

DE Cp GENERATOR

EEN KENNISSYSTEEM VOOR BEPALING VAN WINDDRUKKEN

ing. B. Knoll en ing. J.C. Phaff
TNO Bouw
november 1996

1. Inleiding

De wind speelt een belangrijke rol bij het ontwerpen van gebouwen en installaties.

Stroming van de wind rond gebouwen kan hinderlijk zijn voor personen.

Afgevoerde verontreinigingen kunnen zich door de wind ongewenst verspreiden naar verblijfplaatsen of naar aanzuigopeningen van installaties.

Onder invloed van winddrukken kunnen:

- constructies overmatig worden belast,
- de afvoermogelijkheden van brandventilatiesystemen worden belemmerd,
- de prestaties van mechanische ventilatiesystemen worden beperkt.

Voor het functioneren van natuurlijke ventilatiesystemen zijn winddrukken zelfs in hoge mate bepalend.

Ondanks de belangrijke rol van de wind, is het voor de meeste ontwerpers en constructeurs een tamelijk ongrijpbaar fenomeen. Meestal komt men niet verder dan het hanteren van eenvoudige vuistregels, die de windinvloed slechts globaal aangeven. Het alternatief, windtunnelonderzoek, geeft betrouwbare gegevens, maar acht men in de meeste gevallen te kostbaar.

Om een tussenoplossing te bieden, is door TNO Bouw een begin gemaakt met een kennissysteem in de vorm van een computerprogramma, dat de ontstane winddrukken op gebouwen kan voorspellen. Dit instrument wordt de 'Cp Generator' genoemd. Cp is de gangbare afkorting van de snelheids-onafhankelijke winddrukcoëfficiënt (pressure coefficient).

2. De opzet van het programma

De Cp Generator is gebaseerd op systematisch verzamelde meetgegevens [1,2]. Het betreft windtunnelexperimenten aan:

- verschillende karakteristieke blokvormige gebouwen,
- in verschillende terreingesteldheden (bodemruwheden),
- met en zonder obstakels van verschillende grootte op systematisch variërende afstanden.

In de experimenten zijn de dimensieloze winddrukken (Cp's) vastgelegd, op een groot aantal meetpunten, verdeeld over alle gebouwgevels en het dak.

Door de systematische vastlegging was het mogelijk de gegevens wiskundig te beschrijven. Om geschikte beschrijvende parameters te vinden, is gebruik gemaakt van aanvullende literatuur [3, 4, 5].

De basisformule is een beschrijving van het winddrukverloop met de windrichting op de middens van gevels en dak van een vrijstaand gebouw [1, 4]. De afhankelijkheid van gebouwafmetingen en bodemruwheid is hier ingebracht.

Vervolgens zijn hierop correcties toegepast om de winddrukken te beschrijven op andere punten dan de middens van de vlakken. De correcties zijn afhankelijk van de gebouwafmetingen, de hoeken van de gebouwvlakken ten opzichte van de hoofdstroomrichting en de bodemruwheid.

Om de winddrukken op schuine daken te bepalen is gebruik gemaakt van systematisch verzamelde gegevens aan daken met verschillende hellingen [6, 7]. Later is dit uitgebreid met een module voor repeterende dakhellingen (bijvoorbeeld kasdekken) [8]. Allereerst is het verloop van goot naar nok in het midden van het gebouw beschreven. Om vervolgens de drukken op andere punten in het dakvlak te bepalen, is een vergelijkbare aanpak gevolgd als voornoemd bij de gevels en platte daken.

Voornoemde beschrijvingen houden nog geen rekening met de invloed van lokale obstakels.

De lokale obstakelinvloed wordt eerst bepaald voor de hoofdstroomrichting waarin het obstakel staat. Maatgevend zijn de C_p -waarde die aan het gebouw wordt verkregen zonder obstakel en de C_p -waarde aan de lijzijde van het obstakel, indien het obstakel voor het gebouw staat, of de C_p -waarde aan de loefzijde van het obstakel, indien het obstakel (dicht) achter het gebouw staat. Als gecorrigeerde C_p -waarde op het gebouw wordt een tussenliggende waarde bepaald, die afhankelijk is van de afstand en grootte van het obstakel. De loef- of lijzijdedruk van het obstakel wordt hierbij op vergelijkbare wijze berekend als voor het gebouw zelf, gebruik makend van de obstakelafmetingen.

Vervolgens worden de C_p -waarden voor de naastliggende windrichtingen bepaald, door gebruik te maken van de hoeken waaronder het obstakel vanuit het betreffende drukmeetpunt is te zien.

In het algemeen worden alleen lokale obstakels meegenomen, die dichterbij het gebouw staan dan 5x hun hoogte, of dichterbij het gebouw dan 1x hun hoogte. Staan obstakels verder weg, dan wordt hun invloed voldoende weergegeven door een aangepaste bodemruwheid voor de betreffende windrichtingen op te geven.

3. Invoeren van gegevens in het programma

Er is gestreefd naar een minimum aan invoer van gegevens door de gebruiker. Bovendien dient de invoer door leken mogelijk te zijn.

Voor de invoer volstaat globaal een plattegrond van het gebouw met zijn omgeving. Men voert de volgende gegevens in:

- de ligging van een hoekpunt van het gebouw en van elk lokaal obstakel ten opzichte van een zelf gekozen referentiepunt in de plattegrond,
- de lengte, breedte, hoogte en dakhelling van het gebouw en elk obstakel (de lengte is de afmeting van de eerste gevel linksom draaiend vanaf het opgegeven hoekpunt. Bij schuine daken wordt de noklijn van het dak evenwijdig aan deze eerste gevel verondersteld),
- de richting van de noordpijl in de opgegeven plattegrond, ten opzichte van de y-as

- (de mogelijkheid van een verdraaide noordpijl kan het opmeten van in te voeren maten vergemakkelijken),
- de oriëntatie (azimut) van de eerste gevel in de plattegrond. Dit betreft de azimut ten opzichte van een denkbeeldig 'noorden' evenwijdig aan de y-as (bij een plattegrond met verdraaide noordpijl is dit dus niet de werkelijke azimut),
 - de aard van het terrein op verschillende oriëntaties, gezien vanuit het gebouwmidden. Hiervoor kan de gebruiker kiezen uit een aantal beschrijvingen van terreinruwheden.

Een voorbeeld van zo'n invoer wordt getoond in de bijlage (zie invoerblok en figuur 1).

Nadat voornoemde gegevens van de plattegrond zijn ingevoerd, dient de ligging van de drukpunten op het gebouw te worden opgegeven. Dit gebeurt door van buitenaf naar elke gevel te kijken en de coördinaten ten opzichte van een punt linksonder aan de gevel op te geven. Voor het dak wordt van bovenaf gekeken, waarbij zich linksonder het eerder gedefinieerde gebouwhoekpunt bevindt (figuur 1).

De posities van de drukpunten kunnen zowel in meters als procentueel worden opgegeven.

4. Uitvoer van het programma

Het computerprogramma 'Cp Generator' produceert per drukpunt Cp-waarden voor windrichtingen van 0° tot 360° , oplopend per graad. Deze gegevens kunnen als tekstbestand worden gelezen. Ze kunnen ook als ASCII-bestand worden ingevoerd om verder te worden gebruikt, bijvoorbeeld in een ventilatie- of sterkteberekeningsprogramma.

De uitvoer wordt tevens standaard grafisch gepresenteerd. Figuren 2, 3 en 4 tonen hiervan voorbeelden.

Figuur 2 laat voor een willekeurig drukpunt de Cp-waarde zien, afhankelijk van de windrichting (lijn door de rondjes \circ). Ter controle wordt tevens de Cp-waarde getoond zonder correctie voor lokale obstakels (lijn door de plusjes +), alsmede de correctie zelf (verticale arcering).

Figuur 3 vertoont dezelfde gegevens in een polair diagram, dat over de plattegrond is getekend. Dit vergemakkelijkt de interpretatie van de gegevens.

Figuur 4 toont een voorbeeld van de presentatie van alle drukpunten tezamen in een gebouwuitslag. Deze presentatie wordt standaard gegeven voor windrichtingen die met stappen van 10° oplopen.

5. Eerste evaluatie

Een belangrijke vraag is uiteraard hoe goed de huidige versie van de Cp Generator reeds voldoet. Om dit te controleren is een vergelijking gemaakt met de drukgegevens van enkele projecten.

De eerste vergelijking betreft een tussenwoning in een rij. De wijk ligt aan de rand van een dorp. Hiervan bestaan zowel praktijkmetingen als windtunnelsimulaties [9]. De windtunnelsimulaties bleken goed te kloppen met de praktijkmetingen.

Voor deze situatie zijn de Cp-waarden berekend met de Cp Generator. De rekenresultaten

worden vergeleken met de windtunnelmetingen voor een voorgevel (figuur 5), een achtergevel (figuur 6) en het dak (figuur 7).

De rekenresultaten tonen goede overeenkomsten met de metingen. Opvallend aan de karakteristieken voor beide gevels is dat bij de berekening over een beperkter windrichtingssegment overdrukken optreden.

Een tweede vergelijking heeft plaatsgevonden voor een parkeergarage met kantorencomplex in een stedelijke omgeving [10]. De obstakeldichtheid is hier hoog. De gebouwen zijn hier en daar tegen elkaar gebouwd.

Vergelijking van de berekende waarden met windtunnelmetingen laat zien dat de trends in Cp-waarden wel worden voorspeld, doch dat teveel detail ontbreekt. In het algemeen treedt een te grote afvlakking op van de Cp-karakteristieken. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat de samengestelde invloed van de lokale obstakels te sterk is en doordat nog niet in complexe gebouwvormen is voorzien.

6. Bruikbaarheid van de huidige Cp Generator

De Cp Generator wordt reeds goed bruikbaar geacht voor niet te complexe gebouw- en obstakelconfiguraties. Voor deze gevallen wordt de Cp Generator een goedkoop, eenvoudig hanteerbaar alternatief geacht tussen de grovere vuistregels en de nauwkeuriger, maar beduidend duurdere windtunnelmetingen.

De Cp Generator wordt reeds goed inzetbaar geacht voor natuurlijke ventilatieberekeningen in veel voorkomende situaties. Beperkingen in de nauwkeurigheid van de voorspelde Cp-waarden zijn hierbij acceptabel. Een vrij grote fout in de voorspelling van de Cp-waarde bij een enkel rooster heeft namelijk een beperkte invloed. In de eerste plaats omdat de luchtstroom door een rooster evenredig is met de wortel uit het drukverschil. In de tweede plaats omdat de luchtstroom door een enkel rooster slechts een deel is van de totale luchtstroom door alle roosters. De fout in de voorspelling van de ventilatie blijft hierdoor beperkt.

Bij sterkteberekeningen kan de Cp Generator reeds goed bruikbaar zijn voor een eerste nuancering van de windbelasting bepaald met vuistregels. Als blijkt dat een zekere nuancering zinvol is, kan deze in de sterkteberekening worden verdisconteerd. Mocht blijken dat de windbelasting zeer kritisch is voor de risico's en kosten van het ontwerp, dan kan alsnog tot een betere onderbouwing door middel van windtunnelonderzoek worden besloten.

7. Geplande aanpassingen

Om het toepassingsgebied van de Cp Generator te vergroten, worden de volgende uitbreidingen voorzien in de algoritmen voor de gebouwen:

- complexe gebouwconfiguraties met een plattegrond samengesteld uit verscheidene rechthoeken;
- gebouwen met niet-haakse hoeken;
- gebouwen met opbouwen en sheds;

- ronde gebouwen of gebouwdelen.

In de algoritmen voor obstakelcorrectie worden aanpassingen voorzien met betrekking tot:

- de onderlinge beïnvloeding van obstakels bij hoge obstakeldichtheid. Hiervoor dienen 'weegfactoren' per obstakel te worden geïntroduceerd;
- obstakels tegen het gebouw;
- seizoenscorrecties voor vegetatie.

Voor het gebruik bij sterkteberekeningen worden aanpassingen voorzien ten aanzien van:

- het toevoegen van laagfactoren;
- verbeterde voorspelling van de invloed van gebouwdetaileringen (randen, aan- en opbouwen);
- controle van de betrouwbaarheid van de drukvoorspelling nabij randen.

Ten behoeve van sterkteberekeningen is bovendien een standaard koppeling met een ventilatiemodel aan te bevelen. Dit maakt het mogelijk binnendrukken achter de constructiedelen (in het gebouw of een spouw) te bepalen, zodat drukverschillen over constructiedelen kunnen worden vastgesteld.

Voor meet- en regeltoepassingen kan de Cp Generator worden ingezet voor verbetering van het signaal van lokale meteomasten. De obstakelcorrectie wordt dan gebruikt om een correctie van het meteosignaal vast te stellen.

Ten aanzien van de gebruiksvriendelijkheid van het programma wordt tenslotte gestreefd naar:

- verbetering van de invoer met uitgebreide, grafisch ondersteunde instructie, een controle op ingevoerde waarden en een helpfunctie;
- uitbreiding van specifieke presentatiemogelijkheden, afgestemd op wensen van gebruikers.

8. Beschikbaarstelling van het programma

Vanwege het feit dat de Cp Generator nog in ontwikkeling is en de toepassing overwogen moet gebeuren, wordt nog geen publieke versie van het programma verspreid. Het programma is echter wel al beschikbaar.

Hiertoe dient men bij TNO Bouw een eenvoudige invoer in ASCII-formaat aan te leveren. Men kan deze onder andere aanmaken met behulp van een DOS-editor. Een voorbeeldinvoer met korte instructie is bij TNO verkrijgbaar.

De invoer wordt door TNO beoordeeld op zijn juistheid. Ter controle worden enkele geschematiseerde plattegronden met drukpunten terug gezonden. Hierna worden fouten in overleg gecorrigeerd.

Vervolgens produceert TNO de eerder genoemde standaard uitvoer. Deze wordt niet alleen op papier, maar ook als bestand toegezonden, zodat men de gegevens eenvoudig in een eigen analyse of rapportage kan gebruiken.

Doordat de gebruiker de invoer zelf aanmaakt zijn de kosten beperkt.

De ervaringen worden gebruikt bij de verdere ontwikkeling van het programma.

Nadat aldus een zekere aanloopfase is doorlopen en ook verdere verbeteringen aan de Cp

Generator zijn doorgevoerd zal een toekomstige publieke versie beschikbaar komen via een 'mail-responder'. Dit houdt een volledig elektronische afhandeling in. Deze wordt als volgt voorgesteld:

- Men haalt voor gebruik elektronisch een aantal bestanden op bij TNO, waarmee men (off-line) zelfstandig de invoer kan maken en testen.
- Vervolgens maakt men zich als gebruiker bekend en geeft een opdracht aan het programma om met de invoer te rekenen.
- De uitvoer wordt enkele minuten later teruggezonden naar het opgegeven E-mail adres. Hierna kan men met de uitkomsten verder werken.

Door de volledig automatische verwerking worden de kosten nog verder beperkt. Verrekening van de kosten vindt plaats op basis van het aantal verrichte 'runs', waarbij voor 'grootverbruikers' sterke kortingen zullen worden gehanteerd.

Men kan zo zonder verdere tussenkomst van TNO op elke willekeurige plaats met een Internet-aansluiting en op elk willekeurig tijdstip gebruik maken van de meest recente versie van het programma.

Voor ondersteuning komt een uitgebreide helpfunctie beschikbaar. Daarnaast kan men via E-mail en telefonisch ondersteuning verwachten.

Om potentiële gebruikers bekend te maken met het programma zal een gratis demoversie beschikbaar komen.

Voor scholingsinstellingen en collega-instituten zal, verbonden aan een samenwerkingsovereenkomst, mogelijk een studieverisie beschikbaar komen.

Tenslotte kunnen er produkten worden verwacht, die van de Cp Generator zijn afgeleid. Twee produkten zijn of worden reeds ontwikkeld, te weten:

- een regelsysteem voor industriële natuurlijke ventilatie, dat in opdracht van een bedrijf is ontwikkeld [11];
- een eveneens door TNO uit te brengen computerprogramma voor optimalisatie van het ontwerp van natuurlijke ventilatie-systemen. Het programma moet het mogelijk maken voor een minimale investering optimaal en met garantiestelling presterende systemen te ontwerpen.

8. Resumé

De Cp Generator kan nu reeds een bruikbaar hulpmiddel zijn voor de ontwerpers en constructeurs die met onzekere windinvloeden te maken krijgen. De verwachting is dat het programma uit kan groeien tot een volwassen ontwerp gereedschap en toetsingsinstrument voor regelgeving. Daarnaast wordt een inzet voorzien bij produkten waar het windgedrag een belangrijke rol speelt.

De voortvarendheid waarmee de verdere ontwikkeling ter hand kan worden genomen, is in hoge mate afhankelijk van de interesse, steun en medewerking van potentiële gebruikers.

Literatuur

- [1] Phaff, J.C.
Modelonderzoek naar de winddrukverdeling rond enkele veel voorkomende

gebouwwormen.
Delft, TNO rapport C 403, november 1977.

- [2] Phaff, J.C.
Voortzetting van modelonderzoek naar de winddrukverdeling rond enkele veel voorkomende gebouwwormen.
Delft, TNO rapport C 429, juni 1979.
- [3] Bottema, M.
Wind climate and urban geometry.
Eindhoven, TU, 1993.
- [4] Walker I.S. and D.J. Wilson
Practical methods for improving estimates of natural ventilation rates.
Coventry (UK), AIVC, conference proceedings, 1994.
- [5] Wolfseher, U. und K. Gertis
Darstellung der lokalen Windverhältnisse über unbebauten und bebauten Flächen auf Grund vorhandener Literatur.
Gesundheits-Ingenieur 99, p. 321 - 352, 1978.
- [6] A. Lugtenburg, H.Ph.L. den Ouden en W.F. de Gids
Drukmetingen aan afvoerkanalen.
Delft, TNO rapport C 302, 1972.
- [7] K.J. Eaton, J.R. Mayne and N.J. Cook
Wind loads on low-rise buildings - effects of roof geometry.
Coventry, AIVC Airbase #132, BRE-paper voor de 4^e windconferentie in Londen 1975.
- [8] Wells and Hoxey
Measurements of wind loads on full-scale glasshouses.
Coventry, AIVC Airbase #587, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 6 (1980) 139-167.
- [9] Gids, W.F. de
Natural ventilation and energy consumption of dwellings.
Delft, TNO rapport C482, juli 1981.
- [10] Kornaat, W.
Onderzoek naar ventilatie van de parkeergarage op kelderniveau in het Hardonk-complex te Deventer.
Delft, TNO rapport R90/281, 1990.
- [11] Cleef, L. en B. Knoll
Geregelde natuurlijke ventilatie: Een aantrekkelijk alternatief naast mechanische en natuurlijke ventilatie.
Verwarming en Ventilatie, p. 559 - 565, juli/augustus 1996.

BIJLAGE

Voorbeeld van een invoerblok

wind.Zo

```
richting: 0 120 230
Zo : 1 0.1 1
```

noordpijl kompasrichting in plattegrond

richting: 10

obstakels (positie in m(=meter))

maaiveld hoogte boven zee: 7
dakhoogte gebouw: 10

```
naam: gebouw
x,y: 0 0
azimut: 270
l,b,z,#,α,ba: 22.6 8.5 5.4 1 31.5 8.5
```

```
naam: meteo
x,y: 1E6, -5
azimut: 90
l,b,z: 0.1, 0.1, 10
```

```
naam: obstakel1
x,y: 14.6 0
azimut: 270
l,b,z: 22.6 2.15 2.2
```

```
naam: obstakel2
x,y: 18.3 0
azimut: 270
l,b,z: 8.5 34.2 7
```

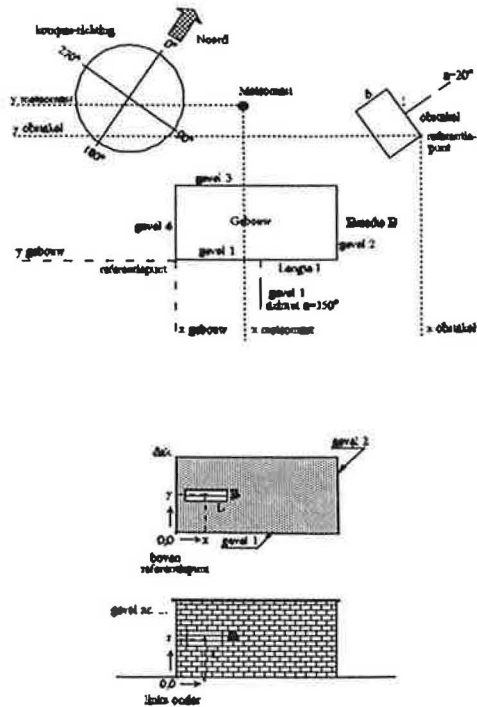
roostersecties

eenheid (% of m (=meter)) : %

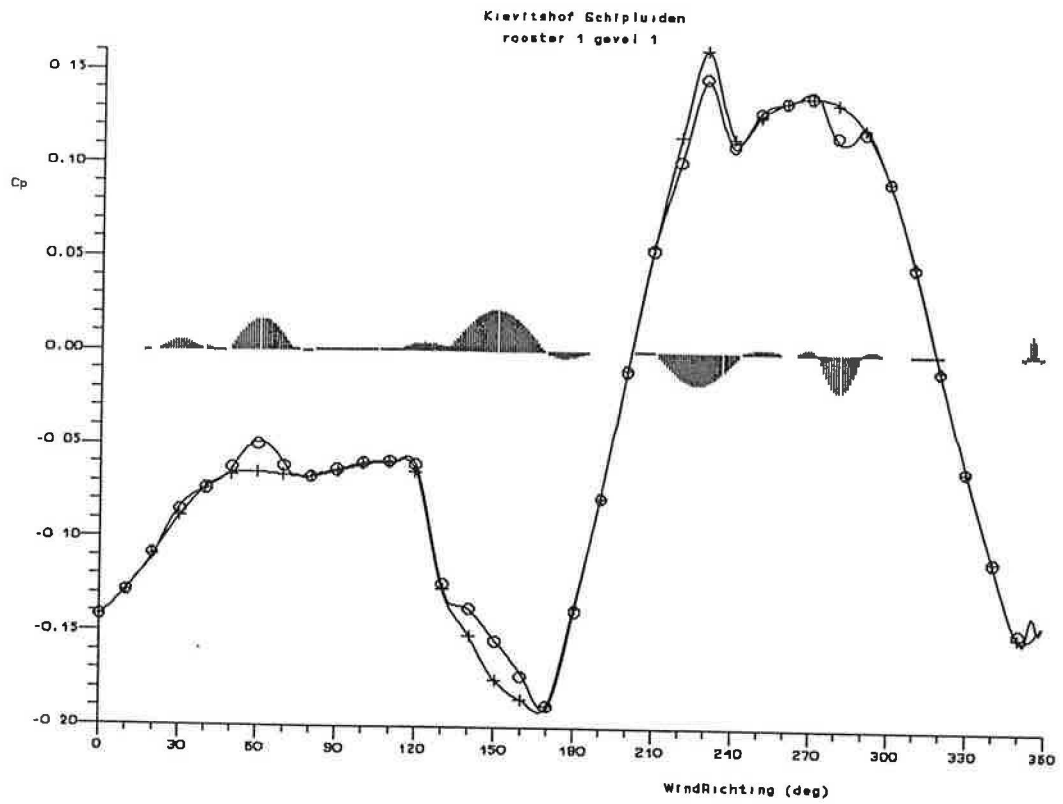
```
soort(dak/gevel): gevel 1
positie x,(y,)z: 38, 25
```

```
soort(dak/gevel): gevel 1
positie x,(y,)z: 38, 50
```

```
soort(dak/gevel): dak
positie x,(y,)z: 50, 15, 0.5
```

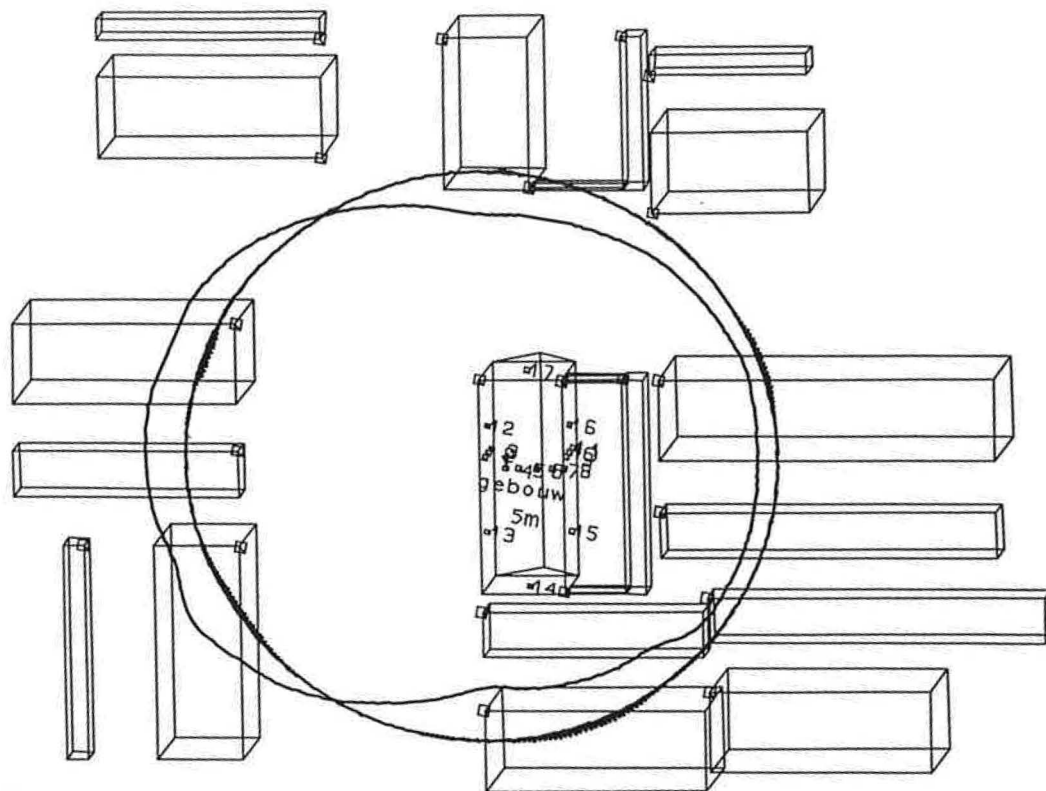



Figuur 1 Voorbeeld van een plattegrond, gevel- en dakaanzicht met invoergegevens



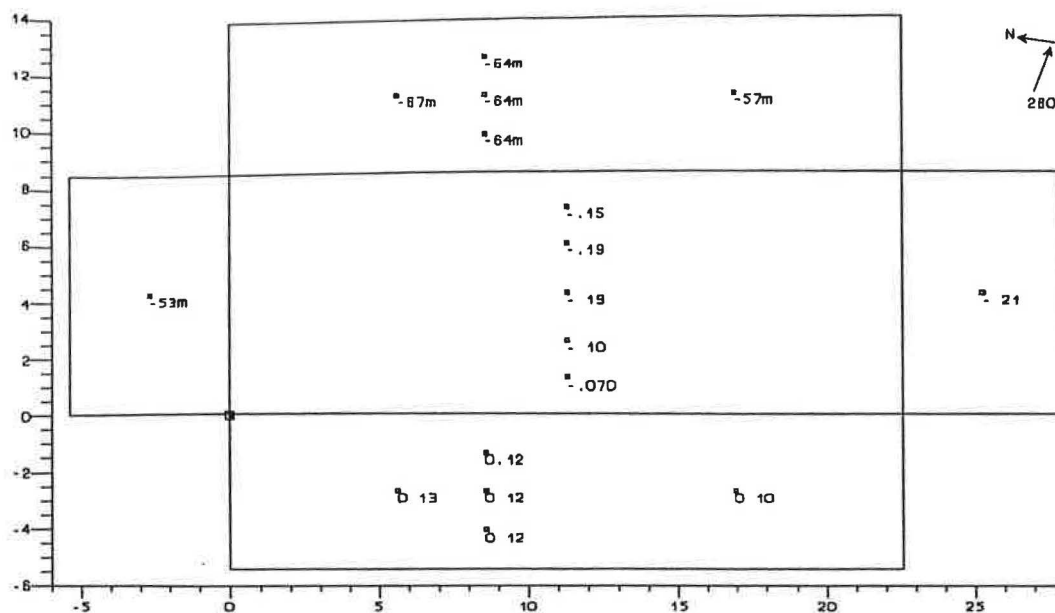
Figuur 2 *Verloop van C_p met de windrichting (O).
Verloop zonder lokale obstakelcorrectie (+).
Obstakelcorrectie zie verticale arcering.*

Kievitshof Schipluizen
rooster 1 gevel 1

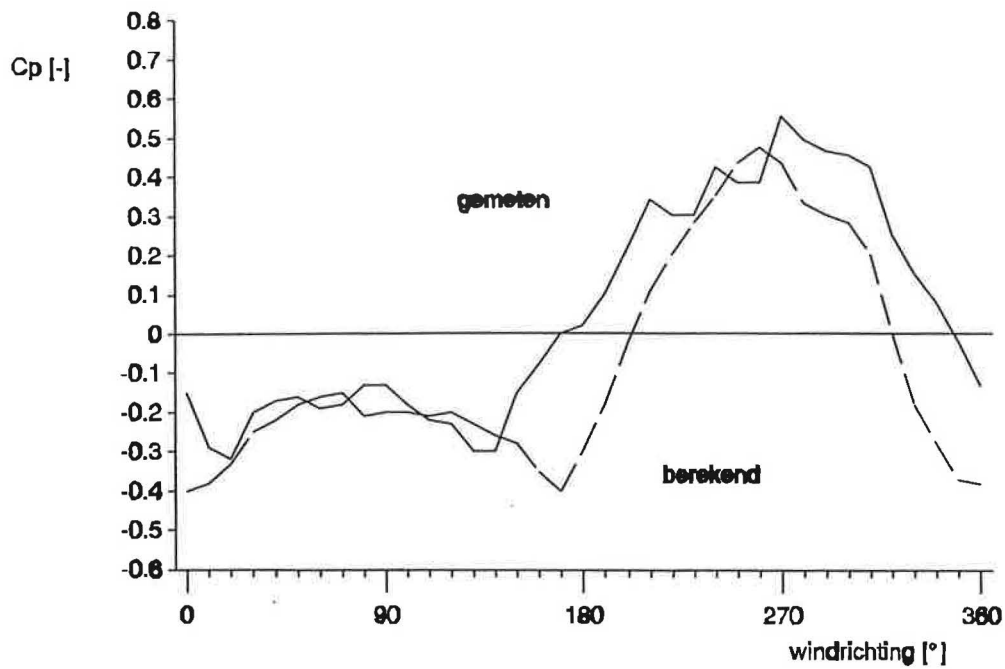


Figuur 3 Polair diagram van C_p en obstakelcorrectie.

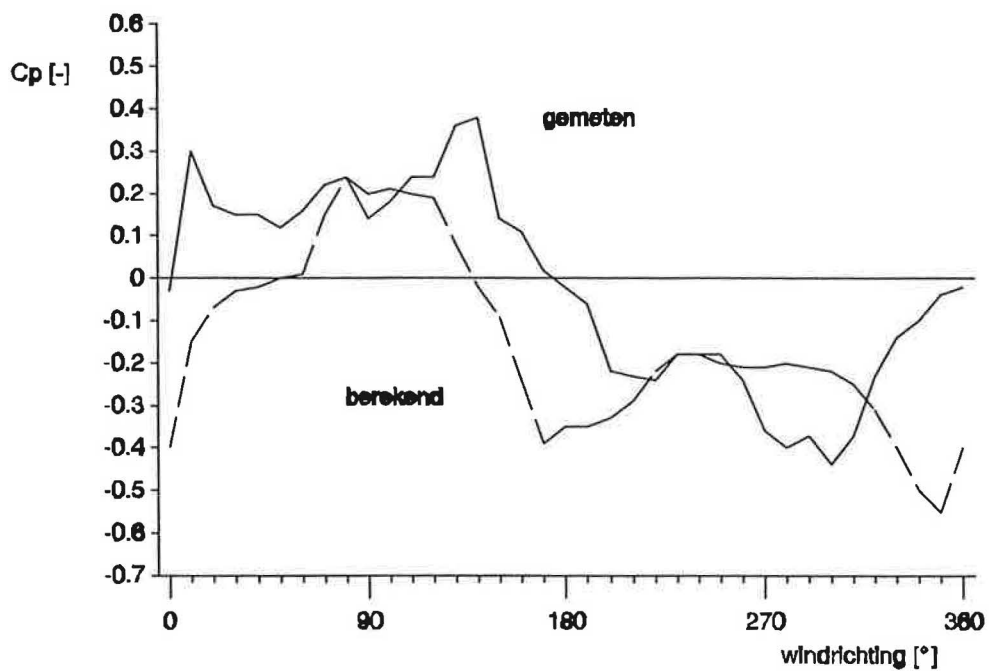
Uitslag Oriëntatie (gevel 1): Azimut=260



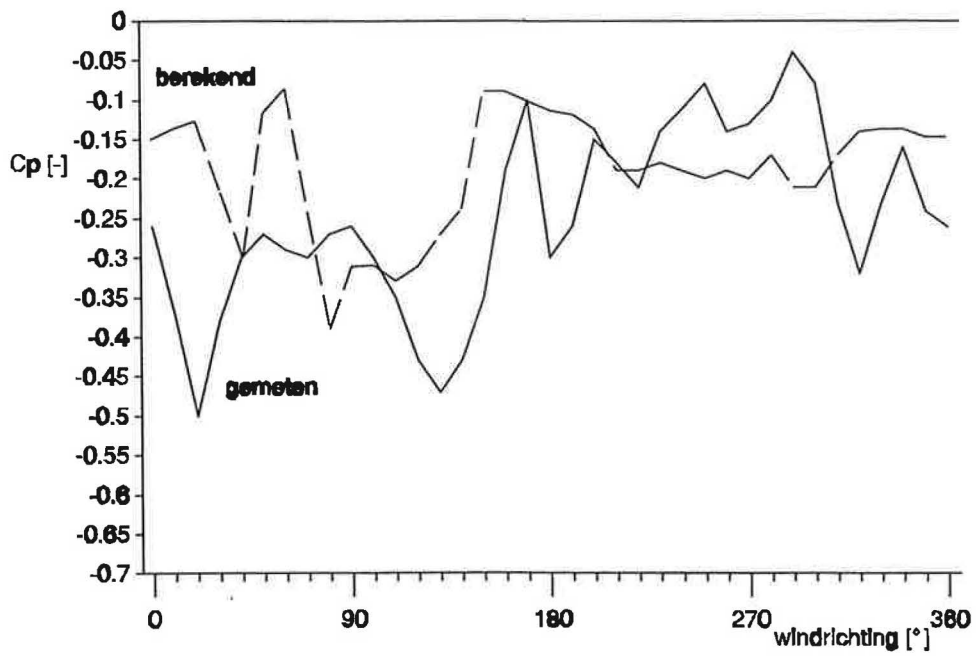
Figuur 4 Uitslag met C_p -waarden voor verschillende drukpunten bij een bepaalde windrichting.



Figuur 5 *Vergelijking gemeten en berekende C_p -waarden voor een voorgevel*



Figuur 6 *Vergelijking van gemeten en berekende C_p -waarden voor een achtergevel*



Figuur 7 *Vergelijking van gemeten en berekende C_p -waarden voor het dak*