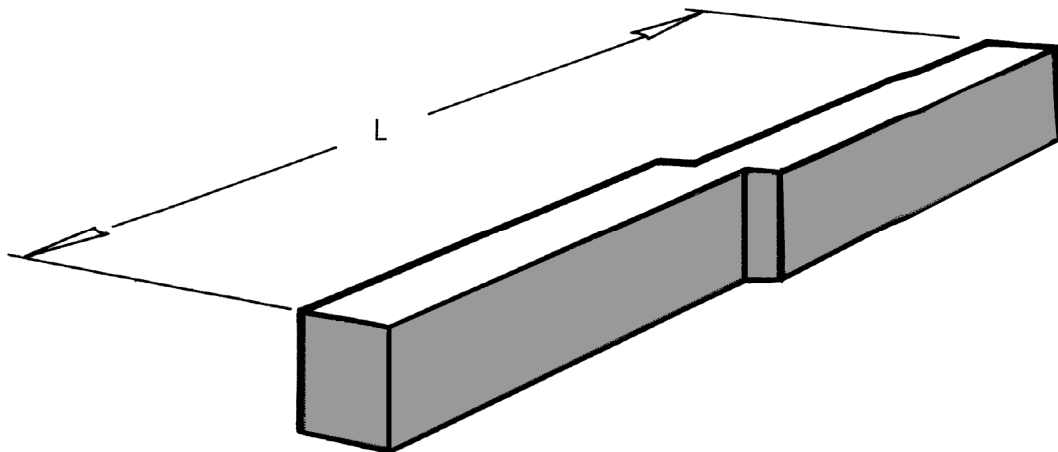
De voorwaarden waaraan de gebouwfafmetingen moeten voldoen om dit effect mogelijk te maken, zijn:

- $15\text{m} < H < 25\text{m}$. Bij ‘drempelhoogten” boven de 25m raakt de overslaande wervel namelijk de grond niet meer.
- $H > h$ Een uitzondering hierop ontstaat wanneer de bovenstrooms gelegen laagbouw eveneens bestaat uit een drempel met hoogte h , die evenwijdig loopt aan de hier bekeken drempel met hoogte H .

Verder geldt dat het drempелеffect in mindere mate optreedt wanneer de hoogte van de bovenstrooms gelegen laagbouw erg klein ($h < \frac{H}{2}$) is ten opzichte van de drempelhoogte.

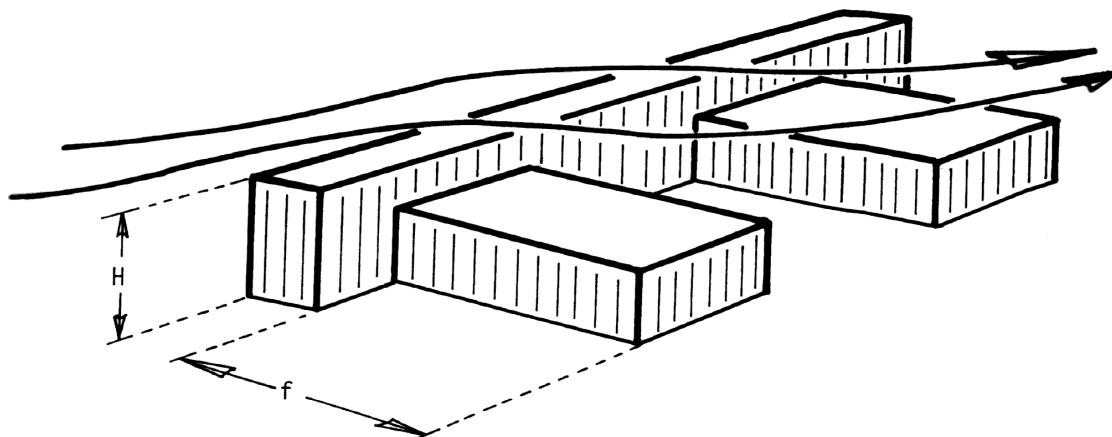
- $L > 8H$. In Figuur 4.10 is aangegeven wat onder de gebouwlengte L moet worden verstaan.

Gebleken is dat het hindergebied zich uitstrekt tot op een afstand van maximaal twee gebouwhoogten vanaf de gevel aan lijzijde. De maximale waarde van de versterkingsfactor, die hier wordt gemeten, bedraagt $c_i = 1,3$ à $1,4$.



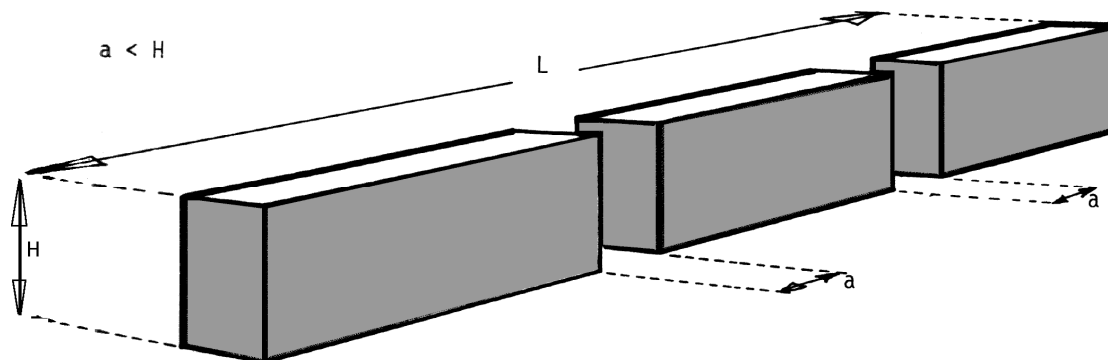
Figuur 4.10 Drempellengte L

Het “drempелеffect” zoals hier is beschreven, kan te niet worden gedaan door loodrecht op de “drempel” gebouwmassa’s te plaatsen, zoals in Figuur 4.11 is aangegeven. Voorwaarde is dat geldt $f > 2H$.



Figuur 4.11 Mogelijkheid om drempелеffect teniet te doen

Opgemerkt wordt nog dat wanneer twee rechthoekige gebouwmassa’s, waarvoor geldt dat $L < 8H$, op een afstand kleiner dan H in elkaars verlengde zijn gelegen, het drempелеffect wél optreedt. Zie Figuur 4.12.



Figuur 4.12 Drempeleffect bij in elkaars verlengde liggende gebouwmassa's, waarvan voor de totale lengte geldt: $L > 8 H$

Evenwijdige, ten opzichte van elkaar versprongen liggende gebouwmassa's

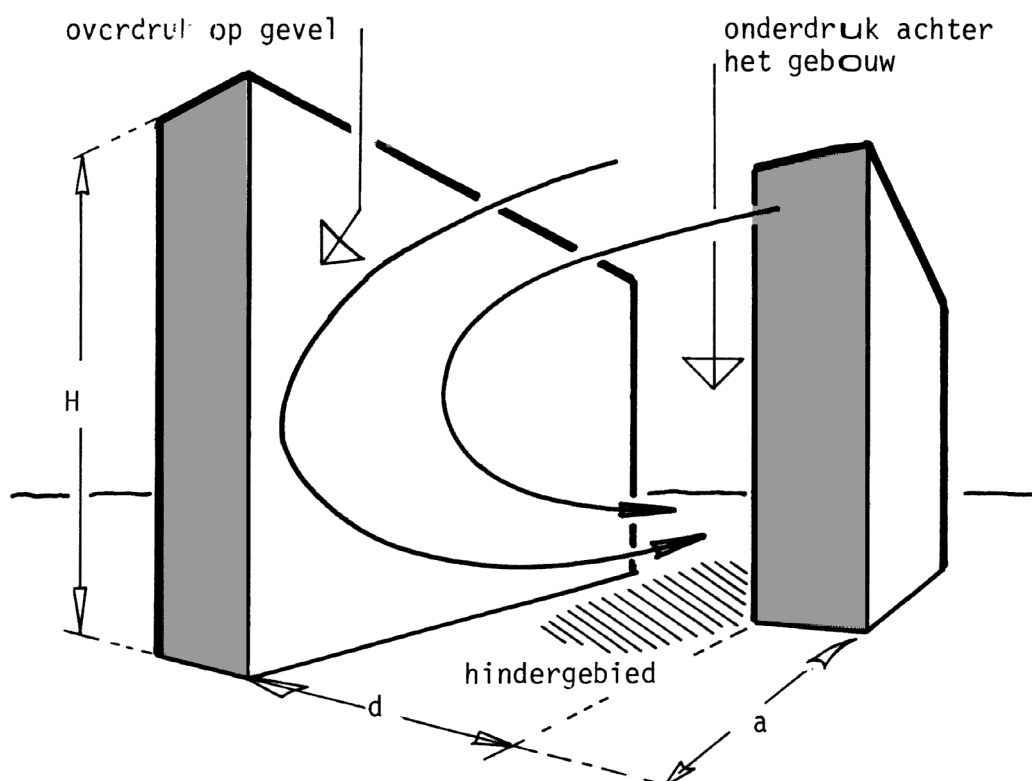
Wanneer in de situatie, zoals geschetst in Figuur 4.13, de lange gevels door de direct aanstromende wind worden getroffen, kan tussen de evenwijdig lopende gebouwmassa's een tot windhinder aanleiding gevende luchtstroming ontstaan.

Deze stroming ontstaat ook nu door de eerder besproken over- en onderdruk respectievelijk aan loef- en lijzijde van een gebouw.

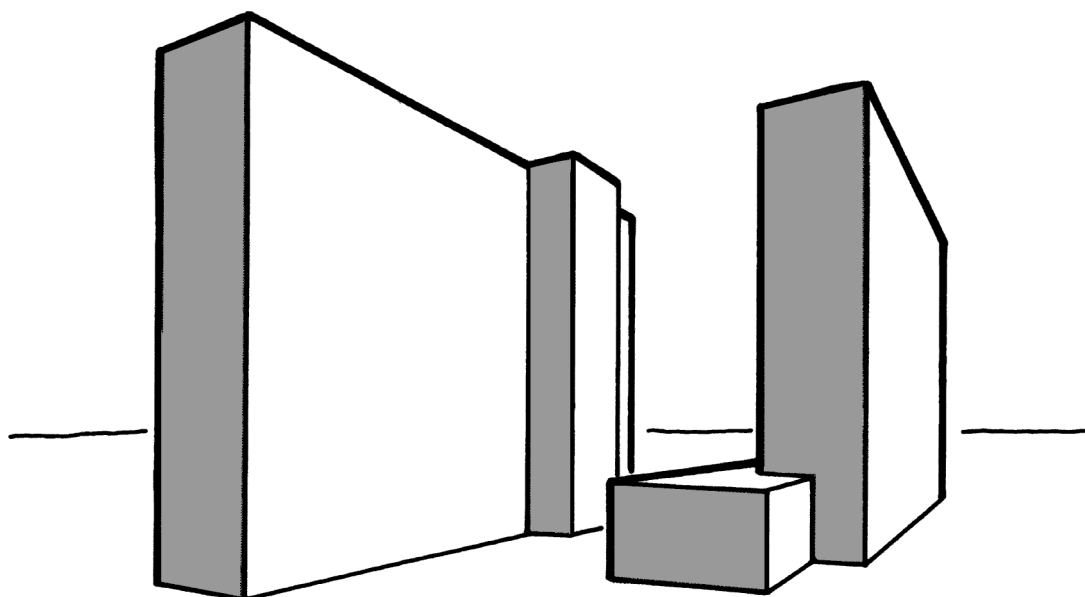
Voorwaarde voor het ontstaan van deze luchtstroming is dat $d \leq H$ en $a \geq H$ [16].

In het hindergebied, dat in Figuur 4.13 gearceerd is aangegeven, worden versterkingsfactoren gevonden van $c_f = 1,2$ voor $H = 15\text{m}$ en $c_f = 1,3$ à $1,6$ voor $H = 35\text{m}$.

Deze stroming kan worden gereduceerd door het aanbrengen van "obstakels", bijvoorbeeld in de vorm van "uitstulpende" gebouwmassa's die de luchtstroming bemoeilijken. Zie Figuur 4.14.



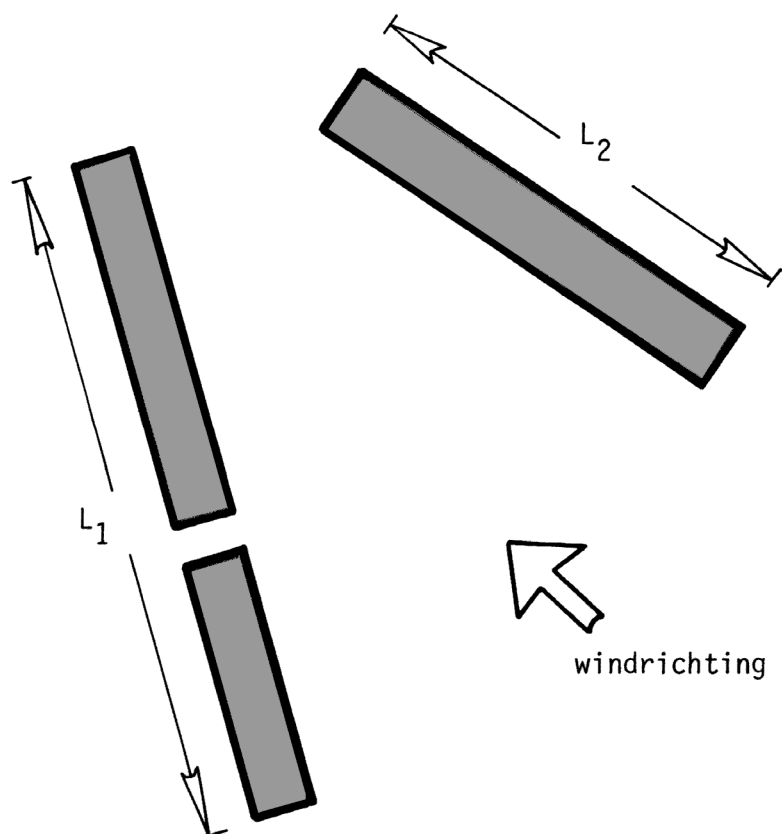
Figuur 4.13 Windhinder bij evenwijdige, versprongen, liggende gebouwmassa's



Figuur 4.14 Reduceren van de windhinder door toevoeging van “uitstulpende” gebouwmassa’s

Lange, niet evenwijdig lopende gebouwmassa’s

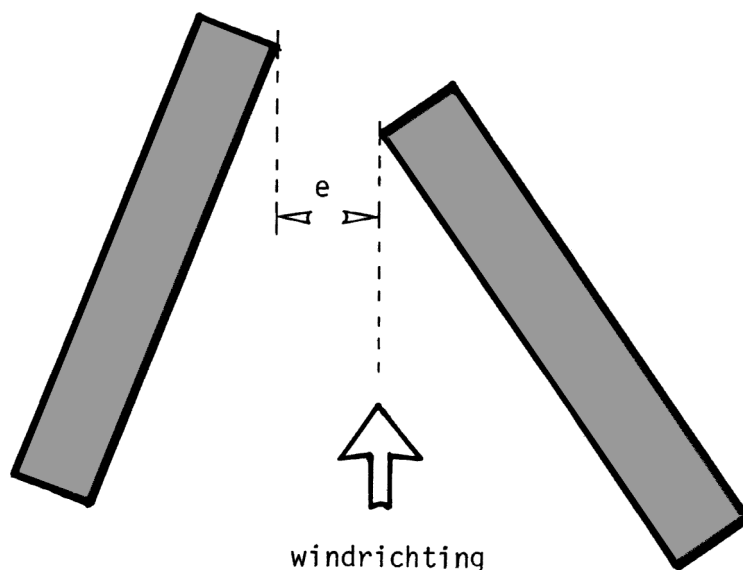
Wanneer de wind waait in de richting zoals in Figuur 4.15 aangegeven, kan ter plaatse van de nauwe doorgang een versterking van de luchtstroming ontstaan, die windhinder tot gevolg heeft.



Figuur 4.15 Lange, niet evenwijdig lopende gebouwmassa’s

Voorwaarde voor het ontstaan van dit, als “Venturi-effect” bekend staande verschijnsel zijn:

- $H > 15\text{m}$. Als $H < 15\text{m}$ dan gaat de luchtstroming niet dóór, maar óver de nauwe doorgang heen
- $L_1 + L_2 > 100\text{m}$
- Windrichting ongeveer volgens de bissectrice van de scherpe hoek, die de gebouwmassa's met elkaar maken
- Het boven- en benedenstrooms gebied moeten onbebouwd (open) zijn over een oppervlak dat overeenkomt met het tussen de gebouwmassa's gelegen oppervlak.
- De effectieve breedte van de opening moet voldoen aan $\frac{H}{2} < e < 4H$.
Zie Figuur 4.16.



Figuur 4.16 “Effectieve breedte”

De grootste waarden voor de versterkingsfactoren worden gevonden bij een effectieve breedte van 2 à $3H$. Gevonden is $c_i \approx 1,3$ voor $H = 25\text{m}$ en $c_i \approx 1,6$ voor $H = 45\text{m}$ [16].

Het windklimaat ter plaatse van de nauwe doorgang kan worden verbeterd door de lange gebouwmassa's te voorzien van openingen met een breedte groter dan de gebouwhoogte. Voorkomen moet worden dat de overheersende windrichting samenvalt met de richting van de eerder genoemde bissectrice.

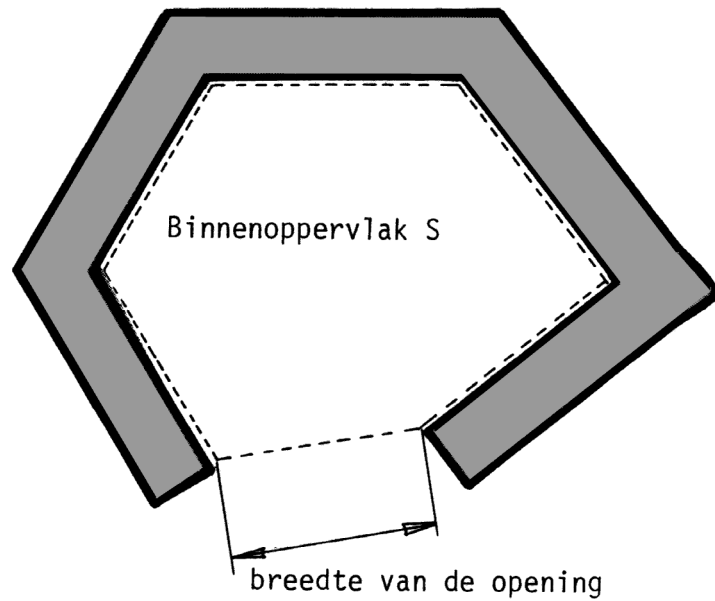
Celvormige structuren

Deze structuren ontstaan wanneer gebouwmassa's – waarvan de hoogte groter is dan de dikte – zodanig worden geplaatst dat zij een nagenoeg gesloten kring vormen, waardoor tussen de gebouwmassa's in celvormige ruimten ontstaan. Min of meer arbitrair wordt gesteld dat er van celvormige structuren sprake is zolang de breedte van de opening kleiner is dan 25% van de omtrek van de binnenruimte [16].

Zie Figuur 4.17.

Gebleken is dat de wind onder bepaalde voorwaarden over de omsloten ruimte heen zal waaien waardoor beschutting – en dus een goed windklimaat – wordt verkregen.

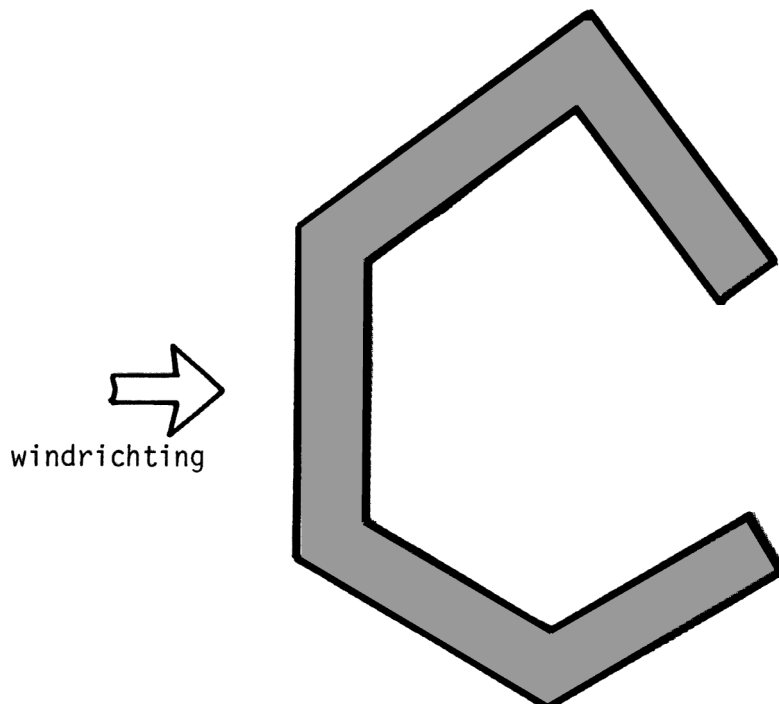
Allereerst kan worden opgemerkt dat alleen voor gebouwhoogten boven de 15m beschutting op kan treden. Vervolgens dat het van de verhouding tussen de grootte van het omsloten binnenoppervlak S en het kwadraat van de gemiddelde gebouwhoogte $\bar{H}$ afhangt of – en zo ja in welke mate – dit gebeurt.



Figuur 4.17 Celvormige structuren

De volgende richtlijnen zijn te geven:

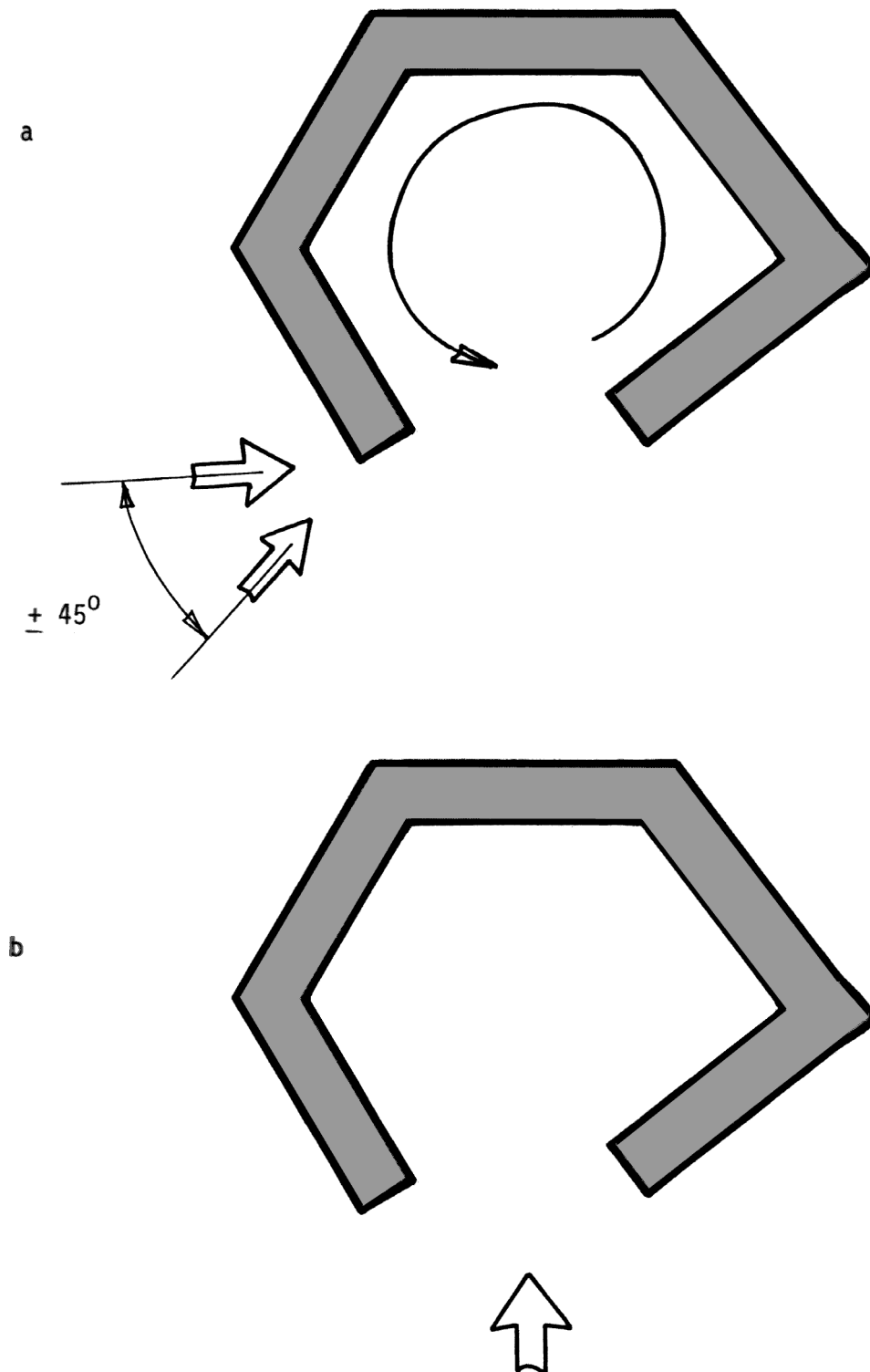
- als geldt dat $\frac{S}{H^2} < 10$, dan geldt voor gebouwhoogten tussen de 15 en 25m dat, ongeacht de richting van de wind, de versterkingsfactoren liggen tussen ongeveer 0,4 en 0,8. Er is dan altijd sprake van beschutting.
- voor gebouwhoogten boven de 30m geldt dat de windrichting sterk van invloed is. Wanneer de opening aan de lijzijde is gelegen dan geldt voor $\frac{S}{H^2} < 30$ dat de versterkingsfactor $c_i \leq 0,5$. Zie Figuur 4.18.



Figuur 4.18 Celvormige gebouwmassa met opening aan de lijzijde

Voor windrichtingen, die liggen binnen de in Figuur 4.19a getekende sector, geldt dat bij een verhouding $\frac{S}{H^2} < 20$ de versterkingsfactor ligt tussen $0,7 < c_i < 1,1$.

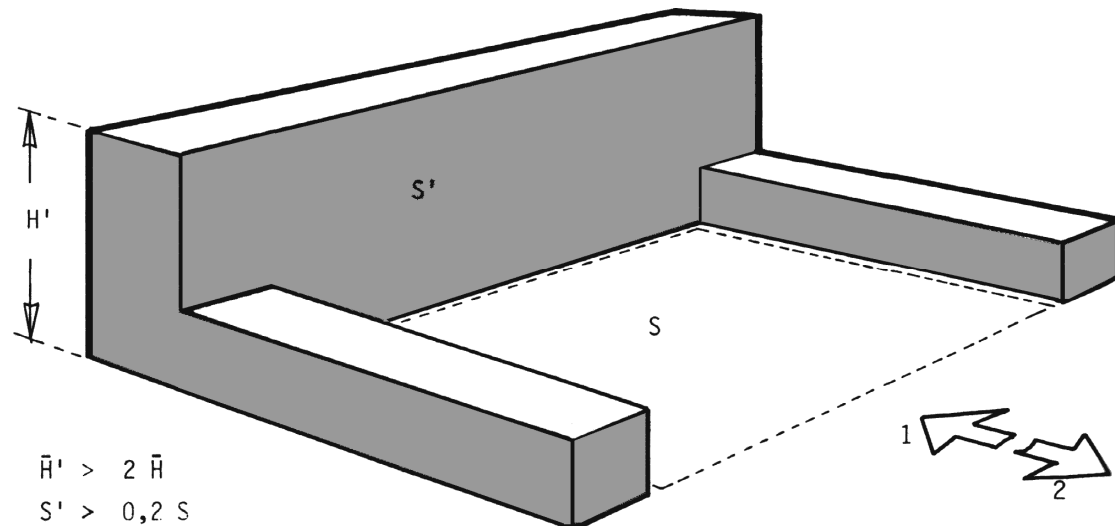
Wanneer de opening evenwijdig loopt met de windrichting dan geldt voor $\frac{S}{H^2} < 20$ altijd dat $c_i \leq 1$.



Figuur 4.19 Celvormige gebouwmassa's waarvan de "opening" onder diverse richtingen wordt aangeblazen

Bij loodrechte aanstroming van de opening geldt – wanneer $\frac{S}{H^2} < 20$ – voor 75% van het binnenoppervlak dat $c_i < 0,8$. In het gebied direct achter de opening treedt namelijk géén verbetering op. Zie Figuur 4.19b.

In figuur 4.20 is voor enkele bijzondere “cellen” aangegeven onder welke voorwaarden beschutting kan worden verkregen.



Figuur 4.20 Bijzondere, celvormige gebouwmassa met beschut binnengebied

Voor windrichting 1 en 2 wordt voor het ingesloten gebied gevonden dat respectievelijk $c_i \leq 6$ en $c_i \leq 5$.

Opgemerkt wordt nog dat de beschutting, die wordt verkregen:

- het grootst is bij dwarsafmetingen van de open ruimten tussen de 50 à 60m.
- toeneemt bij afnemende waarde van $\frac{S}{H^2}$
- toeneemt wanneer op deze binnenruimten gebouwtjes worden geplaatst met ongeveer dezelfde hoogte als de gebouwen, die de binnenruimte omringen.

Terrasbouw

Hieronder wordt verstaan een zodanige aaneenschakeling van gebouwmassa's dat een piramideachtige vorm wordt verkregen. Zie Figuur 4.21.

De aanstromende wind vorst door een degelijke gebouwvorm “opgetild” waardoor in grote gebieden op loophoogte beschutting wordt verkregen. In deze gebieden is de versterkingsfactor ongeveer $c_i = 0,5$ [16].

Deze waarde geldt ook ongeveer voor de eventueel aanwezige lager gelegen balkons.

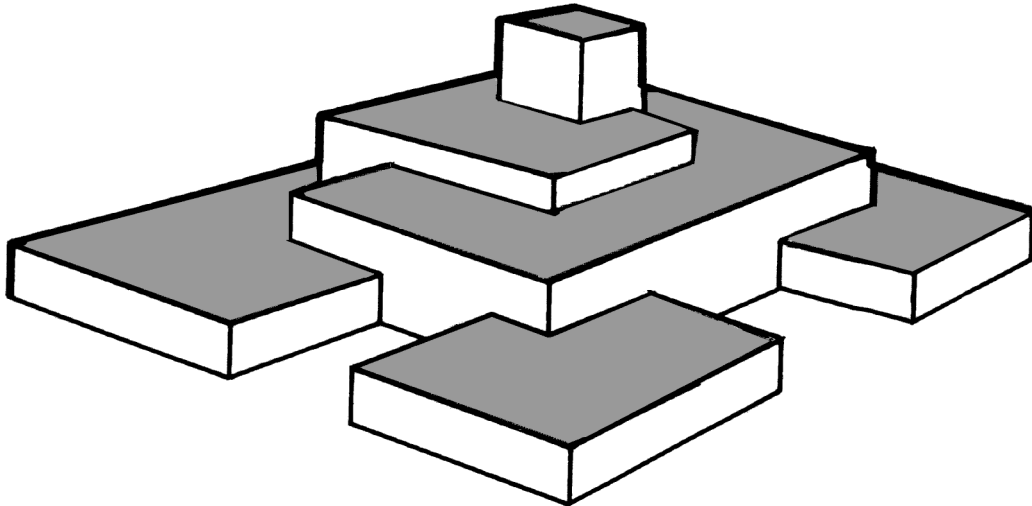
Rond de “hoeken” van de “piramide” ontstaan hindergebieden. Bij een hoogte van 40m is de versterkingsfactor ongeveer $c_i = 1,6$.

Op de terrassen, die hoger dan 25m zijn gelegen, geldt in het algemeen $c_i > 1$.

Deze waarde loopt op tot $c_i = 1,6$ op 50m hoogte.

Bij deze bouwwijze is het raadzaam om:

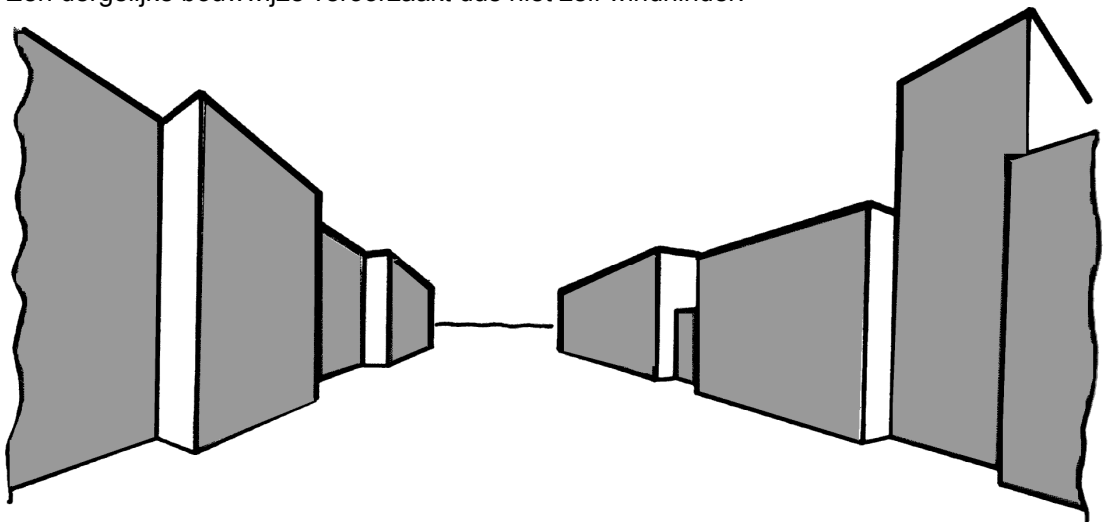
- de verhogingen zoveel mogelijk trapsgewijs tot stand te laten komen.
- ter plaatse van de “hoeken” op geringe hoogte te beginnen (3m) en de hoogte niet te sterk toe te laten nemen.



Figuur 4.21 Terrasbouw

Tot slot van deze paragraaf wordt nog gewezen op het zogenaamde “kanaliseringeffect”. Hieronder wordt het verschijnsel verstaan dat hoge lichtsnelheden, die door elders gelegen gebouwmassa 's zijn veroorzaakt, zich handhaven tussen lange, aaneengesloten rijen gebouwen. Zie Figuur 4.22.

Een dergelijke bouwwijze veroorzaakt dus niet zelf windhinder.



Figuur 4.22 Lange, aaneengesloten gebouwmassa's met mogelijke windhinder tengevolge van het kanaliseringeffect

Dit effect treedt op wanneer de afstand tussen de rijen kleiner is dan $2\bar{H}$ en wanneer $\bar{H} > 6\text{m}$ en kan worden beperkt door het aanbrengen van “gaten”, waardoor het aaneengesloten karakter wordt verstoord, en door plaatsing van kleine gebouwmassa's tegen de lange gebouwrijen [16].

Opgemerkt wordt nog dat voor de in deze paragraaf vermelde, globale c_i –waarden de waarden zijn aangehouden van de in [16] gedefinieerde windhinderparameter:

$$\psi = \frac{\bar{v}_i + \sigma_{v_i}}{\bar{v}_R + \sigma_{v_R}} = c_i \cdot \frac{1 + I_{v_i}}{1 + I_{v_R}}$$

σ_{v_i} = turbulentie in meetpunt i

σ_{v_R} = turbulentie in referentiepunt

I_{v_i} = turbulentie-intensiteit in meetpunt i

I_{v_R} = turbulentie-intensiteit in referentiepunt

Strikt genomen is dit niet juist gezien het verschil in definitie tussen versterkingsfactor en hinderparameter. De verschillen in uitkomsten zullen alleen in gebieden – waar de turbulentie-intensiteit erg verschilt met die in het vrije veld – merkbaar worden. Deze zijn echter uit praktisch oogpunt nauwelijks van betekenis omdat – zoals reeds is opgemerkt – de hier vermelde c_f -waarden globaal zijn.

4.3. Algemene opmerkingen met betrekking tot het windklimaat in de gebouwde omgeving

Invloed van ontwerpbeslissingen

Na lezing van voorgaande paragrafen zal het duidelijk zijn dat het windklimaat in de gebouwde omgeving in sterke mate wordt bepaald door de keuze, die de ontwerper doet ten aanzien van vorm, afmetingen en onderlinge positie van gebouwmassa's.

Verreweg de belangrijkste invloedsfactor van de hier genoemde “ontwerpfactoren” blijkt de gebouwhoogte te zijn. Zowel de mate van windhinder als de omvang van de hindergebieden neemt toe bij toenemende gebouwhoogte (of toenemend hoogteverschil tussen hoog- en laagbouw).

Omdat de maximumsnelheden op loophoogte – en daarmee de mate van windhinder hoofdzakelijk worden bepaald door de gebouwhoogte, is de gebouwbreedte alleen van invloed van de gebouwdiepte D is verwaarloosbaar zolang geldt dat $D < H$.

Ook de oriëntatie van een gebouwmassa speelt in bepaalde gevallen een rol. Zo zal bij toepassing van hoogbouw of van versprongen, evenwijdige gebouwblokken moeten worden vermeden dat de grote gevelvlakken loodrecht op de overheersende windrichting worden geplaatst.

Bij toepassing van “drempelvormige” gebouwmassa's moet worden voorkomen dat de overheersende windrichting van hoek van 45° hiermee maakt.

Dat de bouwingsdichtheid eveneens van invloed is op het windklimaat blijkt uit de ongunstige uitwerking, die open ruimten (pleinen en dergelijke) hier op hebben.

Met behulp van de hier gegeven opsomming is de invloed van het ontwerp op het te verwachten windklimaat nog eens duidelijk geïllustreerd.

Relatie tussen $\bar{v}$ en I_v

Uit metingen is gebleken dat de vorm van de windsnelheidsverdeling in de gebouwde omgeving aanzienlijk kan verschillen ten opzichte van die in het vrije veld.

Dit is meestal het geval in gebieden met een lage gemiddelde snelheid, bijvoorbeeld in de genoemde zogebieden.

In Figuur 4.23 zowel voor het vrije veld als voor een gebied in de gebouwde omgeving met een lage gemiddelde snelheid de windsnelheidsverdelingen geschetst.

Uit (2.10) en (4.1) volgt dat in het vrije veld geldt dat $g = 3,5$.

Uit metingen in de gebouwde omgeving is gebleken dat de vlagfactor in gebieden met lage gemiddelde snelheden meestal varieert van 4 à 7. Zo is bijvoorbeeld gevonden dat $g = 5,8$ bij een verhouding tussen $\bar{v}$ en $\hat{v}$, die gelijk is aan 4,32 [11].

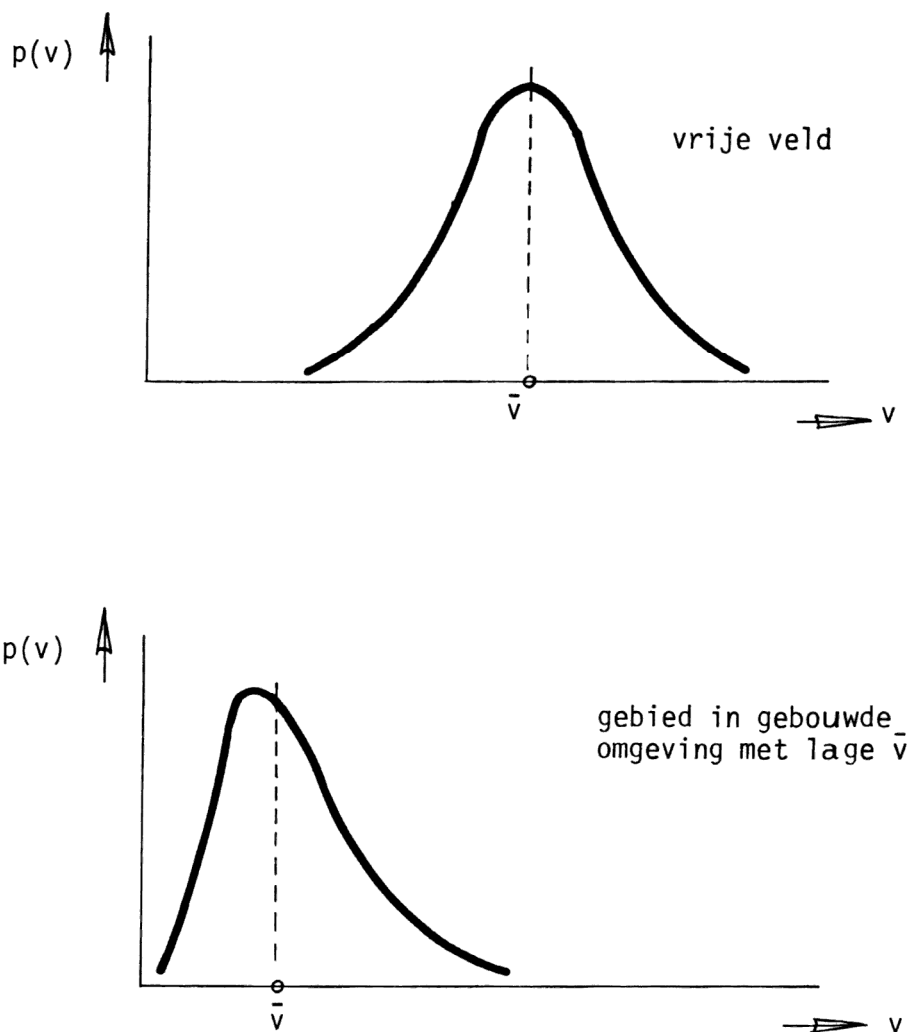
Omdat met behulp van (2.9) en (4.1) kan worden gevonden dat

$$I_v = \frac{\frac{\hat{v}}{\bar{v}} - 1}{g} \quad (4.1)$$

Wordt in dit voorbeeld gevonden dat $I_v = 0,57 \equiv 57\%$.

Andere gevonden waarden zijn bijvoorbeeld $g = 7,2$ en $\frac{\hat{v}}{\bar{v}} = 3,36$. Dit levert een $I_v = 0,33 \equiv 33\%$.

De op deze wijze gevonden waarden voor I_v blijken in gebieden met een lage waarde voor $\bar{v}$ te variëren van 0,3 à 0,6. Omdat in het vrije veld geldt dat $I_v = 0,1$ à 0,3 betekent dit dat in deze gebieden zowel de grootte als de richting van de snelheid veel sterker zal kunnen variëren (zie hoofdstuk 2).



Figuur 4.23 Snelheidsverdelingen

In gebieden met hoge tot zeer hoge gemiddelde snelheden blijkt de windsnelheidsverdeling nagenoeg dezelfde vorm te hebben als die in het vrije veld.

De waarde van g bedraagt dan ook $g \approx 3,5$.

Omdat de gemiddelde snelheden groter zijn dan in het vrije veld betekent dit dat de turbulentie-intensiteiten hier lager zullen moeten zijn. Zo is aan de hand van metingen gebleken dat bijvoorbeeld $g = 3,2$ en $\frac{\bar{v}}{v} = 1,46$. Dit levert een $I_v = 0,14 \approx 14\%$.

In gebieden met hoge gemiddelde snelheden, zoals in onderdoorgangen, doorgangen en in de omgeving van gebouwhoeken, komen waarden voor van I_v , die variëren van 0,1 à 0,2. Dit betekent dat veranderingen in grootte en richting van de optredende luchtsnelheden slechts in zeer geringe mate op zullen treden (zie hoofdstuk 2).

Versterkingsfactoren en windklimaat

In 4.2 is min of meer stilzwijgend verondersteld dat in gebieden, waarin hoge waarden voor de versterkingsfactoren c_i worden gevonden, het windklimaat slechter zal zijn dan dat in het vrije veld.

Uit de beschrijving in hoofdstuk 3 van de werkwijze die moet worden gevolgd om een correcte vergelijking te maken tussen het windklimaat in de gebouwde omgeving en dat in het vrije veld, volgt dat dit in het algemeen beslist niet het geval hoeft te zijn.

Wanneer bijvoorbeeld in een theoretisch geval uitsluitend bij een windrichting, die nagenoeg nooit voorkomt, een hoge c_i -waarde optreedt en in alle overige windrichtingen geldt dat $c_i < 1$, zal dit betekenen dat het windklimaat in dit punt juist goed is. In die gevallen, waarin

voor een aantal vaak voorkomende windrichtingen met hoge windsnelheden hoge waarden voor de versterkingsfactoren worden gevonden, is het daarentegen wel reëel een verslechtering van het windklimaat te verwachten.

Stel bijvoorbeeld dat in een van de veel voorkomende windrichtingen wordt gevonden dat $c_i = 2,3$. Dit betekent dat bij een windsnelheid in het vrije veld op loophoogte (1,75m) gelijk aan $\bar{v} = 6,0 \text{ m/s}$, de snelheid in het betreffende meetpunt gelijk is aan $\bar{v} = 2,3 \cdot 6,0 = 13,8 \text{ m/s}$.

Bij een terreinruwheid van het vrije veld, waarvoor geldt dat $\alpha = 0,15$ wordt op 10 m hoogte en snelheid gevonden gelijk aan $\bar{v}_{(10)} = 6,0 \cdot 1,3 = 7,8 \text{ m/s}$. Zie ook hoofdstuk 2. Uit tabel 5.2 blijkt dat dit overeenkomt met “matige wind”.

Om in ditzelfde vrije veld op loophoogte en snelheid $\bar{v}_{(10)} = 13,8 \cdot 1,3 = 17,9 \text{ m/s}$ – of te wel “stormachtige wind” – vereist.

Dit betekent dat bij “matige wind” in het vrije veld de snelheid in het meetpunt kan worden vergeleken met de snelheid, die in het vrije veld optreedt bij “stormachtige wind”.

Voor de duidelijkheid wordt nog opgemerkt dat wanneer het windklimaat in de gebouwde omgeving slechter blijkt te zijn dan dat in het vrije veld, dit nog niet hoeft te betekenen dat het windklimaat hier slecht genoemd mag worden. Bij toetsing aan bestaande windhindercriteria (zie hoofdstuk 1) kan namelijk best blijken dat hieraan toch wordt voldaan.

Invloed beplanting

Uit metingen is gebleken dat de luchtsnelheid na het passeren van beplanting aanzienlijk af kan nemen en dat deze afname nog tot ver achter deze beplanting merkbaar is [17]. In Figuur 4.24 is voor een aantal typen van beplanting aangegeven hoe groot deze afname is op een hoogte van 0,65m als functie van de afstand achter deze beplanting, uitgedrukt in de beplantingshoogte.

Hieruit blijkt dat zowel met behulp van heggen als met behulp van bomen aanzienlijke snelheidsreducties kunnen worden verkregen. Duidelijk is ook dat de grootte van het luwtegebied ruwweg evenredig is met de beplantingshoogte en dat hierdoor heggen minder geschikt zijn voor het creëren van grote luwtegebieden.

Zo is bijvoorbeeld te zien dat een rij “pinus radiata” met een hoogte van 9,1m zowel ’s zomers als ’s winters op afstanden van 45 en 180m een snelheidsreductie geeft van respectievelijk 45% en 30%. Uit de grafieken blijkt dat plaatsing van meerdere, direct achter elkaar gelegen rijen beplanting niet hoeft te betekenen dat de snelheidsreducties noemenswaardig toenemen.

Gebleken is verder dat bij het aanbrengen van evenwijdige rijen beplanting, die op grote afstand van elkaar zijn gelegen, grotere reducties worden verkregen dan die bij een enkele rij. Ruwweg geldt dat bij plaatsing van bijvoorbeeld twee rijen “pinus radiata” op 45m van elkaar een reductie wordt verkregen van $1 - 0,55^2 \approx 0,70 \equiv 70\%$.

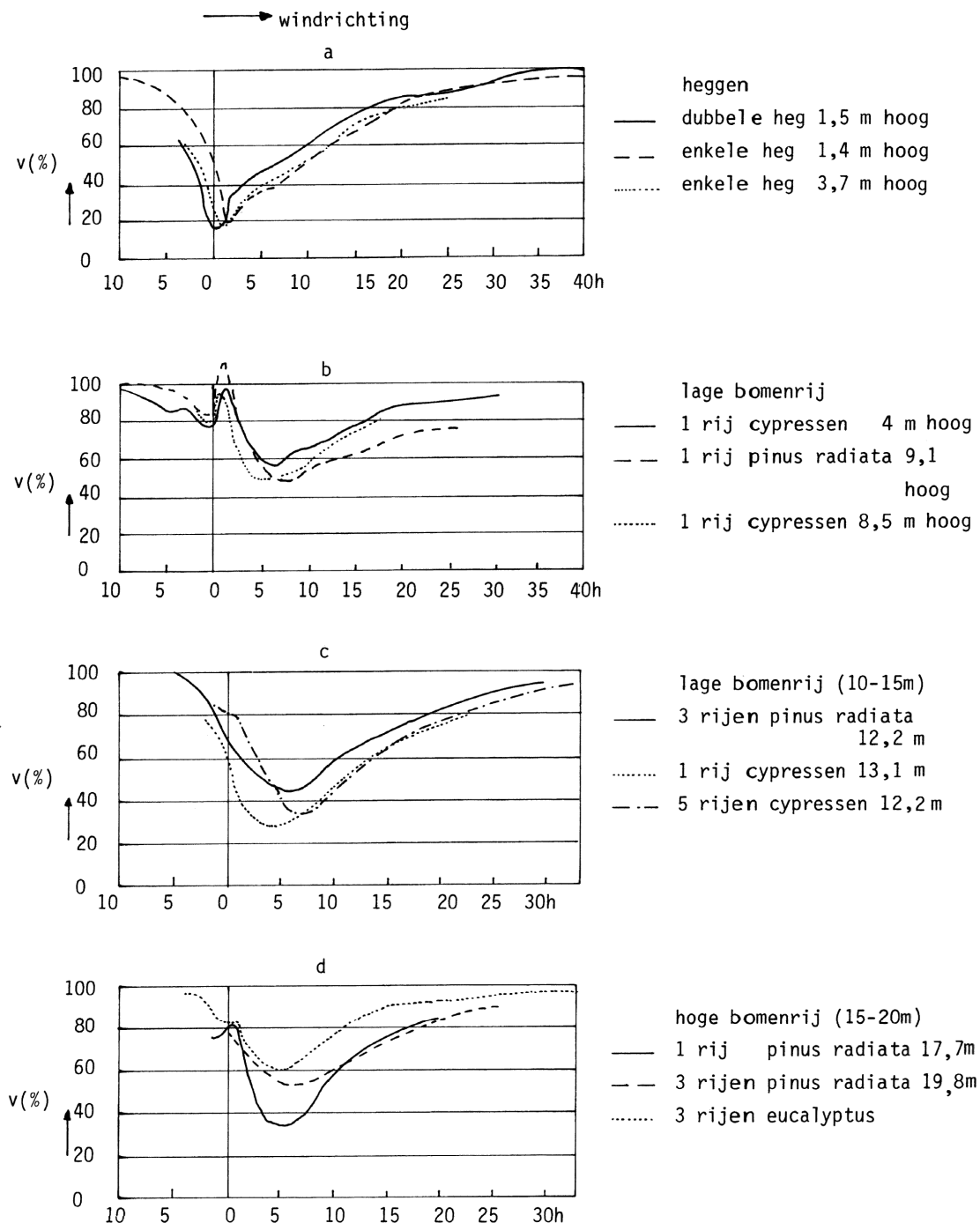
Voor een rij populieren is de invloed van het bladverlies op de productiefactor nagegaan en vermeld in Figuur 4.25.

Dit betekent dat de beplanting, die in het najaar zijn bladeren gaat verliezen, minder beschutting biedt in de periode, waarin hoge luchtsnelheden nu juist het meest voorkomen.

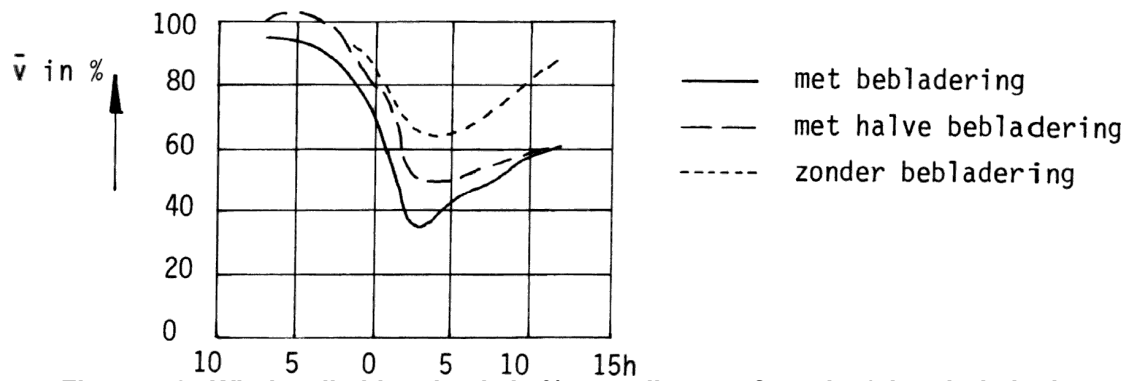
Naar aanleiding van de hier vermelde meetresultaten worden nog een aantal opmerkingen gemaakt:

- de hier gegeven waarden geven een goed idee van hetgeen met een goed aaneengesloten beplanting kan worden bereikt. Duidelijk zal zijn dat een te grote onderlinge afstand tussen de afzonderlijke planten (bomen) of de aanwezigheid van “gaten” in de beplanting tot gevolg kan hebben dat er geen snelheidsreducties optreden of zelfs dat de windhinder wordt vergroot.
- de vermelde waarden gelden alleen in die gevallen waarin de richting van de aanstromende lucht evenwijdig is aan het horizontale vlak. Dit betekent dat een poging tot verbetering van het windklimaat met behulp van beplanting alleen het hier geschetste effect heeft wanneer in de hindergebieden sterke horizontale luchtstromingen plaatsvinden. Zo heeft bijvoorbeeld plaatsing van beplanting rondom het hindergebied, dat tengevolge van een staande wervel aan de voet van hoogbouw kan ontstaan, geen enkele verbetering van het windklimaat in dit gebied tot gevolg.

Omdat voor buitenwijken veelal geldt dat de stedenbouwkundige opzet "open" is, blijkt dat in grote gebieden windhinder ontstaat tengevolge van sterke horizontale luchtstromingen. Dit betekent dat juist in buitenwijken het windklimaat goed kan worden verbeterd met behulp van beplanting.



Figuur 4.24 Windsnelheidsreductie in % voor diverse afstanden (uitgedrukt in de beplantingshoogte) achter de beplanting



Figuur 4.25 Windsnelheidsreductie in % voor diverse afstanden(uitgedrukt in de beplantingshoogte) achter een rij populieren

Verstoring in het stromingsbeeld

Opgemerkt is dat aan lijzijde van een gebouw een zoggebied ontstaat dat zich tot op een afstand van 3 à 5 gebouwhoogten achter het gebouw kan uitstrekken. Dit wil echter niet zeggen dat achter dit zoggebied het oorspronkelijke, ongestoorde stromingsbeeld weer is hersteld. Uit windtunnelproeven is duidelijk gebleken dat de verstoringen zich voortzetten tot op een afstand van ongeveer 20 gebouwhoogten. De verstoringen op een afstand groter dan 5 gebouwhoogten zijn echter voor de windhinder op loophoogte niet van belang.

De zaak ligt echter anders wanneer bij toepassing van windenergie keuzen moeten worden gedaan ten aanzien van de locatie van molens. Omdat voor een optimale werking van windmolens onder andere een zo hoog mogelijke aanstroomsnelheid is gewenst, dienen snelheidsreducties tengevolge van obstakels te worden vermeden. Verder is het in verband met de levensduur van windmolens van belang dat de turbulentie-intensiteit, die in de zoggebieden relatief hoog kan zijn, zo laag mogelijk blijft. De afstand tussen windmolens en dichtst bijzijnde gebouwen kan dus beter groter worden genomen dan 5 gebouwhoogten omdat na 5 gebouwhoogten snelheid en turbulentie-intensiteit respectievelijk nog te laag en te hoog zijn [18].

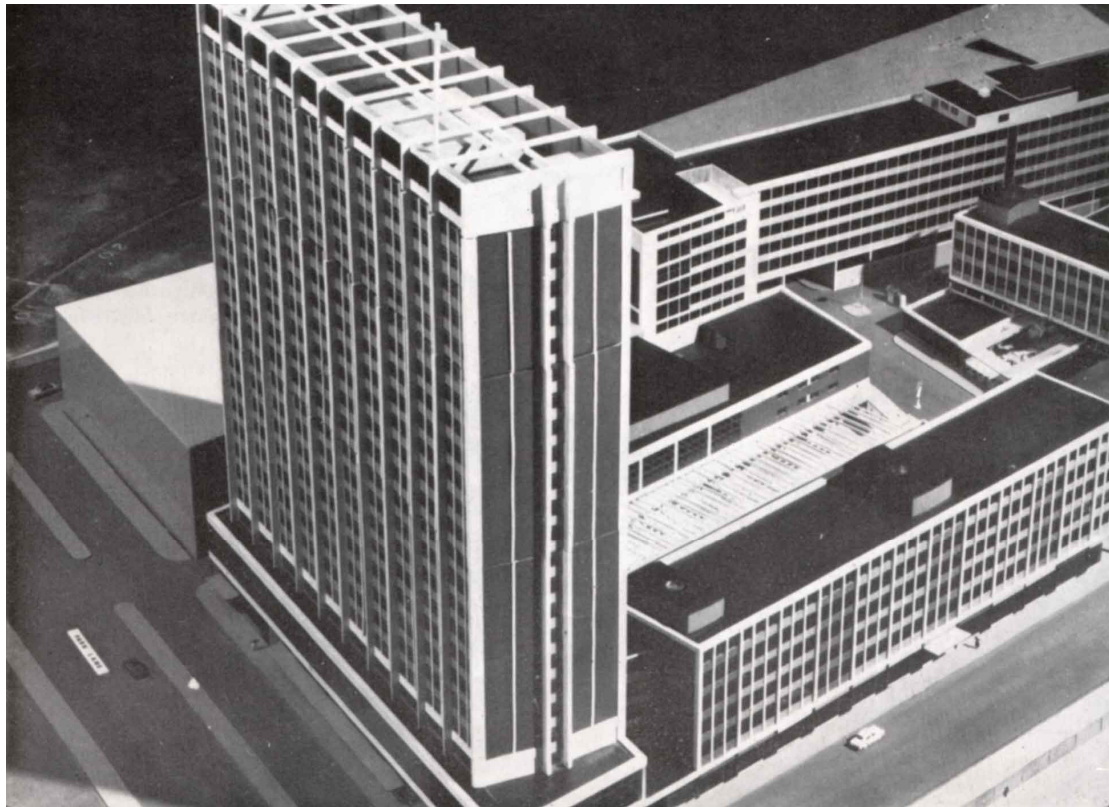
4.4. Praktijkvoorbeelden

In deze paragraaf worden enkele praktijkgevallen bekeken van (stede)bouwkundige ontwerpen, die na realisatie ontoelaatbare windhinder tot gevolg bleken te hebben waardoor "maatregelen achteraf" noodzakelijk bleken [1]. Aangevoerd zal worden dat deze hinder op grond van de in dit hoofdstuk gegeven richtlijnen (zie ook hoofdstuk 6) had kunnen worden verwacht en dat de waarden van de versterkingsfactoren, zoals die aan de hand van windtunnelproeven zijn bepaald, goed overeenstemmen met de gegeven maximale waarden voor c.

Voorbeeld: St. George's House, Croydon

Het gaat hier om een 75 m hoog gebouw dat is gesitueerd temidden van laagbouw met een gemiddelde hoogte van 12 m. De gebouwwas loopt in noord-zuidrichting.

Kort nadat het gebouw in 1964 in gebruik werd genomen, bleken veel klachten te ontstaan tengevolge van hoge lichtsnelheden in de onderdoorgang van het gebouw en in de open ruimte (winkencentrum) tussen de twee lage, rechthoekige gebouwblokken, die loodrecht op het gebouw zijn gesitueerd. In Figuur 4.26 is een foto te zien van de maquette, zoals die voor de windtunnel proeven is gemaakt.



Figuur 4.26 Schaalmodel van “St. George’s house”

Als eerste werd onderzocht in hoeverre de windhinder kan worden beperkt door plaatsing van glazen schermen op een zodanige wijze dat een labyrintvormige onderdoorgang met een gereduceerde doorsnede ontstond.

Het gevolg van deze ingreep was dat bij oostenwind de hinder aanzienlijk verminderde. Bij westenwind bleef de situatie echter nagenoeg ongewijzigd.

Na het testen van een aantal andere, haalbare oplossingen werd uiteindelijk gekozen voor het aanbrengen van een gedeeltelijke overkappingconstructie boven de open ruimte.

In Figuur 4.27 zijn bij de aangegeven meetpunten de waarden vermeld van de versterkingsfactoren zoals deze met behulp van de windtunnel bij oosten- en westenwind zijn bepaald.

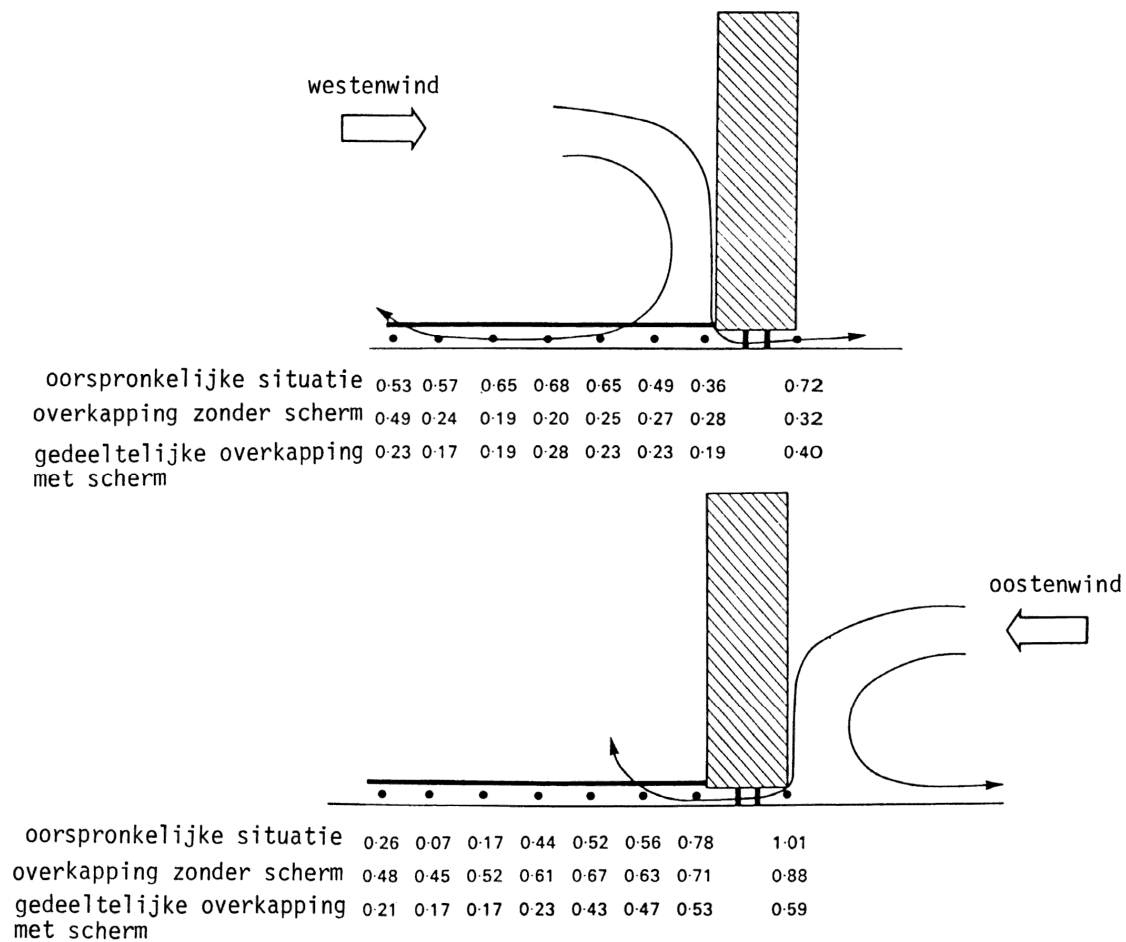
Deze versterkingsfactor R_H verschilt echter van de tot nu toe gebruikte versterkingsfactor c_i en is als volgt gedefinieerd:

R_H is gelijk aan het quotiënt van de snelheid op loophoogte in de gebouwde omgeving en de snelheid op gebouwhoogte in de ongestoorde, aanstromende wind.

Aan de hand van de in Figuur 4.27 vermelde waarden is duidelijk te zien dat de uiteindelijk gekozen oplossing (gedeeltelijke overkapping en de plaatsing van schermen) voor beide windrichtingen resulteert in een sterke reductie van de optredende luchtsnelheden.

Een belangrijke vraag is nu of met behulp van de richtlijnen, die in dit hoofdstuk zijn gegeven, vooraf had kunnen worden gesteld dat in de hier bekeken situatie redelijkerwijs op windhinder moest worden gerekend.

Omdat voor “hoogbouw temidden van laagbouw” als richtlijn is gegeven dat deze hoogbouw vrijwel altijd windhinder veroorzaakt wanneer geldt dat H (hoogte hoogbouw) $> 2\bar{h}$ (gemiddelde hoogte laagbouw) is het antwoord op deze vraag duidelijk ja.



Figuur 4.27 De waarde van de versterkingsfactoren R_H bij oosten- en westenwind voor een drietal situaties

Ook voor de gebieden waarin de hinder bleek op te treden geldt dat deze vooraf hadden kunnen worden aangegeven. Duidelijk is namelijk gesteld dat in onderdoorgangen bij hoogbouw (die aanleiding geeft tot windhinder) altijd zeer hoge lichtsnelheden optreden. Verder geldt dat de hoge snelheden, die bij westenwind optreden in de open ruimte, het gevolg zijn van de staande wervel aan de voet van de hoogbouw. Zie nogmaals Figuur 4.27.

De mogelijkheid bestaat om een nauwkeurige indruk te geven van de c_i -waarden, die horen bij de hiervoor vermelde waarden voor R_H . Bekend is namelijk dat de aankomende wind strijkt over laagbouw en dat voor het hierbij optredende snelheidsprofiel geldt dat $\alpha \approx 0,25$ (zie Tabel 2.1).

Voor dit bekende snelheidsprofiel kan u eenvoudig met behulp van hoofdstuk 2 de verhouding worden bepaald tussen de gemiddelde snelheid op gebouwhoogte H en de gemiddelde snelheid op loophoogte (1.75m).

Gevonden wordt:

$$\bar{V}_{(H)} = \left(\frac{H}{1,75}\right)^{0,25} \cdot \bar{V}_{(1,75)} \quad (4.2)$$

De versterkingsfactor R_H ziet er in formulevorm als volgt uit:

$$R_H = \frac{\bar{V}_i}{\bar{V}_{(H)}} \quad (4.3)$$

Uit (4.2) en (4.3) volgt:

$$\frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_{(1,75)}} = c_i = \left(\frac{H}{1,75}\right)^{0,25} \cdot R_H \quad (4.4)$$

De (globale) verhouding tussen de verschillend gedefinieerde versterkingsfactoren c_i en R_H is nu dus bekend. Voor de maximale c_i -waarde, die in de onderdoorgang optreedt, wordt nu met behulp van (4.4) en met behulp van de in figuur 4.27 vermelde R_H -waarden gevonden:

$$c_i = \left(\frac{75}{1,75}\right)^{0,25} \times 1,01 \approx 2,6$$

Ter plaatse van de open ruimte wordt op dezelfde manier gevonden:

$$c_i = \left(\frac{75}{1,75}\right)^{0,25} \times 0,68 \approx 1,7$$

Duidelijk is dat deze c_i -waarden goed overeenkomen met de in 4.2 gegeven richtwaarden.

Voor een goed begrip is het noodzakelijk nu de volgende opmerkingen te maken:

- Duidelijk is nu geïllustreerd hoe c_i -waarden kunnen worden berekend, uitgaande van R_H -waarden zoals deze in een windtunnel kunnen worden bepaald.

De in dit hoofdstuk vermelde maximale c_i -waarden, die in de beschreven situaties kunnen worden verwacht, zijn dan ook op dezelfde wijze bepaald.

Een voor de hand liggende fout is nu dat wordt gesteld dat uit (4.4) voor de werkelijk optredende gemiddelde snelheid in alle punten op loophoogte temidden van de laagbouw zou volgen:

$$\bar{v}_{(1,75)} = c_i \times \bar{v}_i \quad (4.5)$$

Het snelheidsprofiel geldt namelijk op hoogten, die groter zijn dan de hoogte van de ruweidelementen (in dit geval de laagbouw) en niet tussen deze elementen in. Bij de afleiding van (4.4) is dit echter wel als uitgangspunt genomen. Het feit dat dus wordt gerekend met een fictieve $\bar{v}_{(1,75)}$ doet aan de bruikbaarheid van de hier vermelde c_i -waarden echter niets af.

Wanneer het voorland bestaat uit lage ruweidelementen ($\alpha = 0,11$ en $\alpha = 0,15$) dan mag wel van (4.5) gebruik worden gemaakt.

- In dit hoofdstuk zijn enkele vuistregels vermeld waarmee de snelheid op loophoogte in enkele gebieden kan worden berekend als functie van de gemiddelde snelheid op gebouwhoogte.

Zo is bijvoorbeeld voor onderdoorgangen gesteld dat $\bar{v}_i \approx 1,20 \bar{v}_{(H)}$. Dit betekent dus een $R_H = 1,20$. Met behulp van (4.4) wordt nu voor een 75m hoog gebouw gevonden:

$$c_i = \left(\frac{75}{1,75}\right)^{0,25} \times 1,20 \approx 3,1$$

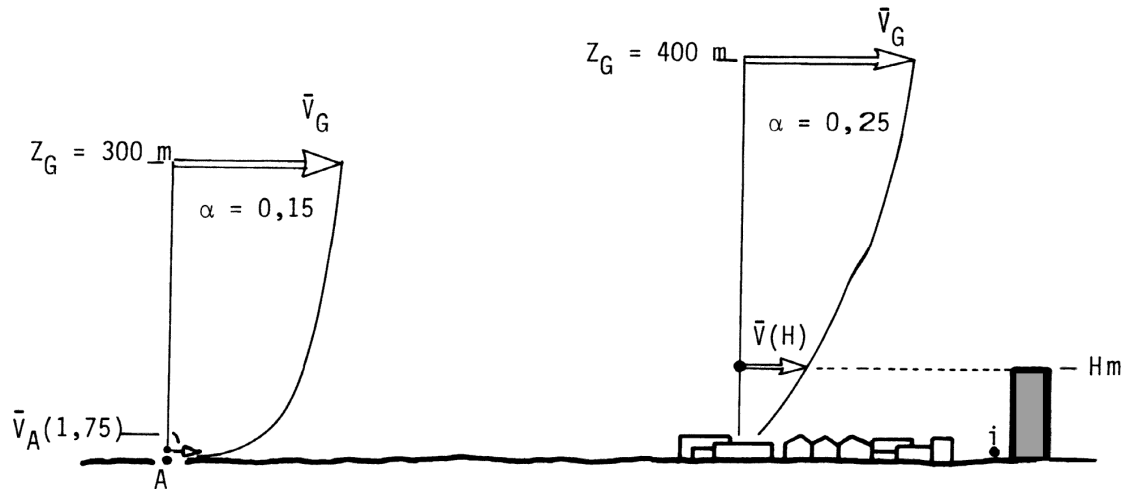
Hiermee is dus aangetoond dat de gegeven vuistregel en de gegeven c_i -waarde goed met elkaar in overeenstemming zijn.

- In hoofdstuk 3 is besproken hoe, uitgaande van een bekende windroos in een referentiepunt en van bekende c_i -waarden in alle windrichtingen, de windroos (en daarmee het windklimaat) in een punt van de gebouwde omgeving kan worden bepaald.

Wanneer – zoals in dit voorbeeld het geval is – het referentiepunt in de gebouwde omgeving is gelegen, is een windroos voor dit punt nagenoeg nooit gegeven. Om in de gebouwde omgeving het windklimaat te bepalen moeten de in dit voorbeeld vermelde c_i -waarden worden omgerekend tot c_i -waarden, die betrekking hebben op het meetpunt in de gebouwde omgeving en op het punt (in het vrije veld) waarvoor

wel een windroos bekend is.

Met behulp van figuur 4.28 kan worden bepaald hoe de gegeven R_H -waarden kunnen worden omgerekend in c_i -waarden, die betrekking hebben op de snelheden in meetpunt i en in referentiepunt A waarvoor de windroos is gegeven.



Figuur 4.28 Snelheidsprofielen in het vrije veld en boven de laagbouw

Eenvoudig is in te zien dat voor de hier getekende situatie de volgende betrekkingen gelden:

$$\bar{V}_G = \left(\frac{400}{H}\right)^{0,25} \cdot \bar{V}_{(H)} \quad (4.6)$$

$$\bar{V}_{A(1,75)} = \left(\frac{1,75}{300}\right)^{0,15} \cdot \bar{V}_G \quad (4.7)$$

Met behulp van (4.3), (4.6) en (4.7) wordt nu gevonden:

$$c_i^* = \frac{\bar{V}_i}{\bar{V}_{A(1,75)}} = \left(\frac{H}{400}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{300}{1,75}\right)^{0,15} \cdot R_H \quad (4.8)$$

Voor $H = 75\text{m}$ volgt uit (4.8):

$$c_i^* = 1,4 R_H$$

Voorbeeld: The Marrion Centre, Leeds

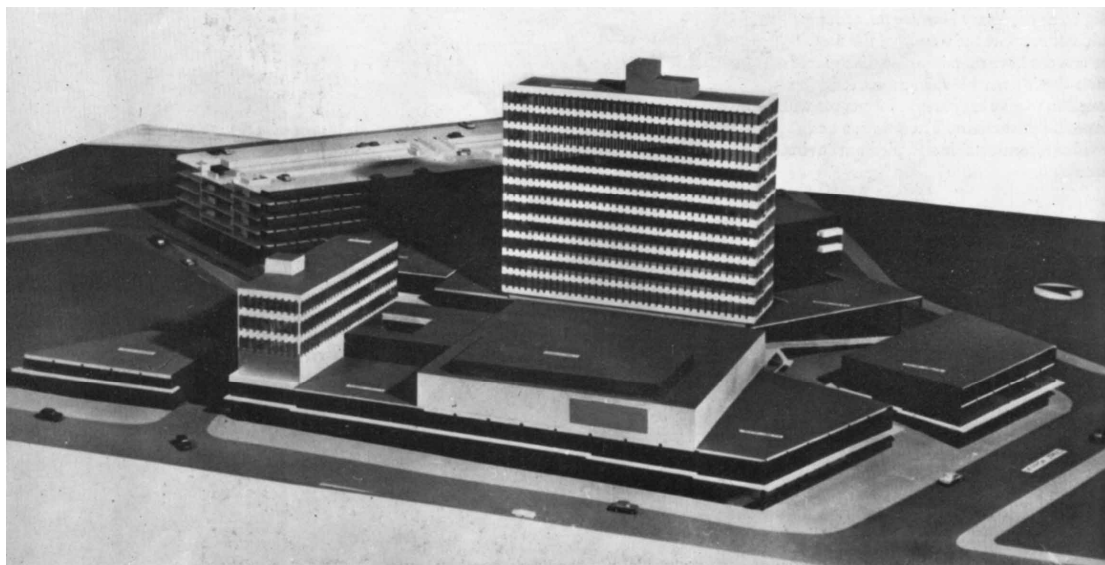
Kort na voltooiing van dit 45m hoge kantoorgebouw gaven de architecten opdracht tot het laten verrichten van een windtunnelproef in verband met het onplezierige windklimaat dat in het aan de voet van het gebouw gelegen winkelcentrum bleek te heersen. In Figuur 4.29 is een foto te zien van de maquette.

Voor de windrichtingen, waarbij de hinder in hoofdzaak bleek op te treden, zijn in Figuur 4.30 de R_H -waarden vermeld in een viertal meetpunten.

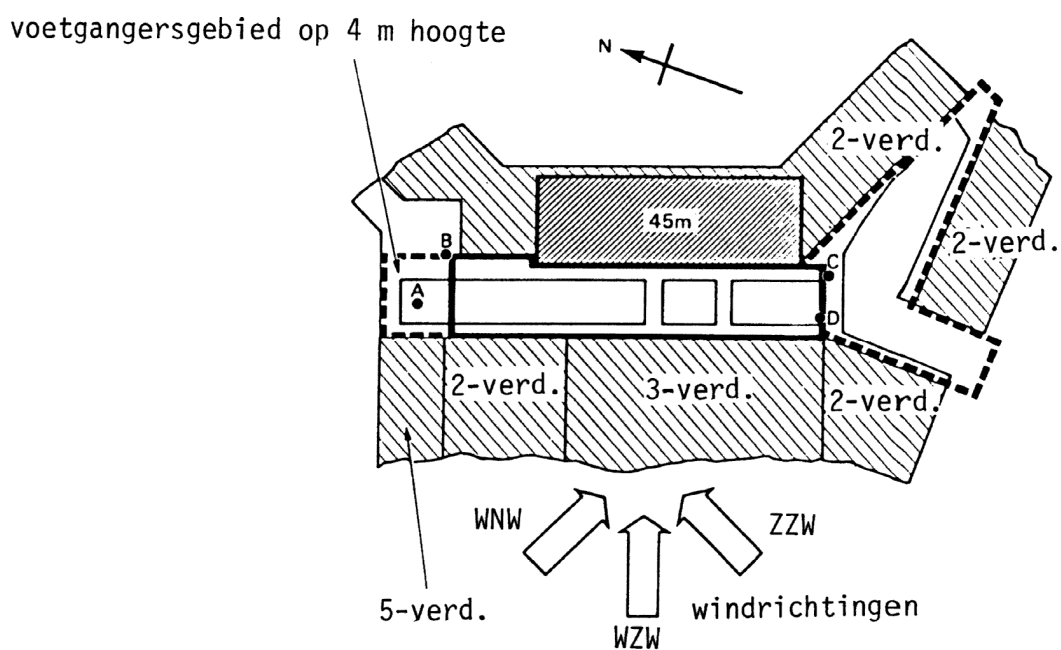
Ook in dit voorbeeld geldt dat de geconstateerde windhinder redelijkerwijs op grond van de gegeven richtlijnen had kunnen worden verwacht. De hoogte van de omringende laagbouw bedraagt namelijk gemiddeld $h = 11\text{m}$ zodat ook nu weer geldt $H > 2h$. Verder blijkt dat wederom de neerwaartse luchtstroming langs de langsgewel aan loefzijde de hinder veroorzaakt.

Met behulp van (4.4) wordt voor dit geval gevonden:

$$c_{i-\max} = \left(\frac{45}{1,75}\right)^{0,25} \cdot 1,04 \approx 2,3$$



Figuur 4.29 Schaalmodel van het "Merrion Centre"



wind- richting		meetpunten			
		A	B	C	D
WZW	oorspronkelijk	0.88	0.94	1.04	0.92
	met overkapping	0.18	0.18	0.30	0.20
ZZW	oorspronkelijk	0.93	1.05	0.35	0.30
	met overkapping	0.39	0.41	0.50	0.50
WNW	oorspronkelijk	0.34	0.48	1.02	1.00
	met overkapping	0.75	0.57	0.36	0.34

Figuur 4.30 De waarde van de versterkingsfactoren R_H in de oude en nieuwe situatie

5. Windhinder

In voorgaande hoofdstukken is één en ander gezegd over het windklimaat in het vrije veld en in de gebouwde omgeving. In principe is het nu mogelijk om voor elk punt in de gebouwde omgeving aan te geven of hier het windklimaat beter of slechter is dan dat in het vrije veld. Hiermee is echter nog niets bekend over de kwaliteit van het windklimaat in absolute zin. In dit hoofdstuk zal daarom aandacht worden besteed aan bestaande criteria ten aanzien van windhinder, nadat eerst enkele algemene opmerkingen zijn gemaakt over de uitwerking van het verschijnsel “wind” op de mens.

5.1. Windeffecten

Een bekend ervaringsfeit is dat door de wind kracht op mens en omgeving worden uitgeoefend.

Eveneens is uit ervaring bekend dat de langsstromende lucht afkoeling tot gevolg kan hebben.

De uitgeoefende krachten bemoeilijken het voortbewegen van de mens of hebben, bij zeer hoge windsnelheden, tot gevolg dat de mens niet langer zijn evenwicht kan bewaren en omver wordt geblazen.

Dit betekent dus dat de uitwerking van de wind op de mens hinderlijk tot zeer gevaarlijk kan zijn. Zie ook hoofdstuk 1.

In Tabel 5.1 is aangegeven welke effecten in het dagelijks leven waarneembaar zijn bij diverse windsnelheden, uitgedrukt in Beaufortgetallen [19]. Hierbij moet worden opgemerkt dat, zoals in de tabel staat vermeld, de snelheden gelden op 10 m hoogte. Dit betekent dat, afhankelijk van de terreinruwheid, in het vrije veld de snelheden op loophoogte 77 à 82% hiervan zullen bedragen.

Een idee van de inspanning die bij het lopen tegen de wind in wordt geleverd, wordt verkregen aan de hand van de door Penwarden gemaakte vergelijking tussen deze inspanning en die, welke nodig is om tegen een gegeven helling met hellingshoek α op te lopen. De resultaten staan vermeld in

Tabel 5.2 [19].

Of de windkrachten aanleiding geven tot hinderlijke of zelfs gevaarlijke situaties wordt door een aantal factoren bepaald. Allereerst is natuurlijk de grootte van de luchtsnelheid van belang. In appendix G is vermeld dat de kracht, die door een luchtstroming op een voorwerp wordt uitgeoefend, gelijk is aan:

$$F = C_F \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \cdot A \quad (5.1)$$

$\bar{v}$:	gemiddelde luchtsnelheid	[m/s]
ρ :	soortelijke massa van lucht	[kg/m ³]
A :	eenvoudig gekozen oppervlak van het obstakel, bijvoorbeeld de geprojecteerde doorsnede op een vlak dat loodrecht staat op de stromingsrichting	[m ²]
C_F :	dimensieloze krachtcoëfficiënt	[-]

Dit betekent dus dat verdubbeling van de luchtsnelheid een vier maal zo grote kracht tot gevolg heeft.

In die zin is het dan ook enigszins misleidend dat in bestaande windhindercriteria (zie 5.2) de mate van hinder afhankelijk wordt gesteld van de snelheid in plaats van het kwadraat van de snelheid.

Tabel 5.1 Windeffecten in het dagelijks leven

Windkracht Beaufortschaal	Uurgemiddelde wind- Snelheidsgrenzen op 10m hoogte (in $\frac{m}{s}$)	Effecten
0 – 1	0 – 1,5	Rustig, geen waarneembare wind
2	1,5 – 3,3	Voelbaar in het gezicht
3	3,4 – 5,4	Lichte beweging van vlaggen, haren en kleren
4	5,5 – 7,9	Stof, droog zand en papier dwarrelen op, haren raken in de war
5	8,0 – 10,7	Windkrachten voelbaar, grens van op het land aanvaardbare windsnelheid is bereikt
6	10,8 – 13,8	Parapluis moeilijk te gebruiken, haren worden overeind geblazen, lastig om regelmatig te lopen
7	13,9 – 17,1	Lopen wordt bemoeilijkt
8	17,2 – 20,7	Vooruitkomen wordt lastig. Tijdens vlagen wordt het moeilijk om in evenwicht te blijven
9	20,8 – 24,4	Mensen worden door vlagen omver geblazen

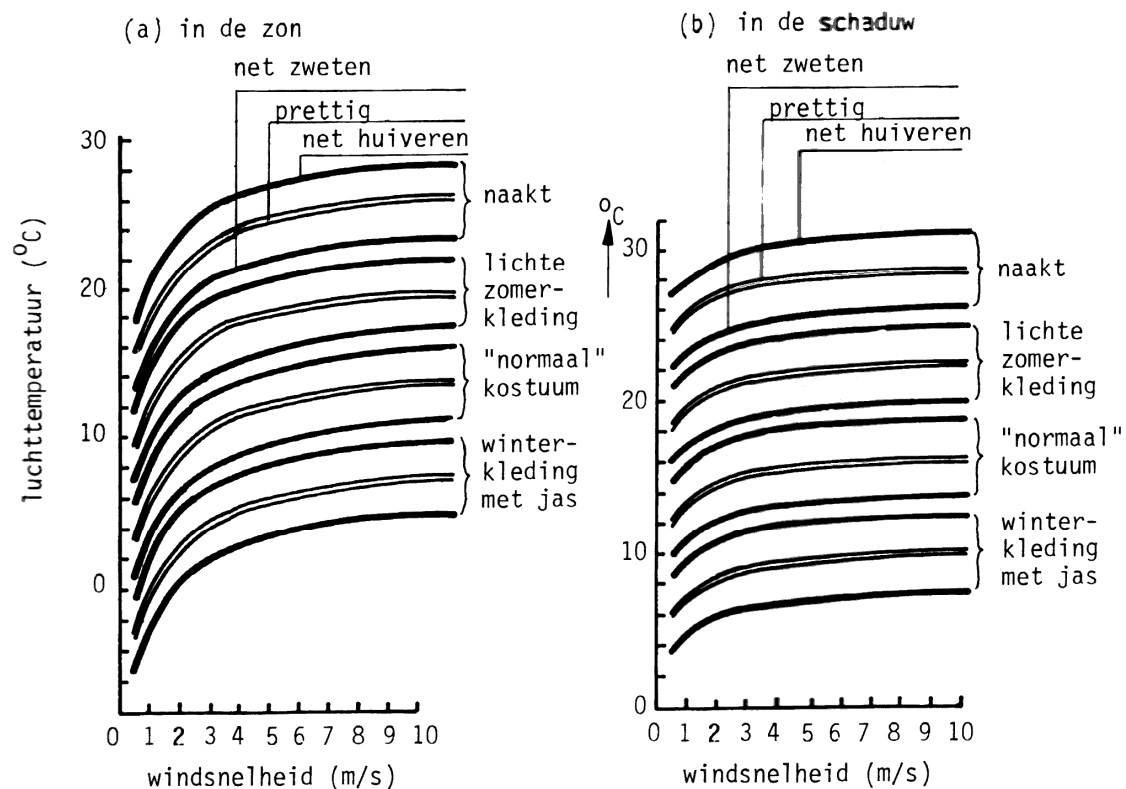
Tabel 5.2 Overeenkomsten in inspanning tussen wandelen tegen een constante helling en wandelen met tegenwind

Helling ($\sin \alpha$)	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$
Som van wind plus wandelsnelheid ($\frac{m}{s}$)	10	14	16,5	19,5	22	25

Behalve de grootte van de snelheid blijkt ook het verloop ervan in de tijd van belang te zijn. Zo blijkt bijvoorbeeld dat bij vlaagsnelheden groter dan $23 \frac{m}{s}$ de mens omver wordt geblazen terwijl bij een constante snelheid van $23 \frac{m}{s}$ hij zich nog wel staande kan houden. Dit is dan ook de reden dat in criteria de mate van hinder niet altijd afhankelijk wordt gesteld van de gemiddelde snelheid, maar soms ook van de vlaagsnelheid.

Als overige factoren, die van invloed zijn op de mate waarin windkrachten hinder veroorzaken, kunnen worden genoemd de leeftijd van de mens, de soort activiteit waarmee hij zich bezighoudt en het klimaat waaraan hij is gewend.

Ook voor het als tweede genoemde windeffect, de optredende afkoeling tengevolge van langsstromende lucht, geldt dat de mens zich als gevolg hiervan onbehaaglijk kan gaan voelen, hetgeen onder ongunstige omstandigheden ziek worden tot gevolg heeft. De mate, waarin afkoeling tot hinder aanleiding geeft, hangt af van een groot aantal factoren zoals grootte van de snelheid, luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, intensiteit van de zonnestraling, leeftijd, soort activiteit, tijdsduur waarin deze afkoeling optreedt en het type kleding. Voor een bepaalde activiteit, namelijk wandelen, is onderzocht in welke mate hinder tengevolge van afkoeling ontstaat bij variatie van een aantal van de zojuist genoemde invloedsfactoren. Op grond van de resultaten, die te zien zijn in Figuur 5.1, kan de algemene conclusie worden getrokken dat de afkoelende werking tengevolge van de wind bij snelheden groter dan $3 \frac{m}{s}$ nagenoeg geen invloed heeft op de behaaglijkheid zolang de luchttemperaturen boven het vriespunt zijn gelegen en wanneer de mens op een voor de tijd van het jaar gangbare wijze is gekleed [19].



Figuur 5.1 Behaaglijkheidscriteria voor "wandelen"

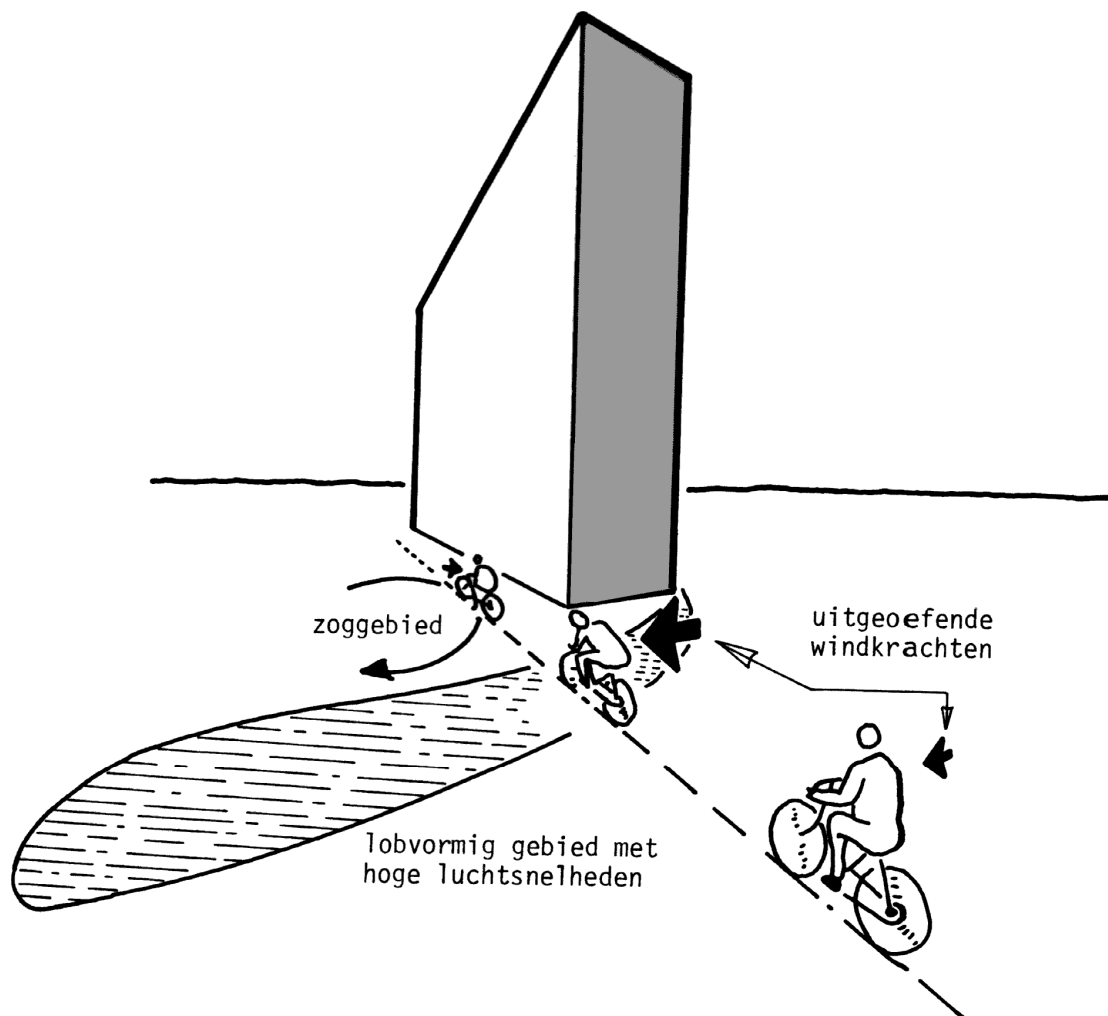
Met betrekking tot de bestaande windhindercriteria zoals deze in 5.2 worden behandeld, kunnen nu de volgende algemene opmerkingen worden gemaakt:

- in de gevallen waarin sprake is van windhinder, wordt deze hinder hoofdzakelijk veroorzaakt door de uitgeoefende windkrachten.
- in de bestaande criteria wordt aangegeven welke eisen moeten worden gesteld aan gemiddelde windsnelheden of vlaagsnelheden om aan bestaande behaaglijkheidseisen (en soms ook veiligheidseisen) te voldoen. In deze criteria wordt echter in het geheel geen rekening gehouden met de hinder, die ontstaat wanneer in korte tijd gebieden – met zeer grote verschillen in luchtstroming – worden doorlopen.

Dat deze vorm van hinder in de praktijk wel degelijk optreedt, kan worden geïllustreerd aan de hand van de in Figuur 5.2 geschetste situatie. Wanneer bijvoorbeeld een fietser de aangegeven route volgt, passeert hij achtereenvolgend de punten A, B en C. deze punten bevinden zich in respectievelijk het ongestoorde gebied, het lobvormige gebied met hoge c_f -waarden en het zoggebied met c_f -waarde ≈ 1 .

Tengevolge van de vrij abrupte overgang van het ongestoorde- naar het lobvormige gebied moet de fietser zich instellen op de plotseling optredende, sterk toegenomen windkrachten. Voordat hij dit goed en wel heeft gedaan, valt hij ten prooi aan de eveneens vrij abrupte overgang van het lobvormige- naar het zoggebied met als gevolg dat niet alleen de grootte van de uitgeoefende windkrachten sterk verandert, maar bovendien een nagenoeg volledige omslag van richting plaatsvindt.

- Uit hetgeen in 2.5 is behandeld kan worden geconcludeerd dat in theorie de luchtsnelheid in ieder meetpunt in principe elke gewenste waarde kan bereiken. De kans dat deze waarde optreedt kan echter oneindig klein zijn en per meetpunt enorm verschillen. Dit is ook de reden dat in de criteria ook de kans, dat een bepaalde snelheid wordt overschreden, in beschouwing wordt genomen.



Figuur 5.2 Hinder ten gevolge van het achtereen volgend “doorlopen” van gebieden met grote verschillen in type luchtstroming

5.2. Criteria

Aan de hand van waarnemingen en metingen rondom hoogbouw heeft Melbourne geconstateerd dat de mens bij vlaagsnelheden van 20 m/s slechts met grote moeite in staat is zijn evenwicht te bewaren en bovendien dat bij vlaagsnelheden vanaf 23 m/s dit in het algemeen niet meer mogelijk is [9]. Zoals reeds is opgemerkt speelt bij dit evenwichtsverlies niet alleen de plotselinge verandering van de grootte van de snelheid een rol, maar is de eveneens plotselinge verandering van richting zeker zo belangrijk. Uit bestudering van het windklimaat in toegangswegen naar “oude” Australische steden (steden zonder hoogbouw) is volgens Melbourne gebleken dat dit klimaat als acceptabel werd ervaren wanneer overdag niet meer dan eens per jaar vlaagsnelheden van 16 m/s of meer voorkwamen. Deze constatering heeft geleid tot het Criterium van Melbourne:

“Het windklimaat in een nabij ontsluitingswegen wordt als acceptabel ervaren wanneer overdag niet meer dan eens per jaar vlaagsnelheden groter dan 16 m/s voorkomen”.

Een criterium dat op veel meer situaties betrekking heeft en waarin bovendien de mate van waardering is aangegeven, is het in Tabel 5.3 weergegeven Criterium van Davenport [9].

**Tabel 5.3 Windhindercriteria volgens Davenport voor luchttemperaturen boven 10°C
(eenheden: Beaufortgetallen)**

Activiteit	Toepasbaar voor	Relatief comfort bij windkrachten volgens Beaufort			
		aangenaam	toelaatbaar	onprettig	gevaarlijk
vlug lopen	trottoirs	5	6	7	8
wandelen, schaatsen	parken, gebouw- ingangen, ijsbanen	4	5	6	8
kortstondig stilstaan of zitten	parken, pleinen, winkelcentra	3	4	5	8
langdurig stilstaan of zitten	Openluchttheaters, terrasjes, onoverdekte stadions, recrea- tiegebieden	2	3	4	8
Aanvaardbare overschrijdingskans			1 uur/week	1 uur/maand	1 uur/jaar

In de tabel staat voor een aantal activiteiten aangegeven hoe groot de windsnelheid op 10m hoogte, uitgedrukt in Beaufortgetallen, met de daarbij behorende overschrijdingskans mag zijn om een zekere mate van hinder of comfort te bewerkstelligen. Opgemerkt wordt echter dat toepassing van dit op zich zeer complete criterium aanleiding kan geven tot het maken van fouten bij de beoordeling van het windklimaat in de gebouwde omgeving. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat Davenport heeft bepaald bij welke waarden van de gemiddelde snelheid een luchtstroming met lage turbulentie-intensiteit een bepaalde mate van hinder of comfort veroorzaakt. Dit betekent voor de bij een gegeven gemiddelde snelheid optredende vlagsnelheid dat $\hat{v} \approx 1,5\bar{v}$.

Omdat, zoals in hoofdstuk 4 al is gebleken, in de gebouwde omgeving de verhouding $\frac{\hat{v}}{\bar{v}}$ veel groter kan zijn dan 1,5, zal hier de werkelijke hinder, die op grond van het criterium bij een gegeven waarde van $\bar{v}$ is te verwachten, eveneens groter zijn.

Hoewel in enkele gevallen met bovenstaande waarschuwend opmerking rekening zal moeten worden gehouden, is uit onderzoeken van Melbourne, Joubert, Davenport en Isyumov gebleken dat in het algemeen in gebieden, die als onaangenaam worden ervaren, de gemiddelde snelheid hoog en de turbulentie-intensiteit laag zal zijn.

Dit betekent dat het criterium van Davenport ook in stedelijke gebieden meestal tot betrouwbare uitspraken ten aanzien van het windklimaat zal leiden.

Als laatste wordt een door Penwarden en Lawson opgesteld criterium vermeld dat door het BRE (Building Research Establishment) wordt gehanteerd. Dit criterium is gebaseerd op de overschrijdingskans van een gemiddelde windsnelheid van $5\frac{m}{s}$, omdat is gebleken dat hogere gemiddelde windsnelheden aanleiding geven tot een zekere mate van windhinder. Het criterium luidt als volgt:

$P_{(\bar{v}>5)} > 20\%$	: maatregelen ter verbetering van het windklimaat zijn noodzakelijk
$20\% > P_{(\bar{v}>5)} > 10\%$	: het windklimaat zal aanleiding geven tot klachten, die echter veelal niet ernstig genoeg zijn om tot maatregelen over te gaan
$P_{(\bar{v}>5)} < 10\%$	: het windklimaat zal waarschijnlijk als bevredigend worden ervaren

Ter afsluiting nog de volgende opmerkingen:

- bij de bespreking van het criterium van Davenport is al ingegaan op het bezwaar dat kleeft aan het gebruik van gemiddelde snelheden voor de bepaling van de ondervonden windhinder als functie van de windsnelheid. Om aan dit bezwaar tegemoet te komen wordt soms gebruik gemaakt van de effectieve snelheid", gedefinieerd als:

$$v_e = \bar{v} + 1,5\sigma_v = \bar{v}(1 + 1,5I_v) \quad (5.2)$$

Duidelijk is dat wanneer de hinder afhankelijk wordt geteld van v_e , nu zowel de invloed van de gemiddelde snelheid als van de turbulentie-intensiteit in beschouwing worden genomen [11].

- zowel het subjectieve karakter van de hier besproken criteria als de eerder genoemde relatie, die in het algemeen blijkt te bestaan tussen gebieden met windhinder en de grootte van $\bar{v}$, maken een sterke verfijning van de voorspelbaarheid in de meestal gevallen overbodig. Hierbij komt nog dat eenvoud en snelheid in de praktijk altijd zoveel mogelijk moeten worden nagestreefd.

6. Ontwerpregels

In hoofdstuk 4 is een aantal stedenbouwkundige situaties beschreven waarvan uit windtunnelonderzoek is gebleken dat zij onder bepaalde voorwaarden aanleiding kunnen geven tot windhinder.

Voor de ontwerper, die zich ten doel stelt windhinder te voorkomen, is kennis van deze situaties van essentieel belang. Enerzijds is hij in staat om met behulp hiervan een ontwerp te realiseren dat na uitvoering geen windhinder van betekenis zal veroorzaken. Anderzijds weet hij – wanneer een dergelijk ontwerp ongewenst of onmogelijk is – dat het laten verrichten van een windtunneltest in een vroeg ontwerpstadium noodzakelijk is en dat op grond hiervan veelal een acceptabel windklimaat kan worden verkregen door het aanbrengen van geringe wijzigingen hierin.

Dit is dan ook de reden dat in dit hoofdstuk in de vorm van "ontwerpregels" een overzicht wordt gegeven van situaties, die vrijwel altijd aanleiding geven tot windhinder of die nu juist een beschut windklimaat kunnen creëren.

1. Hoge gebouwen, die voor meer dan de helft van hun hoogte – en tenminste 15m – uitsteken boven de omringende laagbouw, hebben in de directe omgeving ervan vrijwel zeker een verslechtering van het windklimaat tot gevolg.
In die gevallen, waarin de gemiddelde hoogte $\bar{h}$ van de omringende laagbouw groter is dan de helft van de hoogte H van de hoogbouw, blijkt zelden een verslechtering op te treden.
2. De aanwezigheid van pleinen of andere grote, open ruimten rondom hoogbouw werkt meestal nadelig op het windklimaat in de directe omgeving en kan ook in die gevallen, waarin geldt dat $H < 2h$, een slecht windklimaat veroorzaken.
3. Rondom alleenstaande hoogbouw (of groep hoge gebouwen) treedt verslechtering van het windklimaat op bij gebouwhoogten vanaf 15m.
4. in onderdoorgangen bij hoogbouw kunnen extreem hoge lichtsnelheden optreden (gelijk aan 1,20-maal de lichtsnelheid op gebouwhoogte in de ongestoorde aankomende luchtstroming). De enige manier om de hinder, die hier het gevolg van is, te verminderen, is het geheel of nagenoeg geheel afsluiten van de onderdoorgang. Dit roept dan wel de vraag op of er in een dergelijk geval nog wel van een onderdoorgang kan worden gesproken.
Bovenstaande opmerking is ook van toepassing op "hoogbouw op poten".
5. Evenals in onderdoorgangen kunnen ook in nauwe doorgangen tussen hoge gebouwmassa's zeer hoge lichtsnelheden optreden. Verbetering van het windklimaat is hier soms mogelijk door het plaatsen van al dan niet halfdoorlatende schermen.
6. De hindergebieden rondom hoogbouw bestaan uit lobvormige gebieden, die zich vanaf de gebouwhoeken ongeveer in windrichting over een afstand van 1 à 2 gebouwhoogten uit kunnen strekken, en uit het gebied aan de voet van de langsevel, die door de ongestoorde wind wordt getroffen.
7. Geleidelijke versmalling van de hoogbouw bij toenemende gebouwhoogte heeft in het algemeen geen noemenswaardige verbetering van het op zich verslechterde windklimaat tot gevolg.
8. Het windklimaat in de directe omgeving van hoogbouw kan soms worden verbeterd door het aanbrengen van grote luifelconstructies (aanbrengen van kleine luifels boven ingangen en onderdoorgangen heeft geen enkel effect) of door het plaatsen van overkappingsconstructies op voldoende hoogte boven de grond. Een andere mogelijkheid is het plaatsen van de hoogbouw op een "podium" van voldoende afmetingen.
Of dergelijke maatregelen een verbetering van het windklimaat tot gevolg hebben, zal

met behulp van een windtunnel moeten worden bekeken.

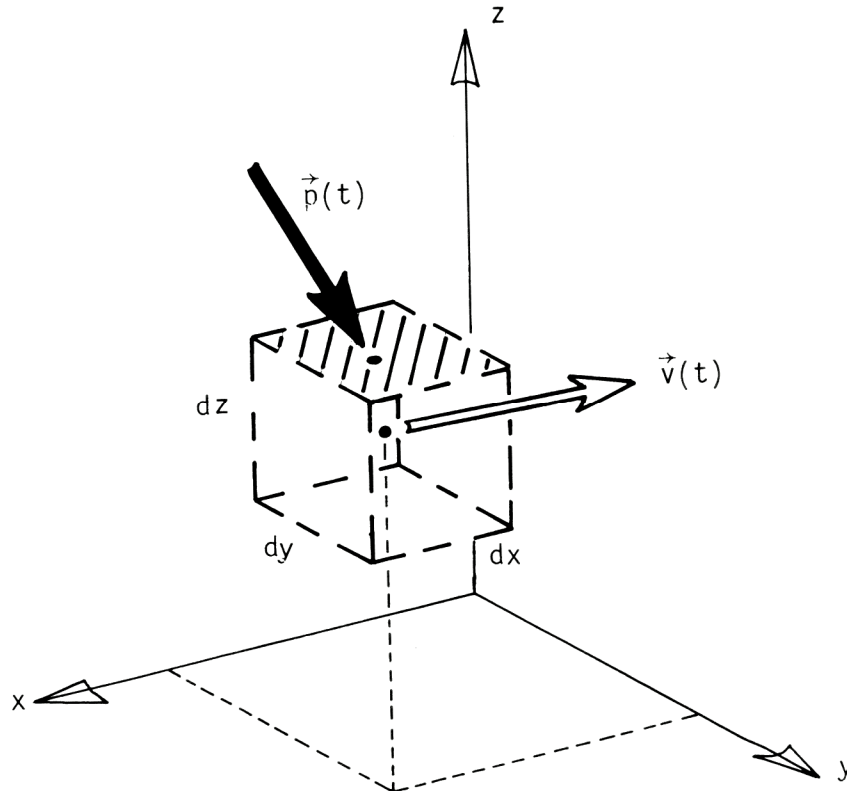
Met de invloed van dergelijke maatregelen op de kwaliteit van het ontwerp zal terdege rekening moeten worden gehouden.

9. Bij “drempelvormige” gebouwmassa’s met een hoogte van 15 à 25m ontstaat aan zijzijde een hindergebied wanneer de richting van de wind hiermee een hoek van ongeveer 45° maakt en wanneer de gebouwhoogte groter is dan de hoogte van de stroomopwaarts gelegen gebouwmassa’s.
Deze hinder kan worden vermeden door loodrecht op deze “drempel” gebouwmassa’s te plaatsen.
10. Zowel bij plaatsing van evenwijdige, ten opzichte van elkaar verspringende gebouwmassa’s als bij plaatsing van langgerekte niet evenwijdige gebouwmassa’s, die vlak bij elkaar zijn gelegen kan onder bepaalde omstandigheden windhinder ontstaan bij gebouwhoogten vanaf 15 m.
11. Met behulp van zogenaamde “celvormige structuren” kunnen, wanneer hiervoor bekende voorwaarden in acht worden genomen, buitenruimten worden gecreëerd met een beschut windklimaat.
12. Bij het toekennen van bestemmingen aan de tussen de gebouwmassa’s gelegen gebieden moet altijd worden nagegaan of het windklimaat, dat volgens bestaande criteria hoort of wenselijk is bij de aard van de activiteit, redelijk overeenstemt met het te verwachten windklimaat.
Indien dit niet het geval is, moet worden bekeken of in de gegeven situatie het windklimaat met eenvoudige windafschermende middelen in voldoende mate kan worden verbeterd.
In het algemeen zal dit betekenen dat het situeren van gebieden, bestemd voor recreatieve doeleinden, in de buurt van hoogbouw beter kan worden vermeden.
Een ander voorbeeld is het projecteren van gebouwingangen in de nabijheid van gebouwhoeken. Gezien de eerder genoemde, lobvormige hindergebieden, geeft dit nagenoeg altijd aanleiding tot grote problemen. De consequentie van deze constatering is dat in het algemeen ingangen ter plaatse van de kopgevels dienen te worden vermeden (zie oude gebouw Bouwkunde).
13. Met behulp van beplanting en al dan niet halfdoorlatende schermen kan het windklimaat in gebieden met in hoofdzaak horizontale luchtstromingen worden verbeterd.
Bij toepassing van deze windafschermende middelen dient echter wel te worden nagegaan of deze bestand zijn tegen de hierop uitgeoefende windkrachten.
Om deze reden zal beplanting dan ook meestal dicht op elkaar in grotere aantallen moeten worden toegepast.
14. Bij toepassing van laagbouw in sterk geaccidenteerd terrein (bijvoorbeeld duingebieden) kan aanzienlijke windhinder ontstaan.
15. Bij hoge gebouwmassa’s van bijzondere afmetingen of vorm – of bij hoogbouw te midden van ingewikkelde stedenbouwkundige structuren – is een windtunnelproef altijd noodzakelijk (bijvoorbeeld TU-wijk rond de hoogbouw van Elektrotechniek en drempelvormige gebouwvorm van Civiele Techniek met de daarin aanwezige onderdoorgangen).
16. Voordat in twijfelgevallen wordt besloten om af te zien van het laten verrichten van een windtunneltest in verband met de daaraan verbonden kosten, moet goed worden gerealiseerd dat:
 - de kosten, die na realisatie van het stedenbouwkundig ontwerp mogelijkerwijs moeten worden gemaakt om het windklimaat te verbeteren, bijna altijd uit zullen stijgen boven de kosten, die aan een windtunneltest zijn verbonden.

- met maatregelen achteraf nooit die verbetering van het windklimaat kan worden bewerkstelligd, welke door middel van veelal kleine wijzigingen in het allereerste ontwerpstadium mogelijk is.
- maatregelen achteraf altijd een aantasting van het gerealiseerde ontwerp zullen inhouden.

Appendix A: Begrippen uit de stromingsleer

In elk stromingsveld kan een denkbeeldig volume-elementje worden bekeken, waarvan positie, vorm en volume niet veranderen. Zie Figuur A-1.



Figuur A-1 Denkbeeldig volume-elementje in het stromingsveld

Door de denkbeeldige omgrenzingen van dit elementje vindt transport van massa (gas of vloeistof) plaats.

Op ieder tijdstip kan aan de massa binnen het volume-elementje een aantal fysische grootheden worden toegekend zoals een snelheid $\vec{v}_{(t)}$, een versnelling $\vec{a}_{(t)}$, een temperatuur $T_{(t)}$, een soortelijke massa $\rho_{(t)}$ en een spanningsvector $\vec{p}_{(t)}$ op de vlakjes, die het volume-elementje omgrenzen. In de stromingsleer wordt de relatie beschreven, die tussen de hier genoemde grootheden bestaat. Zie [4],[5].

De volgende begrippen kunnen nu worden geformuleerd:

Stationaire- en niet-stationaire stromingen

Wanneer in een aantal punten van het stromingsveld geldt dat genoemde fysische grootheden in de tijd variëren, wordt gesproken over een “niet-stationaire stroming”.

Voor “stationaire stroming” geldt dat in elk punt van het stromingsveld de grootheden onveranderlijk zijn.

Ter voorkoming van misverstanden wordt nog opgemerkt dat de fysische grootheden in het algemeen wel van punt tot punt zullen verschillen.

Samendrukbare- en onsamendrukbare stromingen

Wanneer de dichtheid ρ niet in alle punten van een stromingsveld even groot is, wordt gesproken over een “samendrukbare stroming”.

Is dit echter wel het geval, dan is er sprake van een “onsamendrukbare stroming”.

Laminaire- en turbulente stromingen

Bij bepaalde stromingsproblemen (bijvoorbeeld bij de doorstroming van buizen) ligt de richting, waarin het massatransport plaatsvindt, vast. Deze richting wordt "hoofdstroomrichting" genoemd.

Wanneer er sprake is van een dergelijke hoofdstroomrichting, hoeft dit voor de richting van de snelheid in een punt van het stromingsveld nog niet te betekenen dat deze hieraan evenwijdig is.

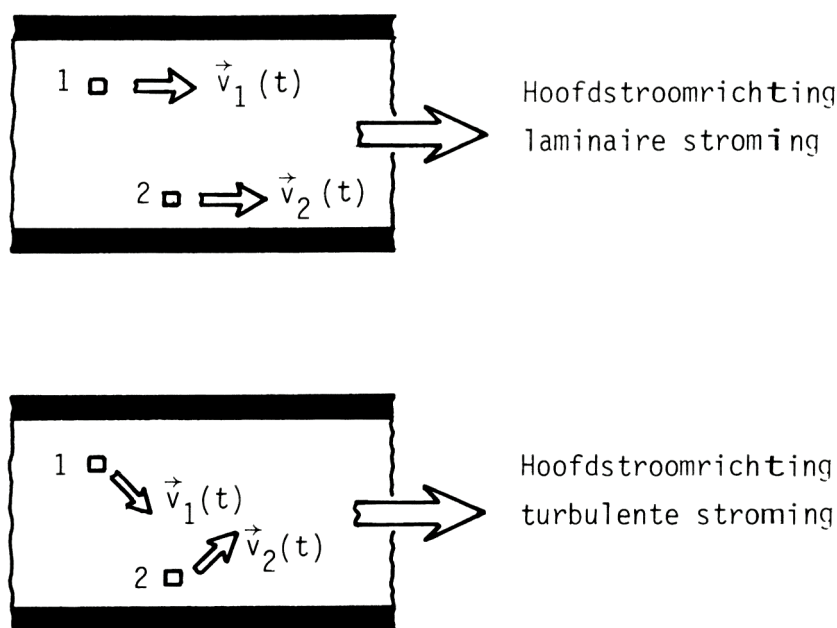
Wanneer op ieder tijdstip de richting van de snelheid in elk punt van een vlak – loodrecht op de hoofdstroomrichting – evenwijdig is aan de hoofdstroomrichting, wordt gesproken over een "laminaire stroming".

Omdat in de richting, loodrecht op de hoofdstroom, geen transport van massadeeltjes plaatsvindt, wordt een laminaire stroming ook wel een "gelaagde stroming" genoemd. Zie Figuur A-2.

In een "turbulente stroming" varieert de richting van de snelheid in elk punt van het stromingsveld en is daardoor niet op elk moment evenwijdig aan de hoofdstroomrichting. Nu vindt wel massatransport plaats in de richting loodrecht op de hoofdstroomrichting. Zie Figuur A-2.

Opmerking:

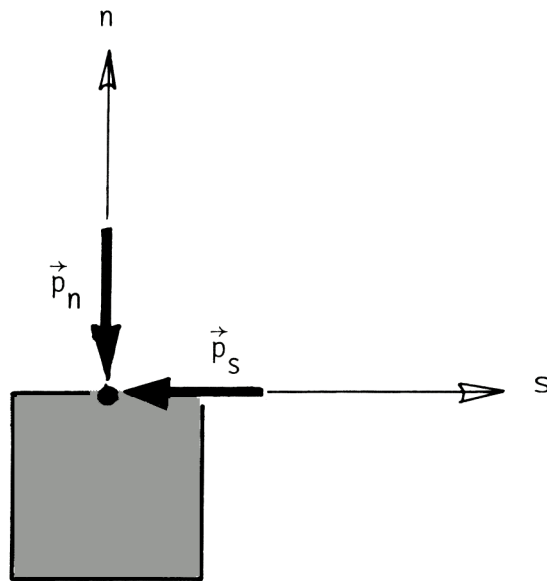
Strikt genomen is een turbulente stroming dus nooit stationair. Omdat bij bepaalde turbulente stromingen blijkt dat in elk punt van het stromingsveld de gemiddelde snelheid, bepaald over een willekeurige periode, niet in grootte en richting verandert, wordt in dit soort gevallen gesproken over "stationair turbulente stromingen" of ook wel over "quasistationaire stromingen".



Figuur A-2 Richting van de snelheid in twee punten van het stromingsveld bij laminaire- en turbulente buisstroming.

Wrijvingsloze- en viskeuze stromingen

Op elk van de vlakjes, die de omgrenzing vormen van een in een stromingsveld gelegen volume-elementje, worden door de omgrenzende materie (gas of vloeistof) krachten uitgeoefend. Deze krachten resulteren in het algemeen in een zogenaamde normaalspanningsvector $\vec{p}_n$ en in een schuifspanningsvector $\vec{p}_s$. Zie Figuur A-3.



Figuur A-3 Spanningsvectoren $\vec{p}_n$ en $\vec{p}_s$ op een vlakje van een denkbeeldig volume-elementje.

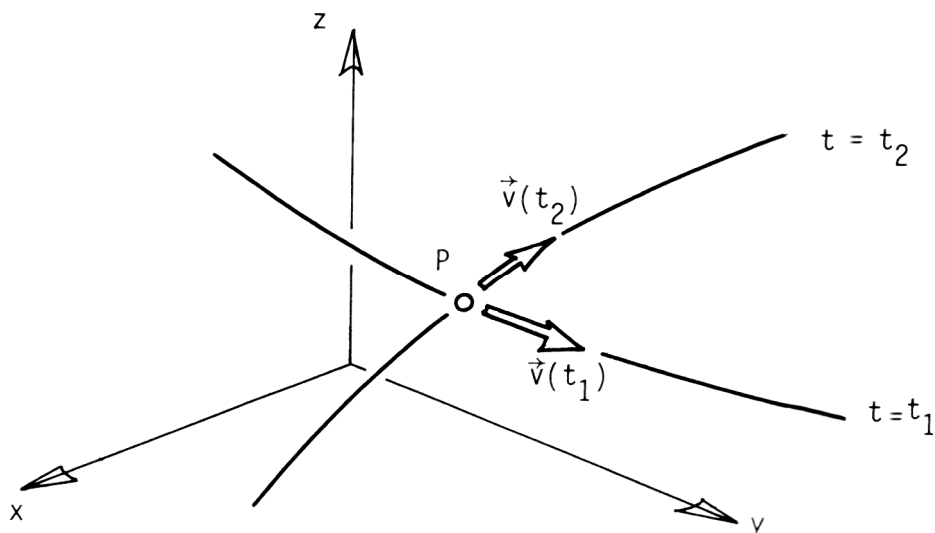
Wanneer in ieder punt van het stromingsveld geldt dat $|\vec{p}_s| = 0$ voor iedere stand van het vlakje door dat punt dan is er sprake van een “wrijvingsloze stroming”. Dit betekent dus dat in wrijvingsloze stromingen de uiteindelijke spanningsvector altijd loodrecht op het beschouwde vlakje staat.

Voor de zogenaamde “viskeuze” stromingen geldt dat $|\vec{p}_s| \neq 0$. Bij deze stromingen treden dus wèl wrijvingskrachten op.

Stroomlijn, stroombuis en stroombaan

Op ieder tijdstip kan in een stromingsveld een denkbeeldige verzameling lijnen worden gevonden met de eigenschap, dat in ieder punt van elk van deze lijnen de richting van de snelheid samenvalt met de raaklijn aan deze lijn door dat punt.

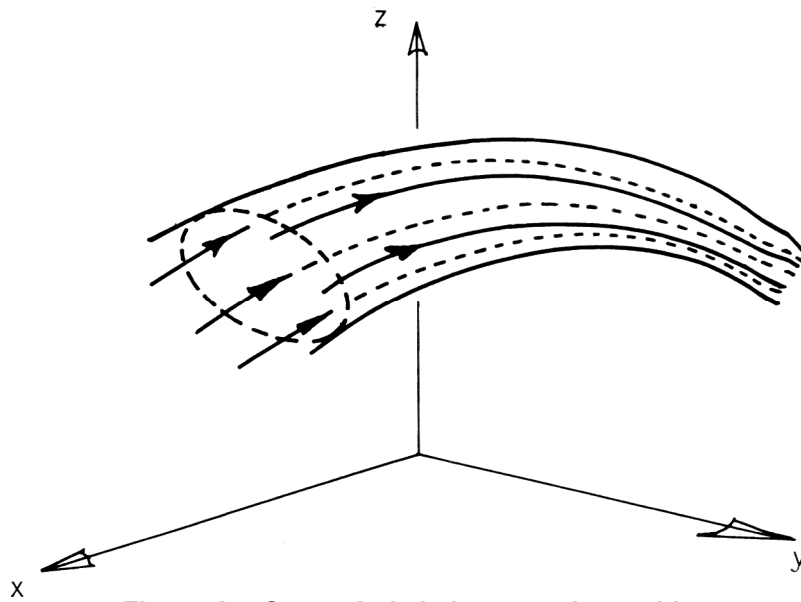
Deze lijnen worden “stroomlijnen” genoemd. Zie figuur A-4.



Figuur A-4 Stroomlijnen door een vast punt P op de tijdstippen t_1 en t_2 .

Onder een “stroombuis” wordt een denkbeeldige buis verstaan waarvan de wand uit stroomlijnen bestaat.

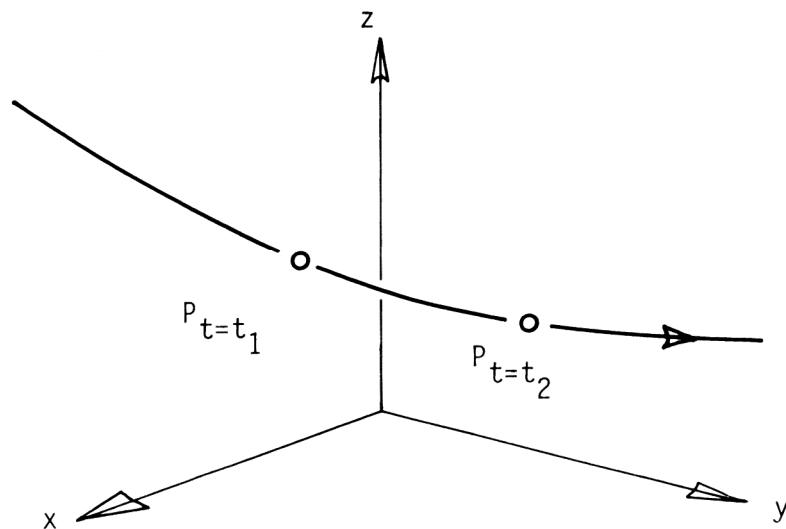
Door de wand van een stroombuis vindt dus géén massatransport plaats. Zie Figuur A-5.



Figuur A-5 Stroombuis in het stromingsveld

Onder een “stroombaan” wordt verstaan de baan, die door een massadeeltje in het stromingsveld wordt beschreven. Zie figuur A-6.

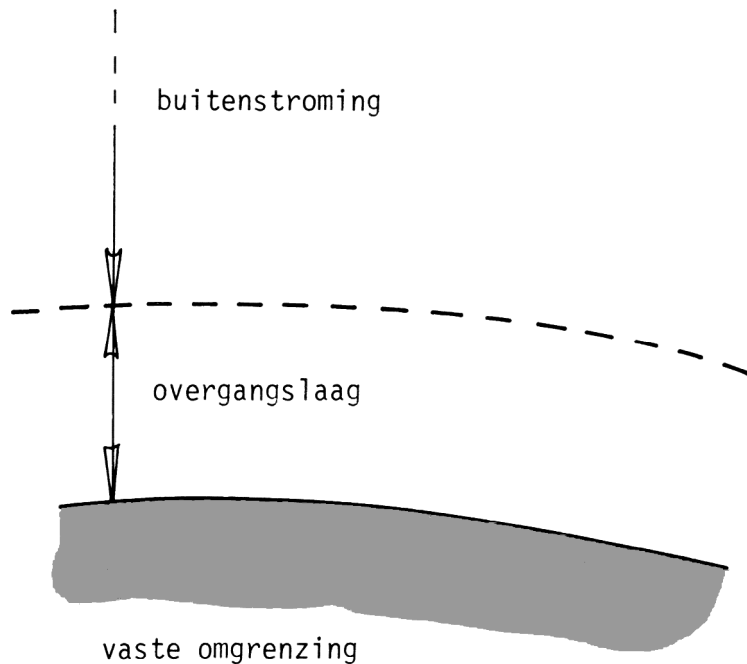
Opmerking: voor stationaire stromingen geldt dat “stroomlijnen” en “stroombanen” identiek zijn.



Figuur A-6 Stroombaan in stromingsveld.

Appendix B: Grenslagen

In veel gevallen kan een stromingsveld in de nabijheid van een vaste omgrenzing (wand) worden onderverdeeld in een zogenaamde “buitenstroming”, op enige afstand van deze omgrenzing gelegen, en in een stroming in de zogenaamde “overgangslaag”, gelegen tussen de buitenstroming en de omgrenzing. Zie Figuur B-1.



Figuur B-1 Onderscheid tussen buitenstroming en overgangslaag.

Deze onderverdeling is zinvol omdat de eigenschappen van de buitenstroming verschillen van die in de overgangslaag.

Om een goed beeld van deze verschillen te krijgen is het noodzakelijk te kijken naar de veranderingen in plaats, stand en vorm van een massa-elementje, die bij dit elementje optreden tijdens zijn weg door het stromingsveld. Deze veranderingen, onder te verdelen in respectievelijk translatie, rotatie en deformatie zijn in Figuur B-2 weergegeven.

Voor de volledigheid wordt nog opgemerkt dat de zogenaamde volumeveranderingen hier niet worden genoemd omdat uitsluitend stromingsvelden worden bekeken, die als onsamendrukbaar mogen worden beschouwd.

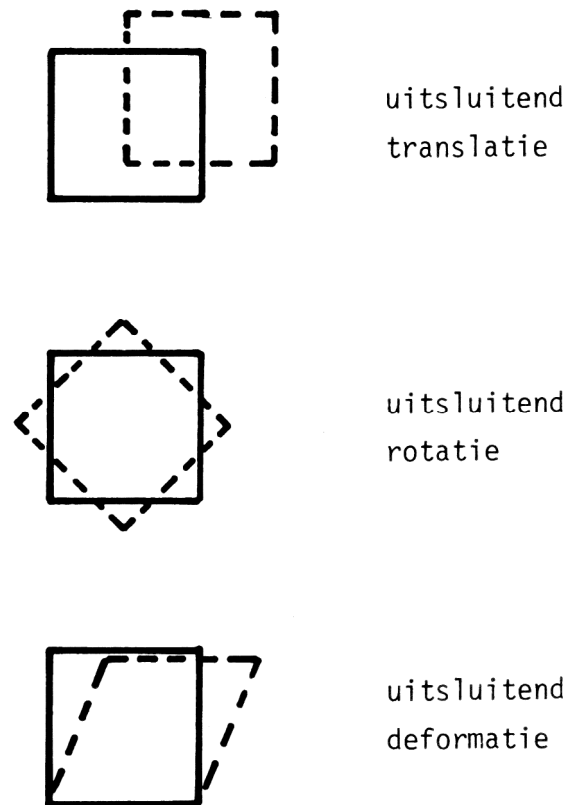
Deformatie treedt op wanneer bijvoorbeeld tussen boven- en ondervlak van een massa-elementje een snelheidsverschil bestaat. Voor de in Figuur B-3 getekende situatie bedraagt dit verschil $\frac{\partial v}{\partial n} dn$.

Tussen de zogenaamde snelheidsgradiënt $\frac{\partial v}{\partial n}$ En de in Appendix A genoemde schuifspanning, meestal aangegeven door middel van τ , blijkt voor de zogenaamde Newtonse vloeistoffen een lineair verband te bestaan. In formulevorm weergegeven:

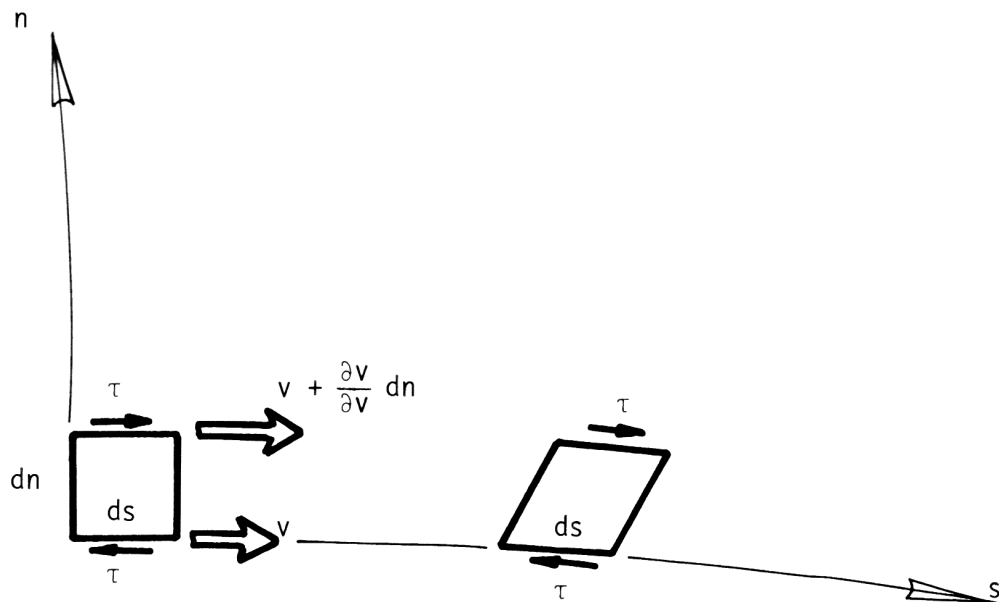
$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial n}$$

Hierin is η de dynamische viscositeit [kg/ms].

Na voorgaande informatie kunnen nu enkele verschillen tussen de buitenstroming en de stroming in de overgangslaag worden genoemd.



Figuur B-2 Veranderingen in plaats, stand en vorm van een massa-elementje in een onsamendrukbare stroming.



Figuur B-3 Deformatie van een massa-elementje.

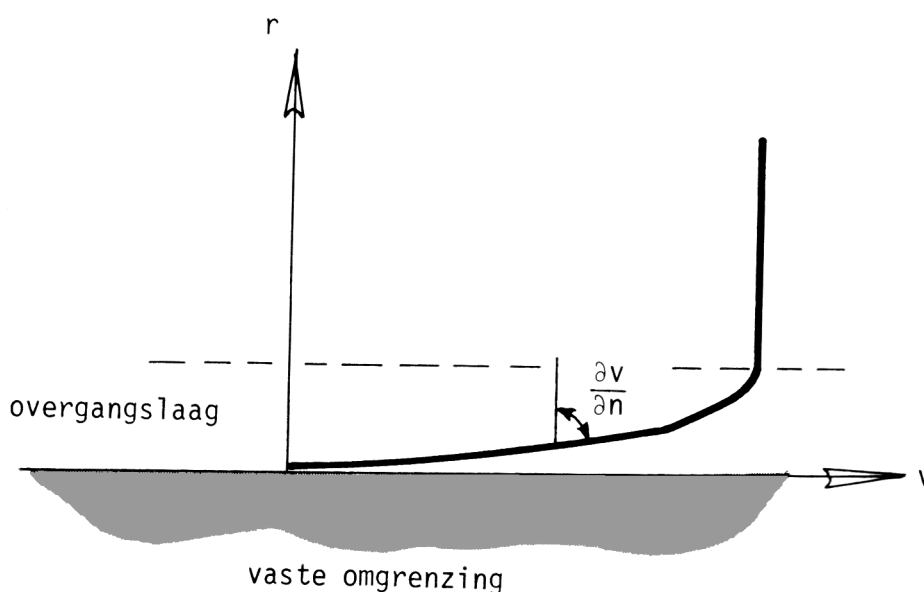
Voor de buitenstroming geldt dat tengevolge van de geringe waarde van η de schuifspanningen bijna altijd verwaarloosbaar klein zijn.

Ook is gebleken dat deze stroming meestal rotatievrij is (zogenaamde potentiaalstroming). Wanneer aan dit type stroming in stationaire toestand moet worden gerekend mag gebruik worden gemaakt van de formule van Bernoulli. Zie appendix F.

In het geval van een rotatievrije stroming geldt dan zelfs dat de in deze formule voorkomende constante voor het gehele stromingsveld geldt en niet uitsluitend langs een stroomlijn.

In de overgangslaag is de situatie duidelijk anders. Ondanks de geringe waarde van η treden hier grote schuifspanningen op ten gevolge van de grote waarden van de snelheidsgradiënt.

Dat de snelheidsgradiënt groot kan zijn kan aannemelijk worden gemaakt door te bedenken dat in de vaak zeer dunne overgangslaag de snelheid van een vaak zeer grote waarde op de grens met de buitenstroming afneemt tot een snelheid nul (zogenaamde hechtconditie) ter plaatse van de omgrenzing. Zie Figuur B-4.



Figuur B-4 Grote waarden voor de snelheidsgradiënten in dunne overgangslagen

De formule van Bernoulli mag hier dus niet worden toegepast.

Verder is de stroming in de overgangslaag nooit rotatievrij.

Zoals reeds is opgemerkt, is de dikte van de overgangslaag vaak zeer gering. In sommige gevallen echter kan deze dikte dermate groot worden dat het gehele stromingsveld als overgangslaag moet worden beschouwd.

Gebleken is nu dat deze dikte afhangt van de zogenaamde grootte van Reynolds, aangeduid als Re . Deze dimensieloze grootte kan voor elk stromingsprobleem worden bepaald door de voor dat probleem karakteristieke snelheid v te vermenigvuldigen met de eveneens karakteristieke lengte l en het verkregen product te delen door de zogenaamde kinematische viscositeit ν :

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

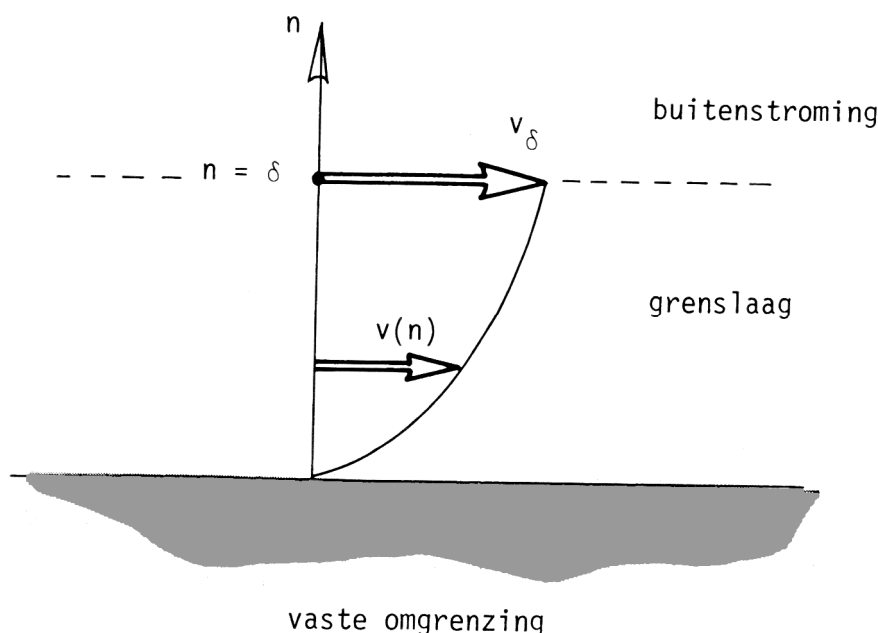
Waarin $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ [m^2/s]

(wordt bijvoorbeeld bekeken de doorstroming van een buis, dan wordt voor v de gemiddelde snelheid en voor l de buisdiameter genomen).

Bij kleine Re (bijvoorbeeld $Re=1$) treedt de situatie op waarbij eigenlijk het gehele stromingsveld als overgangslaag is op te vatten, dus waarbij een onderscheid tussen overgangslaag en buitenstroming niet kan worden gemaakt.

Bij grote Re ($Re \gg 1$) ontstaat een zeer dunne overgangslaag, die in navolging van Prandtl "grenslaag" wordt genoemd.

Over deze grenslagen wordt in het hiernavolgende één en ander gezegd.
 De stroming in een grenslaag blijkt, afhankelijk van de waarde van Re , laminair of turbulent te zijn. Het is van belang om dit onderscheid te maken omdat het snelheidsverloop in de laminaire stroming duidelijk anders is dan het snelheidsverloop in de turbulente stroming.
 Een laminaire grenslaagstroming treedt op voor waarden van $Re < 10^5$. Het verloop van de snelheid over de dikte van de grenslaag blijkt met grote nauwkeurigheid te kunnen worden benaderd door een parabool. Zie figuur B-5.



Figuur B-5 Snelheidsverdeling in een laminaire grenslaagstroming.

In formulevorm:

$$v_{(n)} = v_{\delta} \left(\frac{2n}{\delta} - \frac{n^2}{\delta^2} \right) \quad (\text{B-1})$$

Hierin is:

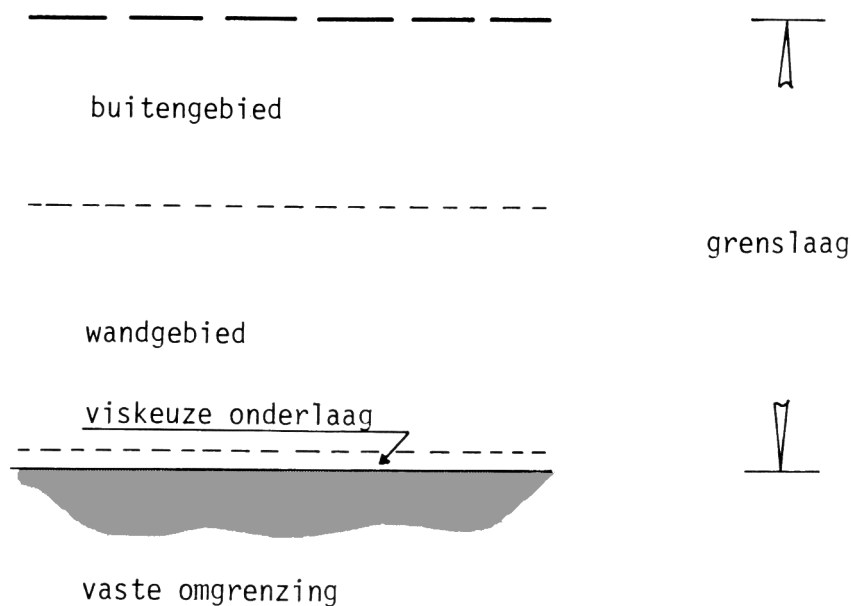
- $v_{(n)}$: snelheid op hoogte n
- v_{δ} : snelheid op de grens met de buitenstroming
- δ : grenslaagdikte

Met behulp van (B-1) kunnen nu ook de schuifspanningen worden bepaald. Voor de schuifspanning op de wand wordt nu gevonden:

$$\tau_{n=0} = \eta \left(\frac{\partial v}{\partial n} \right)_{n=0} = \tau_0 = \frac{2\eta v_{\delta}}{\delta} \quad (\text{B-2})$$

Voor waarden van $Re > 4 \cdot 10^6$ is de grenslaagstroming turbulent (voor de volledigheid wordt opgemerkt dat hier wordt uitgegaan van de in appendix A genoemde quasi-stationaire turbulente stroming. In plaats van de snelheid v wordt daarom gesproken over de gemiddelde snelheid $\bar{v}$).

Voordat kan worden gesproken over “de snelheidsverdeling in een turbulente grenslaag” is het noodzakelijk één en ander te zeggen over de diverse lagen, die in dergelijke grenslagen kunnen worden onderscheiden. In figuur B-6 is aangegeven dat allereerst een onderscheid kan worden gemaakt tussen een buitengebied en een wandgebied.

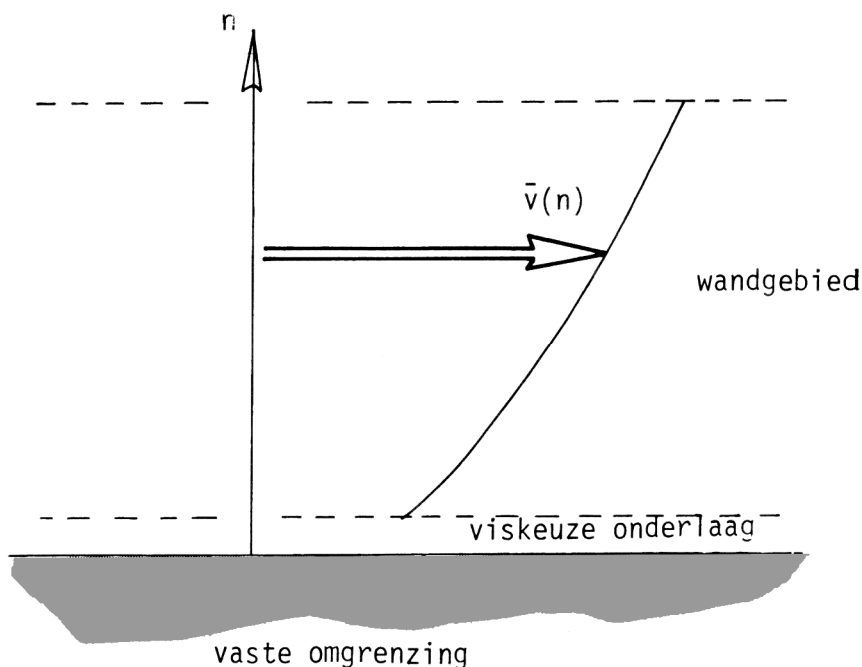


Figuur B-6 Nadere onderverdeling van de turbulente grenslaag

Dit wandgebied kan vervolgens worden onderverdeeld in een aantal lagen, waarvan alleen de zeer dunne, tegen de omgrenzing aan liggende viskeuze onderlaag wordt genoemd. De snelheidsverdeling in het wandgebied blijkt ongeveer vanaf de viskeuze onderlaag logaritmisches te zijn en kan in formulevorm als volgt worden weergegeven:

$$\bar{v}_{(n)} = c_1 \ln(c_2 n + C)$$

Zie Figuur B-7



Figuur B-7 Logaritmische snelheidsverdeling in het wandgebied bij turbulente grenslaagstromingen.

De waarde van de coëfficiënt c_2 en van de constante C – en daarmee het snelheidsverloop – blijkt sterk afhankelijk te zijn van de ruwheid van de omgrenzing. Dit kan aannemelijk worden gemaakt door te bedenken dat bij een ruwe wand de oneffenheden (ruwheden) ver

door de viskeuze onderlaag heen steken, waardoor het effect van deze onderlaag te niet wordt gedaan; er ontstaat eigenlijk een grenslaagstroming waarin de viskeuze onderlaag ontbreekt.

De snelheid in het buitengebied blijkt ook logaritmisch te verlopen. Dit verloop verschilt echter van het logaritmische verloop in het wandgebied.

Gebleken is echter dat voor de gehele grenslaag het snelheidsverloop, zowel voor gladde als voor ruwe omgrenzingen, kan worden beschreven met behulp van de volgende formule:

$$\bar{v}_{(n)} = \frac{v_*}{\kappa} \ln \frac{n}{n_0}$$

In elke situatie kunnen de zogenaamde wandschuifspanningssnelheid v_* en de ruwheidlengte n_0 door middel van metingen worden bepaald. De waarde van de constante van Von Karman κ is $\kappa \approx 0,4$ (omdat $\bar{v}_n$ niet negatief mag worden geldt de formule alleen voor $n \geq n_0$).

De snelheidsverdeling blijkt, eveneens voor gladde- en ruwe wanden, tot vlak bij deze wanden te kunnen worden benaderd door de zogenaamde machtwet:

$$\frac{\bar{v}_{(n)}}{\bar{v}_\delta} = \left(\frac{n}{\delta}\right)^\alpha$$

Hierin is:

$\bar{v}_{(n)}$: gemiddelde snelheid op hoogte n

$\bar{v}_\delta$: gemiddelde snelheid in de vrije stroming

δ : grenslaagdikte

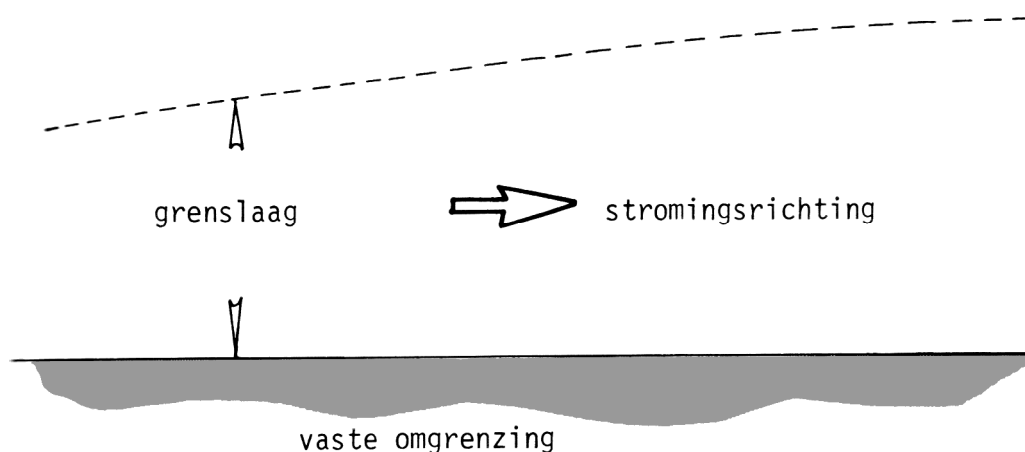
α : constante, die afhangt van de wandruwheid ($\alpha < 1$)

Voor de volledigheid wordt met betrekking tot de turbulente grenslagen nog opgemerkt dat de snelheidsverdeling in de viskeuze onderlaag lineair is.

Ten aanzien van grenslagen kunnen nog de volgende opmerkingen worden gemaakt:

De grenslaagdikte δ neemt bij toenemende afstand in stromingsrichting geleidelijk toe. Deze toename is bij turbulente grenslagen sterker dan bij lineaire grenslagen. Zie Figuur B-8.

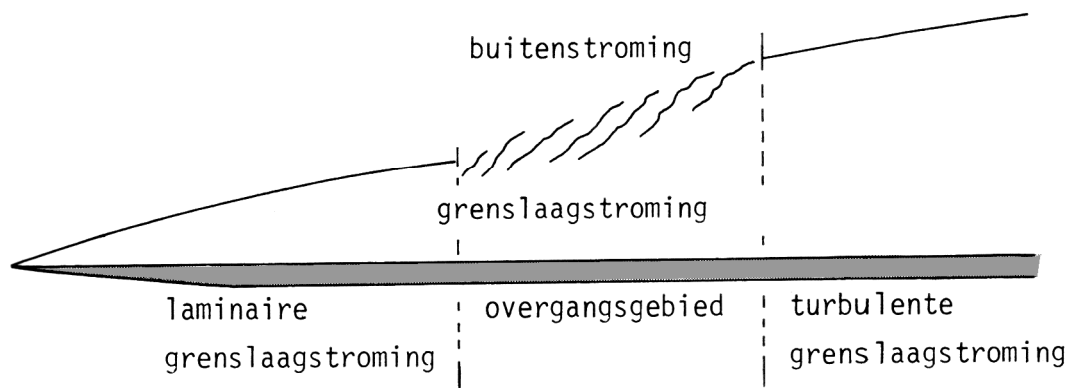
Ook kan worden aangetoond dat de grenslaagdikte bij ruwe omgrenzingen groter is dan bij minder ruwe omgrenzingen. In de in Tabel 2.1 vermelde waarden voor z_g (grenslaagdikte) komt dit effect duidelijk tot uitdrukking.



Figuur B-8 Geleidelijke toename van de grenslaagdikte

Bij toenemende afstand in stromingsrichting neemt de voor de grenslaagstroming karakteristieke lengte – en daarmee de waarde van Re – toe.

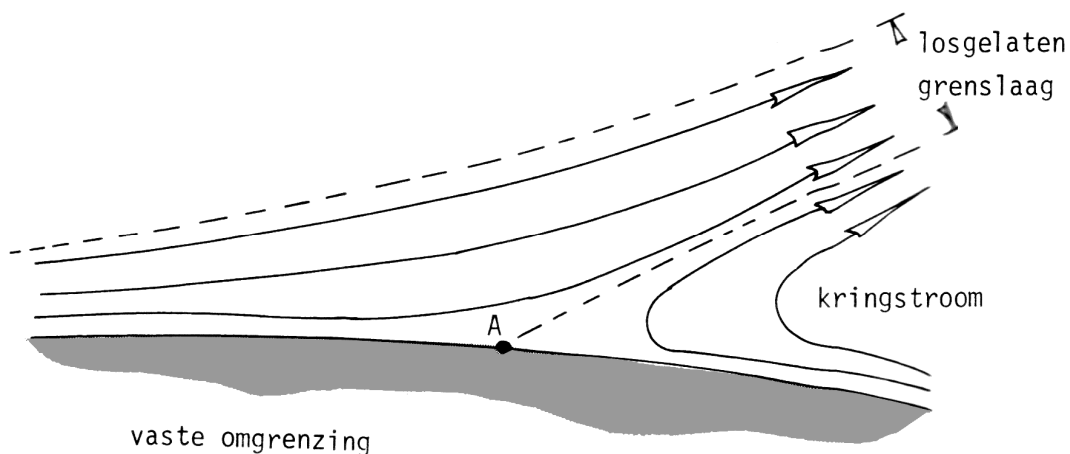
Wanneer als voorbeeld wordt bekeken de grenslaagstroming langs een dunne, vlakke plaat met grote afmetingen dan zal op een bepaalde afstand vanaf het beginpunt gelden dat $Re = 10^5$. Op grotere afstand wordt de waarde bereikt $Re = 4 \cdot 10^6$. Zie Figuur B-9.



Figuur B-9 Overgang van laminaire- naar turbulente grenslaagstroming.

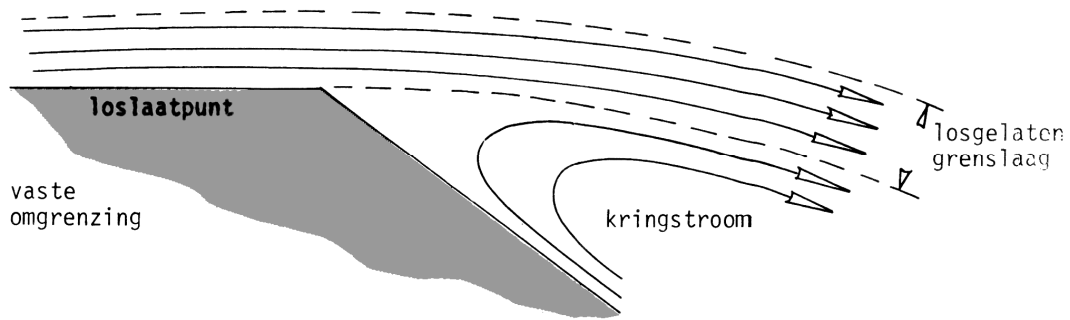
Uit het voorgaande volgt nu dat de grenslaagstroming in eerste instantie laminair zal zijn. In het gebied waarvoor geldt dat $10^5 < Re < 4 \cdot 10^6$ vindt een geleidelijke overgang plaats van laminair naar turbulent. Dit gedeelte van de grenslaagstroming wordt dan ook overgangsgebied genoemd.

In een aantal gevallen komt het voor dat de grenslaag van zijn omgrenzing loskomt. Bij geleidelijk verlopende omgrenzingen kan dit verschijnsel optreden wanneer in de buitenstroming de druk in stromingsrichting toeneemt. Zie Figuur B-10.



Figuur B-10 Loslaten van de grenslaag

Voorbij het zogenaamde "loslaatpunt" A ontstaat dan een tegengestelde, langzaam circulerende kringstroom, die in bepaalde gevallen min of meer stabiel kan zijn. Vaak is het echter zo dat de plaats van punt A onregelmatig verandert en dat de stroming daardoor eveneens een onregelmatig karakter krijgt. Bij abrupte veranderingen in de omgrenzing treedt eveneens loslaten van de grenslaag op. De plaats van het loslaatpunt ligt nu echter vast. Ook nu ligt de losgelaten grenslaag opgesloten tussen de buitenstroming en een langzaam circulerende kringstroom. Zie Figuur B-11.



Figuur B-11 Loslaten van de grenslaag ter plaatse van knik in de omgrenzing

Als kenmerkende verschillen tussen laminaire- en turbulente grenslagen kunnen worden genoemd:

De snelheidsverdeling in turbulente grenslaagstromen is homogener (dat wil zeggen varieert minder in een richting loodrecht op de hoofdstroomrichting) dan in laminaire grenslaagstromingen.

In turbulente grenslaagstromingen is de snelheidsgradiënt $\frac{\partial v}{\partial n}$ ter plaatse van de wand (viskeuze onderlaag) echter veel groter dan bij laminaire grenslaagstromingen.

De wrijving ter plaatse van de wand is bij turbulente grenslaagstromingen daardoor ook veel groter.

Tengevolge van turbulente vermenging neemt in turbulente grenslaagstromingen de snelheid minder snel af bij toenemende druk in stroomrichting dan bij laminaire grenslaagstromingen het geval is. Hierdoor vindt minder gauw loslaten van de grenslaag plaats.

De schuifspanningen in turbulente stromingen zijn meestal groter dan de waarden, die met behulp van formule (B-2) worden gevonden. Dit wordt veroorzaakt door impulstransport (in een richting loodrecht op de hoofdstroomrichting).

Vandaar dat in turbulente stromingen de schuifspanning wordt opgesplitst in een viskeus- en in een turbulent gedeelte:

$$\tau = \tau_{visc} + \tau_{turb}$$

Appendix C: Afleiding $v_{(z)}$

Gevonden zijn de uitdrukkingen:

$$\frac{\bar{v}_{(z)}}{\bar{v}_G} = \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha \quad (\text{C-1})$$

$$\hat{v}_{(z)} = \bar{v}_{(z)} + 3,5\sigma_v \quad (\text{C-2})$$

$$\sigma_v = 0,1\bar{v}_G \quad (\text{C-3})$$

Uit (C-2) en (C-3) volgt:

$$\hat{v}_{(z)} = \bar{v}_{(z)} + 0,35\bar{v}_G \quad (\text{C-4})$$

$$\hat{v}_G = \bar{v}_G + -0,35\bar{v}_G = 1,35\bar{v}_G \quad (\text{C-5})$$

Uit (C-1), (C-4) en (C-5) volgt tenslotte:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{v}_{(z)}}{\bar{v}_G} &= \frac{\hat{v}_{(z)}}{\bar{v}_G} - 0,35 = 1,35 \cdot \frac{\hat{v}_{(z)}}{\hat{v}_G} - 0,35 = \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha \rightarrow \\ \frac{\hat{v}_{(z)}}{\bar{v}_G} &= \frac{1}{1,35} \left[\left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha + 0,35 \right] \end{aligned}$$

Appendix D: Afleiding $C_{(\Theta)}$ en $k_{(\Theta)}$

In hoofdstuk 2 is opgemerkt dat de kans, dat in een gegeven windrichting een gegeven snelheid wordt overschreden, bijna altijd goed kan worden berekend met behulp van een Weibull-verdeling. Voor het hier bedoelde geval ziet deze verdeling er als volgt uit:

$$P_{(>v, \Theta)} = A_{(\Theta)} \exp \left\{ - \left(\frac{v}{C_{(\Theta)}} \right)^{k_{(\Theta)}} \right\} \quad (D-1)$$

Hierin is:

v : een gegeven snelheid [$\frac{m}{s}$]

Θ : een gegeven windrichting

$P_{(>v, \Theta)}$: de overschrijdingskans van de gegeven snelheid v in de gegeven richting Θ

$A_{(\Theta)}$: de kans dat de wind in de gegeven richting Θ waait

$C_{(\Theta)}$: een constante, die aan de hand van resultaten van windsnelheidsmetingen moet worden bepaald en uitsluitend voor deze richting geldig is

$k_{(\Theta)}$: idem

Aangegeven zal worden hoe aan de hand van een windsnelheidsverdeling in één bepaalde windrichting de waarde van de Weibull-parameters $C_{(\Theta)}$ en $k_{(\Theta)}$ kan worden bepaald.

Allereerst wordt gebruik gemaakt van het feit, dat er tussen $\ln(-\ln(\frac{P_{(>v, \Theta)}}{A_{(\Theta)}}))$ en $\ln v$ een lineair verband bestaat. Dit kan als volgt worden aangetoond. Uit (D-1) volgt:

$$\begin{aligned} \ln \{ P_{(>v, \Theta)} \} &= \ln \{ A_{(\Theta)} \} - \left\{ \frac{v}{C_{(\Theta)}} \right\}^{k_{(\Theta)}} \rightarrow \\ \left\{ \frac{v}{C_{(\Theta)}} \right\}^{k_{(\Theta)}} &= -\ln \left\{ \frac{P_{(>v, \Theta)}}{A_{(\Theta)}} \right\} \rightarrow \end{aligned}$$

$$k_{(\Theta)} \ln v - k_{(\Theta)} \ln \{ C_{(\Theta)} \} = \ln \left\{ -\ln \left\{ \frac{P_{(>v, \Theta)}}{A_{(\Theta)}} \right\} \right\} \quad (D-2)$$

Wanneer nu wordt gesteld: $\ln \left\{ -\ln \left\{ \frac{P_{(>v, \Theta)}}{A_{(\Theta)}} \right\} \right\} = y$ en $\ln v = x$ is (D-2) te schrijven als:

$$y = ax + b \quad (D-3)$$

waarin de constanten a en b gelijk zijn aan:

$$\begin{aligned} a &= k_{(\Theta)} \\ b &= -k_{(\Theta)} \ln \{ C_{(\Theta)} \} \end{aligned} \quad (D-4)$$

Appendix E: Voorbeeld berekening $P(>v)$

In Tabel E-1 wordt een gegeven windsnelheidsverdeling bekeken.

Tabel E-1 Gegevens per windrichting met betrekking tot $p_{(v)}$ bij de hier gegeven snelheidsklassen en met betrekking tot de kans dat de wind uit de gegeven richting waait [9].

Wind-richting	SNELHEIDSKLASSEN								Kans op wind uit gegeven richting
	0,5-5 $\frac{m}{s}$	5-10 $\frac{m}{s}$	10-15 $\frac{m}{s}$	15-20 $\frac{m}{s}$	20-25 $\frac{m}{s}$	25-30 $\frac{m}{s}$	30-35 $\frac{m}{s}$	35-40 $\frac{m}{s}$	
NNO	0,957	0,996	0,428	0,141	0,058	0,024	—	—	2,60
NO	0,792	0,326	0,049	0,024	—	—	—	—	1,19
ONO	0,850	0,287	0,015	—	—	—	—	—	1,15
O	1,696	0,685	0,136	—	—	—	—	—	2,52
OZO	1,283	1,093	0,374	0,073	0,010	—	—	—	2,78
ZO	1,667	2,167	0,437	0,058	0,010	—	—	—	4,34
ZZO	1,822	2,843	0,496	0,029	0,005	—	0,005	—	5,20
Z	2,658	5,510	1,433	0,214	0,019	—	—	—	9,84
ZZW	1,433	2,852	1,268	0,301	0,010	—	—	—	5,86
ZW	1,574	3,324	1,798	0,525	0,058	—	—	—	7,28
WZW	1,351	3,285	2,420	1,040	0,185	0,024	0,019	—	8,32
W	1,919	3,984	3,290	1,501	0,345	0,034	0,010	0,005	11,09
WNW	1,370	2,736	2,138	0,972	0,199	0,049	0,005	—	7,46
NW	1,370	2,648	2,182	1,239	0,500	0,121	0,023	0,005	8,10
NNW	1,385	3,017	2,609	1,885	0,850	0,394	0,078	0,015	10,24
N	1,963	3,411	3,139	1,983	1,050	0,355	0,097	0,019	12,03

Hieruit blijkt allereerst dat de kans op wind uit de richting NNO gelijk is aan 2,6% of te wel 0,026. Dit betekent dat nu de waarde bekend is van $A_{(v)}$:

$$A_{(v)} = 0,026.$$

Verder is nu ook de overschrijdingskans bekend van snelheden gelijk aan 5, 10, ..., 25 $\frac{m}{s}$.

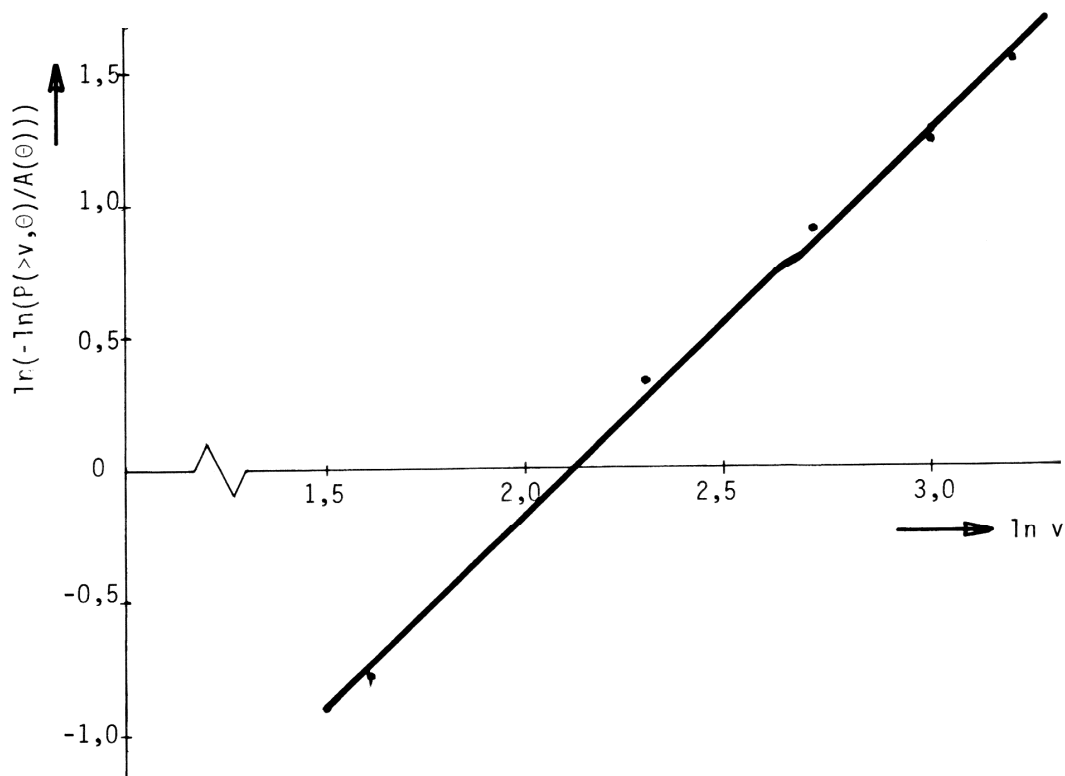
Voor een windsnelheid van 5 $\frac{m}{s}$ is deze kans gelijk aan $0,026 - 0,00957 = 0,01643$. In Tabel E-2 staan de op deze wijze berekende overschrijdingskansen van de hier gegeven windsnelheden vermeld.

Tabel E-2 Overschrijdingskansen van v

v	$P_{(>v, NNO)}$	$\ln v$	$\ln \left\{ -\ln \left\{ \frac{P_{(>v, \Theta)}}{A_{(\Theta)}} \right\} \right\}$
5	0,01643	1,609	-0,779
10	0,00651	2,303	+0,326
15	0,00223	2,708	+0,899
20	0,00082	2,996	+1,240
25	0,00024	3,219	+1,544

Omdat $A_{(\Theta)}$ bekend is kunnen nu voor de hier gegeven waarden van v de daarbij behorende waarden van $\ln v$ en van $\ln \left\{ -\ln \left\{ \frac{P_{(>v, \Theta)}}{A_{(\Theta)}} \right\} \right\}$ worden berekend. Zie eveneens Tabel E-2.

In Figuur E-1 is vervolgens voor elke waarde van v de waarde van $\ln v$ langs de horizontale as – en de waarde van $\ln \left\{ -\ln \left\{ \frac{P_{(>v, \Theta)}}{A_{(\Theta)}} \right\} \right\}$ langs de verticale as – uitgezet.



Figuur E-1 Rechte lijn behorend bij de uitgezette waarden.

Wanneer de overschrijdingskansen, die op de hier aangegeven wijze aan de hand van de gegeven windsnelheidsverdeling kunnen worden verrekend, exact voldoen aan een Weibull-verdeling volgt uit het voorgaande dat de punten, die in Figuur E-1 staan afgebeeld, eveneens exact op een rechte lijn moeten zijn gelegen.

Omdat het echter altijd zo is dat een Weibull-verdeling een goede benadering is voor de werkelijke kansfunctie, zullen de eerder genoemde punten slechts bij benadering op een rechte lijn zijn gelegen. Bepaald moet nu worden welke rechte lijn “zo goed mogelijk” aansluit bij de gevonden punten.

Een hiervoor bestaande methode is die der kleinste kwadraten. Met behulp van deze methode, die hier niet wordt beschreven, wordt gevonden dat de gezochte rechte lijn geschreven kan worden als:

$$y = 1,44 x - 3,05 \quad (\text{E-1})$$

Deze lijn is in Figuur E-1 ingetekend.

Wanneer nu de vergelijkingen (D-3) en (E-1) aan elkaar gelijk worden gesteld, kunnen met behulp van (D-4) de constanten $C_{(\Theta)}$ en $k_{(\Theta)}$ worden opgelost en wel als volgt:

$$k_{(\Theta)} = a = 1,44$$

$$C_{(\Theta)} = e^{-\left(\frac{b}{k_{(\Theta)}}\right)} = 8,31$$

De gezochte Weibull-verdeling is nu bekend en ziet er als volgt uit:

$$P_{(>v, \Theta)} = 0,026 \exp \left\{ -\left(\frac{v}{8,31}\right)^{1,44} \right\} \quad (\text{E-2})$$

Met behulp van (E-2) is het natuurlijk ook mogelijk de snelheid te berekenen, die bij een gegeven overschrijdingskans hoort, bijvoorbeeld $P_{(>v, NNO)} = 10^{-6}$

Gevonden wordt dan $v = 41,6 \text{ m/s}$.

Een ander is terug te vinden in Figuur 2.18.

Deze figuur is tot stand gekomen door de in deze appendix beschreven procedure voor alle windrichtingen te volgen.

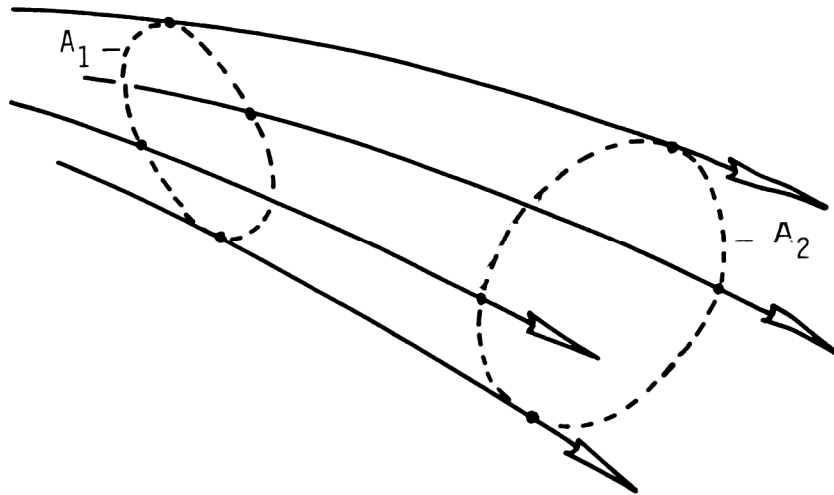
Appendix F: Balansvergelijkingen

Door het opstellen van zogenaamde differentiële balansvergelijkingen wordt een stelsel vergelijkingen verkregen dat de samenhang beschrijft die in elk punt van een stromingsveld tussen fysische grootheden zoals snelheid, druk, temperatuur en dichtheid bestaat. Zie bijvoorbeeld [5].

Omdat het voor een aantal stromingsproblemen mogelijk blijkt om – uitgaande van macro-balansvergelijkingen – inzicht in deze samenhang te verkrijgen zonder van het zojuist genoemde, zeer ingewikkelde stelsel vergelijkingen gebruik te maken, wordt hierover in deze paragraaf één en ander gezegd.

Massabalans

Bekeken wordt het gedeelte van een stroombuis dat is gelegen tussen de doorsnijdingsvlakken A_1 en A_2 . Zie Figuur F-1.



Figuur F-1 Stroombuis met twee willekeurige doorsnijdingsvlakken A_1 en A_2

De massabalans voor dit stroombuisgedeelte luidt nu in woorden:

Wanneer op het tijdstip t zowel de massa wordt bepaald, die per tijdseenheid het stroombuisgedeelte binnentreedt, als de massa, die per tijdseenheid het stroombuisgedeelte verlaat, dan is het verschil tussen deze binnentredende en uittredende massa gelijk aan de toename van de massa binnen het stroombuisgedeelte op dit tijdstip.

Voor onsamendrukbare stromingen kan nu voor de gemiddelde snelheden $\bar{v}_1$ en $\bar{v}_2$, die respectievelijk in de doorsnijdingsoppervlakken A_1 en A_2 optreden, de volgende eenvoudige betrekking worden gevonden:

$$\bar{v}_1 = \frac{A_2}{A_1} \bar{v}_2$$

Voor samendrukbare stationaire stromingen geldt nog dat het massatransport door elke doorsnede van een stroombuis even groot is.

Energiebalans

Wanneer van buiten af energie wordt toegevoerd aan een massa-elementje heeft dit tot gevolg dat snelheid, vorm en volume van dit elementje veranderen, deze energie kan worden

toegevoerd in de vorm van warmte en in de vorm van arbeid geleverd door krachten, die van buiten af op dit elementje werken (zoals de zwaartekracht en de eerder genoemde druk- en wrijvingskrachten).

Door verandering van snelheid verandert de zogenaamde “kinetische energie”.

De vorm- en volumeveranderingen hebben een verandering van de zogenaamde “inwendige energie” tot gevolg.

In woorden luidt de energiebalans nu als volgt:

Voor elk massa-elementje geldt dat de som van mechanische arbeid en toegevoerde warmte gelijk is aan de som van de veranderingen in kinetische- en inwendige energie.

Voor stationaire, wrijvingsloze, onsamendrukbare stromingen kan met behulp van de energiebalans worden aangetoond dat in ieder punt van een stroomlijn geldt:

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2 = C$$

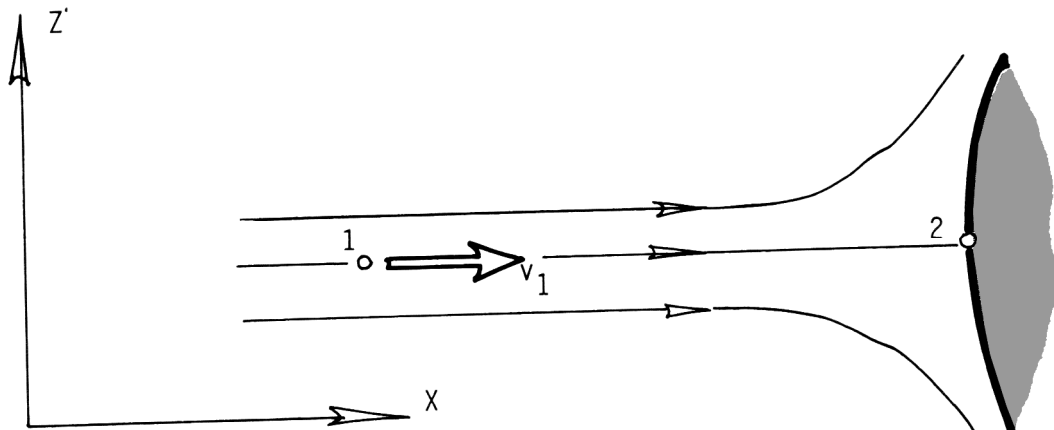
Hierin is:

p	: de druk	$[\frac{N}{m^2}]$
ρ	: de dichtheid	$[\frac{kg}{m^3}]$
v	: de snelheid	$[\frac{m}{s}]$
z	: de hoogte boven een horizontaal referentievlak	$[m]$
C	: een “constante”	$[\frac{N}{m^2}]$

Deze betrekking staat bekend als de formule van Bernoulli.

Wanneer bijvoorbeeld de snelheid in twee verschillende punten van een stroomlijn bekend is, kan met behulp van de formule worden bepaald welk verband tussen de drukken in deze punten bestaat.

Als voorbeeld wordt gekeken naar de omstroming van een voorwerp, waarbij aan de hiervoor gestelde beperkingen is voldaan. Van de stroomlijnen, waarvan er in Figuur F-2 enkele zijn getekend, wordt de stroomlijn bekeken, die het voorwerp in punt 2 treft.



Figuur F-2 Enkele stroomlijnen in de nabijheid van een voorwerp.

Volgens Bernoulli geldt langs deze stroomlijn nu dat:

$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 = C$$

Aangezien $z_1 = z_2$ en $v_2 = 0$, wordt nu gevonden:

Met betrekking tot de energiebalans worden nog de volgende opmerkingen gemaakt:

- het snijpunt van een stroomlijn met een vast voorwerp wordt stuwpunt genoemd (punt 2 in figuur F-2).
- in het algemeen heeft de constante C een waarde, die per stroomlijn zal verschillen.
- voor de meeste gasstromingen geldt dat de term $\rho g z$ mag worden verwaarloosd in verband met de geringe waarde van ρ (tenzij het om zeer grote hoogteverschillen gaat).
- voor samendrukbare stromingen mag Bernoulli niet worden toegepast. Wanneer het om stroomsnelheden gaat, die beneden 0,2 x de geluidssnelheid blijven, blijkt dat stroming echter als onsamendrukbaar te mogen worden beschouwd en kan Bernoulli worden toegepast.
- een meetinstrument dat volledig is gebaseerd op de formule van Bernoulli is de zogenaamde Pitot-buis. Hiermee kunnen in een stromingsveld snelheden worden gemeten. Zie [4].

Impulsbalans

Onder de impuls van een deeltje met massa m dat zich met een snelheid $\vec{v}$ voortbeweegt, wordt het product $m\vec{v}$ verstaan.

Aangetoond kan worden dat er een verband bestaat tussen de impulsverandering van het massadeeltje en de kracht $\vec{F}$, die van buiten af op dit deeltje werkzaam is. Dit verband ziet er als volgt uit:

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

Dit is de zogenaamde impulsbalans in formulevorm. In woorden luidt deze balans:

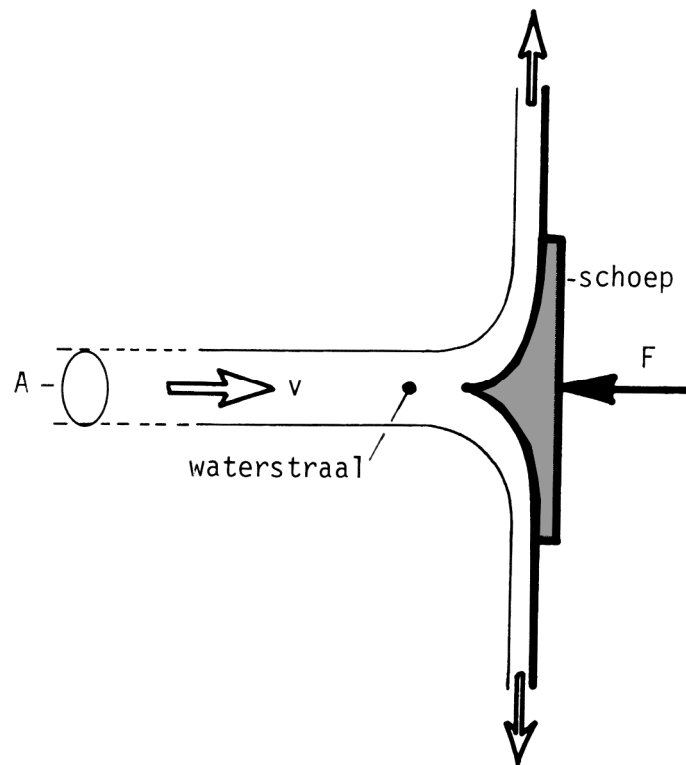
De totale kracht, die van buiten af op een massadeeltje werkzaam is, is gelijk aan de toename van de impuls van dit deeltje per tijdseenheid.

Met behulp van de impulsbalans kan bijvoorbeeld de grootte van de kracht, die in het in Figuur F-3 getekende geval in stationaire toestand door een waterstraal op een stilstaande schoep wordt uitgeoefend, worden gevonden:

$$F = \rho v^2 A$$

Waarin v : gemiddelde snelheid in de doorsnede

A : oppervlak van de doorsneden



Figuur F-3 Kracht, door een waterstraal uitgeoefend op een stilstaande schoep.

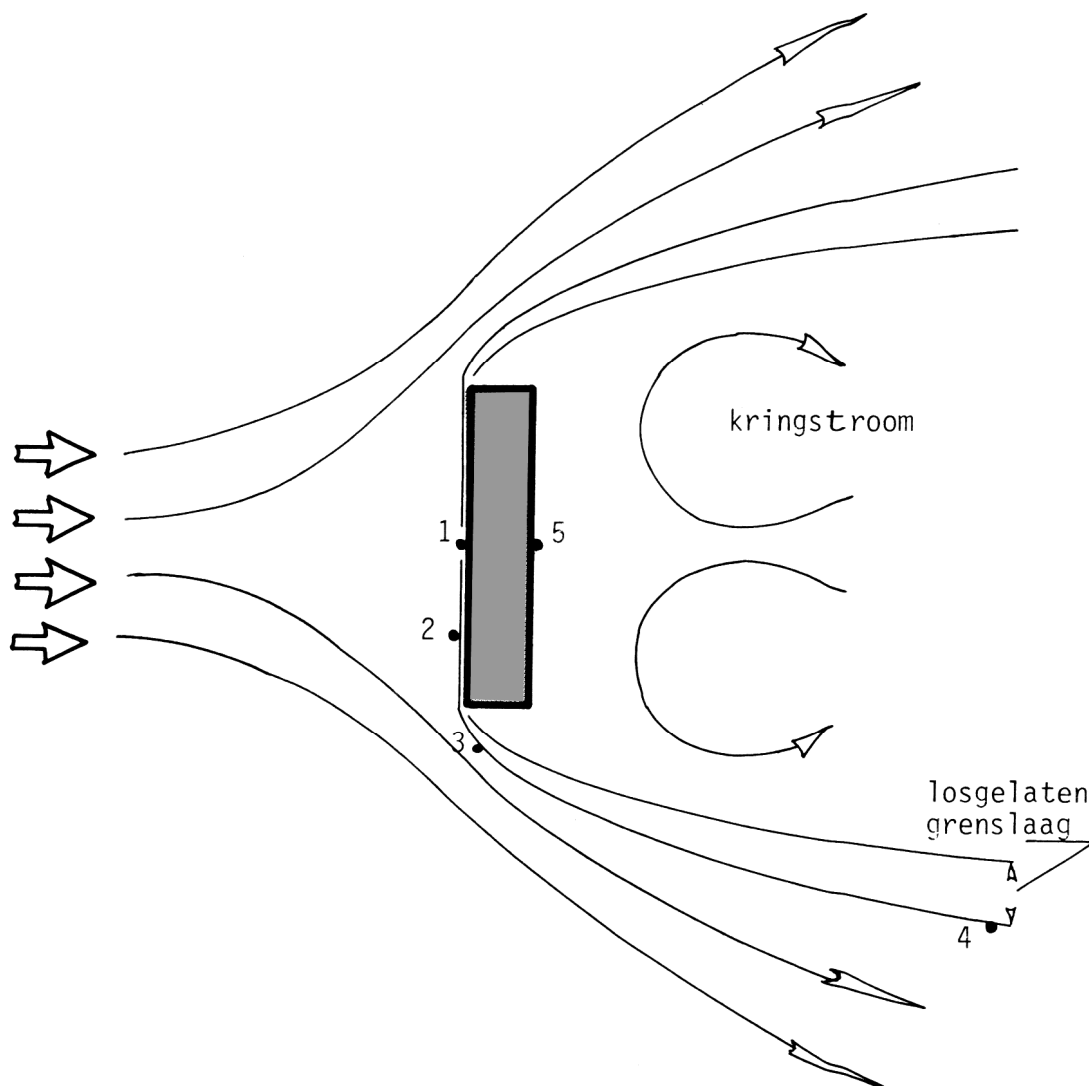
Appendix G: Stromingsveld rond een obstakel

Ook voor obstakels, die zich in een stromingsveld bevinden, geldt dat in de directe omgeving van het obstakel de buitenstroming overgaat in een grenslaagstroming. Nagenoeg altijd treedt loslaten van deze grenslaag op en ontstaan in het gebied tussen grenslaag en obstakel de in Appendix B genoemde kringstromen.

Met behulp van hetgeen in genoemde appendix is besproken, kan vaak een goed beeld worden verkregen van de drukveranderingen, die rond het obstakel optreden, en daarmee van de krachten, die door de stroming op het obstakel worden uitgeoefend.

Als voorbeeld wordt het stromingsveld bekeken dat ontstaat rondom een rechthoekig blok dat met de langste zijde loodrecht op de aankomende stroming staat.

In Figuur G-1 is aangegeven hoe het stromingsveld er in grote lijnen uit blijkt te zien.



Figuur G-1 Stromingsveld rondom een rechthoekige blokvorm.

Wanneer wordt uitgegaan van een wrijvingsloze, rotatievrije gasstroming, vereenvoudigt de formule van Bernoulli omdat de term $\rho g z$ nu mag worden verwaarloosd. Zie appendix F. Nu geldt:

$$p + \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 = C$$

Bovendien geldt de constante C nu voor de gehele buitenstroming.

Aan de hand van de getekende stroomlijnen kan nu in een aantal punten van de buitenstroming en van de omtrek van het rechthoekige blok worden bepaald of hierin drukverhoging dan wel drukverlaging optreedt ten opzichte van de ongestoorde buitenstroming.

In het stuwpunt (punt 1) treedt zoals reeds is aangetoond een drukverhoging op ter grootte van $\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2$.

De snelheid in punt 2 blijkt kleiner te zijn dan $\bar{v}$ en daarmee is de druk in dit punt dus groter dan de druk p in de ongestoorde buitenstroming.

Omdat de stroomlijnenbundel bij punt 3 sterk vernauwt, volgt uit de massabalans dat hier de snelheid sterk toeneemt; de druk neemt dus sterk af.

In punt 4 is de stroomlijnenbundel weer wijder geworden en ligt de druk nog maar iets beneden p .

De druk in het gebied met de kringstromen, ook wel zoggebed genoemd, blijkt nu te liggen tussen p_3 en p_4 in.

Dit betekent dat in punt 5 een drukverlaging plaatsvindt.

Het zal duidelijk zijn dat de hier geschetste drukverdeling resulteert in een kracht op het blok, die stroomafwaarts is gericht.

De kracht F , die in een stromingsveld op een obstakel wordt uitgeoefend, wordt meestal geschreven in de vorm

$$F = C_F \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

Hierin is

- | | | |
|---------|--|---------|
| A : | eenvoudig gekozen oppervlak van het obstakel, bijvoorbeeld de grootste doorsnede loodrecht op de hoofdstroomrichting | $[m^2]$ |
| C_F : | dimensieloze krachtcoëfficiënt | $[-]$ |

C_F blijkt onder andere afhankelijk te zijn van de vorm van het lichaam en de stand hiervan ten opzichte van de hoofdstroomrichting en van de ruwheid van het oppervlak.

Appendix H: Modelregel van Reynolds

Aan de “modelregel van Reynolds” is voldaan, wanneer het getal van Reynolds (zie appendix B) in de werkelijke luchtstroming dezelfde waarde heeft als in luchtstroming, die in de windtunnel wordt opgewerkt.

Dit betekent dat bij een schaalfactor van bijvoorbeeld 1:250 de luchtsnelheid in de tunnel gelijk moet zijn aan 250-maal de werkelijk optredende luchtsnelheid.

Bij een werkelijke windsnelheid van bijvoorbeeld $2 \frac{m}{s}$ wordt in de windtunnel dan al ruimschoots de geluidssnelheid overschreden. In appendix F is echter gesteld dat bij luchtsnelheden tot ongeveer 0,2-maal de geluidssnelheid de luchtstroming nog als onsamendrukbaar mag worden beschouwd. Aangezien bij naleving van de modelregel deze grens ruimschoots wordt overschreden, betekent dit dat de eigenlijke – als onsamendrukbaar te beschouwen – stroming wordt vervangen door een stroming die beslist niet als onsamendrukbaar mag worden opgevat.

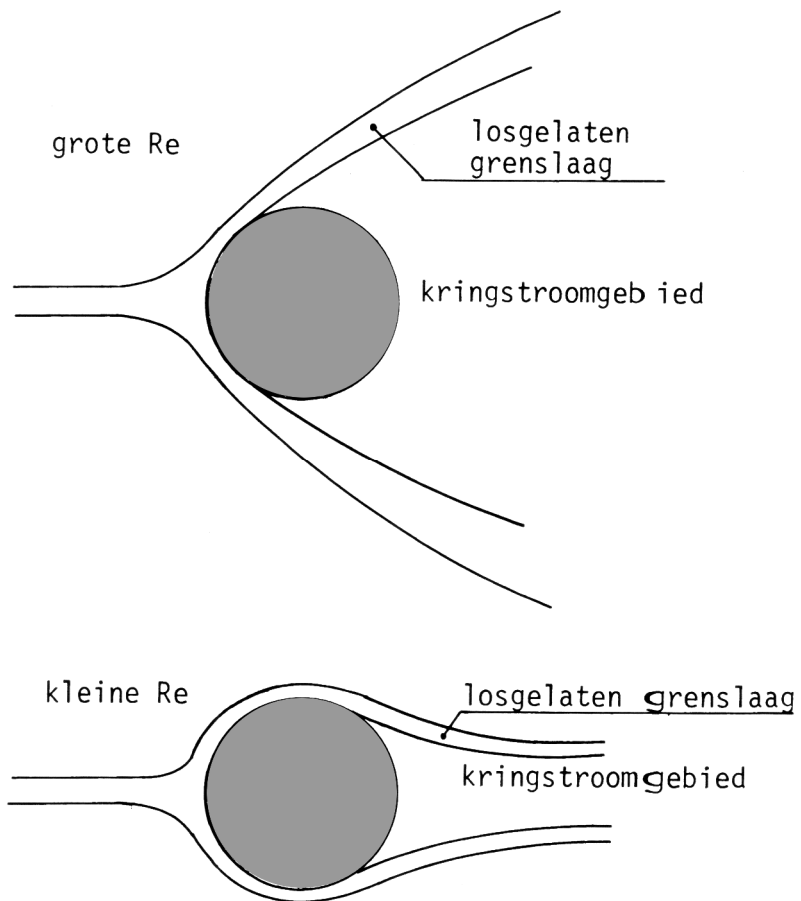
Gezien de verschillen, die bestaan tussen samendrukbare- en onsamendrukbare stromingen, zal het duidelijk zijn dat bij naleving van de modelregel er geen sprake zal zijn van een gelijkvormig stromingsveld.

Formeel redenerend is dus de conclusie dat bij kleine schaalmodellen geen correcte windtunnelproeven mogelijk zijn. Het feit dat dit soort windtunnelproeven toch worden uitgevoerd, vereist dan ook enige toelichting.

Tengevolge van de geringe luchtsnelheden, die bij windtunnelproeven worden aangehouden, zijn de hierbij optredende Reynolds-getallen lager dan die in de werkelijke luchtstromingen.

Voor niet-hoekige gebouwvormen heeft dit tot gevolg dat de plaats van het zogenaamde “loslaatpunt” – en daarmee het rondom deze gebouwen optredende stromingsbeeld – in de tunnel anders zal zijn dan in werkelijkheid. In figuur H-1 is aangegeven hoe de invloed van het getal van Reynolds op de plaats van het loslaatpunt is.

Het testen van dit soort gebouwvormen is dus niet zonder meer mogelijk. Zoals in hoofdstuk 3 al is opgemerkt ligt dit bij de, nagenoeg altijd voorkomende, hoekige gebouwvormen gelukkig anders en is testen ervan in een grenslaagtunnel wél verantwoord.



Figuur H-1 Invloed van Reynoldsgetal op plaats van het loslaatpunt

Literatuurlijst

- [1] Penwarden, A.D. and Wise, A.F.E.; *Wind environment around buildings. Building Research Establishment*, HMSO, London, 1975.
- [2] Hilberseimer, L.; *Nature of cities*. Paul Throbold & co., Chicago, 1955.
- [3] Olgyay, V.; *Design with climate*. Princeton University Press, Princeton N.J. 1963.
- [4] Putte, L.A. van de; *Stroming en Warmte-overdracht I*. Collegedictaat vakgroep Stromingsleer, T.H.-Delft, 1976.
- [5] Putte, L.A. van de; *Stroming en warmte-overdracht II*. Collegedictaat vakgroep stromingsleer, T.H.-Delft, 1978.
- [6] Koeningsverger, Ingersoll, Mayhew, Szokolay; *Manual of Tropical Housing and Building, part I, Climatic Design*. Longman Group Limited, London.
- [7] *Klimaat atlas K.N.M.I.* Staatsuitgeverij, 's Gravenhage, 1972.
- [8] Alexander, A.J. and Coles, C.F.; *A theoretical study of wind flow over hills*. Proceedings of the third international conference on wind effects on buildings and structures, Tokyo, 1971.
- [9] Aynsley, R.M., Melbourne, W., Vickery, B.J.; *Architectural Aerodynamics*. Applied Science Publishers LRD, London.
- [10] *Beperken van windhinder rond gebouwen*. Uitgave S.B.R., nr. 65, Kluwer Technische Boeken B.V.
- [11] Isyumov, N. and Davenport, A.G.; *The ground level wind environment in built-up areas*. Proceedings of the fourth international conference on wind effects on buildings and structures, Heathrow, 1975.
- [12] Feis, N.; *Het woonmilieu in moderne steden*. Verslag van lezingen aan de T.H.-Delft, 1976.
- [13] Wiren, B.G.; *A windtunnel study of wind velocities in passages between and through buildings*. Proceedings of the fourth international conference on wind effects on buildings and structures, Heathrow, 1975.
- [14] Lawson, T.V.; *Wind effects on buildings*. Applied Publishers LTD., London, 1980.
- [15] Lawson, T.V. and Penwarden, A.D.; *The effects of wind on people in the vicinity of buildings*. Proceedings of the fourth international conference on wind effects on buildings and structures, Heathrow, 1975.
- [16] Gandemer, J.; *Wind environment around buildings: aerodynamic concepts*. Proceedings of the fourth international conference on wind effects on buildings and structures, Heathrow, 1975.
- [17] Sturrock, J.W.; *Aerodynamic studies of shelterbelts in New Zealand*. New Zealand Journal of Science, December 1969 and June 1972.
- [18] Daniel Hunt, V.; *Windpower. A handbook on wind energy conversion systems*. Van Nostrand Reinhold company.
- [19] Penwarden, A.D.; *Acceptable wind speeds in towns*. Building Research Establishment, Current Paper, January 1974.