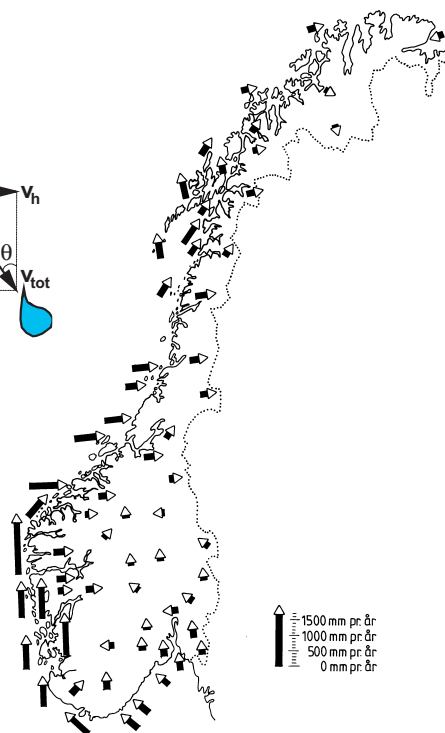
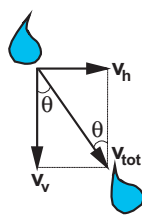
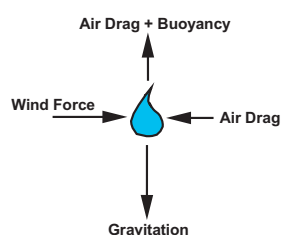


Bjørn Petter Jelle og Kim Robert Lisø

Slagregn – klimadata og grunnlag for beregninger

Delrapport fra prosjekt 11 i FoU-programmet
«Klima 2000»



Prosjektrapport 344

Bjørn Petter Jelle og Kim Robert Lisø

Slagregn – klimadata og grunnlag for beregninger

Delrapport fra prosjekt 11 i FoU-programmet «Klima 2000»

Emneord:

slagregn, nedbør, vind, klimatilpasning, klimapåkjenninger, klimaendring, bygning, yttervegg, fukt, skade, luftmotstand, fuktopptak, klimadata, værstasjon, slagregnmåling, fallhastighet, fasade, topografifaktor, terrengruhetsfaktor, vindretningsfaktor

ISSN 0801-6461

ISBN 82-536-0787-3

300 eks. trykt av

S.E. Thoresen as

Innmat: 100 g Kymultra

Omslag: 200 g Cyclus

© Copyright Norges byggforskningsinstitutt 2003

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndverkslovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med Norges byggforskningsinstitutt er enhver eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk. Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

Adr.: Forskningsveien 3 B

Postboks 123 Blindern

0314 OSLO

Tlf.: 22 96 55 55

Faks: 22 69 94 38 og 22 96 55 08

Hovedsamarbeidspartnere

Forsvarsbygg Utbyggingsprosjektet, Husbanken, Statens bygningstekniske etat (BE), Norges forskningsråd, Finansnæringens Hovedorganisasjon (FNH), Statsbygg, Undervisningsbygg Oslo KF

Bransjepartnere

Selmer Skanska AS, Optiroc AS, A/S Rockwool, Brødr. Sunde as, Glava A/S, Jackon AS, Icopal as, Isola as, Protan A/S, Moelven ByggModul AS, Scandiaconsult AS, Interconsult ASA, Aadnesen as, Dr. Techn. Kristoffer Apeland A/S

Norske fagmiljøer

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Arkitektthøgskolen i Oslo (AHO), Høgskolen i Narvik, Det norske meteorologiske institutt (DNMI), Norges landbrukshøgskole (NLH), CICERO Senter for klimaforskning, Riksantikvaren, Norges byggstandardiseringsråd (NBR)

Bransjeforeninger

Byggenæringens Landsforening (BNL), Isolasjonsprodusentenes forening (IPF), Takprodusentenes forskningsgruppe (TPF), Boligprodusentenes Forening, Byggevareindustriens forening, Norges byggmesterforbund, Ventilasjons- og blikkenslagerbedriftenes landsforbund (VBL)

Forord

Arbeidet i denne prosjektrapporten er utført innenfor prosjekt 11 *Slagregndata for prosjektering og beregninger*. Prosjektet er en del av FoU-programmet *Klima 2000 – Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner*.

Programmets hovedmål er gjennom forskning og utvikling å oppdatere prinsippløsninger for konstruksjoner som både gir økt bestandighet mot og økt pålitelighet ved ytre klimapåkjenninger, samt kartlegge mulige virkninger av klimaendringer på det bygde miljø - og hvordan samfunnet best kan tilpasse seg endringene. Hensikten er å definere klarere kriterier og anvisninger for prosjektering og utførelse av kritiske konstruksjonsdetaljer, hovedsakelig knyttet til bygningers ytre klimaskjerm. Det skal i tillegg utvikles retningslinjer for hvordan de ulike aktører i plan- og byggeprosessen kan medvirke til å unngå at en bygning får skader eller ulemper som er forårsaket av fukt.

Programmet er et viktig ledd i arbeidet med utvikling og revisjon av anvisninger i Byggforskserien og produktdokumentasjon i form av tekniske godkjenninger og sertifiseringer. Programmet ledes av Norges byggforskningsinstitutt (NBI) og gjennomføres i samarbeid med Forsvarsbygg Utbyggingsprosjektet, Husbanken, Statsbygg, Finansnæringens Hovedorganisasjon (FNH), Undervisningsbygg Oslo KF, Statens bygningstekniske etat og Norges forskningsråd, samt andre fagmiljøer og sentrale aktører i BAE-sektoren. Programmet som ble igangsatt i august 2000, og som vil pågå frem til utgangen av år 2006, består av 14 ulike prosjekter.

Prosjekt 11 skal til slutt resultere i en samling av slagregndata for Norge, samt metoder og anvisninger for hvordan slagregnpåkjenninger kan vurderes i forbindelse med prosjektering av bygninger. Denne prosjektrapporten tar for seg tilgjengelige måledata for vind og nedbør, samt beregningsgrunnlaget for sammenhengen mellom regn, vind, fritt slagregn og slagregn på veggfasader. Slagregnbelastningen bygninger blir utsatt for bør tas hensyn til allerede i prosjekteringsfasen. Tiltak i etterkant, spesielt når skader har oppstått, vil som regel være atskillig mer kostbart enn selve slagregnprosjekteringen.

En stor takk til Terje Jacobsen (assisterende programleder), Tore Kvande (prosjektleder P5), Thomas K. Thiis (prosjektleder P3), Berit Time (prosjektleder P9), Sivert Uvsløkk (prosjektleder P4) og Lars-Ivar Aarseth ved NBI og Arild Gustavsen ved NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport for viktige innspill i prosjektet.

Oslo / Trondheim, februar 2003

Kim Robert Lisø
Programleder
Norges byggforskningsinstitutt

Bjørn Petter Jelle
Prosjektleder, prosjekt 11
Norges byggforskningsinstitutt

Sammendrag

Rapporten er et litteraturstudie som tar for seg tilgjengelige vind-, nedbør- og slagregndata for Norge. Måledata for vind og nedbør skaffes til veie av Det norske meteorologiske institutt (DNMI) ved bruk av nedbørstasjoner, værstasjoner og automatstasjoner. Slagregnmålinger utføres for tiden ikke i Norge. Enkelte historiske slagregndata for Norge forekommer dog; slagregnmålinger av J. Holmgren ved Norges tekniske Høgskole (NTH) (Holmgren 1946), og videreføringen av Sverre Hoppestad i regi av Norges byggforskningsinstitutt (NBI) i perioden 1951-1953 (Hoppestad 1955). I tillegg til de direkte slagregnmålingene, beregnet Holmgren og Hoppestad slagregnet for en rekke værstasjoner.

Slagregnkalkulasjoner, både fritt slagregn og slagregn på fasade, er gjennomgått. En rekke faktorer som virker inn på slagregnet, som for eksempel topografi- og veggfaktorer, er tatt med i beregningene. Det ses også nøyere på hvilke krefter som virker på regndråper og hva dette resulterer i form av regndråpeform, størrelsesfordeling og fallhastighet. Slagregnmengden vil for det første variere avhengig av lokalisering på bygningsfasaden. Dermed vil den totale vannmengden på bygningsfasadene variere på grunn av rennende vann på fasaden. Mengden er avhengig av distribusjonen av slagregnet, vedheften av vann og fuktopptaket i fasaden. Oppsamling og registrering av mengde rennende vann vil derfor også være aktuelt i denne sammenhengen. Ut fra målte vind- og nedbørdata fra vær- og automatstasjonene i Norge kan slagregnbelastningen beregnes for ulike steder i landet. Lokale forhold som for eksempel topografi og terrengruhet tas hensyn til i det eksisterende formelverket for beregning av slagregnmengder. En slagregnberegning som inkluderer vind- og nedbørstatistikk for ulike deler av landet over flere tiår vil gi en langt mer oppdatert og pålitelig slagregnoversikt både med hensyn til middel- og ekstremverdier.

Slagregndata for Norge kan presenteres med forskjellige detaljeringsnivå. En mulig oppdeling kan være som følger: (1) grovt slagregnkart over hele Norge (type Norgeskart), (2) oppdeling av slagregnkartet i flere regioner (type fylkeskart, kommunekart osv.), (3) spesifikke slagregnverdier i de forskjellige himmelretningene (for forskjellige regioner, byer, tettsteder, etc.) og (4) metodikk for numeriske slagregnberegninger.

En videreføring av arbeidet med å fremskaffe grunnlagsdata for vurdering av slagregnpåkjenninger i Norge vil bli gjort ved oppstart av slagregnmålinger ved den automatiske værstasjonen på Voll i Trondheim. Disse slagregnmålingene vil bli knyttet opp mot målinger av fuktopptak i fasadeelementer, hvor både slagregnoppsamlere og fuktmålere vil bli plassert på en trefasade på et forsøkshus. En slik kobling medfører verdifull erfaring og datainnsamling med fritt slagregn, målinger av slagregn på fasade og fuktopptaksmålinger på fasadeelementer, og vil bli utført som en del av prosjektene P9, *Krav til fasadesystemer i forhold til slagregnpåkjenninger* og P11, *Slagregndata for prosjektering og beregninger* i FoU-programmet *Klima 2000*.

Prosjektet skal til slutt resultere i en samling av slagregndata for Norge, samt metoder og anvisninger for hvordan slagregnpåkjenninger kan vurderes i forbindelse med prosjektering av bygninger. I tillegg til bruk av eksisterende klimadata, vil mulige virkninger av klimaendringer på fremtidige slagregnforhold i Norge bli vurdert.

Innhold

FORORD	3
SAMMENDRAG	4
INNHold	5
1 INNLEDNING	6
2 HISTORISKE MÅLEDATA FOR VIND OG NEDBØR	7
3 HISTORISKE MÅLEDATA FOR SLAGREGN	9
4 SLAGREGNKALKULASJONER	13
4.1 GENERELT OM SLAGREGN	13
4.2 KREFTER PÅ REGNDRÅPER.....	14
4.3 REGNDRÅPEFORM	15
4.4 REGNDRÅPERS STØRRELSSEFORDELING	17
4.5 LAV FALLHASTIGHET FOR SMÅ REGNDRÅPER.....	18
4.6 HØY FALLHASTIGHET FOR STORE REGNDRÅPER	20
4.7 OPPSUMMERING AV FALLHASTIGHET FOR REGNDRÅPER	21
4.8 FORMLER FOR SLAGREGN	26
4.9 STANDARDISERING AV FORMLER FOR SLAGREGN	29
4.10 VIND- OG REGNSTRØMNINGSFORHOLD RUNDT BYGNINGER	30
5 OPPSUMMERING OG VIDERE ARBEID	32
5.1 SLAGREGNDATA.....	32
5.2 SLAGREGNDATA OG FUKTTEKNISKE BEREKNINGER.....	32
5.3 BRUK AV SLAGREGNDATA.....	32
5.4 BEHOV FOR NY KUNNSKAP	33
REFERANSER	34

1 Innledning

I forbindelse med prosjektering av bygninger er det ofte nødvendig med vurderinger av forventet slagregnbelastning på det aktuelle stedet. Dette for å få en kvalitativ oppfatning av hvilke krav som skal stilles til oppbygging og utførelse av konstruksjonene. Slike vurderinger er imidlertid vanskelige å utføre, da det er svært mangelfullt hva som finnes av slagregndata for Norge. Det er derfor et klart behov for å fremskaffe slagregndata for hele landet. Aktuelle data kan være slagregnkart, slagregnroser som viser slagregnbelastningen for de forskjellige himmelretningene, tabeller, etc. Dataene kan videre fremstilles med forskjellige statistiske verdier som f.eks. sum over måneden eller året, intensiteter over kortere eller lengre tidsperioder, maksimal- og gjennomsnittsverdier. I forbindelse med mer avanserte vurderinger ved bruk av fuktregningsprogrammer, er det også behov for nedbør- og vinddata på timebasis. Slagregnbelastningen bygninger blir utsatt for bør tas hensyn til allerede i prosjekteringsfasen. Tiltak i etterkant, spesielt når skader har oppstått, vil som regel være atskillig mer kostbart enn selve slagregnprosjekteringen.

Nedbør i form av slagregn (regn med en horisontal hastighetskomponent) kan medføre store problemer for ytterkonstruksjonene, spesielt for fasader. Mengden slagregn som treffer en bygnings ytterflate avhenger bl.a. av nedbørsintensiteten, vindens hastighet og retning, lokal topografi, skjerming fra omgivelsene og ytterflatenes orientering og helning. Slagregn opptrer med tilfeldig variasjon og det er store variasjoner i påkjenning fra år til år. Åpne kyststrøk og høyfjellsstrøk har normalt de hyppigste og største påkjenningene, mens innlandsstrøk er mindre utsatt. Erfaringer fra Østlandet og Sørlandet høsten 2000 har imidlertid minnet oss på at også innlandsstrøk fra tid til annen kan oppleve store slagregnmengder.

Litteraturstudiet er utført som en del av prosjekt 11 *Slagregndata for prosjektering og beregninger* i FoU-programmet *Klima 2000 – Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner*, se nærmere omtale i programbeskrivelsen (Lisø et al. 2002). Prosjektet skal fremskaffe grunnlagsdata for vurdering av slagregnpåkjenninger i Norge, blant annet til bruk ved fukttekniske beregninger. Prosjektet vil resultere i en samling av slagregndata for Norge, samt metoder og anvisninger for hvordan slagregnpåkjenninger kan vurderes i forbindelse med prosjektering av bygninger. I tillegg til bruk av eksisterende klimadata, vil mulige virkninger av klimaendringer på fremtidige slagregnforhold i Norge bli vurdert. Slagregndataene vil bli benyttet som underlag for fukttekniske beregninger i flere av de øvrige prosjektene.

2 Historiske måledata for vind og nedbør

Det norske meteorologiske institutt (DNMI) foretar målinger av vind og nedbør i Norge, og generelt vil historiske måledata, pågående målinger og fremtidige målinger i DNMI's regi kunne inndeles i følgende kategorier (Aune 2001):

Nedbørstasjoner (ca. 550 stk.):

Stasjonene måler kun nedbør, og er følgelig ikke så interessante for våre slagregnberegninger og målinger.

Værstasjoner (ca. 140 stk.):

- Nedbør måles 2 ganger/døgn.
- Vind måles 3 eller 4 ganger/døgn.
- Måletidspunkt:
 - Kl. 01.00 (vind, ikke alle stasjoner).
 - Kl. 07.00 (vind + nedbør).
 - Kl. 13.00 (vind).
 - Kl. 19.00 (vind + nedbør).
- Vindmåling: Manuell, visuell etter Beaufort-skalaen.

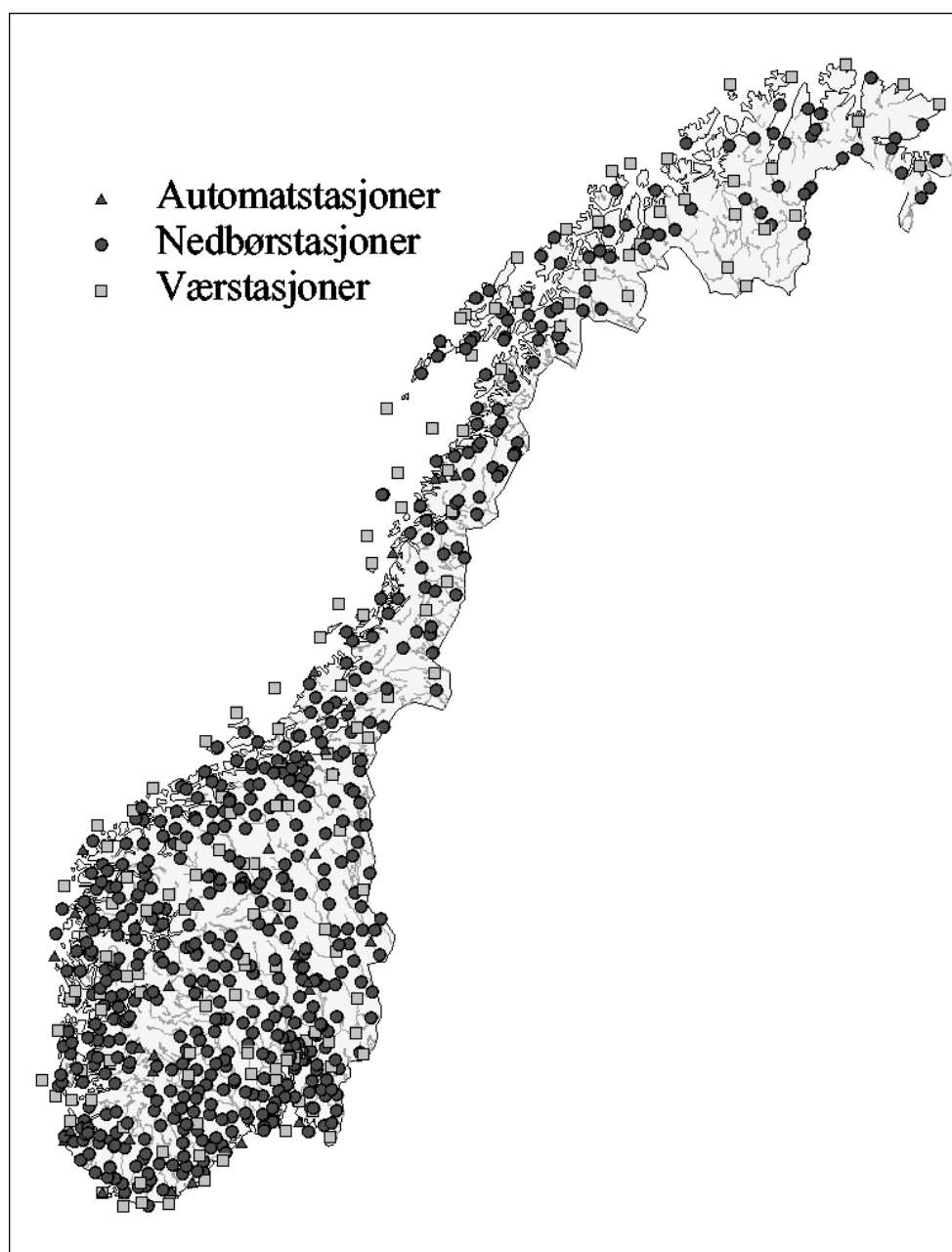
Automatstasjoner (ca. 20 stk.):

- Vindmåling: 1 måling/h, 24 h i døgnet, 10 m høyde.
- Nedbørmåling: 1 måling/h, 2-2.5 m høyde.

Automatstasjoner i landbruket (ca. 50 - 60 stk.):

- Bare måling om sommeren.
- Vindmåling: 1 måling/h, 24 h i døgnet.
- Nedbørmåling: 1 måling/h, 24 h i døgnet.
- Litt usikkerhet angående målehøyde (2 m, etc.)

De forskjellige målestasjonene (nedbør-, vær- og automatstasjoner) og deres lokalisering på Norgeskartet er vist i Figur 2.1 (DNMI 2002).



Figur 2.1.

Målestasjoner (nedbør-, vær- og automatstasjoner) og deres lokalisering på Norgeskartet (DNMI 2002).

3 Historiske måledata for slagregn

Det utføres i dag ingen slagregnmålinger i Norge (Aune 2001).

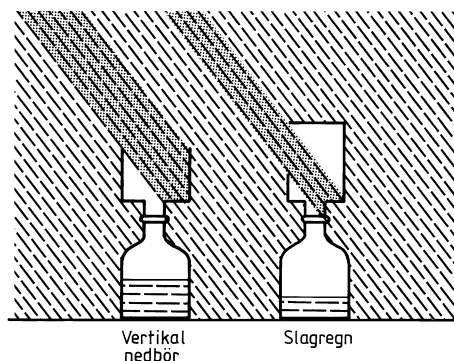
Holmgren - NTH (1946)

De første forsøk på slagregnmålinger i Norge og tilhørende beregninger ble foretatt av J. Holmgren (fra 1937), som utførte direkte slagregnmålinger ved Norges tekniske høgskole (NTH) og ga en beregning av slagregn for en del meteorologiske stasjoner (Holmgren 1946).

Hoppestad - NBI (1955)

En videreføring av Holmgrens arbeid ble besluttet av Norges byggforskningsinstitutt (NBI), og de resulterende slagregnmålingene i Norge finnes i NBI-rapport nr. 13 (Hoppestad 1955). Denne rapporten inkluderer slagregnmålinger i hovedretningene nord, sør, øst og vest ved de fire værstasjonene Oslo (Blindern), Bergen (Fredriksberg), Trondheim (Voll i tidligere Strinda) og Tromsø (Værvarslina for Nord-Norge) i perioden 1951-1953. Vind- og nedbørmålinger fra de samme fire værstasjonene ble brukt til å finne en sammenheng mellom vindhastighet, nedbør og slagregn. Denne sammenhengen ble så benyttet til å beregne slagregn ved 70 værstasjoner distribuert utover Norge.

En prinsippsskisse for måling av vertikal nedbør og slagregn er gitt i Figur 3.1 (NBI Håndbok 45 *Trehus* 1998). Figuren viser at det er den horisontale nedbørkomponenten som fanges inn som slagregn.



Figur 3.1.

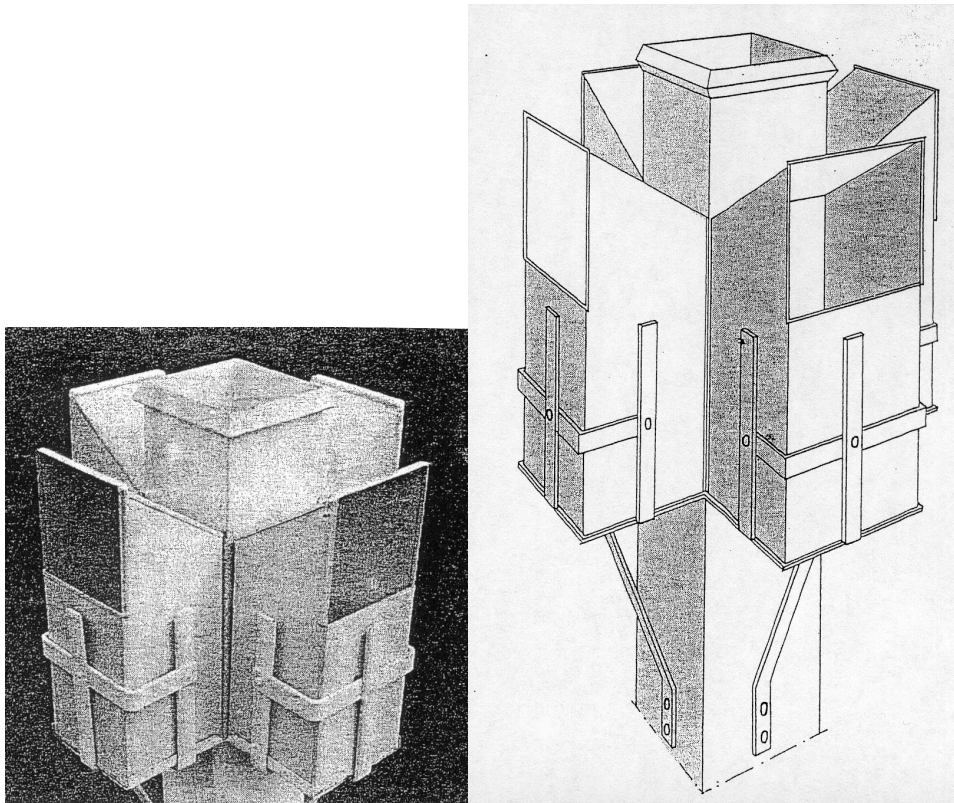
Prinsippsskisse for måling av vertikal nedbør og slagregn (NBI Håndbok 45 *Trehus* 1998).

Observasjonene av slagregn i Hoppestad-rapporten er foretatt med et instrument konstruert av J. Holmgren som vist i Figur 3.2 (Hoppestad 1955). Dette instrumentet er sammensatt av fem nedbørmålere, fire slagregnmålere med vertikal åpning (innfangning av den horisontale nedbørkomponenten fra nord, sør, øst og vest) og en nedbørmåler i midten for registrering av nedbør på vanlig måte.

Basert på Sverre Hoppestads målinger er det laget et enkelt slagregnkart over Norge, se Figur 3.3, som angir oftest opptredende slagregnetning og gjennomsnittlig årlig slagregn fra denne retningen (NBI Håndbok 45 *Trehus* 1998). Fra dette slagregnkartet finner en for eksempel at kyststrøkene på Vestlandet opplever mest slagregn fra sør, mens fremherskende slagregnetning på Nordmøre- og Trøndelagskysten er fra vest. Slagregnkartet viser derimot ikke f.eks. nest største slagregnetning (hvor slagregnmengdene kan være nesten like store som den største slagregnetning vist på kartet), og den totale slagregnmengden. Videre er dette et svært grovt kart, hvor lokale forhold ikke fremkommer. Hoppestads målinger i denne perioden ga også noen resultater som var vanskelige å forklare, for eksempel de relativt ubetydelige slagregnmengder fra vest i Bergen (slagregnårsmiddel på 145.2 mm fra vest og

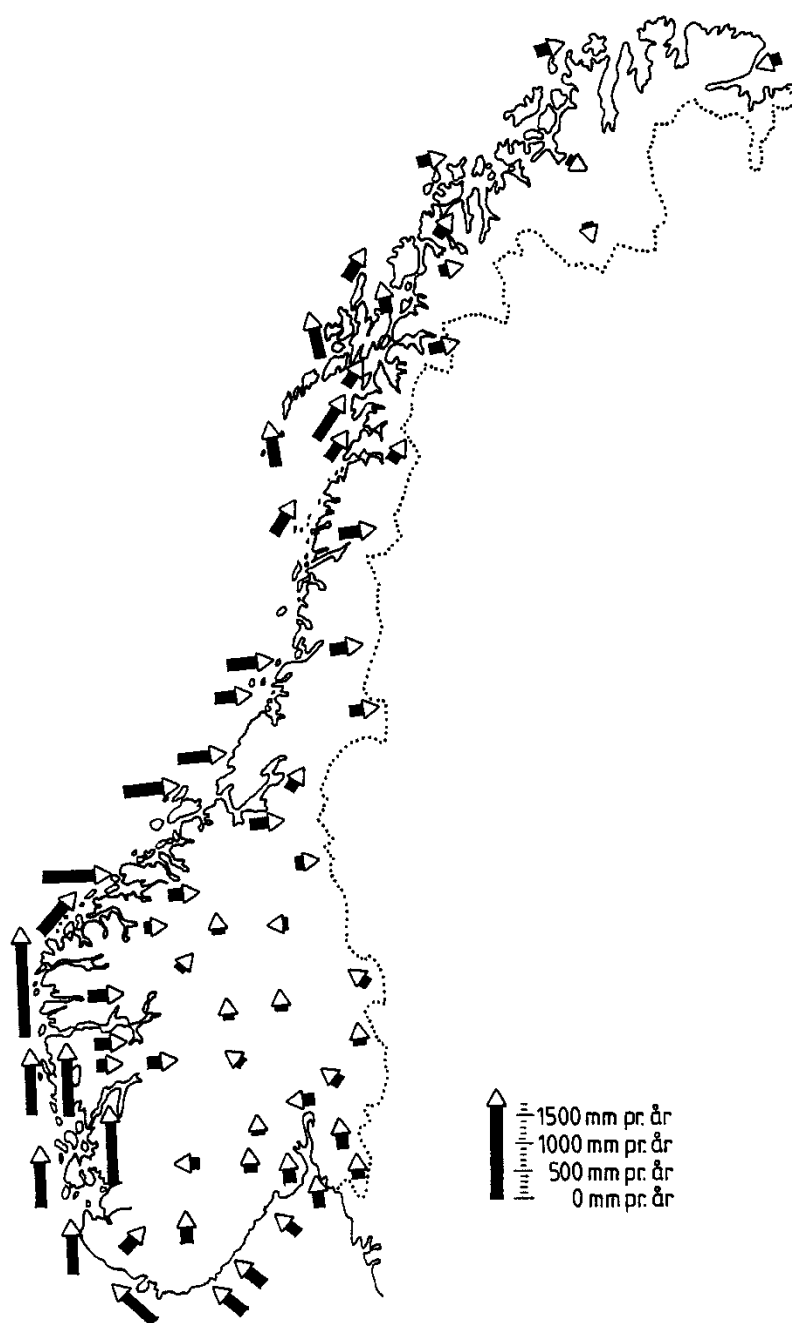
1017.8 mm fra sør i perioden 1952-1953). Hoppestad nevner her at slagregnstasjonens beliggenhet (et større hus ligger et stykke fra måleren) kan være årsak til at så lite slagregn fra vest er målt i Bergen (Hoppestad 1955). Det vil si at lokale forhold i dette tilfellet faktisk kan være feilaktig gjenspeilet i et så grovt oversiktskart som gitt i Figur 3.3.

I Figur 3.4 og Figur 3.5 er det vist henholdsvis prinsippskisser og virkelige slagregnoppsamlere for bruk på fasader (fra et nyere arbeid av Högberg, Kragh og Mook (1999)).



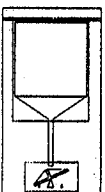
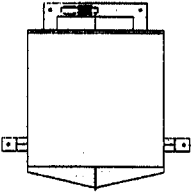
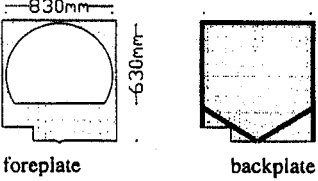
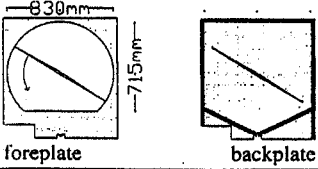
Figur 3.2

Bilde og prinsipptegning av slagregnmåler benyttet først av Holmgren og senere av Hoppestad (Hoppestad 1955).



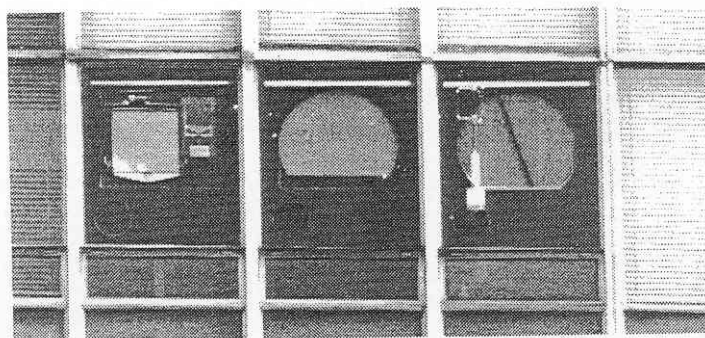
Figur 3.3

Slagregnkart over Norge som angir oftest opptredende slagregnretning og gjennomsnittlig årlig slagregn fra denne retningen (NBI Håndbok 45 *Trehus* 1998).

type	principle min. intensity	material	catch area	geometry
CTH	traditional collector with tipping bucket ($V_{tip} = 1 \text{ g}$) $\frac{1 \text{ tip}}{20 \text{ min}} = 0.09 \text{ mm/h}$	perspex	0.18×0.18 $= 0.032 \text{ m}^2$	
TUD	collector weighted by a strain gauge ($\Delta m \approx 3 \text{ g}$) $\frac{3 \text{ g}}{20 \text{ min}} = 0.04 \text{ mm/h}$	stainless steel	0.46×0.46 $= 0.21 \text{ m}^2$	
TUE-I	traditional collector with reservoir (3 l) and balance ($\Delta m = 0.1 \text{ g}$) $\frac{0.1 \text{ g}}{20 \text{ min}} = 0.001 \text{ mm/h}$	teflon coating	0.44 m^2	
TUE-II	as TUE-I but with a rotating wiper $\frac{0.1 \text{ g}}{20 \text{ min}} = 0.001 \text{ mm/h}$	teflon coating	0.50 m^2	

Figur 3.4

Prinsippskisser og spesifikasjoner for en del fasadeslagregnoppsamlere. Legg merke til teflonbelegg og visker som skal minimalisere vannmengden som normalt ville ha blitt hengende på oppsamlerens vertikale oppsamlingsvegg. Fra et samarbeid mellom Chalmers University of Technology (CTH), Technical University of Denmark (TUD) og Eindhoven University of Technology (TUE) (Högberg, Kragh og Mook 1999).

**Figur 3.5**

Fire slagregnoppsamlere montert på en veggfasade. Fra venstre mot høyre: TUD, CTH (mindre enn de andre), TUE-I og TUE-II som spesifisert i Figur 3.4. En vindmåler er montert under TUE-II (Högberg, Kragh og Mook 1999).

4 Slagregnkalkulasjoner

4.1 Generelt om slagregn

Kombinasjonen av regn og vind gir regndråpene en horisontal hastighetskomponent i tillegg til den vertikale. Denne horisontale hastighetskomponenten kalles slagregn (*driving rain* eller *wind-driven rain* på engelsk). Slagregn gir med andre ord også direkte fuktpåkjenning på vertikale bygningsfasader.

Komplekst mikroklima

Slagregnmålinger innebærer et komplekst mikroklima som innbefatter:

- Konstruksjonsdesign.
- Kombinasjoner av klimaparametere.

Direkte slagregnmåling

Direkte slagregnmålinger deles prinsipielt inn i to typer:

- Fritt slagregn.
- Slagregn på veggfasade.

Fritt slagregn

Måling av fritt slagregn vil i prinsippet aldri være helt fritt slagregn. Introduksjon av en måleboks ute på et åpent jorde, innebærer en forstyrrelse/påvirkning av det frie slagregnet. Og selv om en tenker seg andre målemetoder/prinsipper enn konvensjonelle målebokser (f.eks. tynne målesirkler, fotodeteksjon, etc.) vil slagregnet fortsatt ikke være helt fritt (selv om en da begynner å nærme seg).

Slagregn på veggfasade

Det nærmeste en kommer en ideell slagregnmåling på en veggfasade (basert på konvensjonell vannoppsamling) er ved oppsamling av slagregnet i hull boret direkte og i flukt med den eksisterende veggoverflaten. Som oftest vil det ikke være ønskelig å bore slike hull i eksisterende fasader, og en benytter seg da av oppsamlingsbokser av ulike utforminger. Disse slagregnoppsamlerne bør utformes slik at de påvirker slagregnet i minst mulig grad på fasaden, det vil si at oppsamlerne ikke bør stikke for langt ut fra fasadeoverflaten. På den annen side må oppsamlerne også utformes slik at slagregnet som treffer oppsamlerne ikke spruter/skvetter ut av oppsamlingsenheten igjen (noe som kan skje hvis oppsamlingsfangerne stikker for kort ut fra fasadeoverflaten).

Slagregn ut fra nedbør og vind - Kalkulert slagregn

Som nevnt foran utføres det i dag ingen slagregnmålinger i Norge (Aune 2001). Slagregndata må da beregnes ut fra en kombinasjon av:

- Nedbørmålinger.
- Vindmålinger.

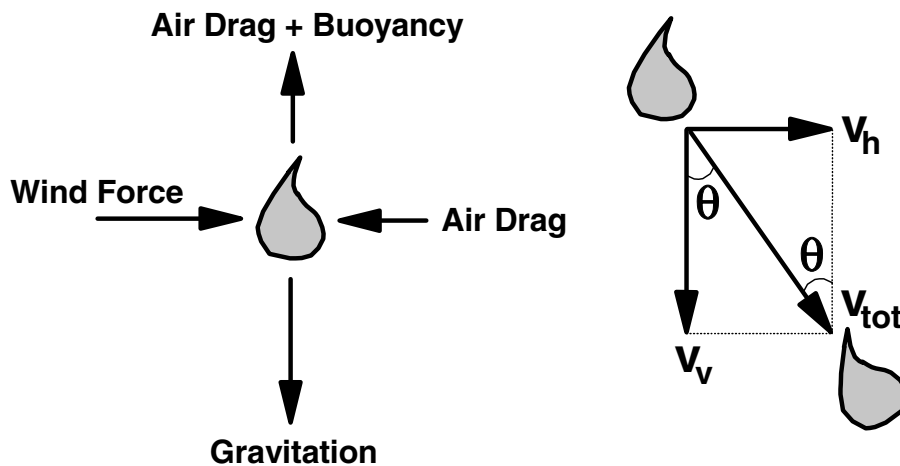
For automatstasjonene har en timeverdier for både nedbør og vind (1 måling/h, 24 h i døgnet). Imidlertid blir en direkte korrelasjon komplisert ved det faktum at nedbør og vind måles i forskjellig høyde, henholdsvis 2-2.5 m og 10 m. For værstasjonene kompliseres sammenhørende nedbør- og vindmålinger ytterligere ved at nedbør kun måles to ganger i døgnet, mens vind måles tre eller fire ganger i døgnet. Dessuten er vindmålingene på værstasjonene manuelle, dvs. visuelle etter Beaufort-skalaen, noe som gir en viss unøyaktighet i målingene.

4.2 Krefter på regndråper

En fallende regndråpe (se Figur 4.1) opplever følgende fem krefter:

- Vertikalt rettet gravitasjonskraft
- Vertikalt oppadrettet luftmotstand
- Vertikalt oppadrettet oppdrift (i samme retning som luftmotstand)
- Horisontalt (forenklet) rettet vindkraft
- Horisontalt (forenklet) rettet luftmotstand (motsatt retning av vindkraft).

Regndråpen påvirkes av en vertikalt rettet gravitasjonskraft som avhenger av regndråpens masse, en vertikalt oppadrettet luftmotstand avhengig av regndråpens fallhastighet og en vertikalt oppadrettet oppdriftskraft avhengig av regndråpens volum (Arkimedes prinsipp). I tillegg påvirkes regndråpen av en vindkraft som forenklet er vist som en horisontalt rettet kraft i Figur 4.1. Som for gravitasjon medfører også vindkraften at det settes opp en motsatt rettet (forenklet horisontalt) luftmotstand. Da denne luftmotstanden er motsatt rettet av vindkraften, kan den ofte inkluderes som et fratrekk i vindkraften. Av definisjonen på slagregn følger det at hvis den horisontale vindkraften er lik null er også slagregnet lik null.



Figur 4.1

Følgende krefter virker på en regndråpe: Gravitasjon, luftmotstand, oppdrift og vind. Regndråpens totalhastighet v_{tot} kan dekomponeres i en vertikalt rettet hastighet v_v og en horisontalt rettet hastighet v_h .

Fallhastigheten v_v i vertikal retning avhenger av regndråpenes forskjellige størrelser og masser, og finnes ved å sette opp og løse kraftbalansen for en regndråpe i vertikal retning uttrykt ved differensiallikningen:

$$m(dv_v/dt) = mg - m_f g - F(v_v) \quad (4.1)$$

hvor

m = regndråpens masse (kg)

m_f = massen av det omgivende fluidet (her: luft) regndråpen fortrenger (kg)

v_v = regndråpens vertikale fallhastighet (m/s)

t = tiden fallet har pågått (s)

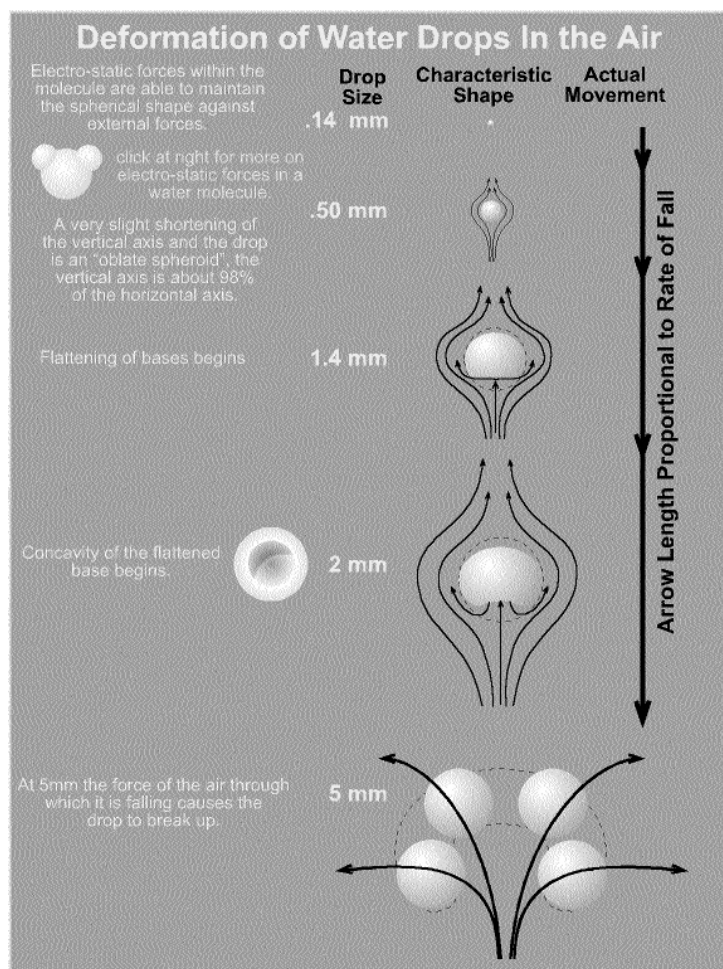
dv_v/dt = regndråpens akselerasjon (m/s^2)

g = tyngdeakselerasjonen $\approx 9.8 \text{ m/s}^2$

$F(v_v)$ = kraftfunksjon av regndråpens vertikale fallhastighet, f.eks. luftmotstand (N).

4.3 Regndråpeform

Regndråper har ikke den karakteristiske dråpeformen som de fleste ser for seg (som for eksempel i Figur 4.1), men derimot en sfæreform for små dråper (lave hastigheter) og en mer flattrøkt (på grunn av luftmotstanden) fra bunnen form ("hamburger-fasjon") for store dråper (høye hastigheter), se Figur 4.2. Maksimal regndråpestørrelse er opp til omkring 5 mm, fordi luftstrømmen vil ødelegge større dråper, se Figur 4.2 (fra <http://www.shorstmeyer.com/wxfaq/float/dropdeform.html>) og Figur 4.3 (Galitz and Whitlock 1998).



Figur 4.2

Maksimal regndråpestørrelse er opp til ca. 5 mm siden luftstrømmen vil ødelegge større dråper. Legg også merke til endringen i regndråpeform, fra små sfæreformede dråper ved lave hastigheter til store flattrøkte "hamburger-formede" dråper ved høye hastigheter (www.shorstmeyer.com/wxfaq/float/dropdeform.html).

Dråpestørrelsen bestemmer i stor grad deformasjonen av regndråpene. Desto mindre dråpen er, desto mindre vil den deformeres. Dette skyldes:

- Små dråper har lav fallhastighet, da hastigheten øker med massen, se senere utledninger (f.eks. likn. 4.23 og likn. 4.35). Luftmotstanden øker med økende hastighet (se f.eks. likn. 4.14 og likn. 4.26).
 ⇒ Små dråper opplever mindre luftmotstand og deformeres følgelig mindre enn store dråper.
- Små dråper har et høyere overflatespenning/masse forhold enn store dråper, og små dråper vil derfor deformeres mindre enn store dråper. Se enkel utledning nedenfor.

Antar sfærisk form for enkelhets skyld. En sfære har areal A gitt av

$$A = 4\pi R^2 \quad (4.2)$$

og volum V gitt av

$$V = (4/3)\pi R^3 \quad (4.3)$$

samt masse m definert ved

$$m = \rho V = (4/3)\pi \rho R^3 \quad (4.4)$$

hvor

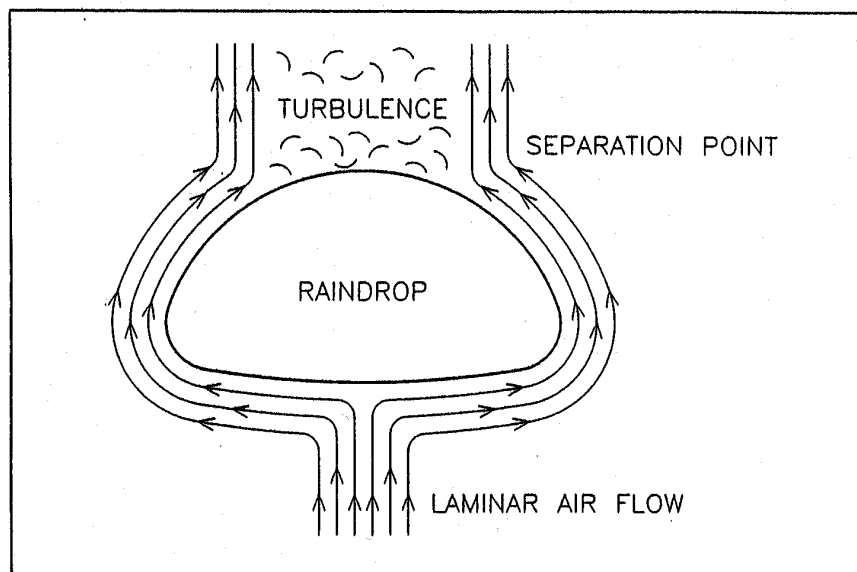
ρ = massetetthet av sfæren (f.eks. av regndråpen) (kg/m^3)

R = sfæreradius (f.eks. for regndråpen) (m)

Forholdet

$$\frac{A}{m} = \frac{3}{\rho R} \quad (4.5)$$

forteller at en minkende dråpestørrelse (R) gir et høyere overflatespenning/masse forhold, dvs. at små dråper deformeres mindre enn store dråper.



Figur 4.3

Tilnærmet form på en fallende regndråpe (Galitz and Whitlock 1998).

4.4 Regndråpers størrelsesfordeling

Regndråpers størrelsesfordeling, altså hvordan regndråpenes størrelse relateres til nedbørmengden, kan beskrives av følgende eksperimentelle sammenheng (Best 1950):

$$\Phi(R) = 1 - e^{-(2R/a)^n} = 1 - e^{-\left(\frac{2R}{AR_N^p}\right)^n} \quad (4.6)$$

$$a = A \cdot R_N^p \quad (4.7)$$

og

$$W = C \cdot R_N^q \quad (4.8)$$

hvor

$\Phi(R)$ = fraksjonen av vann (i væskeform) i luft bestående av dråper med radius $< R$

R = regndråperadius (mm)

R_N = nedbørmengde, regnintensitet (mm/h)

W = mengde vann (i væskeform) pr. luftvolum enhet (mm³/m³)

Konstantene A , C , p , q og n kan variere en del (spesielt n), men middelveidene er av Best (1950) satt til:

$$A = 1.30 \quad (4.9)$$

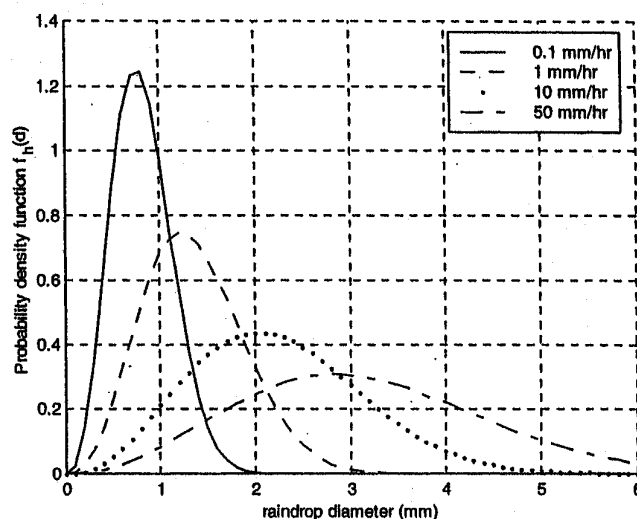
$$C = 67 \quad (4.10)$$

$$p = 0.232 \quad (4.11)$$

$$q = 0.846 \quad (4.12)$$

$$n = 2.25 \quad (4.13)$$

Se forøvrig også arbeid av Blocken og Carmeliet (July 2000), Figur 4.4, og Choi (1992) basert på undersøkelsene til Best (1950).



Figur 4.4

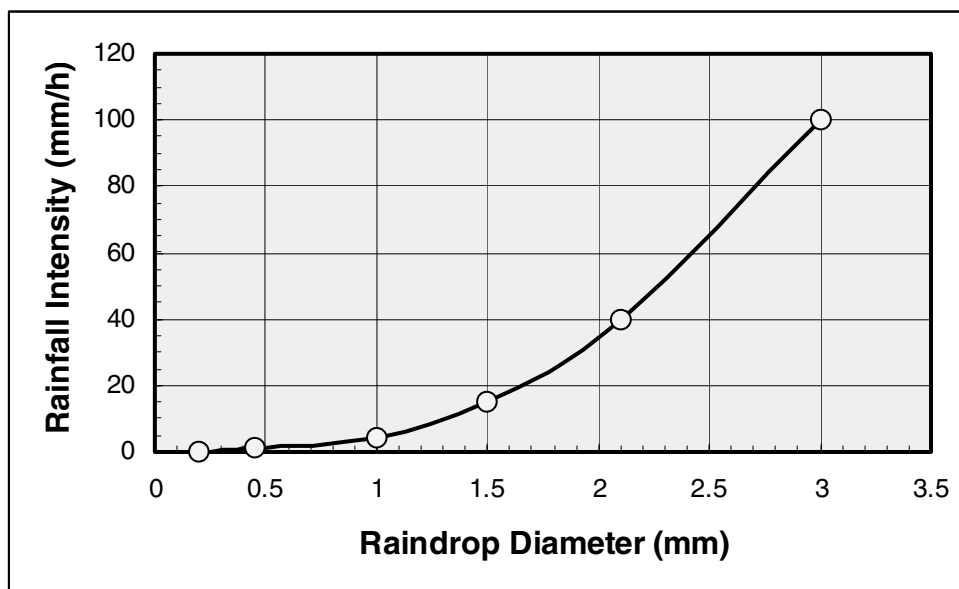
Regndråpers størrelsesfordeling med regnintensitet som parameter. Kalkulert av Blocken og Carmeliet (July 2000) basert på Best (1950).

Sammenhengen mellom regndråpestørrelse og regnintensitet er vist i Tabell 4.1 (Galitz og Whitlock 1998), hvor regnintensiteten øker med økende regndråpestørrelse. I tillegg er denne sammenhengen også framstilt grafisk i Figur 4.5.

Tabell 4.1

Sammenhengen mellom regndråpestørrelse og regnintensitet (Galitz og Whitlock 1998).

Regndråpediameter (mm)	0.20	0.45	1.00	1.50	2.10	3.00
Regnintensitet (mm/h)	0.25	1.00	4.00	15.00	40.00	100.00



Figur 4.5

Regnintensitet som funksjon av regndråpediameter. Verdier er hentet fra Tabell 4.1 (Galitz og Whitlock 1998).

4.5 Lav fallhastighet for små regndråper

For mer viskøse medier (f.eks. vann) og lave fallhastigheter blir motstanden $F(v_v)$ proporsjonal med fallhastigheten v_v , dvs. for **små regndråper med lav fallhastighet** kan $F(v_v)$ skrives på formen (merk at denne har svært begrenset gyldighet med luft som medium):

$$F(v_v) = K\eta v_v \quad (4.14)$$

hvor

K = koeffisient avhengig av det fallende objektets form (m)

η = viskositetskoeffisient til omgivende medium (kg/(ms) = Pas)

Ved innsetting av likn. 4.14 inn i likn. 4.1 fås differensiallikningen:

$$m(dv_v/dt) = mg - m_f g - K\eta v_v \quad (4.15)$$

med følgende løsning for fallhastigheten:

$$v_v = \frac{(m - m_f)g}{K\eta} \left[1 - e^{\frac{-K\eta}{m}t} \right] = v_t \left[1 - e^{\frac{-K\eta}{m}t} \right] \quad (4.16)$$

hvor grensehastigheten, også kalt terminalhastigheten, v_t (*terminal velocity*) er gitt ved:

$$v_t = \frac{(m - m_f)g}{K\eta} \quad (4.17)$$

Grensehastigheten v_t er den endelige, konstante hastigheten til regndråpen etter lang tid ($t \rightarrow \infty$), og finnes også enkelt uten løsning av differensiallikningen likn. 4.15. Når regndråpen har nådd grensehastigheten, dvs. at gravitasjonskraften balanseres av oppdriften og luftmotstanden, medfører dette at summen av kreftene som virker på regndråpen er lik null og følgelig er regndråpens akselerasjon lik null. Akselerasjonen $dv/dt = 0$ innsatt i likn. 4.15 gir etter omforming grensehastigheten gitt i likn. 4.17.

For en sfære er (Stokes' lov)

$$K = 6\pi R \quad (4.18)$$

hvor

R = sfæreradius (f.eks. for regndråpen) (m)

som innsatt i likn. 4.17 gir grensehastigheten

$$v_t = \frac{(m - m_f)g}{6\pi R\eta} \quad (4.19)$$

Med relasjonene

$$m = \rho V \quad (V = \text{volum}) \quad (4.20)$$

$$m_f = \rho_f V \quad (4.21)$$

og

$$V = (4/3)\pi R^3 \quad (4.22)$$

innsatt i likn. 4.19 fås

$$v_t = \frac{2R^2 g(\rho - \rho_f)}{9\eta} \quad (4.23)$$

hvor

R = sfæreradius for regndråpen (m)

g = tyngdeakselerasjonen $\approx 9.8 \text{ m/s}^2$

ρ = massetetthet til det fallende objekt, dvs. regndråpen (kg/m^3)

ρ_f = massetetthet til det omgivende fluidet (her: luft) (kg/m^3)

η = viskositetskoeffisient til omgivende medium ($\text{kg/(ms)} = \text{Pas}$).

Antar vi sfæriske regndråper med diameter på 0.2 mm ($R = 0.1$ mm) og 0.5 mm ($R = 0.25$ mm), $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 1.3 \text{ kg/m}^3$ og $\eta = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$, fås grensehastigheter på henholdsvis:

$$v_t = 1.2 \text{ m/s} \quad (R = 0.10 \text{ mm}) \quad (4.24)$$

$$v_t = 7.6 \text{ m/s} \quad (R = 0.25 \text{ mm}) \quad (4.25)$$

Grensehastigheten på 7.6 m/s for regndråper med diameter på 0.5 mm er for høy, da målte verdier ligger rundt 2 m/s (se Tabell 4.2), og skyldes en svakhet (utenfor gyldighetsområde) i likn. 4.14-4.15.

4.6 Høy fallhastighet for store regndråper

For mindre viskøse medier (f.eks. luft) og høye fallhastigheter blir motstanden $F(v_v)$ proporsjonal med kvadratet av fallhastigheten v_v , dvs. for **store regndråper med høy fallhastighet** kan $F(v_v)$ skrives på formen:

$$F(v_v) = \frac{1}{2} C \rho_f A v_v^2 \quad (4.26)$$

hvor

C = luftmotstandskoeffisient (dimensjonsløs) (avhengig av bl.a. formen på det fallende objekt, typisk lik 0.5 for sfæriske objekter)

ρ_f = massetetthet til det omgivende fluidet (her: luft) (kg/m^3)

A = tverrsnittsarealet på regndråpen målt i et plan normalt på fallretningen (m^2)

Ved innsetting av likn. 4.26 inn i likn. 4.1 fås differensiallikningen:

$$m(dv_v/dt) = mg - m_f g - \frac{1}{2} C \rho_f A v_v^2 \quad (4.27)$$

med følgende løsning for fallhastigheten:

$$v_v = \sqrt{\frac{2(m - m_f)g}{C \rho_f A}} \frac{1 - e^{-\frac{C \rho_f A}{m} \sqrt{\frac{2(m - m_f)g}{C \rho_f A}} t}}{1 + e^{-\frac{C \rho_f A}{m} \sqrt{\frac{2(m - m_f)g}{C \rho_f A}} t}} = v_t \frac{1 - e^{-\frac{C \rho_f A}{m} v_t t}}{1 + e^{-\frac{C \rho_f A}{m} v_t t}} \quad (4.28)$$

eller omskrevet

$$v_v = \sqrt{\frac{2(m - m_f)g}{C \rho_f A}} \tanh \left[\frac{C \rho_f A}{2m} \sqrt{\frac{2(m - m_f)g}{C \rho_f A}} t \right] = v_t \tanh \left[\frac{C \rho_f A}{2m} v_t t \right] \quad (4.29)$$

hvor grensehastigheten v_t er gitt ved:

$$v_t = \sqrt{\frac{2(m - m_f)g}{C \rho_f A}} \quad (4.30)$$

Grensehastigheten v_t er den endelige, konstante hastigheten til regndråpen etter lang tid ($t \rightarrow \infty$), og finnes også enkelt uten løsning av differensiallikningen likn. 4.27. Når regndråpen har nådd grensehastigheten, dvs. at gravitasjonskraften balanseres av oppdriften

og luftmotstanden, medfører dette at summen av kreftene som virker på regndråpen er lik null og følgelig er regndråpens akselerasjon lik null. Akselerasjonen $dv/dt = 0$ innsatt i likn. 4.27 gir etter omforming grensehastigheten gitt i likn. 4.30. For en delvis utledning av grensehastigheten henvises det f.eks. til Serway (Serway 1992).

Med relasjonene

$$m = \rho V \quad (V = \text{volum}) \quad (4.31)$$

$$m_f = \rho_f V \quad (4.32)$$

$$A = \pi R^2 \quad (4.33)$$

og

$$V = (4/3)\pi R^3 \quad (4.34)$$

innsatt i likn. 4.30 fås grensehastigheten

$$v_t = \sqrt{\frac{8Rg(\rho - \rho_f)}{3C\rho_f}} \quad (4.35)$$

hvor

R = sfæreradius for regndråpen (m)

g = tyngdeakselerasjonen $\approx 9.8 \text{ m/s}^2$

ρ = massetetthet til det fallende objekt, dvs. regndråpen (kg/m^3)

ρ_f = massetetthet til det omgivende fluidet (her: luft) (kg/m^3)

C = luftmotstandskoeffisient (dimensjonsløs) (avhengig av bl.a. formen på det fallende objekt, typisk lik 0.5 for sfæriske objekter).

Antar vi sfæriske regndråper med diameter på 2 mm ($R = 1 \text{ mm}$) og 4 mm ($R = 2 \text{ mm}$), $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 1.3 \text{ kg/m}^3$ og $C = 0.5$, fås grensehastigheter på henholdsvis

$$v_t = 6.3 \text{ m/s} \quad (R = 1 \text{ mm}) \quad (4.36)$$

$$v_t = 9.0 \text{ m/s} \quad (R = 2 \text{ mm}) \quad (4.37)$$

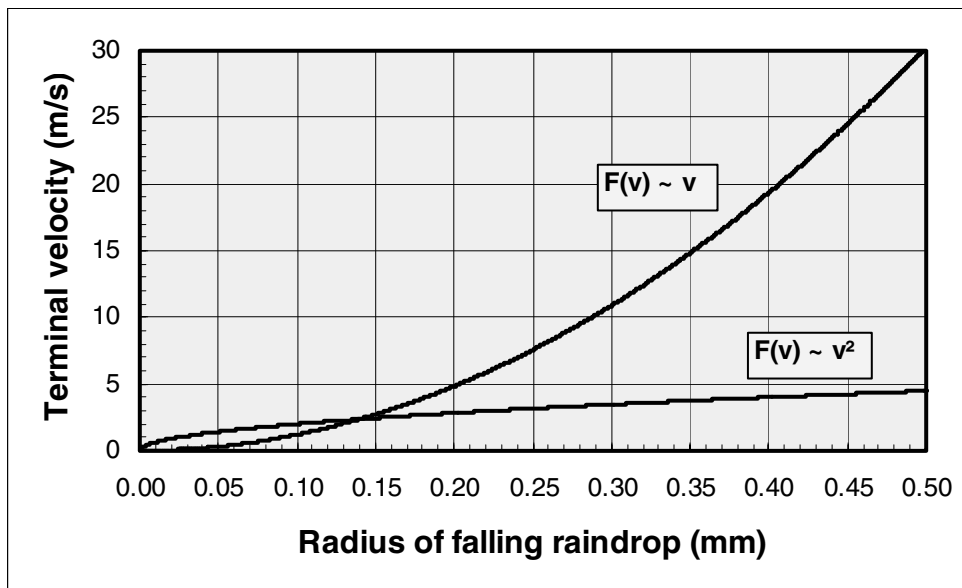
Disse grensehastighetene er sammenlignbare med målte verdier gitt i Tabell 4.2.

4.7 Oppsummering av fallhastighet for regndråper

Som nevnt foran har ikke regndråpene den karakteristiske dråpeformen som normalt visualiseres (som f.eks. i Figur 4.1), men derimot en sfæreform for små dråper (lave hastigheter) og en mer flattrykt (pga. luftmotstanden) fra bunnen form ("hamburger-fasong") for store dråper (høye hastigheter), se Figur 4.2. I beregningene her er det antatt sfæreform på regndråpene, noe som vil være tilnærmet korrekt for små dråpestørrelser og lave fallhastigheter. Større dråpestørrelser og høye fallhastigheter vil derimot introdusere unøyaktigheter i beregningene på grunn av flattrykkingen av regndråpene. Maksimal regndråpestørrelse er opp til omkring 5 mm på grunn av at luftstrømmen vil ødelegge større dråper, se Figur 4.2.

Siden luft er et lite viskøst medium vil vanligvis formelverket i kapittel 4.6 ($F \sim v_v^2$) være langt mer korrekt å bruke enn formelverket i kapittel 4.5 ($F \sim v_v$). Unntaket vil være for svært små regndråper ved lave fallhastigheter. Grensehastigheten stiger raskt når

luftmotstanden er proporsjonal med fallhastigheten, og for større dråpestørrelser kommer en fort opp i helt urealistiske grensehastigheter (f.eks. 755 m/s for $R = 2.5$ mm) ved bruk av denne modellen, se Figur 4.6. Grensehastigheten faller raskt av for større dråper når luftmotstanden er proporsjonal med kvadratet av fallhastigheten (f.eks. 10 m/s for $R = 2.5$ mm).



Figur 4.6

Grensehastighet for regndråpe som funksjon av dråperadius (antatt sfæriske dråper). To modeller er vist, hvor luftmotstanden er enten proporsjonal med fallhastigheten (likn. 4.15, likn. 4.23) eller med kvadratet av fallhastigheten (likn. 4.27, likn. 4.35).

Basert på data fra Gunn og Kinzer (1949), satte Rogers (1976) opp følgende tilnærming av grensehastigheten v_t for væskedråper med radius R (Khvorostyanov og Curry 2001):

$$v_t = k_1 R^2 \quad \text{for} \quad 0 < R < 40 \mu\text{m} \quad (4.38)$$

$$v_t = k_2 R \quad \text{for} \quad 40 \mu\text{m} < R < 600 \mu\text{m} \quad (4.39)$$

$$v_t = k_3 R^{1/2} \quad \text{for} \quad R > 600 \mu\text{m} \quad (4.40)$$

hvor

$$k_1 = 1.19 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (4.41)$$

$$k_2 = 8000 \text{ s}^{-1} \quad (4.42)$$

$$k_3 = 220 (\rho_{f0}/\rho_f)^{1/2} \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1} \quad (4.43)$$

Grensehastigheten for en regndråpe basert på likn. 4.38 - 4.43 i de tre dråpestørrelsesintervallene er framstilt grafisk i Figur 4.7. For enkelhets skyld er lufttettheten ved havnivå, ρ_{f0} , satt lik lufttettheten ved en vilkårlig høyde, ρ_f .

For store regndråpestørrelser ($R > 400 \mu\text{m} = 0.4 \text{ mm}$) og høye fallhastigheter viser Rogers' modell (Rogers 1976) relativt bra samsvar med modellen hvor luftmotstanden er proporsjonal med kvadratet av fallhastigheten (likn. 4.27, likn. 4.35), se Figur 4.7. For store dråpestørrelser over 0.6 mm ($600 \mu\text{m}$) uttrykker disse to modellene det samme, hvilket sees ved å sammenligne likn. 4.35 og likn. 4.40 ($F \sim v^2$) (forskjellen skyldes ulik verdi for k_3 i Figur 4.7; $200 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ kontra $220 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$).

For små regndråpestørrelser ($R < 80 \mu\text{m}$) og lave fallhastigheter viser Rogers' modell (Rogers 1976) relativt bra samsvar med modellen hvor luftmotstanden er proporsjonal med fallhastigheten (likn. 4.15, likn. 4.23), se Figur 4.7. For små regndråpestørrelser under $40 \mu\text{m}$ uttrykker disse to modellene det samme ($F \sim v_v$), sammenlign likn. 4.23 og likn. 4.38, noe som da resulterer i et sammenfall mellom disse to (like) modellene i Figur 4.7 (k_1 verdiene har litt forskjellig verdi i Figur 4.7; $1.21 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ kontra $1.19 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

I Figur 4.2 er det listet opp en del regndråpestørrelser med tilhørende målte grensehastigheter (Best 1950). Basert på disse verdiene er følgende approksimasjon av grensehastigheten funnet (Hagentoft 2002):

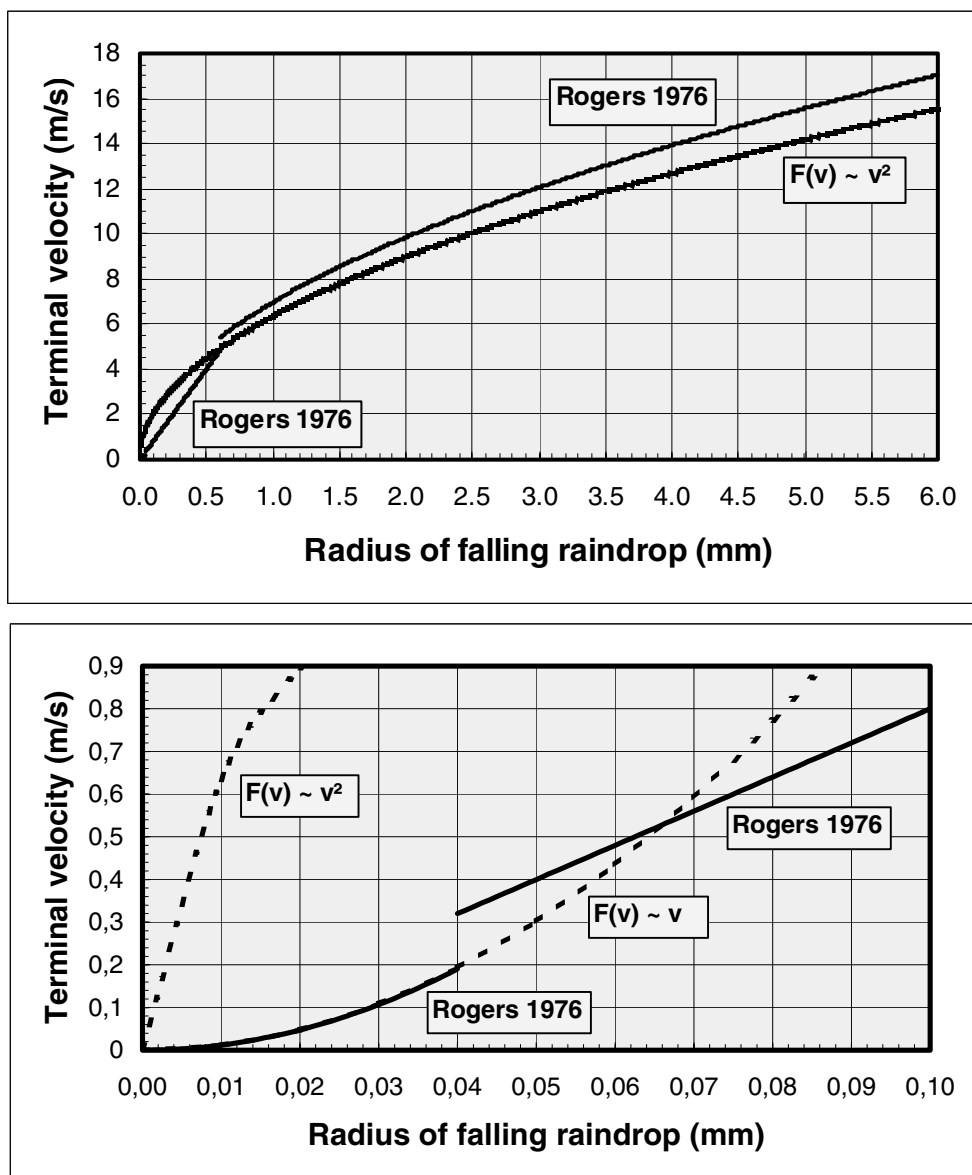
$$v_t = 9.55 \left[1 - e^{-1.15 R^{1.147}} \right] \quad (\text{gitt i m/s}) \quad (4.44)$$

hvor

R = sfæreradius for regndråpen (gitt i mm)

Verdiene i Tabell 4.2, samt likn. 4.44, er framstilt grafisk i Figur 4.8 sammen med grensehastigheten hvor luftmotstanden er proporsjonal med kvadratet av fallhastigheten (likn. 4.27, likn. 4.35).

I Tabell 4.3 er det også ført opp sammenhørende regndråpestørrelser og grensehastigheter, samt nedbørtype (<http://www.shorstmeyer.com/wxfaq/float/rtable.html>), som viser best samsvar med Bests tabellerte verdier i Tabell 4.2 (Best 1950).

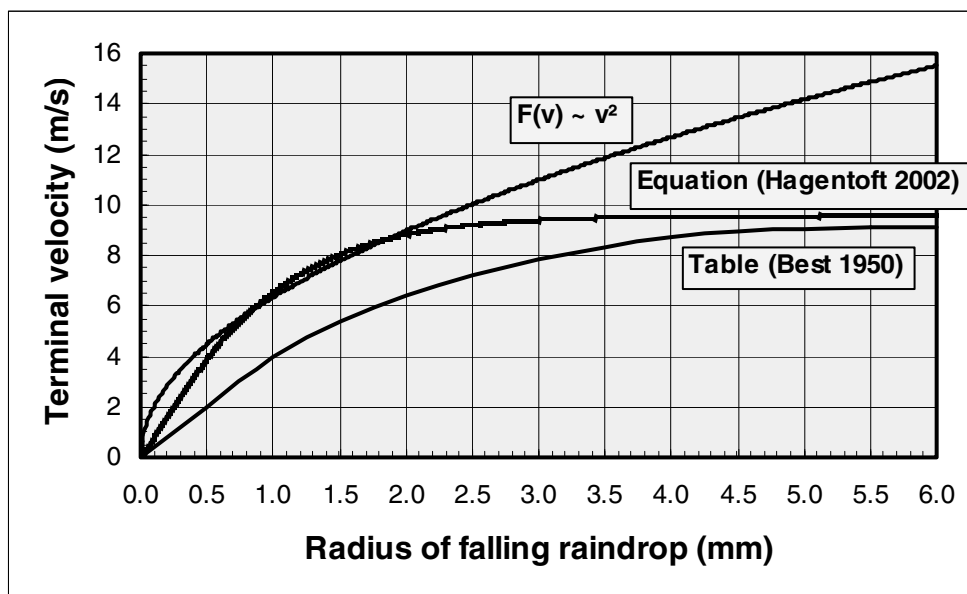
**Figur 4.7**

Grensehastighet for regndråpe som funksjon av dråperadius basert på tre intervaller for dråpestørrelse av Rogers (1976), se likn. 4.38-4.43. I tillegg er grensehastigheten også framstilt for de to modellene hvor luftmotstanden er henholdsvis proporsjonal med fallhastigheten (likn. 4.15, likn. 4.23) og med kvadratet av fallhastigheten (likn. 4.27, likn. 4.35).

Tabell 4.2

Regndråpediameter med tilhørende grensehastigheter (Best 1950).

Regndråpe-diameter (mm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Grensehas-tighet (m/s)	1.98	3.97	5.39	6.40	7.23	7.86	8.35	8.72	8.94	9.06	9.12	9.14

**Figur 4.8**

Grensehastighet for regndråpe som funksjon av dråperadius. Tre modeller er vist, en hvor luftmotstanden er proporsjonal med kvadratet av fallhastigheten (likn. 4.27, likn. 4.35), en som er basert på tabellerte verdier av Best (Best 1950) og en likningstilnærming av Bests tabellverdier (Hagentoft 2002).

Tabell 4.3

Regndråpediameter med tilhørende grensehastigheter, samt type regn
(www.shorstmeyer.com/wxfaq/float/rdtable.html).

Rain Type	Drop Size		Terminal Velocity	
	mm	inch	m/sec	miles/hr
Light Stratiform Rain (0.04" per hour)				
Small Drop	.5	.02	2.06	4.6
Large Drop	2.0	.08	6.49	14.4
Moderate Stratiform Rain (0.25" per hour)				
Small Drop	1.0	.04	4.03	8.9
Large Drop	2.6	.10	7.57	16.1
Heavy Thunder shower (1.0" per hour)				
Small Drop	1.2	.05	4.64	10.3
Large Drop	4.0	.16	8.83	19.6
Largest Possible Drop	5.0	.20	9.09	20.2
Hailstone	10	0.4	10.0	22.2
Hailstone	40	1.6	20.0	44.4

4.8 Formler for slagregn

Som vist i Figur 4.1 kan regndråpens totalhastighet v_{tot} dekomponeres i en vertikalt rettet hastighet v_v og en horisontalt rettet hastighet v_h . Slagregnmengden R_{dr} for fritt slagregn (horisontalkomponenten av nedbøren) måles i mm/h og er gitt av følgende uttrykk:

$$R_{\text{dr}} = \frac{v_h}{v_v} R_N \quad (4.45)$$

hvor

v_v = regndråpens vertikale fallhastighet (m/s)

v_h = regndråpens horisontale fallhastighet (m/s)

R_N = nedbørens (regnintensitetens) vertikalkomponent, dvs. normalnedbør (mm/h)

Regnmengden, eller regnintensiteten, måles i antall millimeter per time (mm/h) i forhold til et flateareal på 1 m^2 . Omregnet tilsvarer derfor 1 mm nedbør 1 liter (dm^3) nedbør per m^2 . Det vil si at:

$$1 \text{ mm}/1 \text{ m}^2 \sim 1 \text{ dm}^3/1 \text{ m}^2 \quad (\text{nedbør pr. h}) \quad (4.46)$$

I følge Lacy (Schwarz og Frank 1973) eksisterer følgende sammenheng mellom regndråpenes fallhastighet v_v (gitt i m/s) og normalnedbør R_N (gitt i mm/h):

$$v_v = 4.505 R_N^{0.123} \quad (4.47)$$

Ved å kombinere likn. 4.45 og likn. 4.47 fås sammenhengen mellom fritt slagregn R_{dr} , vindhastighet v_h (horisontalkomponent) og normalnedbør R_N (Schwarz og Frank 1973):

$$R_{\text{dr}} = 0.222 v_h R_N^{0.88} \quad (4.48)$$

som i følge Lacy er gyldig i det ideelle tilfellet med uforstyrret vindstrøm og regndråper av middels størrelse (Schwarz og Frank 1973). Undersøkelser viser at man i alminnelighet har en vid dråpesammensetning og at man som regel ikke kan regne med en ideell, uforstyrret vindstrøm. Under slike forhold har Lacy funnet det tilrådelig å forenkle til følgende sammenheng (Schwarz og Frank 1973):

$$R_{\text{dr}} = a v_h R_N \quad (4.49)$$

hvor proporsjonalitetsfaktoren etter Lacy (Schwarz og Frank 1973) er satt til

$$a = 0.2 \text{ s/m} \quad (4.50)$$

etter målinger med tallrike nedbørmengder av forskjellig varighet og styrke.

I litteraturen refereres det både til likn. 4.48 og likn. 4.49 (ofte via Lacy). Likninger på formen som likn. 4.48, hvor normalnedbøren R_N opphøyes i en eksponent, er kanskje den mest refererte og brukte likningen. Variasjoner av likn. 4.48 (faktor og eksponent) finnes også, som f.eks. (Fazio 1995, referert til arbeid av Lacy):

$$R_{\text{dr}} = (2/9) v_h R_N^{8/9} \quad (4.51)$$

som er tilnærmet lik likn. 4.48 ($2/9 = 0.222\dots$, $8/9 = 0.888\dots$).

Hens og Mohamed (1994) setter opp følgende slagregnformel for bygningsfasader:

$$R_{dr,w} = \frac{V_h}{V_v} R_N T R O W D \quad (4.52)$$

hvor

$R_{dr,w}$ = slagregnintensitet på bygningsfasade (mm/h)

T = topografifaktor (*topography factor*)

R = terrengruhetfaktor (*terrain roughness factor*)

O = obstruksjonsfaktor (*obstruction factor*)

W = veggfaktor (*wall factor*)

D = vindretningsfaktor (*wind direction factor*)

Topografifaktor T

Faktor som skal ta hensyn til lokal topografi som f.eks. bakker, åser, skrenter, etc. Spesielt av betydning for motvinds stigninger større enn 0.05 (1 til 20). Faktoren ligger mellom 1.0-1.6 i British Standard BS 8104 (1992). Hvor topografien ikke har betydning, settes faktoren lik 1.0.

Terrengruhetfaktor R

Faktor som innbefatter ujevnheter i terrenget på et mer generelt grunnlag. Se British Standard BS 8104 (1992) for flere detaljer.

Obstruksjonsfaktor O

Faktor som inkluderer lokale obstruksjoner, som f.eks. bygninger, gjerder eller trær, nært den aktuelle bygningsfasaden. Faktoren estimeres ut fra graden av obstruksjoner i siktelinjen. Se British Standard BS 8104 (1992) for flere detaljer.

Veggfaktor W

Faktor som omhandler veggkarakteristikker. Faktoren defineres som forholdet mellom mengden vann som treffer den aktuelle bygningsfasaden og mengden vann som treffer en ekvivalent uhindret flate. Se British Standard BS 8104 (1992) for flere detaljer, samt Tabell 4.4. Faktoren er ekvivalent til størrelsen "catch ratio" ("fangstforhold") gitt av Blocken og Carmeliet (July 2000), som vist nedenfor i likn. 4.57.

Vindretningsfaktor D

Faktor som inkluderer slagregnmengden til vinkelen mellom vindretningen og veggnormalen. Settes denne vinkelen lik θ , fås:

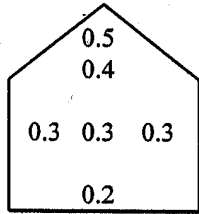
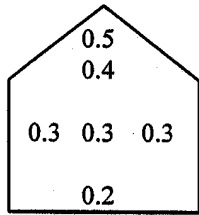
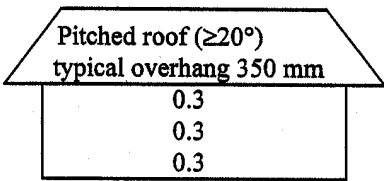
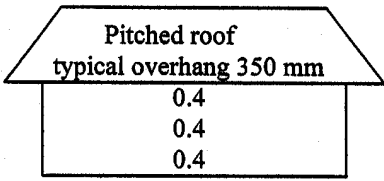
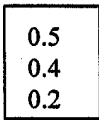
$$D = \cos\theta \quad (4.53)$$

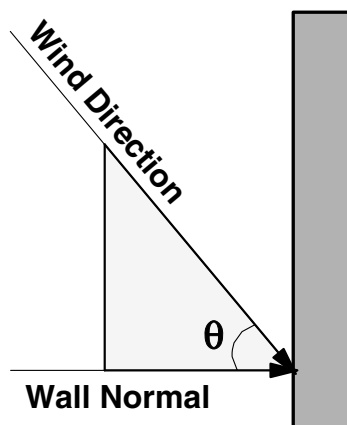
som illustrert i Figur 4.9. Med vindretning normalt på veggen blir $\theta = 0^\circ$ og D følgelig lik 1, mens for $\theta > 90^\circ$ (direktevinden treffer ikke den aktuelle veggen) blir D lik 0. Se Hens og Mohamed (1994) og CEN/TC 89/WG 9 N 104 (1998). British Standard BS 8104 (1992) tar ikke hensyn til denne vindretningsfaktoren (regner med en vindretning normalt på veggen).

For flere detaljer og kalkulasjonsmetoder angående de forskjellige faktorene (T, R, O, W og D), henvises det til British Standard BS 8104 (1992) og standardiseringsarbeidet CEN/TC 89/WG 9 N 104 (1998), samt CEN/TC 89/WG 9 N 125 som i tillegg også kort omhandler solinnstråling og langbølget (infrarød) stråling (relevant med tanke på uttørking av fuktopptak).

Tabell 4.4

Veggfaktorverdier (CEN/TC 89/WG 9 N 104 (1998)). Se forøvrig også British Standard BS 8104 (1992).

Description of wall	Average value	Distribution
Two storey gable	0.4	
Three storey gable	0.3	
Multi storey flat roof	0.2 for e.g. ten storey, but higher intensity at top	0.5 for top 2.5 m 0.2 for remainder
Two storey eaves wall	0.3	
Three storey eaves wall	0.4	
Two storey flat roof (pitch <20°)	0.4	



Wind Direction Factor $D = \cos \theta$

Figur 4.9

Illustrasjon av definisjonen av vindretningsfaktoren $D = \cos \theta$, hvor θ er vinkelen mellom vindretningen og veggnormalen. Se f.eks. Hens og Mohamed (1994).

Videre gir Spiesschaert (Hens og Mohamed 1994) følgende empiriske sammenheng mellom regndråpenes vertikale fallhastighet og regnintensiteten:

$$v_v = 16.2 R_N^{1/8} \quad (4.54)$$

Legg merke til forskjellen og likheten mellom likn. 4.47 og likn. 4.54 ($4.505 \neq 16.2$ og $0.123 \approx 1/8 = 0.125$)

Ved å kombinere likn. 4.52 og likn. 4.54 fås:

$$R_{dr,w} = (1/16.2) v_h R_N^{7/8} TROWD \quad (4.55)$$

som avviker litt fra likn. 4.48 og likn. 4.49 ($1/16.2 \approx 0.0617$, $7/8 = 0.875$).

4.9 Standardisering av formler for slagregn

Standardiseringsarbeidet for slagregnkalkulasjoner er for øyeblikket i en slags ventemodus, da komiteen ikke har blitt enige om hva som skal innbefattes i standarden (forskjellige metoder, etc.). Det foreløpige utkastet til en standard (CEN/TC 89/WG 9 N 104 (1998)) gir følgende formel (litt omskrevet og uten summasjon) for kalkulasjon av slagregnmengden:

$$R_{dr,w} = (2/9) v_h R_N^{8/9} TROWD \quad (4.56)$$

med symboler som definert tidligere. De to vinklene som inngår i vindretningsfaktoren i standarden er definert i forhold til himmelretning nord, men uttrykker det samme som den forenklede likn. 4.53.

Størrelsen "catch ratio" ("fangstforhold"), η , gitt ved (Blocken og Carmeliet July 2000):

$$\eta = R_{dr,w}/R_N \quad (4.57)$$

hvor

$R_{dr,w}$ = slagregnintensitet på bygningsfasade (mm/h)

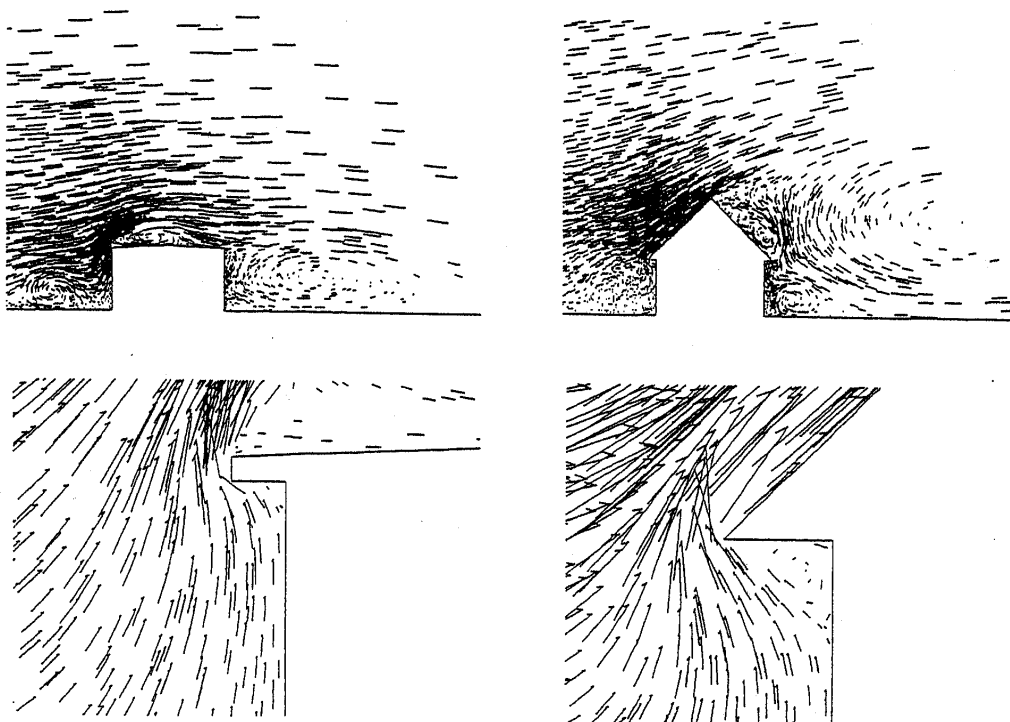
R_N = regnintensitet, normalnedbør (mm/h)

uttrykker hvor stor del av regnet som blir fanget opp av en bygningsfasade. η måles over en viss tid og integreres over alle regndråpestørrelser, og avhenger av (Blocken og Carmeliet July 2000):

- bygningsgeometri
- omgivelsestopografi
- posisjon på bygningsfasade
- vindhastighet
- vindretning
- regnintensitet, normalnedbør
- regndråpers størrelsesfordeling.

4.10 Vind- og regnstrømningsforhold rundt bygninger

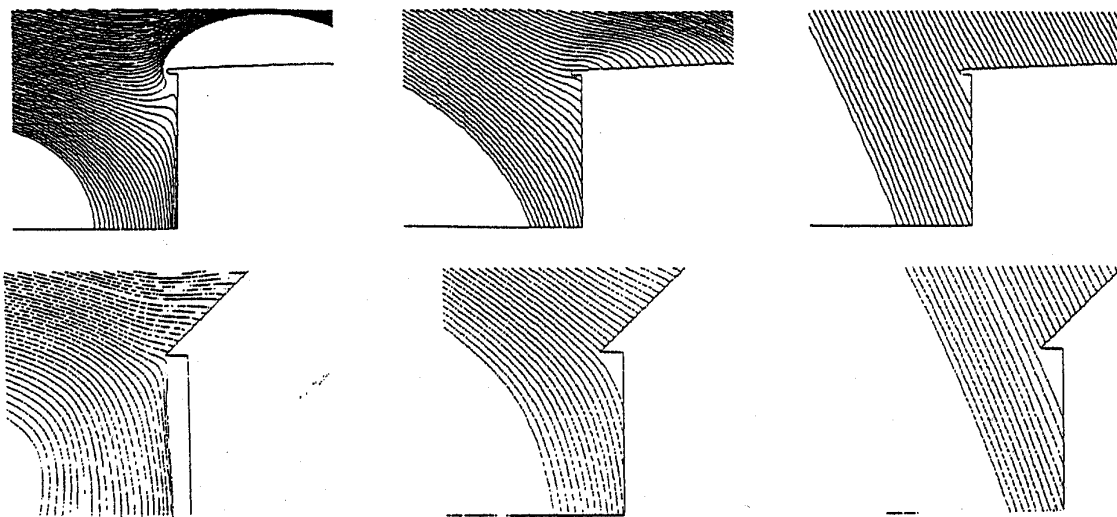
I Figur 4.10 er det vist simulerte vindstrømningsforhold rundt to bygninger; en bygning med flatt tak og en bygning med skråtak. Legg merke til vindgradientene omkring takutstikket (raft), samt turbulensområdet på bygningens leside. På lesiden kan strømningsforholdene drive betydelige regnmengder oppunder takutstikket, med risiko for påfølgende fuktskader.



Figur 4.10

Simulering av vindstrømningsmønster rundt to bygninger; en bygning med flatt tak (venstre) og en bygning med skråtak (høyre). Referansevindhastighet er 5 m/s (Blocken og Carmeliet July 2000).

Simulerte regndråpebaner er vist i Figur 4.11 for to bygninger; en bygning med flatt tak og en bygning med skråtak. Regndråpebanene vises for tre forskjellige regndråpediametre (0.5-1-5 mm). Som Figur 4.11 viser er det naturlig nok regndråpebanene med minst regndråpediameter som påvirkes/avbøyes mest av bygningsfasaden.



Figur 4.11

Simulering av regndråpebaner mot to bygningsfasader; en bygning med flatt tak (øverst) og en bygning med skråtak (nederst). Regndråpediameter er henholdsvis 0.5-1-5 mm fra venstre mot høyre. Referansevindhastighet er 5 m/s (Blocken og Carmeliet July 2000)

Karagiozis og Hadjisophocleous (1995) og Choi (1992 og 1998) tar også for seg simuleringer av regndråpebaner med forskjellige regndråpediametre.

Med dagens økende datakraft og forbedrede simuleringsverktøy, ventes CFD (Computational Fluid Dynamics) simuleringer å få økende betydning for modellering av vind- og regnstrømningsforhold rundt bygninger. For videre utdypning i dette henvises det til for eksempel internettsidene <http://alcor.concordia.ca/~raojw/crd/concept/concept000120.html> og <http://alcor.concordia.ca/~raojw/crd/concept/concept000341.html>, som inneholder en rekke referanser innen dette området.

5 Oppsummering og videre arbeid

5.1 Slagregndata

Slagregnmålinger utføres for tiden ikke i Norge. Går vi noen tiår tilbake vil vi riktignok finne noen historiske slagregndata basert på slagregnmålinger av J. Holmgren ved Norges tekniske Høgskole (NTH) fra 1937 (Holmgren 1946), og videreføringen av Sverre Hoppestad i regi av Norges byggforskningsinstitutt (NBI) i perioden 1951-1953 (Hoppestad 1955). Basert på slagregnmålinger beregnet Holmgren og Hoppestad slagregnmengder for en rekke værstasjoner.

Slagregndata fremskaffes ved hjelp av tilgjengelige vind- og nedbørdata for Norge. Disse måledataene for vind og nedbør skaffes til veie av Det norske meteorologiske institutt (DNMI) ved bruk av såkalte nedbørstasjoner, værstasjoner og automatstasjoner. I tillegg kommer en del automatstasjoner tilhørende landbruket som bare måler om sommeren. Beregning av fritt slagregn ut fra vind- og nedbørdata utføres først. Deretter kalkuleres slagregnet for de spesifikke bygningsfasader, hvor blant annet lokal topografi og bygningskonstruksjon spiller inn. Det er planlagt oppstart av slagregnmålinger, både fritt slagregn og slagregn på veggfasade, ved den automatiske værstasjonen på Voll i Trondheim.

5.2 Slagregndata og fukttekniske beregninger

Slagregnmålinger kan knyttes opp mot målinger av fuktopptak i fasadeelementer. Dette er planlagt utført ved værstasjonen på Voll i Trondheim, hvor både slagregnoppsamlere og fuktmålere er tenkt plassert på en trefasade på et forsøkshus. En slik kobling vil gi verdifull erfaring og datainnsamling med fritt slagregn, målinger av slagregn på fasade og fuktopptaksmålinger på fasadeelementer, og vil bli utført som en del av prosjektene P9, *Krav til fasadesystemer i forhold til slagregnpåkjenninger* og P11, *Slagregndata for prosjektering og beregninger* under FoU-programmet *Klima 2000*.

Slagregnmengden vil for det første variere avhengig av lokalisering på bygningsfasaden, jfr. veggfaktorverdier. Der nest vil den totale vannmengden på bygningsfasadene variere på grunn av rennende vann på fasaden. Mengden er avhengig av slagregndistribusjonen, vedheften av vann og vann/fuktopptaket i fasaden. Oppsamling og registrering av mengde rennende vann vil derfor også være aktuelt i denne sammenhengen.

5.3 Bruk av slagregndata

Slagregndata for Norge kan presenteres med forskjellige detaljeringsnivå. Det må gjøres på en slik måte at dataene gir god oversikt, er lettfattelige og enkle å bruke, samt gir den ønskede grad av nøyaktighet ved beregning av slagregnpåkjenninger på bygninger. En mulig brukeropdeling kan være som følger:

1. Grovt slagregnkart over hele Norge (type Norgeskart).

- Total slagregnmengde.
- Slagregnmengde fra nord, øst, sør og vest (4 kart).
- Årlig slagregnmengde fra den hovedretning som gir mest slagregn.
- Retning med mest slagregn, gjennomsnitt for året.

2. Oppdeling av slagregnkartet i flere regioner med høyere oppløsning (type fylkeskart, kommunekart, etc.).

3. Spesifikke slagregnverdier i de forskjellige himmelretningene (4 eller flere) for forskjellige regioner, byer, tettsteder, etc.

- Slagregntabeller.
- Slagregntabeller.
- Databasert system med inntasting av region- eller stedsnavn.

4. Metodikk for slagregnkalkulasjoner.

- Innhenting av verdier fra punkt 3 ovenfor.
- Kalkulasjoner på ønsket detaljeringsnivå hvor lokale forhold innbefattes, f.eks. om det ligger fjelltopper eller andre bygninger i nærheten.
- Eventuelt beregninger ved bruk CFD (*Computational Fluid Dynamics*) modelleringer.

5.4 Behov for ny kunnskap

Ut fra målte vind- og nedbørdata i Norge kan slagregnbelastningen beregnes for ulike steder i landet. Lokale forhold som for eksempel topografi og terrengruhet tas hensyn til i det eksisterende formelverket for beregning av slagregnmengder. En slik slagregnberegning på landsbasis som inkluderer vind- og nedbørstatistikk over flere tiår vil gi en langt mer oppdatert og pålitelig slagregnoversikt både med hensyn til middel- og ekstremverdier.

Korrelering av slagregnmengder på veggfasader og fuktopptak i fasadeelementer ved simultane målinger vil gi verdifull erfaring med bygningsfasaders bestandighet overfor slagregnpåkjenninger, samt ny innsikt og kunnskap om mer fundamentale fukttekniske forhold.

Ulike typer av klimapåkjenninger medfører årlig omfattende skader på bygninger og bygningskonstruksjoner. Et stadig økende antall observasjoner gir ifølge FNs klimapanel et samlet bilde av en global oppvarming og andre endringer i klimasystemet. Det er i denne forbindelse et klart behov for å identifisere det bygde miljøes sårbarhet med hensyn til mulige virkninger av klimaendringer, og å utvikle og prioritere tilpasningsstrategier (Lisø et al. 2003). Klimaendringer i form av økt slagregnbelastning kan få betydning for valg og utforming av ulike typer av fasadesystemer i ulike deler av landet, og en bør allerede nå vurdere metoder for å ta hensyn til dette ved prosjektering av nye bygninger og rehabilitering av eksisterende bygninger (Lisø et al. 2002).

Prosjektet skal resultere i en samling av slagregndata for Norge, samt metoder og anvisninger for hvordan slagregnpåkjenninger kan vurderes i forbindelse med prosjektering av bygninger. I tillegg til bruk av eksisterende klimadata, vil mulige virkninger av klimaendringer på fremtidige slagregnforhold i Norge bli vurdert.

Referanser

- Alonso, M., Finn, E. J., *Fundamental University Physics - Volume One - Mechanics and Thermodynamics*, 2nd edition, Addison-Wesley, 1980.
- Aune, B., Det norske meteorologiske institutt (DNMI), Telefonsamtale mellom Bjørn Aune (DNMI) og Bjørn Petter Jelle (NBI) torsdag 18.10.2001.
- Best, A. C., *The Size Distribution of Raindrops*, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 76, pp. 16-36, 1950.
- Blocken, B., Carmeliet, J., *Driving Rain on Building Envelopes - I. Numerical Estimation and Full-Scale Experimental Verification*, Journal of Thermal Env. & Bldg. Sci., 24, 61, July 2000.
- Blocken, B., Carmeliet, J., *Driving Rain on Building Envelopes - II. Representative Experimental Data for Driving Rain Estimation*, Journal of Thermal Env. & Bldg. Sci., 24, 89, October 2000.
- British Standard, BS 8104: 1992, *Code of Practice for Assessing Exposure of Walls to Wind-Driven Rain*, 1992.
- CEN/TC 89/WG 9 N 103, GTR WI 00089067, CEN/TC 89 WI 46.3, *Hygrothermal Performance of Buildings - Climatic Data - Part 3: Calculation of a Driving Rain Index for Vertical Surfaces from Hourly Wind and Rain Data* (prEN 13013-3:1997), 14.07.1998.
- CEN/TC 89/WG 9 N 104, GTR WI 67, CEN/TC 89 WI 46.3, *Thermal Performance of Buildings - Climatic Data - Part 3: Calculation of a Driving Rain Index for Vertical Surfaces from Hourly Wind and Rain Data*, 14.07.1998.
- CEN/TC 89/WG 9 N 125, GTR WI 00089027, CEN/TC 89 WI 46.1, *Hygrothermal Performance of Buildings - Calculation and Presentation of Climatic Data - Part 1: Monthly Means of Single Meteorological Elements*, 31.01.2000.
- Choi, E. C. C., *Simulation of Wind-Driven-Rain around a Building*, J. of Wind Engineering, No. 52, pp. 60-65, August 1992.
- Choi, E. C. C., *Criteria for Water Penetration Testing*, Water Leakage through Building Facades, ASTM STP 1314, R. J. Kudder and J. L. Erdly (Eds.), pp. 3-16, American Society for Testing and Materials, 1998.
- Choi, E. C. C., *Modelling of Wind-Driven Rain and its Soil Detachment Effect on Hill Slopes*, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, pp. 1081-1097, 2002.
- DNMI, Målestasjonskart for Det norske meteorologiske institutt (DNMI) på følgende internettadresse: <http://www.dnmi.no/meteorologi/index.html>, 2002.
- Fazio, P., Mallidi, S. R., Zhu, D., *A Quantitative Study for the Measurement of Driving Rain Exposure in the Montréal Region*, Building and Environment, 30, 1, 1995.
- Galitz, C. L., Rhett Whitlock, A., *The Application of Local Weather Data to the Simulation of Wind-Driven Rain*, Water Leakage through Building Facades, ASTM STP 1314, R. J. Kudder and J. L. Erdly (Eds.), pp. 17-32, American Society for Testing and Materials, 1998.

Gunn, R., Kinzer, G. D., *The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnate Air*, Journal of Meteorology, 6, pp. 243-248, 1949.

Hagentoft, C., Högberg, A., *Prediction of Driving Rain Intensities using Potential Flows*, Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, (Editors: Arild Gustavsen and Jan Vincent Thue), Vol. 2, pp. 571-578, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2002.

Hens, H., Mohamed, F. A., T2-B-94/02, *Preliminary Results on Driving Rain Estimation*, Task 2 - Environmental Conditions, IEA ANNEX 24 - Heat, Air and Moisture Transfer through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (Hamtie), International Energy Agency - Energy Conservation in Buildings and Community Systems, T2-B-94/02.

Holmgren, J., *Klimaets innflytelse på materialer og byggemåte*, "Husbygging", 1, pp. 119-128, Oslo, 1946.

Hoppestad, S., *Slagregn i Norge*, Rapport nr. 13, Norges byggforskningsinstitutt, 1955.

Karagiozis, A., Hadjisophocleous, G., Report T1-CA-95/01, IEA Annex 24, HAMTIE, 1995.

Khvorostyanov, V. I., Curry, J. A., *Terminal Velocities of Droplets and Crystals: Power Laws with Continuous Parameters over the Size Spectrum*, revised manuscript submitted to J. Atmos. Sci., October 10, 2001.

Lacy, R. E., *An Index of Driving Rain*, The Meteorological Magazine, 91, No. 1080, July 1962.

Lacy, R. E., *An Index of Exposure to Driving Rain*, Department of the Environment, Building Research Station, Garston, Watford, Benham and Company Limited, Colchester, Her Majesty's Stationary Office, London, 1971.

Lisø, K. R., m.fl., *Klima 2000 – Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner – Program 2000 - 2005*, Programbeskrivelse, Norges byggforskningsinstitutt, Rev. dato 04.04.2002. Se også www.byggforsk.no/prosjekter/klima2000.

Lisø, K. R., Aandahl, G., Eriksen, S., Alfsen, K. H., Preparing for climate change impacts in Norway's built environment, in Richard Lorch (ed.) *Building Research & Information*, Taylor & Francis Group, UK (in press 2003).

Lisø, K. R., Time, B., Kvande, T., Førland, E. J., *Building enclosure performance in a more severe climate*, Second International Building Physics Conference, Leuven, Belgium, September 14-18, 2003 (submitted October 2002).

Mohamed, F. A., Nejat, O., Hens, H., *Outdoor Climate: Reference Year, Driving Rain*, T2-B-92/05, Departement Burgerlijke Bouwkunde, Laboratorium Bouwfysica, Leuven, IEA Annex 24 - Heat, Air and Moisture Transfer through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (Hamtie), International Energy Agency - Energy Conservation in Buildings and Community Systems, T2-B-92/05.

Mook, F. J. R., *Measurements and Simulations of Driving Rain on the Main Building of the TUE*, Proceedings of the 5th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 1, pp. 377-384, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1999.

NBI Håndbok 45 *Trehus*, Norges byggforskningsinstitutt, 1998.

NBI Håndbok 50 *Fukt i bygninger*, Norges byggforskningsinstitutt, 2002.

NS 3491-4:2002, *Prosjektering av konstruksjoner. Dimensjonerende laster. Del 4: Vindlaster*, 1. utg., mai 2002.

Rogers, R. R., *Short Course in Cloud Physics*, A. Wheaton & Co., Exeter, 266 pp., 1976.

Schwarz, B., *Die Kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen*, Gesundheits-Ingenieur, 93. Jahrg., Heft 7, Seite 206-211, 1972.

Schwarz, B., Frank, W., *Schlagregen. Messmethoden - Beanspruchung - Auswirkung*, Berichte aus Der Bauforschung“, Heft 86, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1973.

Serway, R. A., *Physics for Scientists & Engineers*, Third edition, Updated version, Saunders Golden Sunburst Series, 1992.

WWW internettadresse,
<http://alcor.concordia.ca/~raojw/crd/concept/concept000120.html>

WWW internettadresse,
<http://alcor.concordia.ca/~raojw/crd/concept/concept000341.html>

WWW internettadresse,
<http://www.shorstmeyer.com/wxfaq/float/dropdeform.html>.

WWW internettadresse,
<http://www.shorstmeyer.com/wxfaq/float/rdtable.html>.

WWW internettadresse
www.byggforsk.no/prosjekter/klima2000



Norges byggforskningsinstituts forskningsprogram Klima 2000 – Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner retter søkelyset mot klimatilpasning av bygninger og bygningskonstruksjoner under strengere ytre klimabelastninger. Programmet vil pågå frem til utgangen av 2005 og består av 14 ulike prosjekter. Programmets hovedmål er gjennom forskning og utvikling å oppdatere prinsippløsninger for konstruksjoner som både gir økt bestandighet mot og økt pålitelighet ved ytre klimapåkjenninger, samt kartlegge mulige virkninger av klimaendringer på det bygde miljø – og hvordan samfunnet best kan tilpasse seg endringene. Hensikten er å definere klarere kriterier og anvisninger for prosjektering og utførelse av kritiske konstruksjonsdetaljer, hovedsakelig knyttet til bygningers ytre klimaskjerm.