

Slagregen op de gebouwschil

Fabien van Mook

symposium van de stuurgroep windtechnologie op 23-4-2004, TU Eindhoven

1 Inleiding

Slagregen¹ is regen die door de wind op de gebouwschil terecht komt. "Gebouwschil" is de verzamelnaam voor gevels en daken.

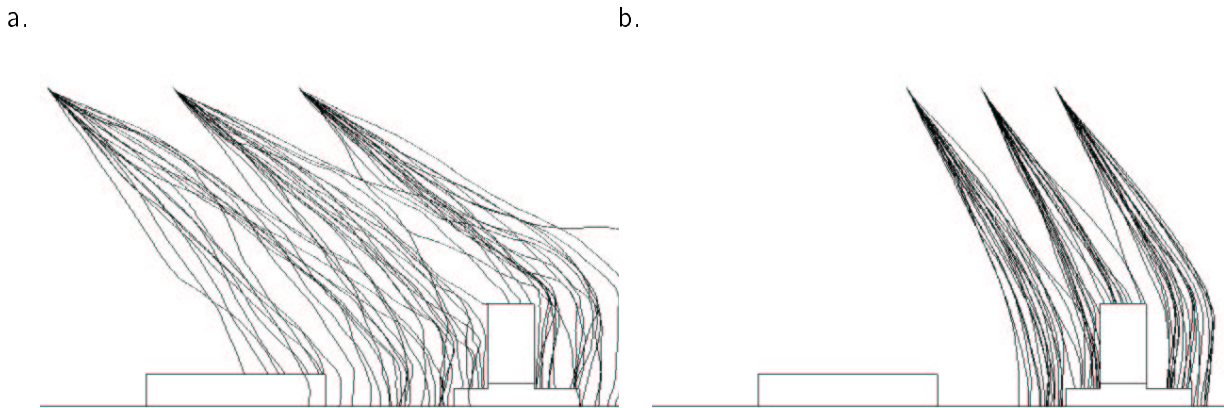
Sinds het begin van de jaren 1990, na twee decennia nagenoeg stilstand, is er opnieuw belangstelling in slagregen ontstaan. De duurzaamheid van de gebouwschil werd immers een belangrijk onderzoeksthema en de opkomst van cfd en krachtigere computers maakten gedetailleerde berekeningen mogelijk. In die tijd is ook de belangstelling gewekt bij Jacob Wisse en anderen van de vakgroep FAGO (Fysische Aspecten van de Gebouwde Omgeving, faculteit Bouwkunde, TU Eindhoven).

Dit paper beoogt de ontwikkeling van het onderzoek naar slagregen, in het bijzonder bij FAGO, te schetsen.

2 Slagregen en slagregenmeter

De slagregenintensiteit is de hoeveelheid regenwater die per tijdsinterval op de gebouwschil terecht komt. Met andere woorden: de slagregenintensiteit is de som van individuele regendruppels die in het tijdsinterval op (een deel van) het oppervlak terecht komen. Deze grootte, die in mm h^{-1} (oftewel $\text{dm}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) wordt uitgedrukt, hangt af van:

- de windsnelheid en windrichting. Juist door de windsnelheid krijgen regendruppels een horizontale snelheidscomponent, waardoor regendruppels op gevels terecht kunnen komen. Bovendien is het windveld rondom een gebouw complex en turbulent. Regendruppels die door zo'n windveld vallen, zullen dus een ingewikkelde baan met bochten en versnellingen beschrijven.
- de (horizontale) regenintensiteit. Dit is de hoeveelheid regenwater dat per tijdsinterval door een horizontaal vlak valt. Deze grootte wordt ook in mm h^{-1} uitgedrukt, en wordt standaard door meteorologische instituten op weerstations gemeten.
- de druppelgrootteverdeling. Regen bestaat uit druppels van verschillende grootte. Ze variëren van 0,1 mm tot 7 mm in diameter. Door hun traagheid zullen grote druppels minder makkelijk de krommingen in het windveld volgen dan kleine druppels, en komen daardoor eerder in botsing met de gebouwschil.
- het gebouw en de plaats op de gebouwschil. De vorm van het gebouw en zijn omgeving bepalen het windveld. De slagregenintensiteit aan randen kan hoger zijn dan in het midden van een gevel, omdat veel meer druppels het windveld niet meer kunnen 'volgen' door het grotere snelheidsgradiënt bij die randen.



Figuur 1: Banen van druppels met een diameter van 1 mm (a) en 3 mm (b). Aanzicht vanuit het zuiden op het Auditorium (links) en het Hoofdgebouw (rechts) van de TUE. De wind komt van links met een referentiesnelheid van $3,5 \text{ m s}^{-1}$ (die op een punt boven het Auditorium op de dakhoogte van het Hoofdgebouw wordt gemeten).

Figuur 1 toont voorbeelden van druppelbanen die voor het onderzoek naar slagregen op het Hoofdgebouw van de TU Eindhoven met cfd zijn berekend. In deze figuur vertrekken vanuit een punt verschillende banen, om de invloed van de turbulentie op de dispersie van druppels zichtbaar te maken.

Slagregenintensiteiten worden gemeten met slagregenmeters. Een slagregenmeter is meestal een ondiep bakje, een collector, dat men plat tegen de gevel bevestigt. Zoals regendruppels op de gevel terecht komen, komen druppels op de achterplaat van de collector terecht. De bedoeling is dat ze naar beneden druipen zodat ze in een reservoir opgevangen worden. Vervolgens kan de hoeveelheid van het verzamelde slagregenwater na een tijdsinterval worden gemeten.

3 Geschiedenis

Er wordt sinds lang onderzoek naar slagregen op de gebouwschil gedaan. Volgens Lacy (1965) was Holmgren misschien de eerste die slagregen op een gevel had gemeten. Hij deed dat in 1937 in Trondheim. In de jaren 1950 formuleerde Hoppestad van het Noorse instituut voor bouwkundig onderzoek de volgende relatie tussen de regenintensiteit door een vertikaal vlak in het vrije veld (R_v), de regenintensiteit door een horizontaal vlak in het vrije veld (R_h) en de windsnelheid in het vrije veld (U):

$$R_v = \alpha R_h U, \quad (1)$$

met α = de reciproke van de 'gemiddelde' valsnelheid van de regendruppels. Hoppestad nam een 'gemiddelde' valsnelheid van $4,5 \text{ m s}^{-1}$ aan, en dus $\alpha = 0,2 \text{ s m}^{-1}$. Deze waarde voor α bleek met metingen overeen te komen.

De verticale regenintensiteit R_v is geen slagregenintensiteit, maar een grootte in het vrije, ongestoorde veld. Hoppestad nam dus aan dat in het vrije veld het quotiënt tussen de verticale en de horizontale regenintensiteit gelijk is aan het quotiënt tussen de windsnelheid en een 'gemiddelde' valsnelheid.

In 1955 publiceerde Hoppestad een kaart van Noorwegen waarop R_v was uitgezet. Deze was berekend aan de hand van gemeten R_h en U van alle meteorologische stations in Noorwegen.

In 1962 introduceerden Lacy and Shellard de "driving rain index" (Lacy 1965). De index was gedefinieerd als het produkt van de jaarlijkse gemiddelde windsnelheid (in m s^{-1}) en de jaarlijkse regenhoeveelheid

¹In het Engels: "driving rain" of "wind-driven rain".

(door de horizontale, in m). Kaarten met de driving rain index werden door Lacy c.s. voor het Verenigd Koninkrijk gemaakt. Ook werden later dergelijke kaarten voor andere landen in Europa gepubliceerd.

Künzel vergeleek de kaarten in 1968 en kwam tot de conclusie dat de driving rain index redelijke schattingen geven voor slagregen in Groot-Brittannië en de Scandinavische landen, maar dat in andere delen van Europa lage waarden voor de driving rain index vaak overeen kunnen komen met hoge slagregenhoeveelheden in werkelijkheid (Frank 1973). Door uit te gaan van jaarlijkse of maandelijkse regenhoeveelheden en dito gemiddelde windsnelheden bleek de methode van Lacy en Shellard dus te grof. Door deze tegenslag en het gebrek aan meer gedetailleerde meteorologische gegevens kwam het onderzoek naar slagregen vanaf het begin van de jaren 1970 nagenoeg tot stilstand. Alleen in Groot-Brittannië werden in de jaren 1980 nieuwe kaarten van driving rain indices gemaakt. Nu werden ze op uurlijkse regenhoeveelheden, windsnelheden en zelfs windrichtingen van 52 weerstations gebaseerd. Deze gegevens werden vervolgens in een Britse norm voor de schatting van slagregenhoeveelheid op gebouwen (BS 8104) opgenomen (BSI 1992).

In deze norm wordt de slagregenintensiteit (R_f) berekend uit het produkt van de driving rain index, die van de lokatie en oriëntatie afhankelijk is, en coëfficiënten waarmee terreinruwheid, topografie, belemmering door andere gebouwen en objecten, gebouwworm en plaats op de gebouwschil in rekening worden gebracht. Wanneer deze coëfficiënten in κ worden samengevat, komt de norm neer op (vergelijk met vgl. 1):

$$R_f = \kappa R_v = \kappa \alpha R_h U. \quad (2)$$

Vanaf de jaren 1990 wordt een nieuwe methode in het onderzoek naar slagregen geïntroduceerd: computational fluid dynamics (cfd). Steeds krachtiger wordende computers maken cfd-berekeningen van wind rondom gebouwen makkelijker. Choi (1993) maakte simulaties van slagregen op een hoog gebouw. Daartoe had hij eerst het windveld rond het gebouw met een K - ϵ -model berekend. Vervolgens werden druppelbanen in het windveld berekend. Tenslotte berekende hij de slagregenintensiteiten aan de hand van de druppels die op de gevel terecht waren gekomen en een aan te nemen druppelgrootteverdeling. Choi was overigens alleen in slagregen op hoogbouw bij grote regenintensiteiten en grote windsnelheden geïnteresseerd.

Ook rond 1993 presenteerden Bookermann and Wisse (1992) en Wisse (1994) resultaten van simulaties van slagregen op een kleiner, langwerpig gebouw (5,5 en 11 m hoogte) in een gematigd klimaat (bij een windsnelheid van 10 m s^{-1} en regenintensiteit van $1,3 \text{ mm h}^{-1}$). Door het onderzoek van Marcel Bottema (1993) naar windhinder was er immers bij FAGO ervaring met cfd opgedaan. Zo kon onder leiding van Jacob Wisse de afstudeerder Bookermann de eerste simulaties van slagregen bij FAGO maken. Na 1993 publiceerden ook andere onderzoekers resultaten van hun simulaties van slagregen.

In 1996 werd er bij FAGO een aanvang voor een uitgebreid onderzoek naar slagregen gemaakt. Voor een korte beschrijving van dit onderzoek door de auteur dezes (van Mook 2002) wordt naar paragraaf 4 verwezen. Het onderzoek kreeg al snel een internationale dimensie omdat meerdere vakgroepen bouwfysica zich met het onderwerp slagregen gingen bezig houden. Mikkel Kragh (1998) van de TU Denemarken organiseerde de "micro-climate group", waarin hijzelf, Anneli Högberg (2002) van de Chalmers Universiteit in Göteborg en de auteur dezes literatuur en ideeën over slagregen uitwisselden. De groep voerde ook een gezamenlijk vergelijk van slagregenmeters uit. Eind 1998 verliet Kragh de groep omdat hij was gepromoveerd en kwam Bert Blocken van de KU Leuven erbij. In april 2000 voerden Blocken en ik metingen van wind en slagregen rond een gebouwtje in de grote Jules Verne-windtunnel van het CSTB in Nantes. Dit was de laatste activiteit van de micro-climate group. Binnenkort komt het proefschrift van Blocken (2004) klaar.

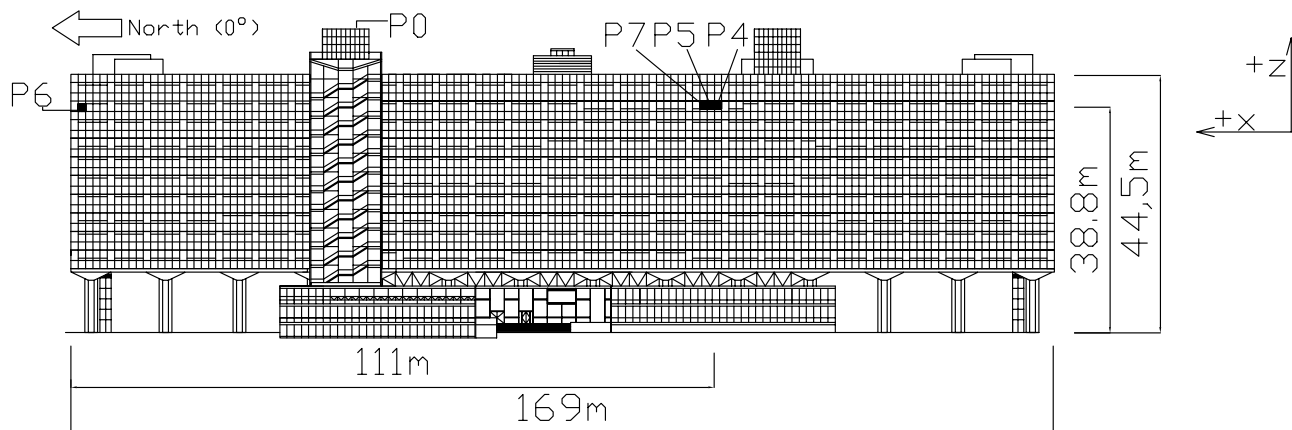


Figuur 2: De campus van de TU Eindhoven gezien vanuit het zuid-westen (rond 1995).

4 Onderzoek aan de TU Eindhoven

Onze uiteindelijke motivatie voor het onderzoek naar slagregen ligt in de wens duurzame gevels en daken te maken. De duurzaamheid is beperkt door degradatie zoals vanwege warmte- en vochttransport, depositie van chemische stoffen, ontwerpfouten en fouten tijdens de bouw. Voor een duurzaam ontwerp is kennis van de blootstelling van het gebouw aan de atmosfeer een vereiste. Een van de belangrijke micro-klimatologische parameters is slagregen.

Wanneer we in 1996 de literatuur over slagregen overzagen, bleek dat de kennis over de kwantificering van de slagregen als functie van gebouwvorm, wind en regen veel leemtes bevatte. Zo bestonden er geen ontwerpregels voor slagregenmeters en waren er geen resultaten van zowel metingen als simulaties van slagregen in dezelfde situatie gepubliceerd. Ons onderzoek heeft de volgende doelen: (1) het ontwikkelen en testen van slagregenmeters, (2) het gedetailleerd meten van slagregen op de gevel van een gebouw samen met de relevante meteorologische grootheden, (3) het ontwikkelen en toepassen van simulaties en rekenmethodes voor de slagregen op de gebouwschil, met verificatie met metingen in dezelfde situatie. Een aspect dat niet in het onderzoek werd betrokken, is datgene wat er gebeurt met het regenwater op de gevel, zoals opzuigen of afdruipe.



Figuur 3: De westgevel van het Hoofdgebouw, met de meetpositie P4/5/7 en de meetpositie P6.

4.1 Lokatie

Als testobject is het 45 m hoge Hoofdgebouw op het TUE-terrein gekozen. Het gebouw en zijn omgeving (figuur 2) zijn redelijk eenvoudig van vorm. Een bruikbare referentie van het lokale klimaat kan men bovendien aan de westkant van het Hoofdgebouw, op/boven het Auditorium, meten. De referentiewindsnelheid en -windrichting worden op 45 m hoogte, op een mast op het dak van het Auditorium, gemeten. De mast staat 127 m van de westgevel vandaan. De mast is voor het onderzoek van Chris Geurts (1997) opgericht. Hij heeft reeds de eigenschappen van de wind in deze situatie bestudeerd. De referentieregengintensiteit wordt op het dak van het Auditorium gemeten.

Slagregen wordt gemeten op twee posities op eenzelfde hoogte op de westgevel van het Hoofdgebouw (figuur 3). Op een middenpositie (P4/5/7) zijn vier verschillende slagregenmeters vlak naast elkaar geïnstalleerd (figuur 4). Ook wordt daar de windsnelheid op een afstand van 50 tot 125 cm tot de gevel gemeten. De andere meetpositie (P6) is aan de noordelijke rand van de gevel.

4.2 Slagregenmeters

In internationaal verband zijn vier slagregenmeters met elkaar vergeleken. Ze zijn vlak bij elkaar in het midden aan de bovenrand van de westgevel van het Hoofdgebouw geïnstalleerd om ervoor te zorgen dat ze dezelfde slagregenbelasting krijgen.

Een van de vermoedens van Jacob Wisse was dat traditionele slagregenmeters die gebaseerd zijn op het principe dat druppels van de collector naar beneden druipen, niet goed werken. Zoals vaak op ramen goed zichtbaar is, blijven regendruppels op oppervlakken plakken. Een verbetering die we bedacht hebben, is het gebruik van een ruitenwisser die bij regen over de collector draait om de druppels bij elkaar te vegen en ze zo te dwingen af te druipen. Dit type slagregen heet TUE-II. Het afgedropen verzamelde regenwater wordt in het reservoir op een balans continu gemeten. Zo kan nauwkeurig en in korte tijdsintervallen slagregen gemeten worden ($0,001 \text{ mm h}^{-1}$ bij 10-minutenintervallen). Van Mikkel Kragh ontvingen we uit Denemarken zijn verbeterde type (DTU), waarbij de collector met het opgevangen slagregenwater en al continu wordt gewogen.

Naast die twee verbeterde slagregenmeters hebben we twee traditionele slagregenmeters aan de westgevel opgehangen: de TUE-I (die geen wisser heeft, maar verder gelijk is aan TUE-II) en de CTH (die van Anneli Högberg uit Zweden ontvingen).

De registraties van drie van de vier bleken overeen te komen. De slagregenmeter zonder wisser, TUE-I, mat slechts circa de helft van de regenhoeveelheid gemeten door de andere regenmeters.



DTU CTH

TUE-I

TUE-II

Figuur 4: De vier slagregenmeters op meetpositie P4/5/7. Linksonder vóór TUE-II is een anemometer op een arm gemonteerd.

4.3 Slagregenmetingen

Tijdens een periode van 24 maanden (december 1997 tot en met november 1999) hebben de volleschaalmetingen continu plaatsgevonden. De meetgegevens zijn beschikbaar via website <http://sts.bwk.tue.nl/drivingrain/>.

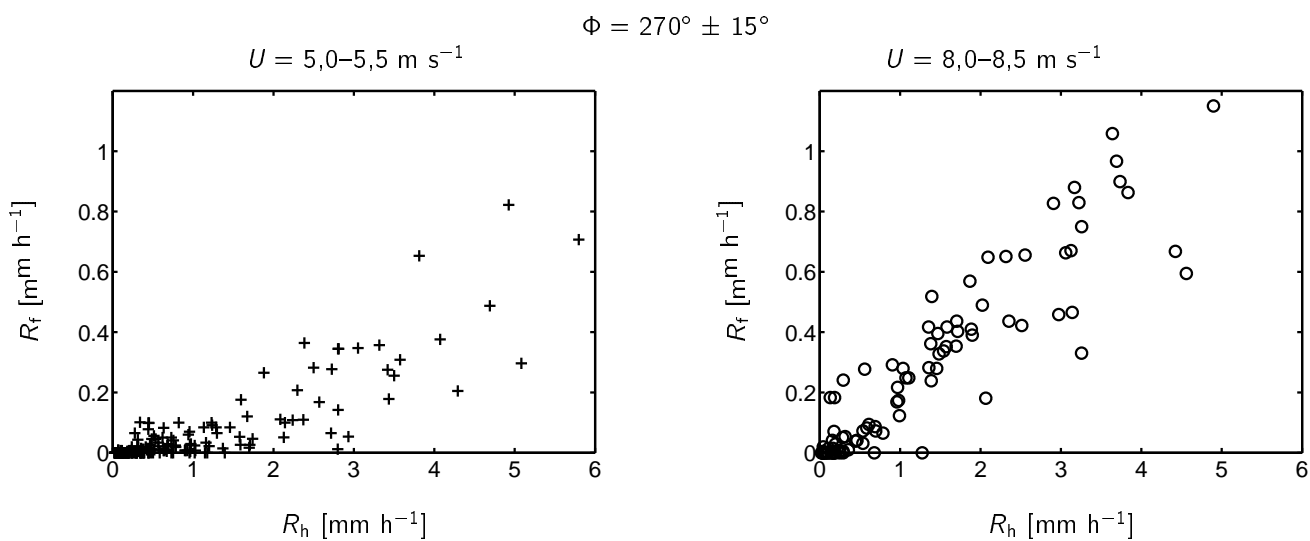
Een belangrijk resultaat is de grote spreiding in de gemeten slagregenintensiteiten voor nauwe intervallen van de referentiewindsnelheid, -windrichting en -regenintensiteit (figuur 5). De grote spreiding wordt verklaard met de dispersie van regendruppels door turbulentie van de wind en met de grote variatie in druppelgrootteverdelingen. Dit laatste blijkt uit metingen die we met een zogenaamde disdrometer nog gedurende drie maanden hebben kunnen doen.

Onze metingen hebben we toegepast op het eenvoudige empirische verband waarop de Britse norm BS 8104 is gebaseerd. Daaruit blijkt dat slagregenintensiteiten op 5-minutenbasis en hun maxima slecht worden geschat: 5–8 mm h⁻¹ voor de gemeten maxima van 25–29 mm h⁻¹. De totale slagregenhoeveelheid na 24 maanden wordt redelijk geschat (afwijking van ca. 5–50% met de metingen), tenminste als men een goede schatting voor $\kappa \times \alpha$ (zie vgl. 2) kan maken.

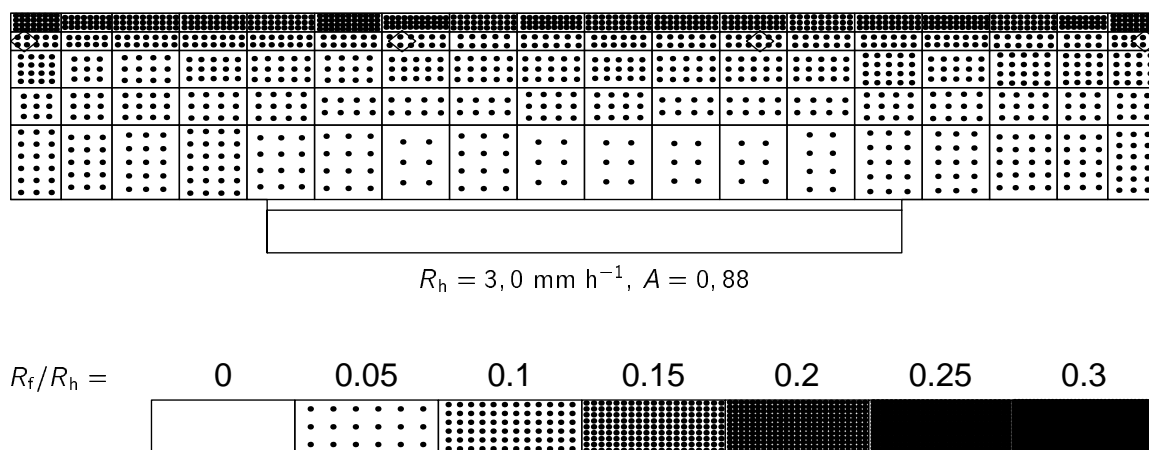
We hebben ook een verbeterd empirisch model voorgesteld, dat preciezer rekening met windrichting en positie op de gevel houdt. Zowel de cumulatieve slagregensom over 24 maanden (afwijkingen met de metingen van ca. 6–23% voor P4/5 en 8–33% voor P6) als de slagregenintensiteiten op 5-minutenbasis en hun maxima (afwijkingen tot ca. 2 mm h⁻¹) worden redelijk tot goed geschat.

4.4 Simulaties

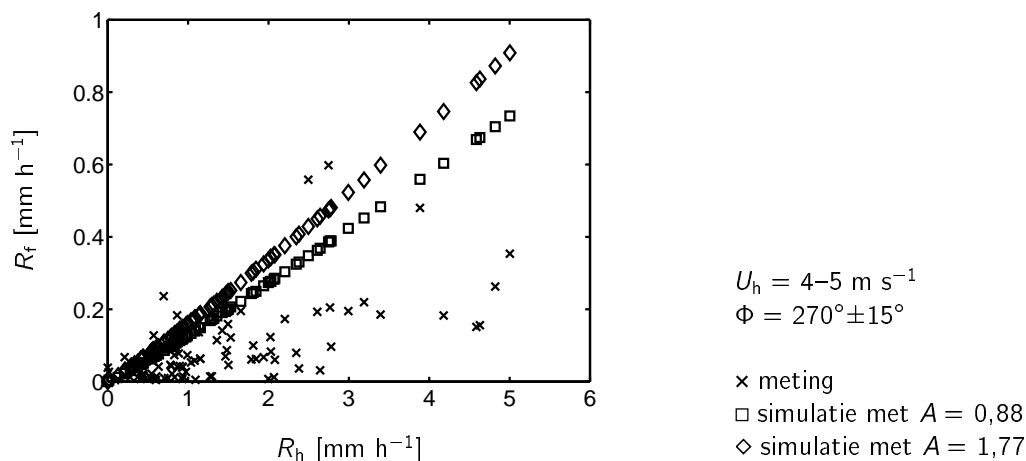
Een standaard K - ϵ -model van het programma *Fluent* (versies 4.4 en 4.5) wordt voor de simulaties gebruikt. Het rekendomein wordt als een 'structured grid' in cellen opgedeeld, wat helaas op sommige plaatsen tot ongewenste celverhoudingen leidt. Ondanks de beperkingen van het model, valt de gesimuleerde windsnelheid vlak voor de gevel bij de middenpositie P4/5 binnen de standaarddeviatie van de



Figuur 5: Slagregenintensiteiten R_f op positie P4/5 als functie van de referentieregenintensiteit (door de horizontaal, R_h). De meetgegevens zijn 5-minutenwaarden van december 1997 tot en met november 1999, geselecteerd voor intervallen van referentiewindsnelheden (U) en -windrichtingen (Φ).



Figuur 6: Gesimuleerde slagregen uitgedrukt in R_f/R_h op de westgevel van het Hoofdgebouw bij $U = 3,5 \text{ m s}^{-1}$, $\Phi = 270^\circ$ en $R_h = 3,0 \text{ mm h}^{-1}$. Druppelgrootteverdeling met parameter $A = 0,88$ volgens Wessels (1972).



Figuur 7: Gemeten en gesimuleerde slagregenintensiteiten R_f op positie P4/5 als functie van de referentieregenintensiteit (door de horizontaal, R_h). De meetgegevens (×) zijn 5-minutenwaarden van december 1997 tot en met november 1999, geselecteerd voor intervallen van referentiewindsnelheden (U) en -windrichtingen (Φ). De simulaties met turbulente dispersie zijn uitgerekend met de uit de metingen gegeven U , Φ , R_h en met de aangenomen parameter A voor de druppelgrootteverdeling volgens Wessels (1972).

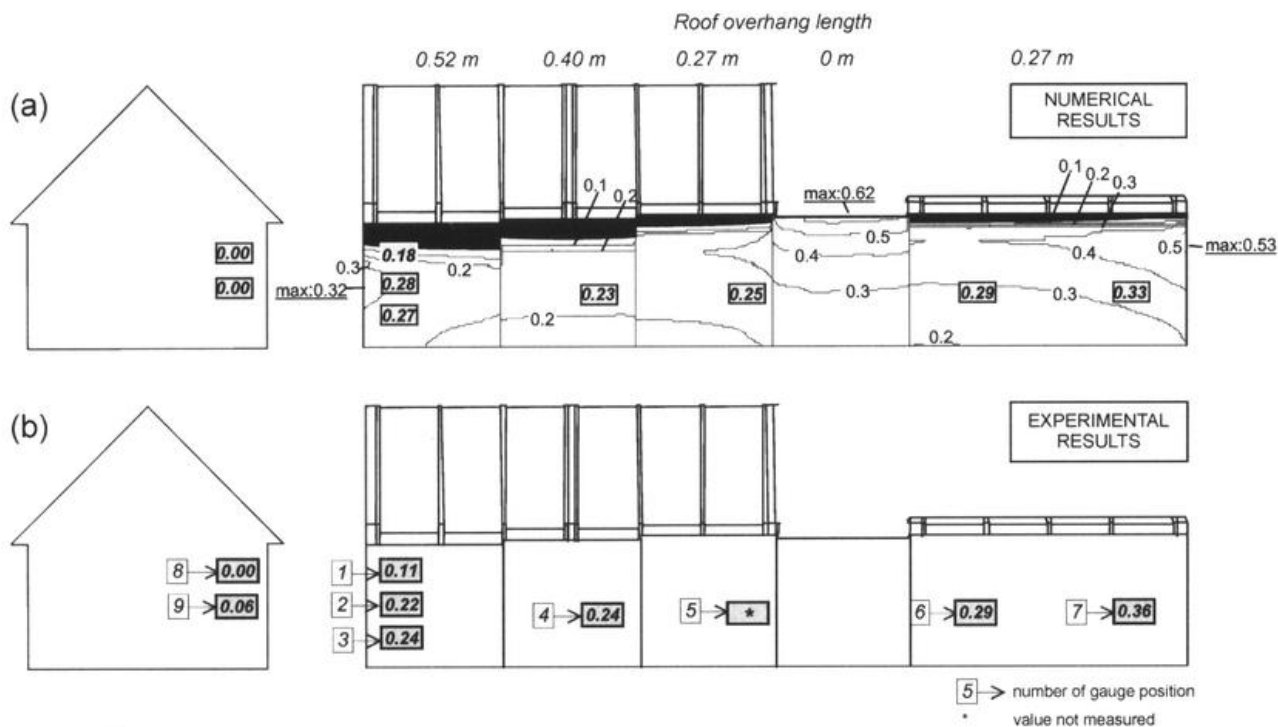
gemeten windsnelheid. Verder zijn de gesimuleerde gemiddelde drukcoëfficiënten positief met in situ- en windtunnelmetingen van dezelfde situatie (Geurts 1997) vergeleken.

In de simulatie van slagregen wordt uitgegaan van het reeds berekende windveld nabij het Hoofdgebouw. Bij het berekenen van de banen van de druppels veronderstellen wij dat de regen het windveld niet beïnvloedt en dat regendruppels niet verdampen, niet met elkaar botsen en niet uiteenvallen. We hebben de turbulente dispersie van druppelbanen meegenomen (figuur 1). Figuur 6 toont een voorbeeld van de verdeling van gesimuleerde slagregenintensiteiten op de westgevel van het Hoofdgebouw.

De gesimuleerde slagregenintensiteiten komen redelijk overeen met de gemeten slagregenintensiteiten (figuur 7); de simulaties hebben wel de neiging de slagregenintensiteiten te overschatten. Hierbij gaat het overigens om simulaties die op de parameterisaties van regendruppelverdelingen door Wessels (1972) zijn gebaseerd. Duidelijke conclusies aan de hand van de door ons gemeten druppelgrootteverdelingen zijn niet mogelijk omdat het aantal metingen van druppelgrootteverdelingen bij slagregen te beperkt is (een te korte meetperiode).

5 Onderzoek aan de KU Leuven

In het slagregenonderzoek aan de KU Leuven gebruikt Bert Blocken voor een groot gedeelte dezelfde aanpak en methoden als het onderzoek aan de TU Eindhoven. Zijn testobject is het VLIET-testgebouw (25,2 m lang, 7,2 m diep) dat gedeeltelijk een zadeldak (nok op 7,9 m hoogte) en een plat dak (4,3 m hoog) heeft. Van slagregen op de zuidwestgevel van het VLIET-gebouw zijn metingen gedaan en gedetailleerde simulaties gemaakt. Figuur 8 uit Blocken and Carmeliet (2002) toont daarvan resultaten. Interessant zijn bijvoorbeeld de invloed van de gebouwranden en de drie verschillende overstekdiepten van het zadeldak op de verdeling van slagregen over de gevel.



Figuur 8: Gesimuleerde (a) en gemeten (b) slagregen uitgedrukt in R_f/R_h op de zuidwestgevel (rechts) van het VLIET-gebouw tijdens een periode van regen op 5/6-1-1998 (Blocken and Carmeliet 2002). De totale horizontale regenhoeveelheid was 13,6 mm, de windsnelheid 2–6 m s⁻¹ en de windrichting 200–270°. De door het overstekend dak beschutte gedeelten van de gevel zijn zwart gekleurd.

6 Besluit

Na de studies van met name Kragh (1998), Högberg (2002), van Mook (2002) en Blocken (2004) kan de stand-van-zaken van het onderzoek naar slagregen als volgt worden samengevat:

- Dankzij een internationaal vergelijk weten we nu eindelijk beter hoe nauwkeurige slagregenmeters ontworpen kunnen worden.
- Het komt in de literatuur nog vaak voor dat simulaties van slagregen op een gebouw niet met metingen op hetzelfde gebouw geverifieerd (kunnen) worden. Uniek aan het onderzoek van van Mook (2002) en van Blocken (2004) is dat dit wel gebeurt is. Daarmee worden de aspecten duidelijker die belangrijk zijn voor realistische simulaties.
- Van slagregen op de westgevel van Hoofdgebouw in combinatie met referentiemetingen van wind en regen zijn gedetailleerde meetgegevens gedurende 24 maanden via het internet beschikbaar. Vooralsnog is dit uniek en het beschikbaar maken van andere slagregenmetingen wordt dan ook aanbevolen.
- Uit de metingen blijkt een grote variatie in slagregenintensiteiten (figuur 5), ook bij nauwe intervallen van referentiwindsnelheid, -windrichting en -regenintensiteit. Factoren die deze variatie verder kunnen verklaren (regendruppelverdeling en turbulente dispersie van druppels) zijn nog weinig onderzocht.

Wellicht is nu overvloedig te vermelden dat de slagregenintensiteit in het algemeen maar een klein deel (ca. 0,1–0,3) van de horizontale regenintensiteit in het vrije veld bedraagt.

- De verdeling van slagregen op een gevel hangt mede af van de vorm van het gebouw, de aanwezigheid van randen, overstekken en dergelijke. De aandacht voor zulke geometrische 'details' zou nu vergroot kunnen worden, bijvoorbeeld in verband met onderzoek naar verwerking en vervuiling van gevels en daken. Jacob Wisse vond het al in 1992 belangrijk dat hij resultaten van simulaties van een gebouwtje met een overstek en met een borstwering in het paper van Bookelmann en hem opnam.

Referenties

- Blocken, B. (2004). *Wind-driven rain on buildings: measurements, numerical modelling and applications*. Ph. D. thesis, Laboratory of Building Physics, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven.
- Blocken, B. and J. Carmeliet (2002). Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise building. *Wind and Structures* 5(5), 441–462.
- Bookelmann, J. and J. Wisse (1992). Numerical estimate of driving rain. In *Inaugural Conference of the Wind Engineering Society, Cambridge (UK), 28–30 September 1992*. Wind Engineering Society.
- Bottema, M. (1993). *Wind climate and urban geometry*. Ph. D. thesis, Eindhoven University of Technology.
- BSI (1992). *BS 8104: Code of practice for assessing exposure of walls to wind-driven rain*. British Standards Institute.
- Choi, E. (1993). Simulation of wind-driven-rain around a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 46/47, 721–729.
- Frank, W. (1973). Einwirkung von Regen und Wind auf Gebäudefassaden. In *Berichte aus der Bauforschung*, Volume H. 86, pp. 3–13. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Geurts, C. (1997). *Wind induced pressure fluctuations on building facades*. Ph. D. thesis, Eindhoven University of Technology.
- Högberg, A. (2002). *Microclimate load: transformed weather observations for use in design of durable buildings*. Ph. D. thesis, Dep. of Building Physics, Chalmers University of Technology.
- Kragh, M. K. (1998). *Microclimatic conditions at the external surface of building envelopes*. Ph. D. thesis (report R-027), Dep. of Building Physics, Technical University of Denmark.
- Lacy, R. (1965). Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings. In *RILEM/CIB Symposium on Moisture in Buildings, Helsinki (SF), 1965*.
- van Mook, F. (2002). *Driving rain on building envelopes*. Ph. D. thesis, Eindhoven University of Technology.
- Wessels, H. (1972). *Metingen van regendruppels te De Bilt*. Technical Report W.R. 72-6, KNMI, De Bilt (NL).
- Wisse, J. (1994). Driving rain, a numerical study. In *9th Symposium for Building Physics and Building Climatology, Dresden (DE), 14–16 September 1994*.