

REGNINLÄCKAGE OCH DESS MEKANISMER I FASADER

En ny beräkningsalgoritm



Lars Olsson

2018-12-28

FÖRORD

Projekttiteln är ”Riskanalys av nya innovativa fasadsystem för energieffektivisering av miljöprogrammets byggnader (etapp I)” med SBUFs identifikationsnummer: 12847.

Arbetet har skett inom ramen för Lars Olssons (industridoktorand på RISE) doktorandutbildning på Chalmers tekniska högskola. Titeln på doktorsavhandlingen är: *Driving rain tightness, intrusion rates and phenomenology of leakages in defects of façades: A new calculation algorithm*. Professor Carl-Eric Hagentoft, Chalmers, har varit projektledare. Carl-Eric Hagentoft har också varit huvudhandledare och biträdande handledare har varit docent Paula Wahlgren, Chalmers och biträdande handledare adjungerad professor Kristina Mjörnell, RISE och LTH.

Projektet initierades av Carl-Eric Hagentoft, Chalmers, i samband med att han ledde ett större internationellt forskningsprogram för IEA-EBC(International Energy Agency Energy in Buildings and Communities Programme) med rubriken; Tillförlitlighet för energieffektiv renovering-sannolikhetsbedömning av prestanda och kostnad (RAP-RETRO). Syftet med programmet var att ge svar på frågan: Hur kan vi renovera byggnader så att de blir robusta, ger låga energibehov och livscykelkostnader, samtidigt som vi kontrollerar risknivåerna för de förväntade funktionerna som ska uppfyllas.

De främsta finansörerna är SBUF, Energimyndigheten (E2B2) och RISE. Dessutom är deltagande partners: NCC, Weber, STO, Paroc, Soleed, Boxmodul, WSP, PEAB och Wästbygg. Vidare har finansiering skett genom flera resebidrag från Maj och Hilding Broenius forskningsstiftelse och SWESIAQ. Tack till er alla.

Tack till kollegor vid RISE, laboratoriet för slagregnssimulering hos RISE och kollegor inom forskningsprojektet och finansörer för bidrag och samarbete.

Arbetsgrupp:

Henrik Carlsson, Hans Wetterlund, WSP
Lars-Olof Eriksson, Boxmodul
Mattias Gunnarsson, PEAB
Mattias Ivarsson, Kajsa Flodberg, NCC
Anders Johansson, Riksbyggen
Rolf Jonsson, WästBygg
Krister Nyman, Sture Lindmark, Stefan Kanda, Ola Lindborg, Mats Öberg, Weber
Mikael Olofsson, Anders Olsson, Paroc
Anders Olson, Soleed
Anders Sjöberg, Johan Claesson, STO
Pär Åhman, SBUF

Referensgrupp:

Johan Alte, Veidekke
Jesper Arfvidsson, Fuktcentrum/LTH
Robert Bengtsson, Tuve Bygg
Joakim Dahlgren Persson, Hyrmaskiner
Lars-Göran Dahlqvist, Besab
Andreas Furenberg och Mattias Gunnarsson, Peab
Tobias Hagrenius, Erlandsson Bygg
Mats Karlsson, Thomas Betong
Niklas Sparw, NCC
Charlotte Svensson Tengberg, Skanska
Åsa Tenggren, Serneke
Anders Lönn Lundbäck
Andreas Brendinger, BI Väst

December 2018

SAMMANFATTNING

Arbetet redogör för regntätheten hos fasader med fasaddetaljer och vilka inläckageflöden som kan förväntas. Vidare redogör den för de väsentligaste mekanismerna för inläckage i otätheter i det yttersta skiktet i ytterväggar. En ny algoritm har tagits fram baserad på empiriska mätningar av inläckage. För att kunna göra noggranna beräkningar av inläckage behöver otätheternas geometri och mått kunna definieras exakt. Det finns omfattande med data i detta arbete som möjliggör att relativt rimliga antaganden av inläckageflöde kan göras, trots att otätheternas geometri och mått är okända.

Omfattande skador har på senare år uppkommit i fasader och ytterväggar och de är orsakade av inläckage. Bakgrunden är att fasader och anslutningsdetaljers regnskyddande funktion har varit otillräcklig, vilket bidragit till fuktskadeproblem inuti fuktkänsliga ytterväggar. Uppgifter om nya fasaders regntäthet eller regntäthet hos anslutningar mellan fasad och fönster etc. har varit relativt sällsynt. Vidare har det saknats kunskap om hur inläckage sker, varför realistiska fuktberäkningar och pålitliga riskanalyser av nya fasader inte varit möjliga att göra. Det innebär att det finns stora risker i fuktsäkerheten som kan leda till att inte tillräcklig energieffektivitet och livslängd uppnås och föranleder till ökade kostnader och ökad miljöbelastning. Idag finns det dock klimatdata och beräkningsprogram för att modellera regnbelastning, avrinningsvatten, vattenabsorption på utsidan av fasader etc. Med utgångspunkt i detta så är målet med denna forskning att öka kunskapen och ta fram mer data om regntäthet, inläckageflöde genom det yttersta skiktet i ytterväggen. Vidare har målet också varit att utveckla en ny algoritm för att mer exakt kunna beräkna inläckageflöde. Eftersom otätheter och inläckage vanligtvis finns punktvis behöver fuktberäkningar göras i två eller tre dimensioner för att de ska bli relevanta. Arbetet är baserat på fältmätningar, omfattande laboriemätningar i full skala och i experimentell skala.

Resultaten visar på inläckage i mer än 90% av alla studerade fasader och i mer än 60 % av alla anslutningar mellan fasad och fönster. Därmed kan konstateras att dagens fasadlösningar är svåra eller omöjliga att göra regntäta, det vill säga det yttersta skiktet i ytterväggen är oftast inte regntätt på grund av otätheter vid fasaddetaljer. En anledning till varför det inte framkommit någon markant skillnad i resultat mellan oventilerade och ventilerade tryckutjämnade fasader är förmodligen på grund av att många otätheter återfinns vid utstickande detaljer, oberoende av fasadsystem, som ger upphov till att vatten däms upp och ger ett betydligt hydrostatiskt tryck. Många hål lutar nedåt vilket ger ett ökat hydrostatiskt tryck i hålet. Resultaten visar att vid provningar och experimentella försök ligger ofta inläckageflödet omkring 0,5 till 2 procent, per otäthet, av vattenbelastningen per enhetsbredd av fasaden (tumregel). Detta avser noggrant monterade fasader. Det tyder på att även om montaget görs noggrant så finns det ändå små, dolda eller osynliga otätheter. Därför bör punktinläckage genom det yttersta skiktet vara med vid fuktdimensionering av ytterväggar.

INNEHÅLL

1	INTRODUKTION	5
1.1	BAKGRUND	5
1.2	SYFTE	5
1.3	OMFATTNING OCH AVGRÄNSNING.....	5
2	UTFÖRDA STUDIER OCH METODIK.....	7
2.1	FÄLTMÄTNINGAR	7
2.2	LABORATORIEMÄTNINGAR VID FULLSKALEFÖRSÖK.....	7
2.3	SMÅSKALIGA EXPERIMENT.....	11
3	TEORI OM VATTNETS BETEENDE PÅ MATERIAL	12
4	FÖRSLAG PÅ BERÄKNING AV VATTENBELASTNING OCH INLÄCKAGEFLÖDE	13
5	RESULTAT	15
5.1	REGNTÄTHET.....	15
5.2	INLÄCKAGEFLÖDE.....	16
5.2.1	<i>Laboratiemätningar av fullskaleförsök.....</i>	<i>16</i>
5.2.2	<i>Småskaliga experiment</i>	<i>16</i>
6	KONCEPTUELL MODELL FÖR INLÄCKAGEFLÖDE	18
7	FÖRSLAG PÅ TUMREGEL.....	20
8	SLUTSATSER	21
9	FRAMTIDA FORSKNINGSBEHOV	22
	REFERENSER	23

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

Idag saknas pålitliga teoretiska analysverktyg för att bedöma nya fasadsystem eller innovativa fasadsystem för renovering av miljonprogrammets byggnader. Några väsentliga egenskaper där indata ofta saknas är slagregnstäthet, dräneringsegenskaper, kapillär fukttransport, variationer i montage och beständighet och funktion hos tätningslösningar för att kunna göra pålitliga eller relevanta analyser. Dessutom saknas det ofta en fullständig funktionsverifiering av fasadsystem. Detta innebär stora risker för inblandade parter i form av bland annat fuktrelaterade skador, innemiljöproblem och att inte energieffektiviteten nås. Byggherrar bör därför inte lita på traditionell framtagning av konstruktioner eller byggsystem så länge inte utvärdering av konstruktioners prestanda har gjorts och dokumenterats eller att funktionsverifiering är en branschpraxis.

För det första kan regnvatten läcka in i ytterväggar och fasader (Samuelson & Jansson, 2009, Olsson, 2014a) i större eller mindre utsträckning men det saknas emellertid specifika uppgifter om bland annat hur stora mängder vatten som tränger in. Vidare finns det en begränsad kunskap om vilken betydelse otätheters geometriska form och graden av regn- och vindbelastning har för flödesmängden genom otätheter. Vidare kan fasader utsättas för vatten, trots att det inte regnar på fasaden, genom exempelvis vattenstänk från droppande vatten (Garg et al., 2007) som träffar utstickande detaljer längre ner på fasaden och betydelse av detta finns det lite kännedom om. Droppande vatten kan uppkomma när vatten ansamlas eller koncentreras på mindre utstickande ytor från snösmältning, kondens och regn. Det behövs således mer kunskap för att teoretiskt kunna dimensionera, projektera och bedöma nya eller vanligt förekommande lösningar och konstruktioner bättre.

Idag används ofta schablonmässiga bedömningar baserade på procentuell andel slagregn som tränger in, fördelat per kvadratmeter, detta är en viktig faktor att mer i detalj känna till för att bedöma fuktsäkerheten. Denna bedömning ser ut att kunna vara en väldigt stor osäkerhet eller risk, framförallt eftersom läckage uppkommer punktvis, och har inte varit känd i detalj tidigare. För att ha rätt ingångsdata för simulering krävs omfattande data och erfarenhet som baseras på fält- och laboratorieexperiment samt toleransbedömningar. Det har tidigare funnits relativt lite gjort kring detta både i Sverige och internationellt. Denna rapport är ett sammandrag av nya resultat och kunskap kring slagregnsinträngning, som finns publicerad i en doktorsavhandling (Olsson, 2018).

1.2 Syfte

Syftet är att öka kunskapen om mekanismerna för inläckage och ta fram mer data om regntäthet, inläckageflöde samt att utveckla en ny beräkningsalgoritm för inläckageflöde. Dessutom öka förståelsen för fasaders regntäthet samt öka möjligheten att göra mer exakta två eller tredimensionella fuktberäkningar av förväntade läckageflöden och pålitliga probabilistiska fuktriskanalyser.

1.3 Omfattning och avgränsning

Arbetet omfattar en sammanställning av resultat från mer än 100 kommersiella laboratorieprovningar (fullskaleprovningar) hos RISE av slagregnstäthet och inläckageflöde av olika typ av fasader, ytterväggar eller stomskydd i ytterväggar, som har monterats av leverantörer.

Vidare har det genomförts långtidsmätningar av fukt och temperatur för att detektera eventuella regninläckage inuti träregelyttervägar i fält, totalt sju nya fasader på byggnader fördelat på olika platser i Sverige med olika fasadtyper.

Ytterligare laboratorieprovning har genomförts i full skala av regntäthet och mätningar av inläckageflöden av fyra kommersiella fasadlösningar, med totalt 29 stycken fönster och anslutningsdetaljer, som har monterats med eller helt utan medvetna brister av fasadleverantörer eller byggentreprenör.

Dessutom har mätningar av inläckageflöde gjorts för ett stort antal riktade experiment i full skala och i mindre skala både för mer och mindre väldefinierade små otätheter och för olika typer av fasadmaterial. Mätningarna har varit viktiga för att bättre kunna bedöma inläckageflöde och för att bidra med data till utveckling av beräkningsmodeller.

Vidare beskrivs teorier och mekanismer med betydelse för inläckageprocessen samt analyser av en del samband. I arbetet föreslås en ny algoritm för att beskriva inläckageflöde i väldefinierade hål och dämmen, som har validerats.

Arbetet är avgränsat till framförallt regntäthet och inläckageflöde hos den slagregnsexponerade ytan, med vanligt förekommande fasaddetaljer, såsom det yttersta fasadskiktet. Dessutom finns en del mätningar gjorda i väggstommar. Vidare är det otätheter utan och med fasaddetaljer, utstickande detaljer, såsom anslutningar mellan fasad och fönster, balkong, el- och ventilationsgenomföringar och infästningar etc. som arbetet avser. När det gäller regn- och vindbelastningar i fält så är det de verkligt uppkomna belastningarna som fasaderna utsatts för och beskrivs av närliggande mätstationer under mätperioden. I laboratorium har en standardiserad metod för slagregn (skapad med vattenspray) och pulserande vindtryck (tryckskillnad över vägg) använts samt att lägre vind- och regnbelastningar har också tillämpats som är vanligt i verkligheten.

De riktade experimenten omfattar dels definierade hål, med vanligt utstickande detaljer i full skala, med ett 10 mm tjockt material som ska motsvara fasadskiktet. Dels väldefinierade hål och slitsar som har skapats i tre olika material, vertikalt placerade såsom fasad, med skiktjocklek av ≤ 6 mm, samt väldefinierade utstickande detaljer. Materialen är av icke fuktsugande material eller har blivit fuktmättade före mätning av inläckageflöde. Materialen bedöms som representativa, eftersom många fasadmaterial inte är fuktsugande eller att de blir kapillärmättade på ytan relativt snabbt vid regnbelastning (Hens, 2010, Garden, 1963).

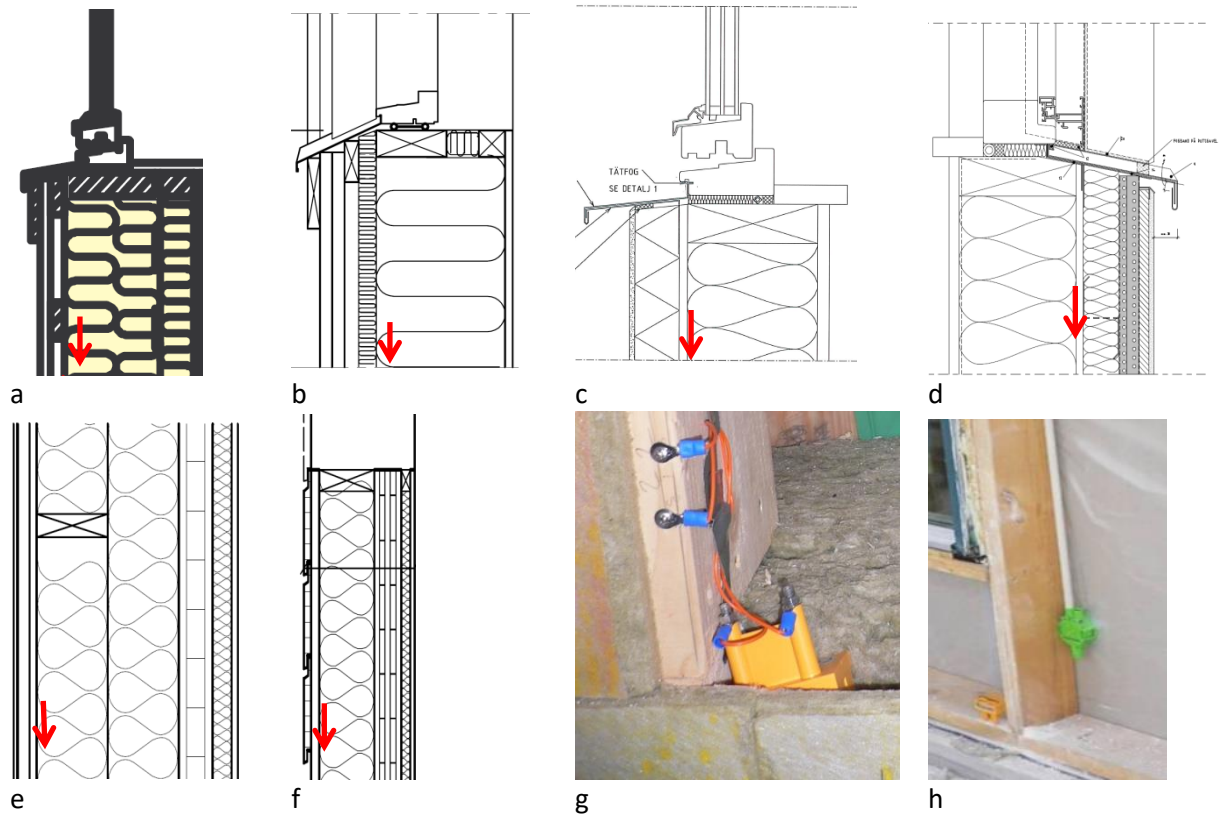
För algoritmen antas att regn rinner vertikalt ner på fasaden. Algoritmen är baserad på empiriska resultat från mätningar av de väldefinierade hålen. Dessutom har algoritmen validerats mot andra studier.

Arbetet omfattar inte olika fasadsystems funktioner, prestanda eller robusthet avseende fuktfördelning och kritiska fukttillstånd i väggkonstruktion.

2 UTFÖRDA STUDIER OCH METODIK

2.1 Fältmätningar

Långtidsmätningar i fält av relativ fuktighet, fuktkvot och temperatur har skett med trådlösa sensorer placerade i träregelstommen i ytterväggar med olika fasadmaterier såsom träpanel, fibercementskiva och puts, se figur 1. Mätningarna var avsedda för att bl.a. detektera regninläckage. Ytterväggarna utgörs av ventilerade och oventilerade fasader. Totalt sju byggnader har följts upp under en period av upp till sju år.



Figur 1. (a-f) Vertikalt tvärsnitt av konstruktionerna, i de sju byggnaderna. (g-h) visar exempel på placering av sensorer i träregelstommen. Röd pilmarkering visar placering av fukt- och temperatursensorn.

2.2 Laboratoriemätningar vid fullskaleförsök

Slagregnsprovningar och slagregnsexperiment i laboratorium har skett baserat på en standardiserad Europeisk metod, EN 12865 *Bestämning av ytterväggars täthet mot slagregn vid pulserande tryck* (SIS, 2001). Anledningen till att metoden har pulserande lufttrycksskillnad är att det är mer realistiskt än statiskt lufttrycksskillnad. Regnbelastning utgjordes av vattenspray skapat med dysor med vattenspridning över hela fasadytan. Den regnexponerade ytan placerades i en regnkammare och väggens insida var således placerad i ett normalt laborierklimat. I regnkammaren skapades pulserande luftövertryck med en fläkt vilket gav en tryckskillnad över väggen och dess olika skikt beroende på väggens uppbyggnad och lufttäthet.

I studien med över 100 kommersiella laborierprovningar av fasader så har flera olika fasaddetaljer varit med. I figur 2 visas ett exempel på en provvägg med flera olika fasaddetaljer.



Figur 2. Exempel på en kommersiell provvägg (storlek 3 x 3 m) med fasaddetaljer; fönster, balkong och två infästningar (markis- och stuprörsinfästning).

I den experimentella studien av 4 kommersiella fasadlösningar med totalt 29 fönster var storleken på experimentväggarna 3 x 3 meter, se figur 3. Väggarna bestod av tre horisontella rader med fönster för att representera en fasad för en flervåningsbyggnad. Vidare har fasaden delats in i tre vertikala sektioner, för tre av fyra väggar, där en sektion monterades på bästa möjliga sätt och de två andra med brister baserade på verkligheten eller monterade av personal som inte fått specialutbildning på systemet. Inuti väggar under hela fönsterkarmen installerades uppsamlingskar för mätning av inläckagemängd och lite längre ner i väggar under fönster installerades uppsamlingskanaler etc. för att kunna mäta inläckageflöden, se figur 4.



a)



b)



c)

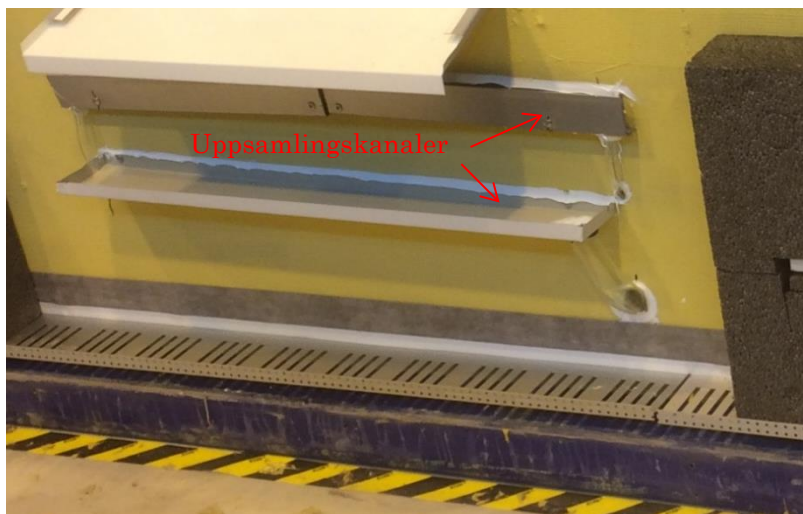


d)

Figur 3. (a) Ventilerad fasad med kompositivskivor, (b) 15 mm tunna prefabricerade högpresterande betongelement med elastiska fogar, (c) 20 mm fasadputs på 200 mm mineralull med dräneringsmöjlighet och stomskydd, (d) 8 mm fasadputs på 100 mm EPS med dräneringsmöjlighet och stomskydd. Utrustning med vattendysor visas också i (c).



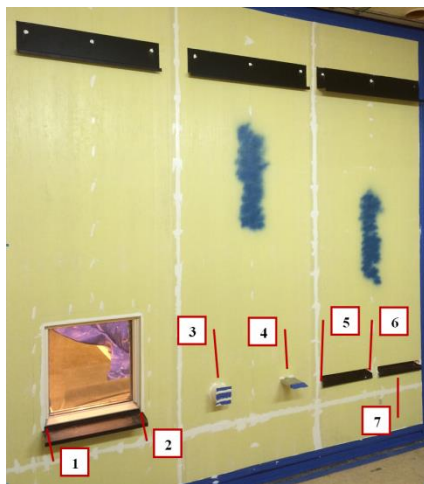
a)



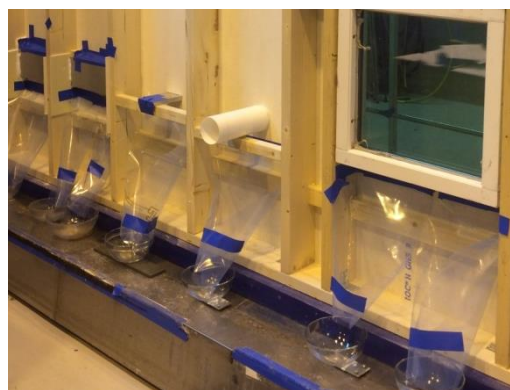
b)

Figur 4. (a) Bild på ett uppsamlingskar som placerades i drevspalten under fönsterkarm (drevspalten var förseglad på insidan med transparent tejp). (b) Bild på uppsamlingskanaler placerade på utsidan av stomskyddet, mellan fasad (som ska monteras) och stomskydd. De mindre kanalerna var placerade direkt under fönsteröppning och de större placerades ca 30 cm ovanför väggens nederkant. Till höger i bilden har montage av isolering påbörjats.

Utifrån erfarenheter från fält och laboratorium skapades sju otätheter, vid fasaddetaljer, i en experimentvägg i full skala på 3 x 3 meter, se figur 5(a), 6 och tabell 1. Ungefär 100 försök genomfördes. Fasadskiktet bestod av en vattenavstötande skiva med en tjocklek av 10 mm med förseglade skarvar. På baksidan av fasadskiktet monterades uppsamlingskanaler som leddes till glasskålar, se figur 5(b).



a)



b)

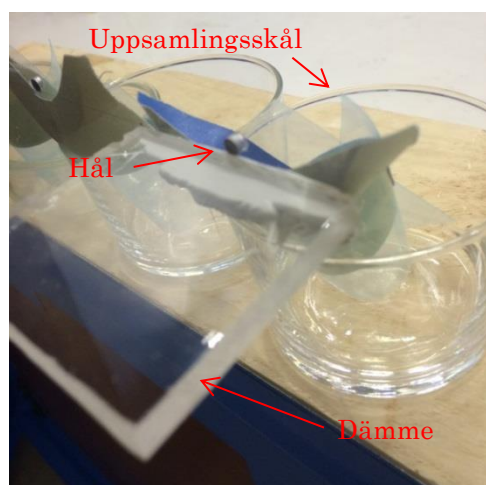
Figur 5. (a) Bilden visar väggelementets framsida och numrerade otätheter. (b) Bilden visar baksidan av experimentväggen med uppsamlingskanaler och skålar.

Tabell 1. Beskrivning av detaljernas otätheter i form av hål- eller öppningsmått samt kommentarer om otätheterna var synliga sett utifrån.

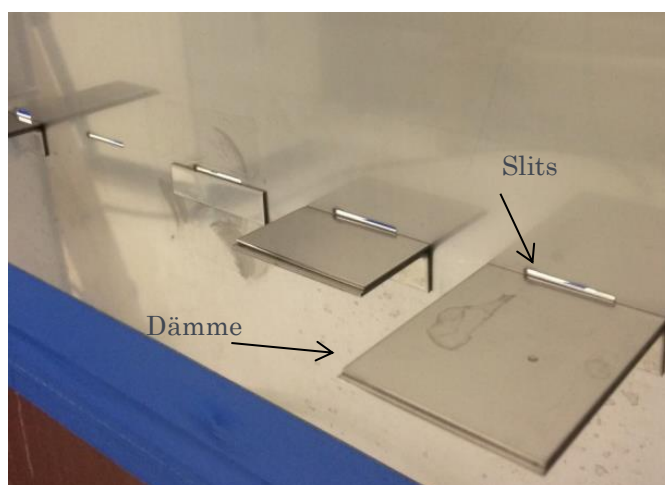
Detalj	Typ av detalj	Otäthetens mått [mm]	Kommentarer
1	Anslutning fönsterbleck, hörn och bakkant	$(1,5 \times 1,5) + (9 \times 0,2) + (50 \times 0,1)$ (9,0 mm ²)	Dolt placerad
2	Anslutning fönsterbleck, hörn	2 x 2 (4 mm ²)	Dolt placerad
3	Cirkulär genomföring	35 x 0,9 (32 mm ²)	Synlig
4	Rektangulär genomföring	30 x 2 (60 mm ²)	Synlig
5	Anslutning metallbleck, ände	35 x 0,1 (3,5 mm ²)	Ej synlig för blotta ögat
6	Hörnvik metallbleck	"Ej mätbart"	Ej synlig för blotta ögat
7	Anslutning metallbleck, undersida	120 x 0,3 (36 mm ²)	Dolt placerad, ej utsatt för slagregn, endast utsatt för vattenstänk underifrån.

2.3 Småskaliga experiment

I de småskaliga experimenten med väldefinierade hål, slitsar och dämmen, se figur 6 (a-b) finns den regnexponerade ytan upp till en meter ovanför hål och slitsar. Fasadmaterialen bestod av tre olika fasadmaterial såsom fibercementskiva, polykarbonatskiva och rostfri stålplåt. På baksida fasad under hål och slitsar monterades uppsamlingsrännor och vattnet leddes ner till uppsamlings-skålar, se figur 6 (a). Den provningsmetod, EN 12865, som använts tidigare har applicerats i tillämpliga delar.



a)



b)

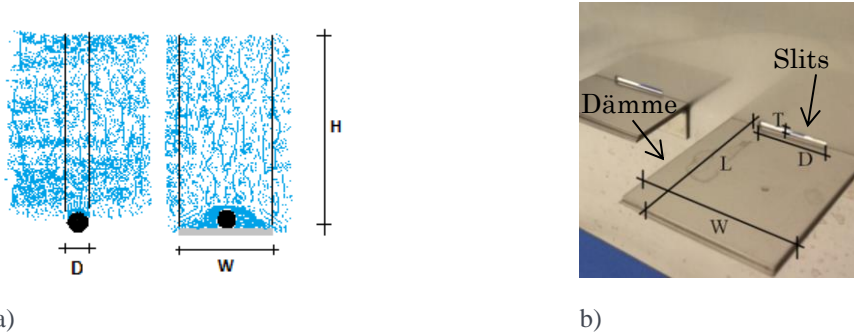
Figur 6. (a) Ett dämme finns monterad under ett hål i en polykarbonatskiva (observera att polykarbonatskivan är transparent). Delar av de andra fallen syns också längre bort i bilden. (b) Fasadmaterial av rostfri stålplåt med breda horisontella slitsar med flera dämmen placerade direkt undertill. Hålen och dämmena placerades längst ned på den regnexponerade ytan som var 1 m i höjddled.

3 TEORI OM VATTNETS BETEENDE PÅ MATERIAL

Huruvida vatten attraheras eller stöts bort från material eller luft har med materialens ytenergi (ytspänning) att göra (De Gennes et al., 2004). Om ytenergin är större än vattnets så attraheras vattnet mot materialet, eller det omvända om ytenergin hos materialet är lägre än vattnet. Detta förklarar varför vatten kan uppträda olika på olika material eller varför vattnet gärna följer och rinner längs med material eller att vattnet gärna sprider ut sig, s.k. väter, på den materialytan (De Gennes et al., 2004, Garden, 1963). Om det finns kapillärer, hål eller liknande i materialet som gör att kapillära krafter uppkommer så dras eller sugts vattnet ännu mer in i materialet (Garden, 1963). En förutsättning för att kapillära krafter ska uppkomma är att ytenergin hos materialet måste vara högre än vattnets. Mineraliska och metalliska material har generellt sett mycket hög ytenergi men däremot har plaster lika eller lägre ytenergi än vatten.

Det finns enkla formler för att beräkna vattnets ytspänning eller kapillära krafter som kan transportera vatten i hål och mellan två nära placerade ytor. Vidare finns det enkla formler för att bestämma vattenflöde genom hål (Olsson, 2018). Eftersom vatten är flytande så uppkommer högst vattentryck i exempelvis i botten av en vattensamling på grund av gravitation. Detta innebär att horisontella eller framförallt lutande hål i fasaden kan få relativt stora tryck i botten, eller i utloppet av hålet, om hålet fylls med vatten. Därmed kan drivkraften för att vattnet ska flöda igenom på grund av hydrostatiskt tryck vara i paritet med de vindtrycksbelastningar som kan uppkomma mot fasader. Formler för dessa krafter och tryck beskrivs mer ingående i (Olsson, 2018).

4 FÖRSLAG PÅ BERÄKNING AV VATTENBELASTNING OCH INLÄCKAGEFLÖDE



Figur 7. Fångstområde med avseende på hålbredd (D) eller dämbredd (W) och fasadhöjd (H). Det antagna fångstområdet visas inom de två vertikala linjerna. b) Figuren visar en vertikal rostfri stålplåt med flera dämmen, som är placerade under horisontella slitsar. De olika dimensionerna anges med beteckningar som dämbredd (W) och utstickande längd (L) samt hål-/slitsbredd (D) och höjd (T) av slitsar.

Om fasaden är kapillärmättad eller inte fuktabsorberande, kommer allt vatten som träffar fasadytan att rinna nedåt och definieras som vattenflödet på fasaden. Det största vattenflödet uppkommer sålunda längst ner på fasaden förutsatt att det inte finns några vattenavledande detaljer etc. Vattenmängden som belastar ett hål, G_{max} (kg/s), är baserad på området (fångstområde) ovanför hålet/dämmet, definierad av höjd, H , (m) och bredd, D eller W , (m), se ekvation (1) och figur 7 (a). Fångstområdets bredd består av antingen hålets bredd (D) eller dämmets bredd (W). Dämmet kan omdirigera vatten från ytor bredvid hålet så att mer vatten når hålet. Beteckningar för hål/slitsens och dämmens geometri finns också i figur 7 (b). Slagregnsintensiteten (deponeras på fasaden) betecknas g_{DR} (kg/(m²s)).

$$G_{max} = H \cdot D \cdot g_{DR} \quad \text{or} \quad H \cdot W \cdot g_{DR} \quad (1)$$

Vattenläckaget genom defekten betecknas G (kg/s). Vi definierar en faktor η (-) som beskriver hur effektivt det uppfångade vattnet faktiskt läcker in genom fasadskiktet, se ekvation 2.

$$G = \eta \cdot G_{max} \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (2)$$

Baserat på likformighet, antag att det inte finns något motstånd för vattnet att rinna in genom ett hål i ett oändligt tunt vertikalt skikt. Då skulle vattnet som träffar hålet fördelas lika på vardera sida om det tunna skiktet. En faktor som beskriver den uppkomna fördelning av vatten blir då $\eta=0,5$, som kan benämnas inläckagefaktor. Denna term används senare för att analysera resultat dels i den föreslagna algoritmen dels mot andra studier. Resonemanget och jämförelser mot andra studier beskrivs mer ingående i (Olsson, 2018).

Vidare antas att den totala tryckskillnaden kommer att vara en viktig faktor att inkludera i en beräkningsalgoritm för beräkna läckageflöde. Det uppskattade värdet av inläckagefaktorn kan uttryckas som:

$$\eta_{est} = f(P_{tot}) \quad (3)$$

Den totala tryckskillnaden för en icke absorberande fasadyta erhålls genom:

$$P_{tot} = P_w + P_h - P_{men} \quad (4)$$

Mottrycket i menisken, P_{men} , som bildas på baksidan, på grund av ytspänning motverkar läckage, medan trycket från vattenpelaren, P_h , och vinden, P_w , hjälper till att öka läckaget.

För en absorberande yta bildas ingen betydande motverkande menisk på baksidan på samma systematiska sätt. Således:

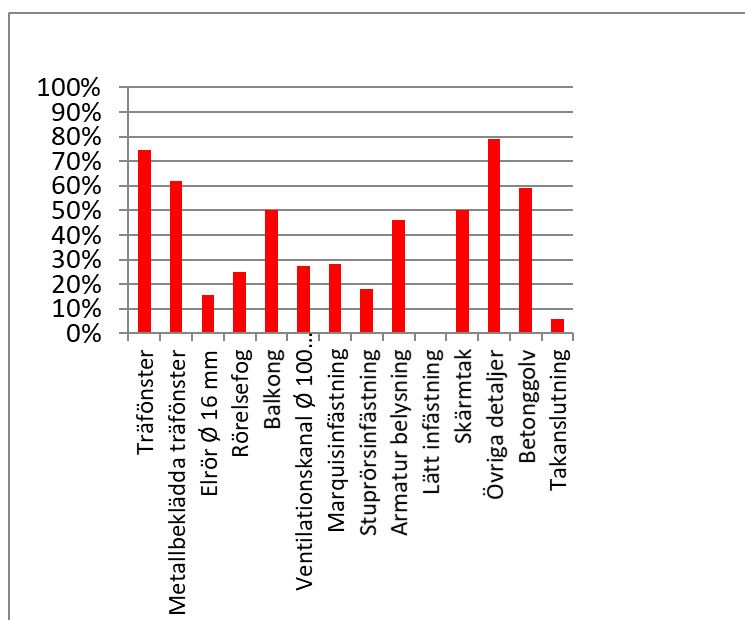
$$P_{tot} = P_w + P_h \quad (5)$$

För enkelhetens skull har rännilar och effekten av trycket i rännilar, P_{riv} , uteslutits från denna beskrivning. Det kan dock vara av betydelse för icke-absorberande fasadmateriäl med låg ytenergi, och finns mer beskrivet i (Hagentoft & Olsson, 2017).

5 RESULTAT

5.1 Regntäthet

- Sammandrag av resultat visar att för 100 kommersiella provningar uppkom inläckage i mer än 90 % av alla provväggar och i 50% av alla fasaddetaljer, redovisas mer utförligt i (Olsson, 2014b). Andel inläckage vid exempelvis fönsteranslutningar var inom 60-80 %, se figur 8, oberoende av fasadmaterial, fasadsystem, ventilerat, oventilerat och tryckutjämnade fasader etc. De fasader som saknade tryckutjämning tenderade få högre andel inläckage.
- I resultat från fältmätningar uppkom inläckage i 5 av 7 byggnader, vilket motsvarar 70 %, relativt oberoende av fasadsystem såsom fasadmaterial av trä, fibercementskiva eller puts och med eller utan luftspalt bakom fasaden, redovisas mer ingående i (Olsson, 2015). Mätningar skedde inuti vägg i träreglar och träsyll, alltså innanför fasad och eventuellt vindskydd eller stomskydd, nära fasaddetaljer. Mätningarna visade endast inläckage när tillräcklig regnmängd, vindhastighet och vindriktning inträffade mot fasad. Dock handlade det inte om några extrema eller ovanliga vindhastigheter. Fuktvärdena avtog inom en eller två veckor till normala värden igen. Huruvida inläckaget runnit vidare till andra delar etc. eller orsakat fuktskador har inte studerats.
- I de experimentella provningarna av 4 fasadsystem med 29 fönsteranslutningar erhöles inläckage mellan fönster och fasad i ungefär 60 % av fönstren, redovisas mer ingående i (Olsson, 2016a). Ingen nämnvärd skillnad uppkom mellan de sektioner som utförts noggrant i jämförelse med de övriga. En förklaring är att otätheterna är små eller osynliga vid noggrant montage och därför svåra att undvika. I de fall sekundär tätning saknades vid genomföringar och detaljanslutningar trängde det in vatten till väggens stomme etc. Många av inläckagen uppkom redan vid 0 Pa tryckskillnad över fasadskiktet.



Figur 8. Andel inläckage i fasad för respektive fasaddetalj.

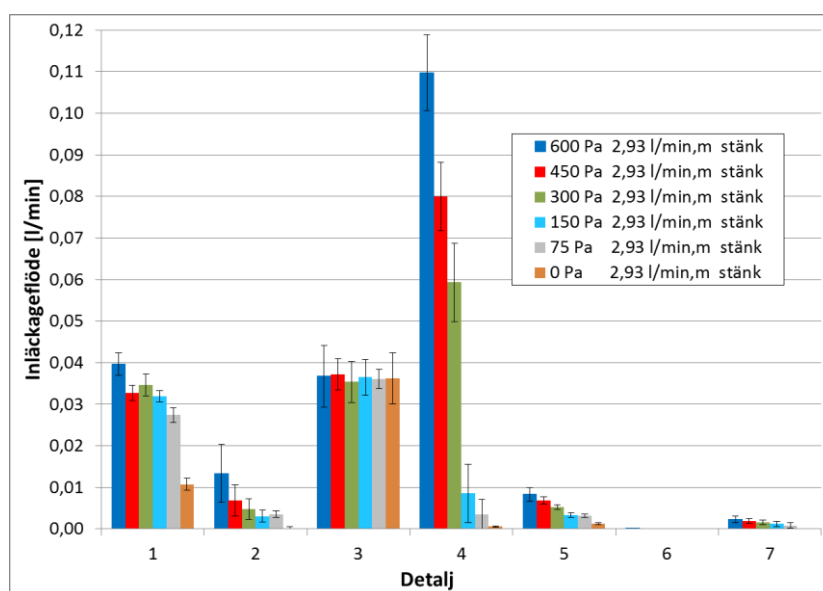
Genomgående pekar dessa tre studier på att inläckage är mer regel än undantag vid anslutningsdetaljer i nya fasader som byggts efter eller långt efter att problemen med inläckage i ETICS fasader blev allmänt känt. Dessutom verkar det vara vanligt med inläckage trots att ingen eller liten tryckskillnad uppkom över fasadskiktet, alltså vatten läcker in ändå på grund av andra

mekanismer än vindtrycksskillnad och för andra fasadmateriäl, vilket också har visats i andra studier (Hens, 2010, Lacasse, 2003).

5.2 Inläckageflöde

5.2.1 Laboratiemätningar av fullskaleförsök

- Inläckageflödet är uppskattat för ungefär 100 kommersiella provningar enligt en 5 gradig skala utan definiering av aktuella otätheter, se utförligare beskrivning i (Olsson, 2014b). Före regnbelastning var brister eller otätheter sällan synliga för blotta ögat. Resultaten visade att i ungefär 3/4 av alla provade fasader uppkom inläckageflöden inom intervallet 0,01-0,1 l/min med vattenbelastning enligt EN 12865, vid den otäthet som läckte mest per provvägg.
- Mätningar gjordes av inläckageflöde vid 29 fönsteranslutningar, se utförligare beskrivning i (Olsson, 2016a). Brister eller otätheter kunde inte definieras och de var inte synliga för blotta ögat. De tre största inläckagen var inom 0,01-0,03 l/min med vattenbelastning enligt EN12865.
- Noggrann mätning har gjorts av inläckageflöde i sju definierade otätheter vid fasaddetaljer, redovisas mer ingående i (Olsson, 2016b). Tre otätheter var osynliga för blotta ögat och resultaten visade på inläckageflöden inom intervallet 0,01-0,04 l/min och två var synliga otätheter, med måtten 0,9 x 35 mm och 2 mm x 30 mm, och resultaten visade på inläckageflöden mellan 0,04 till 0,11 l/min, se figur 9, med en vattenbelastning av 2,93 l/min,m. Dessutom visas ett exempel på jämförelse med och utan direkt regnbelastning, men i fallet utan regnbelastning var det enbart vattenbelastning i form av vattenstänk på fasaden från utstickande detaljer. I denna jämförelse erhöles flera fall med likvärdiga resultat vilket pekar på att vattenstänk är en vattenbelastning som ska beaktas.



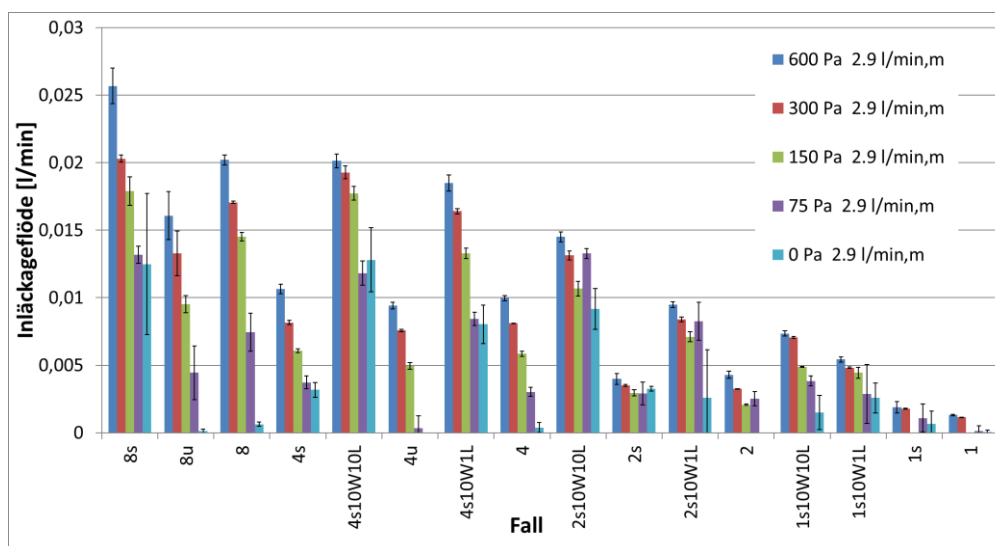
Figur 9. (a) Staplarna visar inläckage (medelvärde av 3-7 repetitioner) för sju stycken otätheter vid sex tryckskillnader med pulsering. Den applicerade vattenbelastningen var 2,93 l/min,m och vattenstänk. Standardavvikelsen visas också.

5.2.2 Småskaliga experiment

Ett stort antal mätningar, över 100 försök, har gjorts av inläckageflöden i väldefinierade otätheter med och utan dämmen för tre olika fasadmateriäl. Ingen otäthet var dold och de flesta otätheter var

synliga för blotta ögat inom storleksspannet från de minsta slitsarna på 0,3 x 3 mm till de största på 2 x 20 mm och hål mellan 1 till 8 mm i diameter, se utförligare beskrivning i (Olsson, 2018).

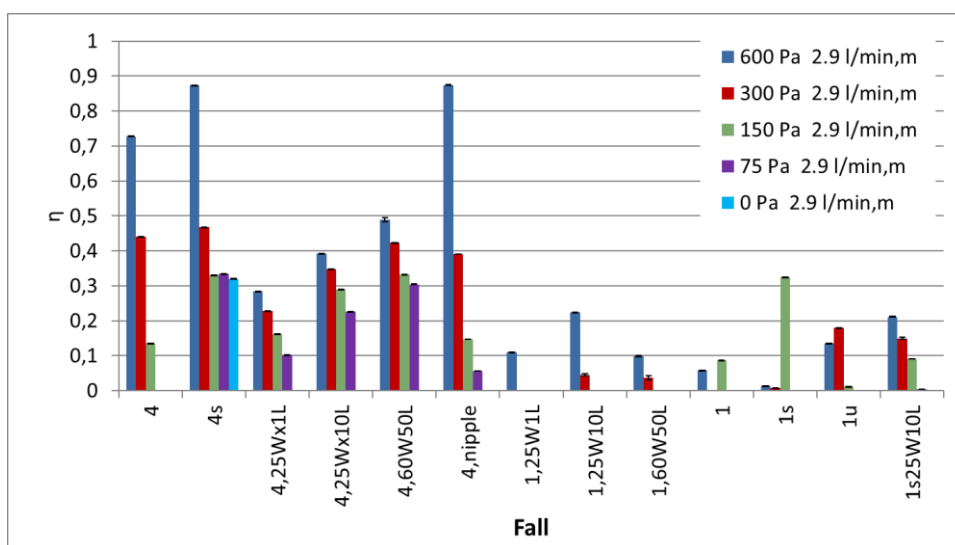
Resultaten visade på inläckageflöden inom intervallet 0,01- 0,09 l/min med vattenbelastning av 2,9 l/min,m. För hål och slitsar utan dämnen samt för mindre dämnen uppkom inläckageflöden i nedre delen av läckageintervallet, se exempelvis figur 10 och för större dämnen erhöles värden i övre delen av läckageintervallet.



Figur 10. Inläckageflöde för olika hål med och utan dämme. Vindtrycksskillnad från 0 till 600 Pa och pulsering. Vattenbelastning av 2,9 l/min,m. Exempelvis är 4s ett lutande hål med 4 mm i diameter och 10W1L är ett dämme som är 10 mm bred och med ett utstick av 1 mm.

6 KONCEPTUELL MODELL FÖR INLÄCKAGEFLÖDE

De småskaliga experimenten, med väldefinierade otätheter med och utan dämnen och tre olika fasadmateriell, har först utvärderats med inläckagefaktorn, Teorin om likformighet som nämnts tidigare ser ut att kunna överensstämna relativt väl för hål i fibercementskiva och att inläckagefaktorn går mot 0,5 för lutande hål utan vindtrycksskillnad (Olsson, 2018). För polykarbonat erhöles strax över 0,3 i inläckagefaktor utan vindtrycksskillnad för 4s, se figur 11. Vid exponering av kraftigt vindtryck så går inläckagefaktorn mot 1 för hål, alltså allt det vatten som träffar hålet läcker igenom, se figur 11, och en inläckagefaktor av 0,5 erhöles som högst för hål med brett dämme alltså hälften av det vatten som träffar dämnet läcker in genom hålet. Detta redovisas mer ingående i (Olsson, 2018, Olsson & Hagentoft, 2018).



Figur 11. η -faktorn av de uppmätta värdena för hål med och utan dämme i polykarbonatskiva. Vattenflöde på fasaden av 2,9 l/min,m och vindbelastning från 0 till 600 Pa med pulsering.

Det finns flera parametrar som påverkar inläckagefaktorn såsom material, vattenbelastning, relationen mellan hålstorlek och dämme för de aktuella måtten för hål- och dämme. Dessa parametrar har betydelse i algoritmen som är antagen enligt följande.

Följande ekvation för inläckagefaktor, η_{est} , antogs:

$$\eta_{est} = \eta_0 + \alpha \cdot P_{tot} + \beta \cdot \frac{D}{W} + \gamma \cdot \frac{D}{L} \quad (6)$$

Ett stort antal småskaliga experiment med mätningar utfördes och konstanterna i ekvation (6) bestämdes med användning av linjär regression, se tabell 2.

Tryckskillnaden som används i ekvationerna (4) och (5) avser det maximala trycket som uppträder under varje vindtryckscykel enligt metod EN 12865. Enligt metod EN 12865 är vindtrycket pulserande och tryckskillnaden är under en tredjedel av varje cykel noll, $P_w/2$ respektive P_w . Medeltrycket över cykeln är alltså $P_w/2$.

Tabell 2. Visar konstanter som bestämts för ekvation 6 för ett antal experimentella fall. Tabellen gäller för olika vattenbelastningar/vattenflöden på fasader, angivna materialtyper, olika hål och slitsar samt dimensionerna av horisontella dämmen. Mer information om hur du använder tabellen visas i (Olsson, 2018), särskilt om andra fall kommer att användas.

Fall	Vattenflöde (l/min,m)	η_0	α	β	γ	R^2
Fibercement-hål (diam. 2/4/8 mm)	2.9	0.19	0.0011	-	-	0.71
	1.1	0.16	0.0010	-	-	0.69
Fibercement-hål (diam. 1/4 mm) med dämmen upp till 10(W) x 10(L) mm	2.9	-0.039	0.00035	1.36	-0.044	0.85
	1.1	0.012	0.00044	0.92	-0.055	0,71
Fibercement-slits 0.3(T) x 3(D) to 1.5(T) x 7(D) mm med dämmen upp till 10(W) x 10(L) mm	2.9	0.42	0.0014	-0.14	-0.014	0.45
Polykarbonat-hål (diam. 4 mm)	2.9	0.065	0.0013	-	-	0.88
	1.1	0.19	0.0014	-	-	0.36
Polykarbonat-hål (diam. 1/4 mm) med dämmen upp till 60(W) x 50(L) mm	2.9	-0.011	0.00054	1.30	0.040	0.73
	1.1	0.029	0.00042	0.77	-0.043	0.47
Rostfri stålplåt- slits 1(T) x 5(D) till 2(T) x 20(D) mm	2.9	0.17	0.00077	-	-	0.77
Rostfri stålplåt-slits 1(T) x 5(D) till 2(T) x 20 (D)mm med dämmen upp till 40(W) x 50(L) mm	2.9	0.017	0.00045	0.57	0.010	0.63

I de flesta fallen, se tabell 2, var determinationskoefficienten R^2 över 0,7 vilket indikerar en mer eller mindre klar korrelation.

7 FÖRSLAG PÅ TUMREGEL

Om det inte är möjligt att få fram exakta uppgifter om en fasads otätheter så kan istället en tumregel tillämpas. Utifrån alla de mätningar som gjorts har inläckageflödet uppskattats till 0,5 till 2 % per otäthet av vattenflödet per enhetsbredd av fasaden. Enhetsbredden avser det vertikala vattenflödet på en meters fasadbredd. Detta gäller för väl utförda fasader med små eller osynliga otätheter. Inläckage uppkommer vanligtvis punktvis och framförallt vid fasaddetaljer. Förslagsvis kan 0,5 % användas för otätheter utan dämmen och 2 % kan användas där det finns dämmen. Givetvis kan högre och lägre inläckageflöde uppkomma beroende på otäthetens storlek etc. Inläckageflödet kan användas i två eller framförallt tredimensionella fuktberäkningar för att kunna analysera kritiskt snitt i väggkonstruktionen. Om bakomvarande väggkonstruktion saknar stomskydd, även vid fönsteranslutningar och genomföringar, eller att inläckaget kan ackumuleras eller absorberas så bör inläckaget placeras punktvis inuti konstruktionen. Om hela eller delar av inläckaget kan dräneras ut av konstruktionen så bör det finnas dokumentation som styrker det och för att kunna beakta det i fuktberäkning.

8 SLUTSATSER

Resultaten visar att det är mer en regel än undantag med inläckage i små dolda eller osynliga otätheter i fasader med fasaddetaljer såsom vid fönsteranslutningar etc oberoende av fasadtyp och fasadsystem såsom oventilerat, ventilerat och tryckutjämnad fasad. En förklaring till varför det inte är några tydliga skillnader i regntäthet mellan fasader är för att otätheterna påminner om varandra oberoende av fasad och framförallt återfinns de vid fasaddetaljer, utstickande detaljer som orsakar mer eller mindre uppdämning av vatten, och kan också öka inläckaget. Resultaten visar mer specifikt att:

- mer än 90 % av alla kommersiella provväggar vid laboratorieprovning hade inläckage,
- mer än 60% av alla fönsteranslutningar läckte både för kommersiella provväggar vid laboratorieprovning och experimentväggar,
- fältmätningar visar inläckage intill väggstommen i 70% av byggnaderna.

En övergripande slutsats är att inläckage generellt sett alltid kan förväntas i fasader med fasaddetaljer så länge inte motsatsen är bevisad. Otätheterna är ofta små, dolda och osynliga varför det knappast går att avgöra om en fasad är regntät utan regnprovning. Utifrån resultaten är det således svårt eller omöjligt att bygga regntäta fasader (yttersta skiktet i ytterväggar) med vanligt förekommande material och lösningar. Utifrån en bedömning av alla resultaten är det rimligt att anta punktinläckage på 0,5-2 % per otäthet av vattenflödet per enhetsbredd av fasaden. Den lägre andelen inom intervallet avser endast hål/slitsar och det högre avser hål/slitsar med dämme. Om otätheter och dämme är väldefinierade kan exakt inläckageflöde beräknas, enligt följande.

Genom att kombinera ekvation 2 och 6 erhålls beräknat inläckageflöde, $G = \eta \cdot G_{max}$. Denna enkla formel baseras dels på inläckagefaktorn η som är baserad på empiriska värden dels det vattenflöde som uppkommer på fasaden när det rinner mot ett hål eller slits för regnexponerad fasad. Detta teoretiska samband korrelerar relativt väl med flera andra laboratorieexperiment. Inläckageflödet kan användas i 2D- och 3D fuktberäkningar eftersom det är punktinläckage. De faktorer som visat sig ha störst betydelse för inläckageflödet är:

- hålets storlek,
- dämmets storlek,
- typ av material,
- hydrostatiskt tryck i hålet,
- vindtrycksskillnad över fasaden,
- regnbelastning och fasadhöjd.

Vidare kan konstateras att det hydrostatiska trycket kan ha lika stor betydelse som vindtrycksskillnaden vilket innebär att betydande inläckage också kan förväntas i tryckutjämnade eller ventilerade fasader. Flödeskapaciteten för exempelvis ett litet hål med en diameter på över 1 mm är ofta avsevärt större än de vattenmängder som rinner på en fasad. Det innebär att allt vatten som rinner mot hålet kan läcka in. När det gäller fuktsugande material uppkom ingen nämnvärd mothållande meniskel vid inläckagehålets utlopp, det vill säga, det vattentryck som uppkommer i ett horisontellt hål i fasad är tillräckligt för att inläckage ska ske. För icke fuktsugande fasader kan det behövas ett litet tryck som exempelvis kan uppkomma av hydrostatiskt tryck av lutande hål eller vindtryck.

Dessutom kan mer eller mindre slagregnskyddade detaljer, såsom undersidan av fönsterbleck, utsättas för betydande vattenmängder på grund av vattenstänk, vatten som exempelvis rinner av ovanförliggande detaljer och droppar ner på utstickande detaljer mm och stänker upp på fasaden.

9 FRAMTIDA FORSKNINGSBEHOV

Mer data behövs, exempelvis för andra storlekar på hål, slitsar och dämmen samt andra material, än vad som varit med i denna avhandling, för att kunna göra exakta beräkningar i sådana fall. Dämmen med utstick på mer än flera millimeter i kombination med olika lutningar på dämnet behöver också studeras.

Data på nya fasaders regntäthet samt bestämning av geometriska mått på otätheter skulle förbättra möjligheten att göra mer exakta fuktberäkningar och pålitliga riskanalyser.

Eftersom inläckage kan förväntas genom det yttersta skiktet i ytterväggar, oberoende av fasadtyp, så behövs ett andra hinder som verkligen skyddar väggstommen, vid genomföringar och fuktkänsliga delar i väggen. Risken för inläckage och inläckageflöde genom det andra hindret och kombinationen bör studeras mer.

För att beskriva hur vattnet sprider sig i väggen är dräneringsförmåga och fuktackumulering bakom fasader ett annat område av stor betydelse för ytterväggen.

REFERENSER

- DE GENNES, P.-G., BROCHARD-WYART, F. & QUÉRÉ, D. 2004. Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves. New York: Springer Science & Business Media.
- GARDEN, G. K. 1963. Rain Penetration and its Control. *CBD-publication 40* [Online]. Available: http://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd040_e.html.
- GARG, K., KRISHNAN, G. & NAYAR, S. K. Material Based Splashing of Water Drops. In: KAUTZ, J. & PATTANAIK, S., eds. Eurographics Symposium on Rendering, 2007. The Eurographics Association 2007.
- HAGENTOFT, C.-E. & OLSSON, L. 2017. Rain intrusion behind insulated modules attached to façades of old buildings: A probabilistic modelling approach. *AIRAH and IBPSA's Australasian Building Simulation 2017 Conference, November 15-16*. Melbourne.
- HENS, H. 2010. Wind-driven rain: from theory to reality. *Proc. Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XI, Clearwater, Florida*.
- LACASSE, M. 2003. Recent studies on the control of rain penetration in exterior wood-frame walls. National Research Council Canada.
- OLSSON, L. 2014a. *Moisture Conditions in Exterior Wooden Walls and Timber During Production and Use*. Licentiate thesis, Chalmers University of Technology.
- OLSSON, L. 2014b. Results from laboratory tests of wind driven rain tightness in more than 100 facades and weather barriers. *10th Nordic Symposium on Building Physics, 15-19 June*. Lund, Sweden: Lund University.
- OLSSON, L. 2015. Long-term Field Measurements of Moisture in Wooden Walls with Different Types of Facades: Focus on Driving Rain Tightness. *6th International Conference on Building Physics for a Sustainable Built Environment*. Turin, Italy: Energy Procedia Vol. 78, pp. 2518-2523.
- OLSSON, L. 2016a. Laboratory study of driving rain resistance of four facade systems with window fittings-Experimental results of leakage flows. *CESB16-Central Europe toward Sustainable Building 2016*. Prague: Grada Publishing a.s. Czech Technical University in Prague.
- OLSSON, L. 2016b. Laboratory study of rates of inward leakage in seven different gaps in a façade exposed to driving rain or water splash. *Buildings XIII – Thermal Performance of the Exterior Envelope of Whole Buildings Conference* Clearwater Beach, Florida, US: ASHRAE.
- OLSSON, L. 2018. *Driving rain tightness, intrusion rates and phenomenology of leakages in defects of façades : A new calculation algorithm*. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology.
- OLSSON, L. & HAGENTOFT, C.-E. 2018. Driving rain induced water leakage through rain screen defects in façades. *To be submitted 2018*.
- SAMUELSON, I. & JANSSON, A. 2009. Putsade regelväggar. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- SIS 2001. SS-EN 12865:2001. *Fukt- och värmeteknisk funktion hos byggkomponenter och byggnadsdelar - Bestämning av ytterväggars täthet mot slagregn vid pulserande tryck*. Stockholm: Swedish Standards Institute.