



LUND UNIVERSITY

Ventilerad luftspalt i yttervägg : luftomsättningar och konvektiv fukttransport

Falk, Jörgen

2010

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Falk, J. (2010). *Ventilerad luftspalt i yttervägg : luftomsättningar och konvektiv fukttransport*. [Licentiatavhandling, Avdelningen för Byggnadsmaterial]. Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Ventilerad luftspalt i yttervägg

Luftomsättningar och konvektiv fukttransport

Jörgen Falk

ISRN LUTVDG/TVBM--10/3155--SE(1-126)
ISSN 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund

Telefon: 046-2227415
Telefax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Detta licentiatarbete har utförts vid avdelning Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF och Skanska Sverige AB.

Det är framförallt två personer som bidragit med vägledning och råd under arbetets gång, min handledare docent Kenneth Sandin på Byggnadsmaterial och min industrihandledare Sigurd Karlsson, Skanska Teknik. Ett stort och varmt tack till Kenneth som med säker hand guidat mig igenom såväl praktiska som teoretiska svårigheter. Ett speciellt tack till Sigurd för stöd och uppmuntran under arbetets genomförande och för att du aldrig tvivlar på min förmåga.

Det finns även ett antal andra personer som aktivt hjälpt mig fram i arbetet och som jag härmed vill tacka

- Tekniker Stefan Backe som anskaffat material när så behövts och som ledde bygget av experimentväggarna.
- Professor Lars Jensen som ödmjukt tog sig tid att diskutera grundläggande strömningslära med en novis på området.
- Teknisk doktor Sture Lindmark som visat stort intresse för mina problemställningar och som alltid varit beredd att bidra med sin kunskap.

Jag vill också uppmärksamma och tacka för att

- Rolf Blank och Carl-Magnus Capener på Weber både bidrog med material och yrkeskraft när mina experimentväggar fick ett putsat fasadskikt.
- Christian Carlsson, Europrofil och Niclas Ivarsson, Lindab tillhandhöll material i form av perforerade ställakt.

Slutligen vill jag rikta en uppskattande tanke åt alla er vänliga kollegor på Byggnadsmaterial vars närvaro gjort det dagliga arbetet roligare.

Lund, oktober 2010

Jörgen Falk

Sammanfattning

Allvarliga fuktproblem i ytterväggar med regelstomme av trä och fasadskikt av puts på isolering har under senare delen av 2000-talet konstaterats i Sverige. Ett alternativ byggsätt för den putsade fasaden är att putsa mot ett skivunderlag som sitter monterat mot läkt så att en luftspalt bildas. Om spalten i över- och underkant kan kommunicera med utomhusluften så kommer vind och temperaturskillnader (termik) att få luften i spalten att strömma så att en luftomsättning uppstår. Därmed kan skadlig fukt genom konvektion transporteras bort från väggen. Det finns dock en stor kunskapsosäkerhet om hur stor luftomsättningen i en spalt över tid blir. Med denna förutsättning är det svårt att uppskatta och jämföra storlek på möjlig konvektiv fukttransport för olika spaltutformningar. Detta arbete har utförts i syfte att beskriva samband mellan spaltutformning, luftomsättning och konvektiv fukttransport för en spalt bakom puts på skiva. Speciellt intresse har i detta avseende ägnats åt att bestämma skillnader mellan två typer av luftspaltsbildande läkt som är vanligt förekommande i praktiken – vertikalt ställda träläkt respektive horisontellt lagda, perforerade ställäkt.

Genom teoretiska studier har ekvationer och modeller för att kunna räkna på luftströmning och värme- fuktbalans i en öppen spalt identifierats. För att verifiera beräkningsmodellen för luftströmning genomfördes experiment i en fullskalig spaltuppställning i laboratorium. Efter korrigering av några faktorer i den teoretiska modellen var överensstämmelsen mellan teori och experimentella resultat inom en felmarginal på 10%.

För att mäta luftrörelser i spalter vid exponering mot uteklimat byggdes experimentväggar med höjd 2.15 m och söderorientering i ett provhus. Efter mätningar med lufthastighetsgivare kunde den genomsnittliga luftomsättningen under perioden oktober till februari uppskattas till intervallet 230-310 oms/h för spalt med vertikala läkt. För spalter med perforerade ställäkt var luftomsättningen 60-70% lägre. Genom detaljanalys av mätresultat redovisas i arbetet ett antal slutsatser om hur vind respektive termik influerade luftomsättningen i experimentväggarnas spalter.

Utifrån generella klimatdata och en förenklad drivkraftsmodell där dygnet delats upp i en ljus och en mörk del redovisas beräkningar av luftomsättning i experimentväggarnas spalter. Avvikelse mellan beräkningsresultat och mätresultat var mindre än 20%. Samma metodik användes även för att beräkna luftomsättning för ett antal fiktiva varianter av de faktiska experimentväggarna, till exempel ljus fasadkulör istället för mörk.

Med den samlade kunskapen som grund tillämpas ekvationer från teoriavsnitt för att beräkna storlek på konvektiv fukttransport (gram per dygn) och fuktutbyte (gram per dygn och m^2) i spalter med varierande utformning och vid varierande yttre klimatbetingelser. Resultaten visar på betydande skillnader beroende på vilka förutsättningar som föreligger. Vid ett fuktillstånd där fukt kan avdunsta direkt från spaltytorna till spaltluften skiljer beräknat fuktutbyte med en storleksordning 100. De stora skillnaderna är en följd av spaltens geometri men även av kulör, årstid och väderstreck. Liten spaltbredd, ljus fasadkulör och norrorienterad fasadriktning visas vara ogynnsamma faktorer för fuktutbytet. När transport av fukt till spaltluften måste ske via diffusion genom ett ”torrt” materialskikt närmast spalten dämpas fuktutbytet kraftigt. Vid stort ånggenomgångsmotstånd i det ”torra” skiktet tenderar fuktutbytet för de studerade fallen att bli nära utjämnat. I denna fas är den mest avgörande faktorn för storleken på fuktutbytet årstiden med ett vår- sommarklimat som väsentligt fördelaktigare än ett höst- vinterklimat.

För att visa på betydelsen av beräknade fuktutbyten redovisas avslutningsvis jämförande uttorkningsberäkningar för fallet med en blöt vindskyddsskiva av gips i anslutning till spalten. Resultaten visar på små skillnader i uttorkningstid mellan spalter med bredd 25 och 40 mm utförda med vertikala läkt, speciellt om detaljutformningen vid spaltöppningarna begränsar strömningsarean. En utformning med liggande ställäkt förlänger uttorkningstiden jämfört med vertikala träläkt, speciellt om fasaden är ljus eller norrorienterad. Ett utmärkande resultat är att en liten spaltbredd (< 10 mm) är mycket ogynnsam för uttorkningstiden som, beroende på de exakta materialvalen, kan vara i paritet med de uttorkningstider som erhålls när fasaden helt saknar luftspalt och har ett fasadskikt av puts på isolering.

Abstract

During the past few years Sweden, has experienced severe problems due to moisture in rendered exterior walls with wood framing and face-sealed EIFS (Exterior Insulation and Finish Systems). An alternative construction principle is to use a rainscreen cladding system where render is applied to a carrier board fixed on strapping. As a result of the strapping an air cavity is created. If the cavity is designed with openings at the top and bottom, wind- and buoyancy-induced driving pressures will result in ventilation airflow. Ventilation airflow provides the potential for drying. However, in reality there is great uncertainty regarding the air change rate (ACH). It is therefore difficult to assess and compare the ventilation drying potential for different cavity designs. The aim of this project was to examine the relations between cavity design, air change rate and ventilation drying when a ventilated rainscreen cladding is used. Differences depending on the choice of strapping system: vertical wooden strapping or horizontal, perforated metal strapping, are especially examined.

The equations and models necessary to calculate air flow, thermal balance and moisture balance in a ventilated cavity were identified through theoretical studies. To validate the air flow model a full-scale experimental set-up was designed and built. The results of experimental measurements indicated that some factors in the model deviated from the theoretical proposed. Once these factors had been corrected, the consistency between the calculations and the results from the experimental set-up was good.

South-facing experimental walls with differently designed cavities (all with a height of 2.15 m) were built and exposed to an outdoor climate. Results from measurements of the air velocity in the cavities showed that the air change rate during October-February could be estimated to be 230-310 ACH when vertical wooden strapping was used. In cavities with horizontal, perforated metal strapping the air change rate was 60-70% lower. Several conclusions regarding wind action and buoyancy effect, and their separate contributions to the air change rate in the experimental walls, could be drawn from detailed analysis of the experimental results. A full description is given in the report.

A simple approach for the estimation of wind- and buoyancy-induced driving forces to predict the air change rate is presented. In this procedure day and night are treated separately. The air change rates for the experimental walls were calculated based on data collected at weather stations, and compared to the measured results. The calculated air change rates deviated by less than 20% from the measured results. The same procedure was also used to calculate air change rates for several fictitious variants of the actual experimental walls, for instance a brightly coloured façade instead of a dark one.

The knowledge gathered from these theoretical and experimental studies was used to calculate ventilation drying rates ($\text{g/day}\cdot\text{m}^2$) for various cavity designs and outdoor climates. The results indicate large differences depending on the assumed conditions. Provided the moisture content allows liquid mass transfer in the materials facing the cavity, the magnitude of the drying rates was found to be in the range of 10-1000 $\text{g/day}\cdot\text{m}^2$. These large differences are the result of variations in cavity design, as well as in season and direction. A small cavity depth, bright façade and north-facing direction are all factors that significantly reduce the ventilation drying rate when the moisture content in the materials facing the cavity is above the hygroscopic level. When liquid mass transfer has ceased, continued moisture transport to the cavity will become dependent on vapour diffusion mechanisms. With some exceptions, the drying rate at this stage is considerably lower. As drying proceeds and the resistance to

vapour diffusion in the materials gradually increases, the drying rates for different cavity designs tend to converge. When the diffusion resistance in the materials reaches high levels a favourable outdoor climate is more important than any other factor in promoting drying.

Finally, comparative manual calculations were performed to demonstrate the actual implication of the calculated ventilation drying rates. It was assumed that moisture-saturated gypsum sheathing was facing the cavity, and the time required to reach equilibrium with 80% relative humidity was calculated. The results show that there are only small differences in drying time when the cavity depth is 25 or 40 mm, especially if the detailed design of the cavity openings restricts the flow area. Horizontal, perforated metal strapping prolongs the drying time compared with vertical wooden strapping. This relation is enhanced if the façade is brightly coloured, or the wall is facing north. One important finding is that a small cavity depth (< 10 mm) substantially prolongs the drying time, and the calculations performed show that under these conditions ventilation drying does not always offer any benefit compared to face-sealed EIFS.

Keywords:

Ventilated cavity, Air change rate, Ventilation drying rate, Drying time, Strapping, Moisture balance, Moisture transport, Thermal balance, EIFS

Innehållsförteckning

FÖRORD	III
SAMMANFATTNING	IV
ABSTRACT	VI
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	VIII
1 INTRODUKTION OCH PROBLEMSTÄLLNING	1
1.1 SYFTE	2
1.2 AVGRÄNSNINGAR	2
1.3 DISPOSITION	3
1.4 LITTERATURSTUDIER	4
2 TEORI – LUFTSTRÖMNING I YTTERVÄGGSSPALT	5
2.1 GRUNDLÄGGANDE BEGREPP	5
2.1.1 BERNOULLIS EKVATION, STAGNATIONSTRYCK	5
2.1.2 REYNOLDS TAL, LAMINÄR OCH TURBULENT STRÖMNING	6
2.1.3 HYDRAULISK DIAMETER	7
2.1.4 ABSOLUT OCH RELATIV YTRÅHET	7
2.1.5 TRYCKFÖRLUST	8
2.1.6 HASTIGHETSPROFIL	9
2.1.7 INLOPPSSTRÄCKA	10
2.2 DRIVKRAFTER FÖR LUFTSTRÖMNING	11
2.2.1 TERMISK DRIVKRAFT	11
2.2.2 DRIVKRAFT BEROENDE PÅ VARIATIONER I FUKTINNEHÅLL	12
2.2.3 DRIVKRAFT AV VIND	13
2.3 BERÄKNINGSMODELL FÖR LUFTSTRÖMNING I SPALT	19
2.3.1 BEGRÄNSNINGAR I MODELLEN	20
2.3.2 TRYCKFALL PÅ GRUND AV FRIKTION	20
2.3.3 TRYCKFALL VID IN- OCH UTLOPP	21
2.3.4 TRYCKFALL VID PERFORERADE STÅLLÄKT	23
2.3.5 TRYCKFALL VID LUFTNINGSPROFIL	25
2.3.6 TRYCKFALL VID BÖJ	26
2.3.7 EKVATION FÖR BERÄKNING AV LUFTFLÖDEN	28
3 LUFTSPALTERS VÄRME- OCH FUKTBALANS	29
3.1 FYSIKALISKA GRUNDER	30
3.1.1 VÄRMETRANSPORT	30
3.1.2 FUKTTRANSPORT OCH UTTORKNING	35
3.2 VÄRMEBALANS	39
3.3 FUKTBALANS	43

4	VERIFIERING AV BERÄKNINGSMODELL FÖR LUFTFLÖDEN	49
4.1	PROVUPPSTÄLLNING	49
4.2	GENOMFÖRANDE	51
4.3	BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	52
4.4	RESULTAT	53
4.4.1	FÖRLUSTFAKTOR VID PERFORERADE STÅLLÄKT	53
4.4.2	FÖRLUSTFAKTOR VID SPALTINLOPP	54
4.4.3	FÖRLUSTFAKTOR VID SPALTUTLOPP	56
4.4.4	HASTIGHETSProfiler	57
4.4.5	JÄMFÖRELSE MELLAN MÄTTA OCH BERÄKNADE TRYCK/FLÖDES KURVOR	58
4.5	KOMMENTARER TILL PROVNINGSRESULTAT	58
5	BERÄKNINGAR AV LUFTHASTIGHETER VID OLIKA SPALTUTFÖRANDE	59
5.1	SPALT MED HORISONTELLA, PERFORERADE STÅLLÄKT	59
5.2	SPALT MED VERTIKALA LÄKT	61
6	EXPERIMENTELL UPPSTÄLLNING – VENTILERAD PUTSFASAD	66
6.1	BESKRIVNING	66
6.1.1	PROVHUSBYGGNAD	66
6.1.2	EXPERIMENTVÄGGAR	67
6.1.3	INSTRUMENTERING	69
6.1.4	REDOVISNING AV MÄTRESULTAT	70
7	LUFTRÖRELSER UNDER DYNAMISKA FÖRHÅLLANDEN	71
7.1	METODER	71
7.1.1	RÖK	71
7.1.2	LUFTHASTIGHETSGIVARE	71
7.2	OBSERVATIONER MED RÖK	72
7.3	MÄTNINGAR MED LUFTHASTIGHETSGIVARE	74
7.4	ANALYS AV LUFTHASTIGHETSMÄTNINGAR	80
7.4.1	MÄTPERIOD 081007-081008 FACK 4, LÄKT EUROPROFIL	81
7.4.2	MÄTPERIOD 081213-081215 FACK 3, LÄKT LINDAB	90
7.4.3	MÄTPERIOD 081015-081017 FACK 1, VERTIKALA LÄKT	93
7.4.4	FORMFAKTORSSKILLNAD FÖR PRAKTISK TILLÄMPNING	96
7.5	KOMMENTARER OCH SLUTSATSER	97
8	PREDIKTION AV LUFTOMSÄTTNINGAR	99
9	KONVEKTIV FUKTTRANSPORT I PRAKTIKEN	105
9.1	BERÄKNINGAR	105
9.2	KOMMENTARER TILL BERÄKNINGSRESULTAT	110
9.2.1	UTTORKNINGSFAS 1, POTENTIAL FÖR FUKTUTBYTE	110
9.2.2	UTTORKNINGSFAS 2	111

9.2.3	SLUTKOMMENTAR	112
-------	---------------	-----

10	ENKLA, JÄMFÖRANDE UTTORKNINGSBERÄKNINGAR	113
-----------	---	------------

10.1	FUKTTRANSPORTDATA	113
10.2	BERÄKNINGSRESULTAT	114
10.2.1	VENTILERAD PUTSFASAD	114
10.2.2	FASAD MED PUTS PÅ ISOLERING	117
10.3	KOMMENTARER OCH SLUTSATSER	119

11	RESULTAT OCH SLUTSATSER	121
-----------	--------------------------------	------------

12	FORTSATT ARBETE	123
-----------	------------------------	------------

13	LITTERATURLISTA	124
-----------	------------------------	------------

14	REFERENSER	125
-----------	-------------------	------------

BILAGOR

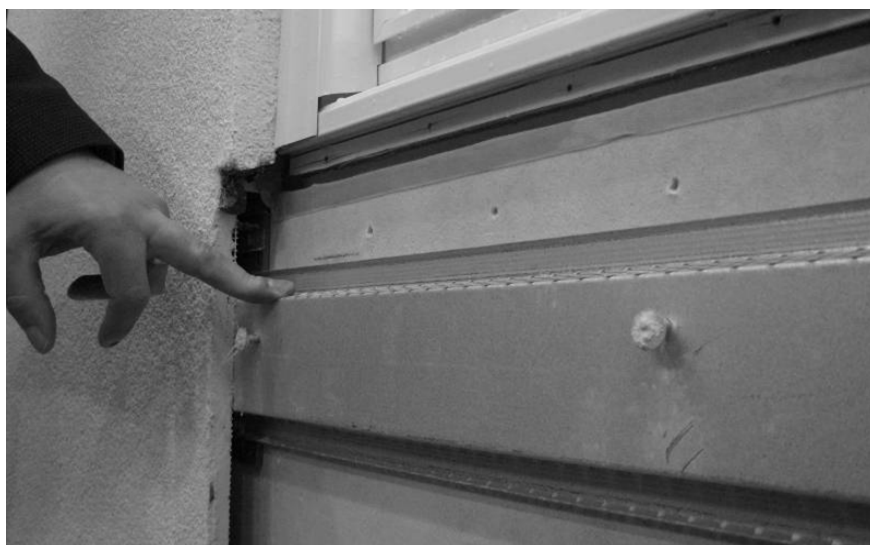
BILAGA 1:	KURVOR TRYCK/FLÖDE FÖR SPALT UTAN HORISONTELLA LÄKT	(3 SIDOR)
BILAGA 2:	KURVOR TRYCK/FLÖDE FÖR SPALT MED LÄKT EUROPROFIL	(2 SIDOR)
BILAGA 3:	KURVOR TRYCK/FLÖDE FÖR SPALT MED LÄKT LINDAB	(2 SIDOR)
BILAGA 4:	RITNINGAR PÅ EXPERIMENTVÄGGAR	(2 SIDOR)
BILAGA 5:	MAXIT PUTSSYSTEM SERPOSOL EF PÅ AQUAPANEL OUTDOOR	(1 SIDA)
BILAGA 6:	OBSERVATIONER MED RÖK I FACK 1, VERTIKALA LÄKT	(1 SIDA)
BILAGA 7:	OBSERVATIONER MED RÖK I FACK 3, LÄKT LINDAB	(1 SIDA)
BILAGA 8:	OBSERVATIONER MED RÖK I FACK 4, LÄKT EUROPROFIL	(1 SIDA)
BILAGA 9:	MÄTPERIOD 081007-081008 FACK 4, LÄKT EUROPROFIL	(3 SIDOR)
BILAGA 10:	MÄTPERIOD 081213-081215 FACK 3, LÄKT LINDAB	(3 SIDOR)
BILAGA 11:	MÄTPERIOD 081015-081017 FACK 1, VERTIKALA LÄKT	(3 SIDOR)
BILAGA 12:	METODIK FÖR BERÄKNING AV ANTAL LUFTOMSÄTTNINGAR	(1 SIDA)
BILAGA 13:	DATA FÖR UPPSKATTNING AV NEDÅTRIKTAD STRÖMNING	(1 SIDA)
BILAGA 14:	DATA FÖR UPPSKATTNING AV NEDÅTRIKTAD STRÖMNING	(1 SIDA)
BILAGA 15:	DATA FÖR UPPSKATTNING AV NEDÅTRIKTAD STRÖMNING	(1 SIDA)
BILAGA 16:	KLIMATDATA FÖR PERIODEN APRIL-AUGUSTI	(1 SIDA)

1 Introduktion och problemställning

De senaste åren har fuktskador i putsade, enstegstätade fasader på regelstommar blivit mycket uppmärksammade och debatterade i Sverige. En omfattande beskrivning av de aktuella problemfasadernas uppbyggnad, mekanismerna bakom skadornas uppkomst och möjliga, fuktsäkrare konstruktionsprinciper för nyproduktion av putsade fasader ges i Samuelson & Jansson (2007). I en av de principer som omnämns utförs putsen inte mot isolering utan mot en fukttålig skiva med en bakomliggande, dränerad och ventilerad luftspalt. En putsfasad i detta utförande blir tvåstegstätad.

I min yrkesverksamhet som anställd för Skanska Teknik har jag vid upprepade tillfällen under åren 2003-2007 varit djupt involverad i processer där nästan nybyggda och enstegstätade putsfasader tvingats att genomgå ett omfattande renoveringsarbete. En av de metoder som i dessa sammanhang användes i återställandefasen var puts på skiva. Tekniska beslut att använda sådana system var inte helt självklara då erfarenheterna vid denna tidpunkt var ytterst begränsade, åtminstone i Sverige. Farhågorna handlade då inte om luftspalten och dess funktion utan om hur fasader med puts på skiva mekaniskt beter sig långsiktigt. I ett värsta scenario skulle belastningar från vind, fukt och temperatur över tid kunna tänkas medföra allvarliga defekter, till exempel sprickbildning i putsen över skivskarvar.

Våren 2008 startade forskningsprojektet ”Fasadputs på skivunderlag i dränerade och ventilerade konstruktioner” vid avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Ett syfte med projektet var att studera mekanik och systemegenskaper när putsbruk, skivmaterial och läkt som kombinerats för att samverka utsätts för olika typer av belastningar. I en annan, och här behandlad del av projektet var perspektivet ett helt annat med syfte att undersöka den byggnadsfysikaliska frågeställningen hur val av läktsystem påverkar luftomsättningen (luftväxlingen) i spalten. Motivet var att skivmaterial i ventilerade putssystem inte bara monteras mot olika typer av stående läkt utan regelmässigt även mot horisontellt lagda, perforerade läkt av stål. Idén bakom att läkten är perforerade är naturligtvis att luftomsättning och dränering i spalten inte skall hindras trots det horisontella montaget. Det är dock uppenbart att lufthastighet och luftomsättning måste bli reducerad jämfört med fallet med stående läkt och i övrigt lika förutsättningar. Figur 1-1 ger ett exempel på ställäkt som monterats i en regelvägg med puts på skiva.



Figur 1-1 Horisontellt ställäkt (Europrofil) bakom puts på skiva.

Perforerade ställläkt för skivmontage i fasad finns i ett flertal olika utföranden och ger en produktionsteknisk fördel när läktmontage skall göras mot ett vertikalt ställt regelverk. Fördelen består i att horisontella läkt kan placeras och fästas in till stommen med optimala avstånd mellan läkten utan krav på passning till det vertikala regelverkets placering. Därmed kan tillkapningar och spill av kostsamma skivmaterial hållas på en låg nivå vid efterföljande skivmontage.

En av avsikterna med en ventilerad spalt bakom fasadskiktet på en yttervägg är att luft skall strömma och föra bort fukt från spalten. För att med någon precision kunna beräkna hur mycket fukt som kan transporteras bort på detta sätt är kunskap om hur fort luften rör sig tillsammans med kunskap om lufttemperatur och ytemperaturer i spalten nödvändig. Temperaturförhållandena beror på ett stort antal faktorer varav just lufthastigheten är en. Kännedom om storleken på luftomsättningen är följaktligen en viktig förutsättning för att temperatur- och uttorkningsförlopp i spalter med varierande utformning skall kunna beräknas och jämföras. Luftomsättningen är alltså av intresse ur ett fuktsäkerhetsperspektiv.

Det är ingen enkel uppgift att förutsäga vilken luftväxling som i praktiken kommer att uppstå i en spalt då mängden påverkande faktorer och omständigheter är mycket stor. Det som driver luft att strömma är såväl temperaturskillnader (så kallad termik) som vind och vid en specifik drivkraft kommer luftflödet att bestäms av spaltens strömningstekniska egenskaper. Dessa naturliga drivkrafter kommer över tid att variera mellan vida gränser. För något så när adekvata bedömningar av storlek på luftomsättning är ett lämpligt första steg att använda kunskap från strömningstekniken för att konstituera samband mellan drivkraft och flöde för given spaltutformning. Därefter måste tillgängliga drivkrafter från vind och termik försöka uppskattas utifrån rådande yttre klimatförhållanden.

1.1 Syfte

Ursprungligt syfte med detta licentiatarbete har varit att under lika yttre betingelser jämföra luftspaltens funktion vid ett skivmontage mot horisontella, perforerade ställläkt i förhållande till ett skivmontage mot vertikala läkt. Med funktion avses luftomsättningar och förmåga att konvektivt transportera bort fukt från spalten. Under genomförandet har arbetet utvidgats till att även undersöka hur dessa egenskaper påverkas av andra faktorer, till exempel spaltbredd och fasadkulör.

1.2 Avgränsningar

Arbetet har avgränsats till att studera en ventilerad ytterväggsspalt ur två specifika aspekter - luftomsättning och konvektiv fukttransport. Det innebär att inga perspektiv eller värderingar lagts på närliggande tekniska egenskaper som till exempel luftspaltens förmåga att skapa tryckutjämning över fasadskiktet, dess dräneringsförmåga eller dess inverkan på väggens brand- och isolerförmåga.

Studien utgår från en schematisk yttervägg bestående av ett fasadskikt och en väggkärna som är åtskilda av en uteluftsventilerad spalt. Spalten kan kommunicera med uteluften genom öppningar i underkant respektive överkant som båda förutsatts vara kontinuerliga. Resultaten är alltså inte giltiga för till exempel ett murat fasadskikt med punktvisa öppningar i stötfogar.

Arbetet har i högsta möjliga grad utförts utan att precisera och behandla specifika material och materialkombinationer. Ett sådant angreppssätt har valts för att antalet parametrar inte skall bli ohanterligt många och för att erhållna resultat inte skall bli ”materialberoende”. Det följer att arbetet inte avhandlar frågeställningar som berör kritiska fuktillstånd, beständighet eller miljö/hälsa.

En ytterligare avgränsning som gjorts är att arbetet inte omfattar beskrivningar av sådana mekanismer och scenarior som kan leda till att materialskikt i en yttervägg blir blöta.

1.3 Disposition

Framställningen har disponerats enligt nedan. Det är en förhoppning att vald kapitelordning skall underlätta läsarens förståelse och samtidigt uppfattas som logisk.

Kapitel 2 - Inleds med en genomgång av grundläggande strömningslära. Mot bakgrund av denna kunskapsbas formuleras sedan en beräkningsmodell som ger sambandet mellan drivkraft och luftflöde för en spalt med givna geometriska förutsättningar. Kapitlet omfattar också en beskrivning av hur drivkraft (tryckskillnad) mellan en spalts över- och underkant uppstår på grund av temperaturdifferenser och vindpåverkan.

Kapitel 3 - Beskriver några fundamentala samband för värme- och fukttransport. Vidare redovisas ekvationer för att beräkna temperaturförlopp och konvektiv fukttransport i spalter som genomströmmas av luft.

Kapitel 4 - Redogör för experiment som genomfördes i laboratoriemiljö i syfte att verifiera beräkningsmodellen för luftströmning i spalter.

Kapitel 5 - Är i huvudsak en parameterstudie där beräkningsmodellen för luftströmning utnyttjas för flödesmekaniska jämförelser av olika spaltutformningar.

Kapitel 6 - Beskriver utförande och instrumentering av experimentväggar som exponerades mot utomhusklimat.

Kapitel 7 - Detta kapitel behandlar studier av luftrörelser som gjordes i experimentväggarnas spalter med hjälp av rök och genom mätningar med lufthastighetsgivare. Kapitlet inleds med en beskrivning av rökproven och en övergripande sammanställning och utvärdering av mätdata från lufthastighetsgivare. I avsnitten som följer analyseras mätresultat från tre mätperioder i detalj. Avslutningsvis presenteras en uppskattning av luftomsättningens storlek i väggarnas spalter över lång tid tillsammans med ett resonemang kring termikens respektive vindens betydelse för att skapa denna luftomsättning.

Kapitel 8 - Redovisar en beräkning av luftomsättningen i experimentväggarnas spalter med generella klimatdata som underlag. Inkluderar även beräkningar av luftomsättning vid ett antal olika och fiktiva förändringar i förutsättningarna för experimentväggarna.

Kapitel 9 - Här tillämpas samlad kunskap från tidigare kapitel för kvantitativa beräkningar av konvektiv fukttransport i experimentväggarnas spalter och de fiktiva varianter av dessa som definierats i kapitel 8.

Kapitel 10 - I kapitlet används resultaten i kapitel 9 för jämförande uttorkningsstudier.

1.4 Litteraturstudier

De litteraturstudier som gjorts visar att det under de senaste 10-15 åren internationellt funnits ett intresse att öka kunskapen om, och hur, ventilerade spalter i ytterväggar kan bidra till att öka fuktsäkerheten. Speciellt verkar frågan ägnats mycket uppmärksamhet i Nordamerika. Det mest tydliga exemplet på detta är ett omfattande forskningsprojekt som genomfördes i USA 2001-2004 och som resulterade i hela 12 delrapporter (en sammanfattning av projektet ges i Burnett et al (2004)). Trots att flera av de skrifter som hittats behandlar frågeställningar som ligger mycket nära de som är av intresse i föreliggande arbete är det inte alla som befunnits innehålla fakta som varit direkt användbar. Några exempel på avgörande orsaker till detta är:

- Skriften behandlar företrädesvis luftspalter bakom fasadskikt som ligger utanför detta arbetes ramar eller fasadskikt som inte används i Sverige. Typiskt exempel på det förra respektive det senare är fasadtegel och ”*contact-applied vinyl siding*” (en speciell typ av fasadbeklädnad tillverkad av PVC).
- Förutsättningar och begränsningar för ekvationer som ges för att kunna beräkna olika storheter (till exempel konvektiv fukttransport) är svåra att förstå och genomskåda eller direkt kopplade till regionala klimatförhållanden.
- Skriften presenterar någon form av experimentella resultat som är knutna till specifika materialval och/eller specifika klimatförhållanden.
- Skriften fokuserar på jämförelser mellan experimentella resultat och beräkningsresultat från avancerade modeller, exempelvis CFD (Computational Fluid Dynamics).

En förteckning över insamlad litteratur av ovanstående art har sammanställts i kapitel 13 medan litteratur som direkt refereras till i detta arbete återfinns i kapitel 14.

2 Teori – luftströmning i ytterväggsspalt

Avsikten med detta kapitel är att upprätta en beräkningsmodell för luftströmningen i en vertikal ytterväggsspalt. Storleken på luftströmningen beror dels på hur stor tryckskillnad som finns mellan spaltens båda öppningar och dels på strömningsmotståndet mellan öppningarna. För att underlätta förståelsen ges i 2.1 en kortfattad presentation av några grundläggande begrepp inom strömningslära. Hur tryckskillnader som drivkrafter för luftströmning i spalter uppstår beskrivs i 2.2.

2.1 Grundläggande begrepp

Begreppen och sambanden nedan gäller för många vätskor och gaser men av uppenbara skäl skall fortsättningsvis förstås att det strömmande mediet är luft.

2.1.1 Bernoullis ekvation, stagnationstryck

Under förutsättningen av stationär, förlustfri och inkompressibel strömning beskriver Bernoullis ekvation sambandet mellan tryck, hastighet och höjd längs en strömlinje (med strömlinje avses en kurva där tangenten i varje punkt anger hastighetsvektorns riktning) (Eriksson och Norberg, 2006)

$$p + \frac{\rho \cdot u^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = konst. \quad (2.1)$$

p = statiskt tryck, det verkliga trycket [Pa]

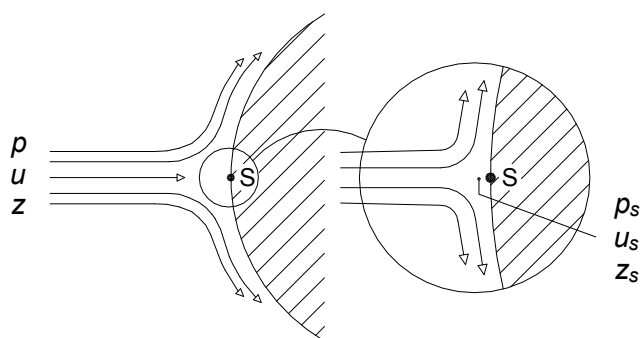
ρ = luftens densitet [kg/m^3]

u = luftens strömningshastighet [m/s]

g = tyngdaccelerationen 9.81 m/s^2

z = höjd över ett referensplan [m]

Termerna i ekvationen har alla dimensionen tryck och representerar olika former av energi (tryckenergi, rörelseenergi och potentiell energi) och det som ekvationen uttrycker är att energin konserveras i strömlinjen. Vanligen kallas $\rho \cdot u^2 / 2$ hastighetstryck alternativt dynamiskt tryck och $\rho \cdot g \cdot z$ höjdttryck. En konsekvens av Bernoullis ekvation är att maximalt statiskt tryck uppstår där strömningshastigheten blir noll, den så kallade stagnationspunkten. Betrakta Figur 2-1 som visar strömlinjerna kring en kropp i ett strömningsfält.



Figur 2-1 Strömlinjer kring en kropp i ett strömningsfält (Eriksson och Norberg, 2006).

För en strömlinje gäller enligt Bernoullis ekvation att

$$p + \frac{\rho \cdot u^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = p_s + \frac{\rho \cdot u_s^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_s \quad (2.2)$$

I stagnationspunkten S delar sig strömlinjerna och strömningshastigheten blir noll. Vid horisontell strömning ($z = z_s$) fås då

$$p_s = p + \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad (2.3)$$

Trycket som uppstår vid stagnationspunkten – p_s – kallas stagnationstryck och är alltså summan av det statiska och det dynamiska trycket i den ostörda strömningen.

2.1.2 Reynolds tal, laminär och turbulent strömning

Reynolds tal är centralt inom strömninglära och avgör om ett strömningstillstånd i ett rör, en spalt eller annat är laminärt, turbulent eller i en övergångsfas mellan dessa båda tillstånd. Talet är dimensionslöst och beräknas som (Kronwall, 1980)

$$\text{Re} = \frac{u_m \cdot d_H \cdot \rho}{\eta} = \frac{u_m \cdot d_H}{\nu} \quad (2.4)$$

u_m = medelhastighet hos luftströmmen [m/s]

d_H = hydraulisk diameter [m]

ρ = luftens densitet [kg/m^3]

η = luftens dynamiska viskositet [Ns/m^2]

ν = luftens kinematiska viskositet [m^2/s]

Laminär strömning kan beskrivas som ett stabilt och ”ordnat” tillstånd där luften strömmar i skikt som inte blandar sig med varandra. Vid detta strömningstillstånd är luftflödet direkt proportionellt mot drivande tryckdifferens. Dessutom saknar skrovligheten på de ytor inom vilka strömningen sker betydelse för luftflödet (inom rimliga gränser på skrovligheten). För strömning i rör gäller att den garanterat är laminär om Re understiger cirka 2100 (Eriksson och Norberg, 2006). Ett brukligt antagande vid rörströmning är att den kritiska punkten för laminär strömning inträffar då Re närmar sig 2300.

Turbulent strömning karakteriseras av att strömningen är virvelrik och orolig med stor blandningsförmåga. Flödet är i detta tillstånd proportionellt mot kvadratroten ur den drivande tryckdifferensen. Strömningens skrovlighet har vid turbulent flöde, till skillnad mot det laminära fallet, en betydelse för flödet. Strömning i rör är oftast fullt utvecklad turbulent om Re överstiger cirka 4000 (Eriksson och Norberg, 2006).

I övergångsstadiet - Re cirka 2300-4000 - finns inga entydiga strömningförhållanden utan i detta område sker en successiv övergång från laminär till turbulent strömning.

2.1.3 Hydraulisk diameter

Begreppet hydraulisk diameter d_H möjliggör flödesberäkningar för en generell tvärsnittsform trots att många teoretiska samband inom strömningsläran ursprungligen kommer från studier av strömning i cirkulära rör. Ett av de mest använda uttrycken för beräkning av hydraulisk diameter är formulerat som (Pinon et al, 2004)

$$d_H = \frac{4 \cdot A}{R} \quad (2.5)$$

A = sektionens tvärsnittsarea [m^2]

R = sektionens våta perimeter [m]

Våt perimeter skall förstås mot bakgrund av att det strömmande mediet kan vara vätska eller gas. Vid flöde av luft är den våta perimetern liktydig med sektionens inre omkrets. En cirkel med diametern d har då hydraulisk diameter

$$d_H = \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\pi \cdot d} = d \quad (2.6)$$

För en rektangulär kanal med sidor a och b gäller att

$$d_H = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (2.7)$$

För en spalt mellan två parallella ytor på avståndet b från varandra samtidigt som $a \gg b$ framgår att den hydrauliska diametern blir

$$d_H = 2 \cdot b \quad (2.8)$$

2.1.4 Absolut och relativ ytråhet

Absolut ytråhet ε beskriver hur skrovlig eller ojämn en yta är. Exempel på absolut ytråhet för några olika material ges i Tabell 2-1 (Kronwall, 1980). Relativ ytråhet definieras som förhållandet mellan absolut ytråhet och hydraulisk diameter (ε/d_H).

Tabell 2-1 Absolut ytråhet för några olika material (Kronwall, 1980).

Material	Absolut ytråhet ε [mm]
Glas	0.0010 - 0.0015
Gipsskiva	0.2 - 0.7
Betong gjuten mot stål	0.5 - 1.3
Betong gjuten mot plywood	1.3 - 2.0
Asfaboard	1.8 - 3.4

2.1.5 Tryckförlust

Vid strömning i en spalt kommer kontinuerliga tryckförluster att uppstå genom luftens friktion mot spaltytorna. Dessutom kommer punktvisa tryckförluster att uppstå vid t ex abrupta förändringar i spaltsektionen eller flödesriktningen. Dessa punktförluster kallas engångsförluster.

Tryckförlust på grund av friktion kan beräknas med hjälp av Darcy-Weisbach ekvation (Kronwall, 1980)

$$\Delta p_{\text{friktion}} = \lambda \cdot \frac{h}{d_H} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.9)$$

$\Delta p_{\text{friktion}}$ = tryckfall [Pa]

λ = friktionsfaktor [-]

h = spaltens höjd (längd) [m]

d_H = hydraulisk diameter [m]

ρ = luftens densitet [kg/m³]

u_m = medelhastighet hos luftströmmen [m/s]

Vid laminär strömning gäller som nämnts tidigare att friktionsförlusterna är oberoende av spaltväggarnas ytråhet. Ett approximativt uttryck för friktionsfaktorns storlek vid en generell, rektangulär tvärsnittsform med sidomått a respektive b är då (Kronwall, 1980)

$$\lambda = \frac{64}{\left[\frac{2}{3} + \frac{11}{24} \cdot \frac{b}{a} \left(2 - \frac{b}{a} \right) \right]} \cdot \text{Re} \quad (2.10)$$

Om $a \gg b$ (två parallella plan) ger ekvation (2.10) $\lambda = 96/\text{Re}$.

Vid turbulent strömning är friktionsfaktorn en funktion av både Reynolds tal och spaltens relativa ytråhet och kan inte beräknas lika enkelt som i det laminära fallet. I Kronwall (1980) återges (med hänvisning till Selander, 1978) samband för beräkning av friktionsfaktorn vid strömning mellan två parallella plan när $\text{Re} > 3500$

$$\lambda = \left[2 \cdot \log \left(\frac{-4.793}{\text{Re}} \cdot \log \left(\frac{10}{\text{Re}} + 0.2 \cdot \frac{\varepsilon}{d_H} \right) + 0.2698 \cdot \frac{\varepsilon}{d_H} \right) \right]^{-2} \quad (2.11)$$

Tryckförlust vid ett engångsmotstånd beräknas i allmänhet som (Kronwall, 1980)

$$\Delta p_{\text{engångsförlust}} = \xi \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.12)$$

ξ = förlustfaktor [-]

Storleken på förlustfaktorn beror på engångsmotståndets geometriska utformning och Reynolds tal. I litteraturen finns omfattande information om storleken på förlustfaktorer för böjar, sektionförändringar med mera. Tyvärr gäller värdena ofta endast för cirkulära

tvärsnittssektioner vid höga Reynolds tal. Det kan också påpekas att litteraturuppgifter gällande förlustfaktorer kan vara relaterade till hastighetstrycket före, i eller efter det aktuella engångsmotståndet.

Slutligen kan det observeras att även Darcy-Weisbach ekvation är möjlig att formulera i termerna av en förlustfaktor

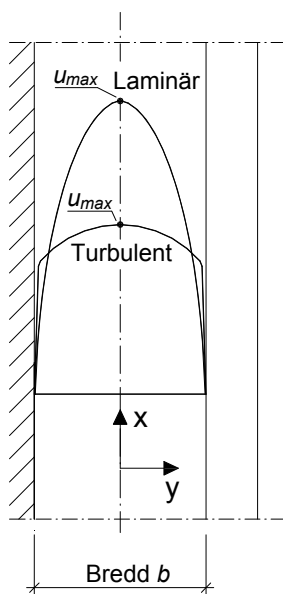
$$\Delta p_{\text{friktion}} = \xi_{\text{friktion}} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.13)$$

där förlustfaktorn beräknas som

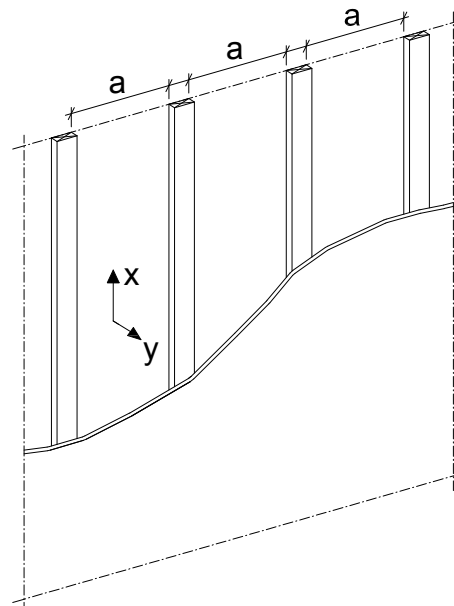
$$\xi_{\text{friktion}} = \lambda \cdot \frac{h}{d_H} \quad (2.14)$$

2.1.6 Hastighetsprofil

Vid fullt utvecklad laminär strömning fås en parabolisk hastighetsprofil medan profilen vid turbulent strömning är jämnare över tvärsnittet med mindre skillnad mellan topphastighet och medelhastighet, se Figur 2-2. Då hastighetsprofilens gradient mot begränsningsytorna är större vid turbulent strömning jämfört med laminär strömning är också friktionen och tryckförlusterna större. När strömningen är laminär går det analytiskt att visa att relationen mellan medelhastighet u_m och topphastighet u_{max} är $2/3$ vid strömning mellan två parallella plan och $1/2$ vid strömning i rör med cirkulärt tvärsnitt (Eriksson och Norberg, 2006). Inga uppgifter har hittats gällande relationen mellan medelhastighet och topphastighet vid laminär strömning i en rektangulär tvärsnittsgeometri där det inte gäller att $a \gg b$. En sådan geometri uppstår till exempel i spalter bakom ett fasadskikt som monteras mot stående läkt, se Figur 2-3. Resonemangsmässigt bör förhållandet mellan medelhastighet och topphastighet för detta fall ligga mellan $1/2$ och $2/3$ med en klar förskjutning åt det senare.



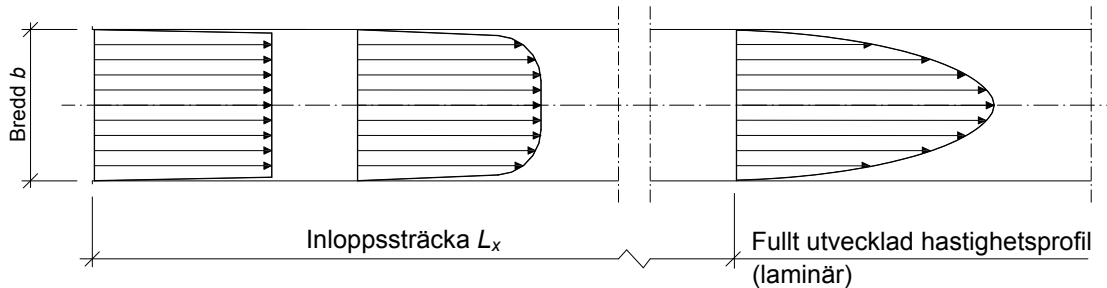
Figur 2-2 Hastighetsprofil vid laminär och turbulent strömning (principiell).



Figur 2-3 Spalt med rektangulär tvärsnittsgeometri

2.1.7 Inloppssträcka

Precis efter inströmningen till en spalt är hastighetsprofilen jämn men med en stor gradient mot spaltväggarna. Strömningen utvecklas sedan successivt och på ett visst avstånd från inloppet uppnås en konstant hastighetsprofil, se Figur 2-4.



Figur 2-4 Utveckling av hastighetsprofil längs inloppssträcka L_x vid laminärt strömningstillstånd.

Avståndet mellan inloppet och den position där hastighetsprofilen är fullt utvecklad benämns inloppssträcka L_x . Med hänvisning till amerikansk litteratur (Olson & Wright, 1990) ger Andersen (2000) följande överslagsmässiga uttryck för beräkning av inloppssträcka i en rektangulär spalt med bredd b ($a \gg b$) när strömningen är laminär

$$L_x \approx b \cdot \frac{Re_b}{50} \quad (2.15)$$

Re_b = Reynolds tal bestämt med d_H satt till b [-]

Vid en spaltbredd b om 25 mm och en lufthastighet u_m om 0.66 m/s (Re cirka 2200 och Re_b cirka 1100) ger ekvation (2.15) att inloppssträckan L_x är cirka 0.55 m.

Då hastighetsprofilen varierar längs inloppssträckan varierar också friktionsfaktorn. Ett medelvärde på friktionsfaktorn längs inloppssträckan vid laminär strömning kan beräknas som (Andersen, 2000)

$$\lambda_{L_x} \approx 1.6 \cdot \lambda \quad (2.16)$$

Friktionsfaktorn λ i (2.16) avser den fullt utvecklade, laminära strömningen.

För turbulent strömning anger Andersen (2000) att inloppssträckan är kortare än vid laminär strömning och att medelfriktionsfaktorn längs inloppssträckan är mycket nära friktionsfaktorn för den fullt utbildade turbulenta strömningen.

2.2 Drivkrafter för luftströmning

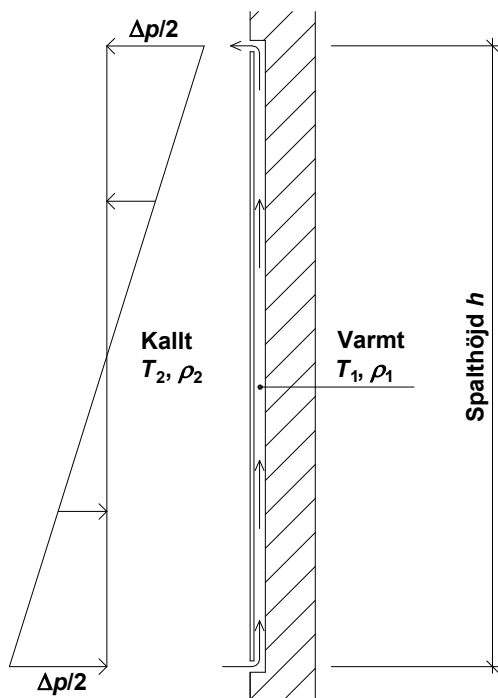
Drivkrafter för luftströmning i en vertikal spalt är lufttrycksskillnader mellan spaltens öppning i överkant respektive underkant. Lufttrycksskillnaderna skapas av vind och genom att luftens densitet varierar med temperatur och fuktinnehåll. De olika mekanismerna kan vid vissa tillfällen samverka för att vid andra tillfällen motverka varandra.

2.2.1 Termisk drivkraft

Termiska drivkrafter uppstår genom att luftens densitet minskar med ökad temperatur. För luftens torra densitet ρ_l [kg/m³] gäller att den är en funktion av luftens temperatur T [°C] (Nevander och Elmarsson, 1994)

$$\rho_l(T) = \frac{352.9}{T + 273.15} \quad (2.17)$$

Tryckförhållandena i en spalt med lika stor öppning upptill som nertill illustreras i Figur 2-5.



Figur 2-5 Termisk drivkraft i en öppen luftspalt.

Den totala tryckskillnaden Δp mellan spaltens öppningar kan skrivas

$$\Delta p = 2 \cdot g \cdot (\rho(T_2) - \rho(T_1)) \cdot \frac{h}{2} = 3462 \cdot \left(\frac{1}{T_2 + 273.15} - \frac{1}{T_1 + 273.15} \right) \cdot h \quad (2.18)$$

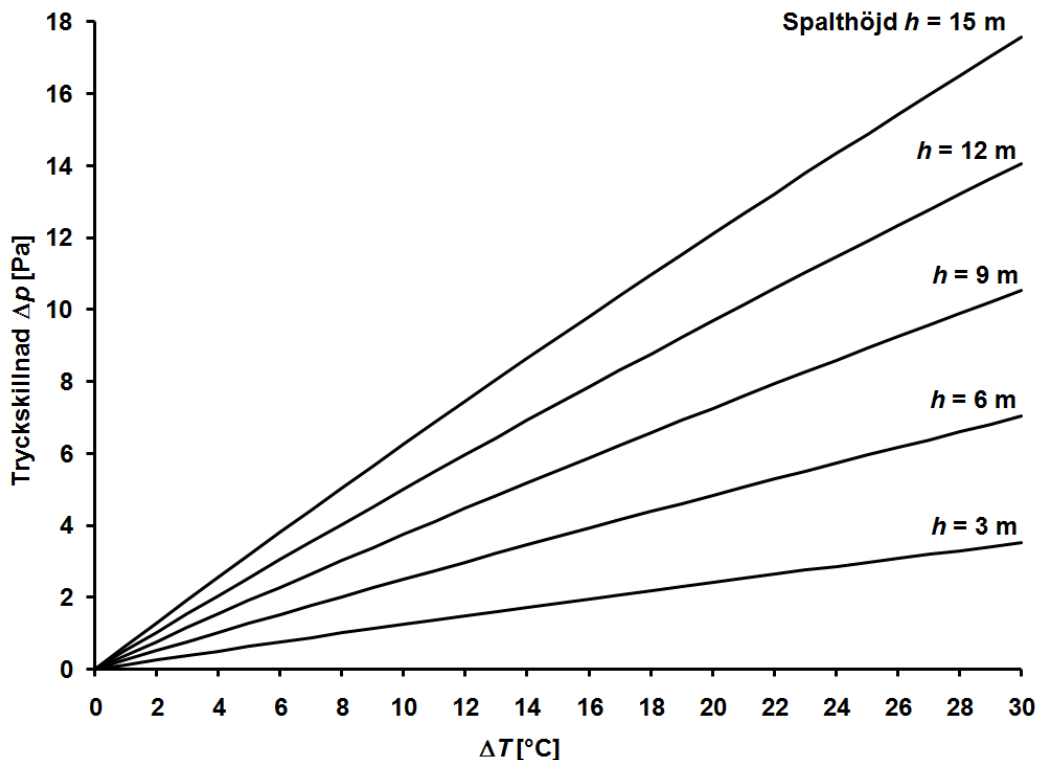
g = tyngdaccelerationen 9.81 m/s²

h = spalthöjd [m]

T_1 och T_2 = luftens temperatur på varma respektive kalla sidan [°C]

Förutsatt att endast termiska drivkrafter verkar blir luftströmningen i en vertikal spalt uppåtående om temperaturen i spalten är högre än utomhustemperaturen. Vid det omvända förhållandet blir luftströmningen nedåtående.

Figur 2-6 ger en uppfattning om storleksordningen på de tryckskillnader som skapas av temperaturskillnader.



Figur 2-6 Tryckskillnader på grund av temperaturskillnader i luft. Utomhusluften är satt till 10 °C och spaltluften är ΔT °C varmare.

2.2.2 Drivkraft beroende på variationer i fukttinnehåll

Luftens densitet minskar med ökat fukttinnehåll och med beaktande av både temperatur och fukt kan densiteten skrivas som (Nevander och Elmarsson, 1994)

$$\rho_l(T, \varphi) = \frac{352.9}{T + 273.15} - 1.607 \cdot \varphi \cdot v_s(T) \quad (2.19)$$

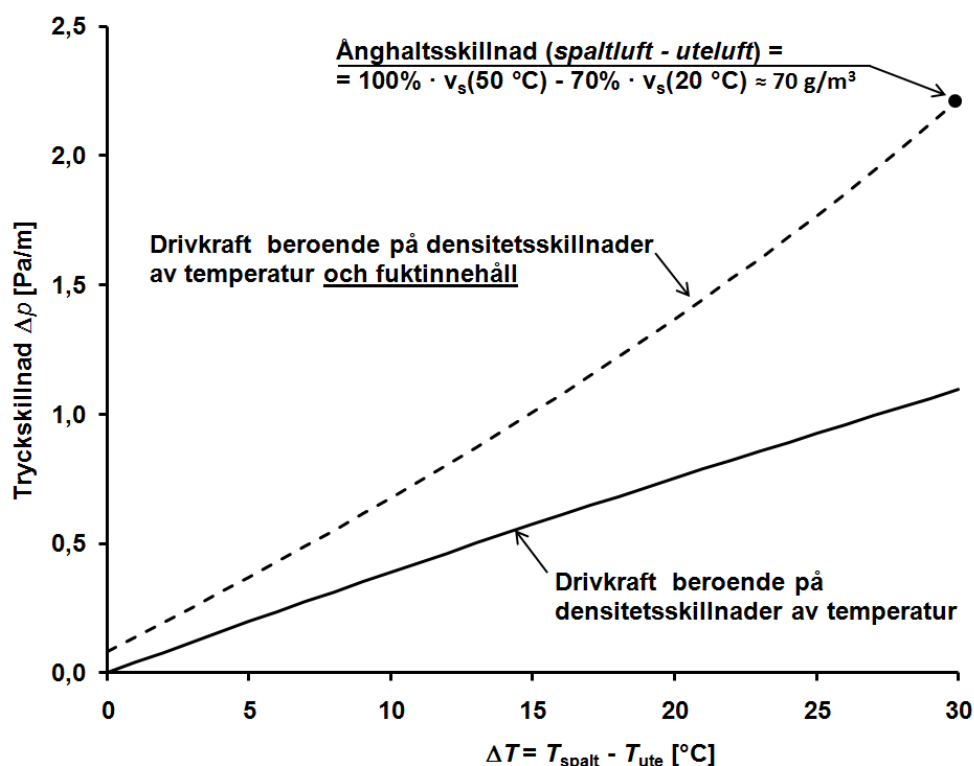
T = luftens temperatur [°C]

φ = luftens relativa fuktighet (RF) [%]

$v_s(T)$ = luftens mättnadsånghalt vid temperatur T [kg/m³]

De lufttryckskillnader som uppstår på grund av variationer i luftens fukttinnehåll är ofta små i jämförelse med dem som orsakas av skillnader i temperatur. I Straube et al (2004) visas att denna drivkraft trots allt kan vara av betydelse under vissa förutsättningar. En sådan förutsättning är om det i en spalt finns så stor fukttransport från omgivande, våta materialskikt att ånghalten (absolut fuktighet) i spalten blir avsevärt högre än den i uteluften. Antag till exempel att en spalt ventileras med uteluft som håller 20 °C och 70% RF. I Figur 2-7 visas drivkraften per höjdmeter spalt [Pa/m] om temperatur och RF i spalten är ΔT grader varmare

än uteluften respektive konstant 100%. Den heldragna linjen avser drivkraften när endast temperaturskillnaden beaktas medan den streckade linjen även inkluderar effekten av att spaltluften har en högre ånghalt än uteluften.



Figur 2-7 Tryckskillnader med och utan beaktande av att luftens densitet varierar med fuktinnehållet.

Skillnaderna i drivkraft mellan de två olika fallen är betydande vid stora temperaturskillnader ΔT . Det är sannolikt ovanligt med scenarier där stora ånghaltsskillnader mellan uteluft och spaltluft kan upprätthållas, annat än under mycket korta tidsperioder, i en spalt där möjlighet till luftväxling finns. Betydelsen av effekten bör i praktiska sammanhang därför vara liten.

2.2.3 Drivkraft av vind

Vindhastigheten fluktuerar kraftigt över tiden och variationer med $\pm 50\%$ kring medelvärdet är normala (Sandin, 1988) Vindens hastighet varierar också med höjd över marken och påverkas dessutom av omgivande bebyggelse och terrängförhållanden. Mätningar som sker på SMHIs väderstationer avser 10 minuters medelvärden mätta på 10 meters höjd, oftast i öppen terräng. För att beräkna vindhastighet på annan höjd och under andra terrängförhållanden än de som gäller vid en lokal väderstationen kan följande approximativa uttryck användas (Hagentoft, 2001)

$$U_z = U_m \cdot k \cdot z^a \quad (2.20)$$

U_z = vindhastighet på höjd z [m/s]

U_m = vindhastighet på 10 m höjd vid väderstation [m/s]

Koefficienterna k och a ges i Tabell 2-2.

Tabell 2-2 Koefficienter för beräkning av vindhastighet (Hagentoft, 2001).

Terrängbeskrivning	k	a
Öppen, plan terräng (open, flat country)	0.68	0.17
Öppen terräng med små spridda hinder (country with scattered wind breaks)	0.52	0.20
Småskalig bebyggelse, förorter (urban)	0.35	0.25
Stora byggnader, storstadscentra (city)	0.21	0.33

Vid vindanblåsning mot en byggnad kommer strömningen att bromsas upp på byggnadens lovartssida vilket resulterar i ett statiskt övertryck. När vinden böjer av kring byggnaden kommer vissa fasadytor att utsättas för ett statiskt undertryck (sug). Över- och undertryck relaterar här till det omgivande atmosfäriska trycket. För att beskriva tryckfördelningen på en fasadyta vid vindpåverkan används vanligen formfaktorn C_p [-]. Denna definieras som (Gudum, 2003)

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{\rho \cdot u_{ref}^2}{2}} \quad (2.21)$$

p = lokalt statiskt tryck mot fasaden [Pa]

p_{ref} = statiskt tryck i den fria luftströmmen på en referenshöjd [Pa]

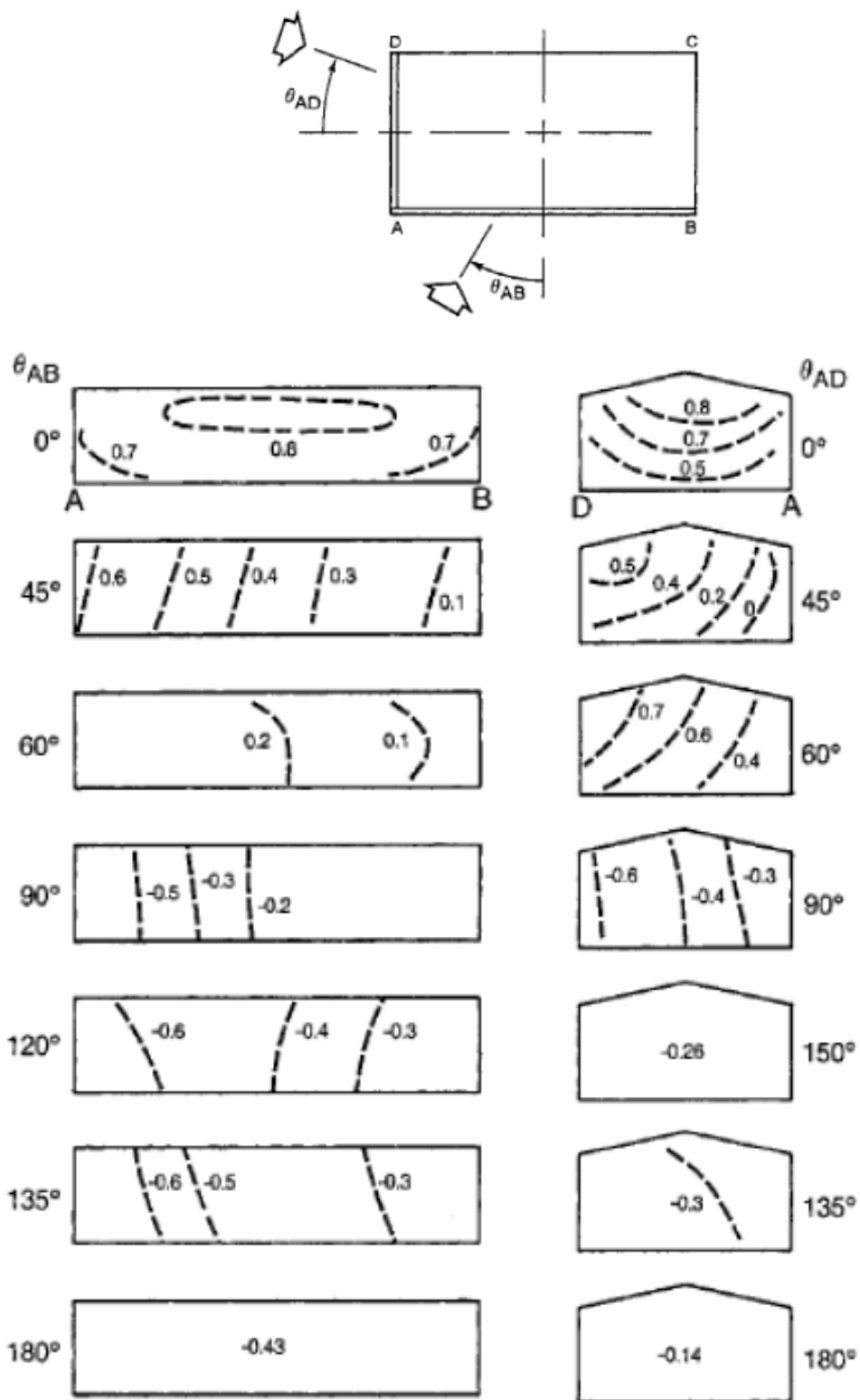
ρ = luftens densitet [kg/m^3]

u_{ref} = vindhastighet på en referenshöjd [m/s]

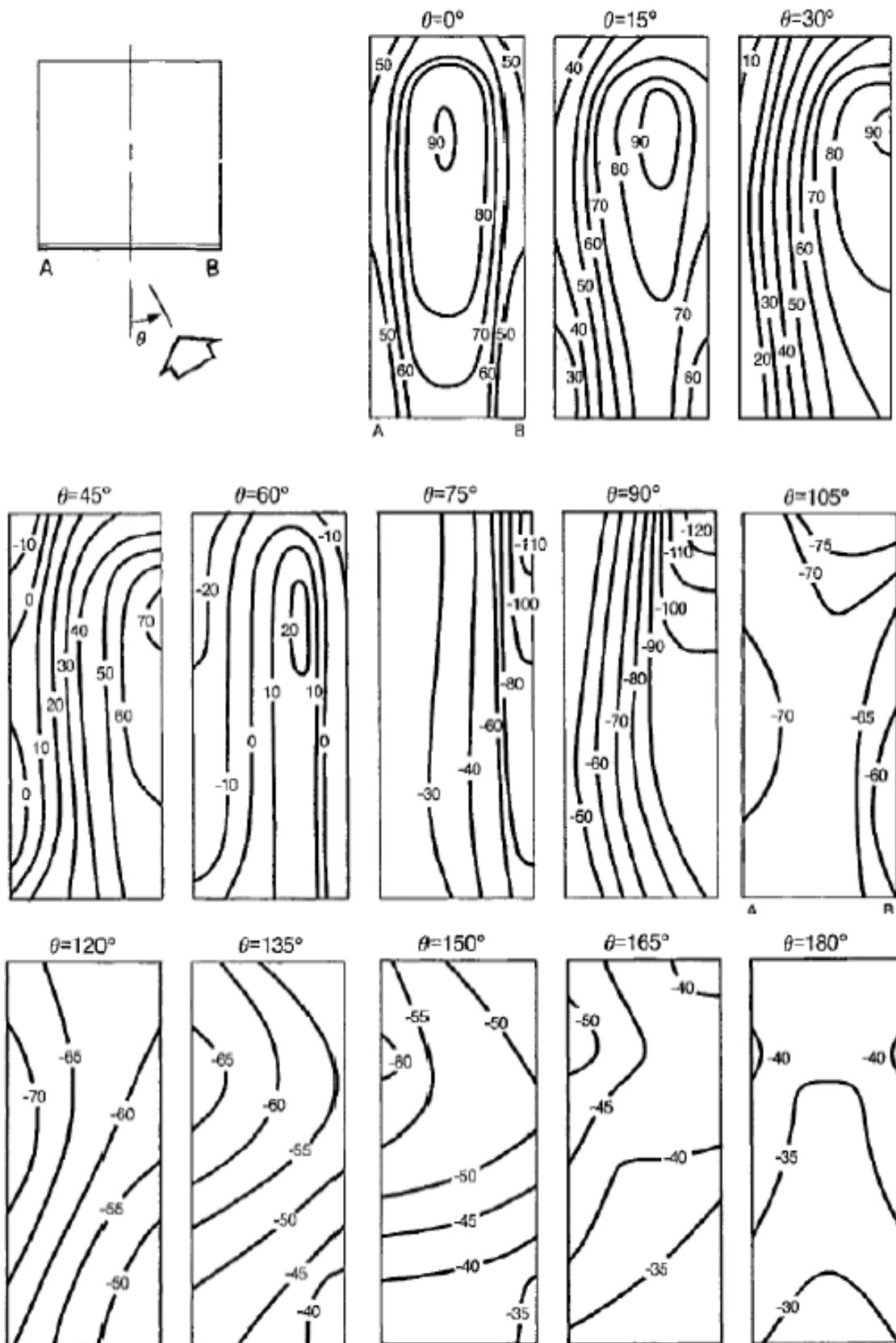
För varje anblåsningvinkel skiljer formfaktorn mellan fasadytor med olika orientering men även inom en och samma fasadyta. Förutom anblåsningvinkel påverkar byggnadens geometri, omgivningens topografi och närliggande bebyggelse formfaktorers variation. Det statistiska över- eller undertryck som verkar mot en fasad i en given punkt beräknas som

$$p = p_{ref} + C_p \cdot \frac{\rho \cdot u_{ref}^2}{2} \quad (2.22)$$

Det av vinden skapade statistiska trycket mot en fasad uttrycks alltså genom formfaktorn som en andel av vindens stagnationstryck på en specifik höjd. Vanligen tas formfaktorer fram genom vindtunnelförsök då sådana ger möjlighet till en systematisk variation av olika parametrar såsom anblåsningvinkel och byggnadsgeometri. Vid vindtunnelförsök är referenshöjden byggnadens höjd (ASHRAE, 2001). Figur 2-8 och Figur 2-9 visar exempel på formfaktorer från vindtunnelförsök på en låg respektive hög byggnad. Med låg byggnad avses en byggnad med höjd H och bredd B där det gäller att $H < 3 \cdot B$. Figuren för hög byggnad avser byggnader med förhållandet $H > 3 \cdot B$. Positiva värden anger övertryck och negativa värden anger undertryck.



Figur 2-8 Exempel på hur C_p varierar över fasaderna på en låg byggnad ($H < 3 \cdot B$) vid olika anblåsningvinklar (ASHRAE, 2001).



Figur 2-9 Exempel på hur C_p varierar över fasadytan på en hög byggnad ($H > 3 \cdot B$) vid olika anblåsningvinklar (ASHRAE, 2001). Värdena i figuren anger $C_p \cdot 100$.

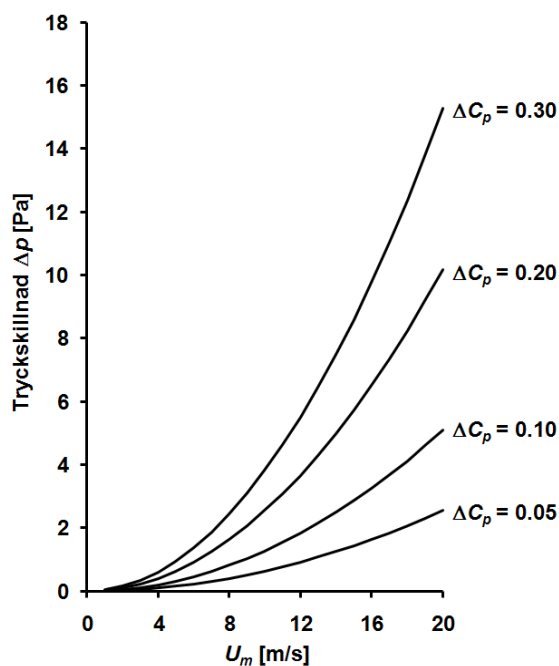
Formfaktorns variation innebär att det i samband med vind mot en byggnad kommer att skapas tryckskillnader mellan olika punkter på en fasad. Om formfaktorn vid en spalts öppningar A respektive B är kända kan tryckskillnaden därmed beräknas som

$$\Delta p = (C_{pA} - C_{pB}) \cdot \frac{\rho \cdot u_{ref}^2}{2} \quad (2.23)$$

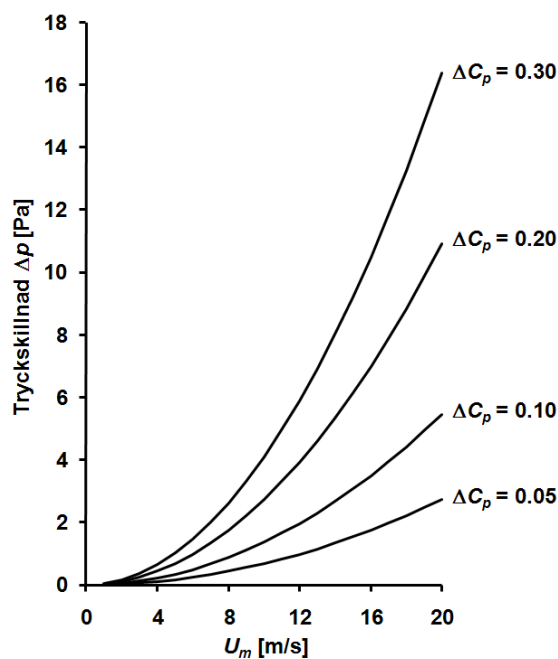
Vi en närmare betraktelse av Figur 2-8 och Figur 2-9 framgår det att:

- vindtrycken mot anblåst sida huvudsakligen är positiva om anblåsningvinkeln är mindre än 60° . När anblåsningvinkeln når $60-75^\circ$ sker ett omslag och vindtrycken övergår till att vara negativa.
- formfaktorn vid sockel tenderar att vara lägre än vid takfot. Vid positiva vindtryck blir då strömningsriktningen i en vertikal spalt uppifrån och ner och tvärtom vid negativa vindtryck. Vid samtidigt verkande termik kan naturligtvis strömningsriktningarna bli annorlunda.
- för låga byggnader är ΔC_p mellan takfot och sockel som störst vid vind rakt emot och då i storleksordningen 0.3-0.4 för kortsidan och < 0.1 för långsidan. Formfaktorns vertikala gradient minskar allteftersom anblåsningvinkeln ökar för att vid 90° vinkel vara nära noll.
- för höga byggnader uppstår maximalt positivt tryck på cirka $\frac{3}{4}$ höjd av byggnadshöjden. ΔC_p mellan takfot och sockel är, med något enstaka undantag, i storleksordning 0.1-0.2.

I Figur 2-10 och Figur 2-11 visas tryckskillnad Δp som funktion av vindhastighet U_m (medelvindhastighet under 10 minuter på 10 m höjd vid väderstation) för några olika värden på ΔC_p .



Figur 2-10 Tryckskillnader av vind – 3 m hög byggnad.



Figur 2-11 Tryckskillnader av vind – 12 m hög byggnad.

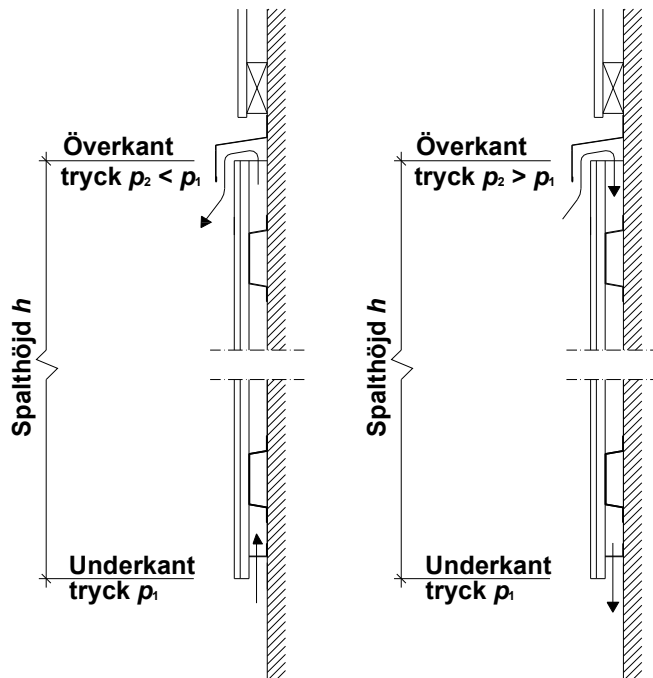
Förutsättningarna i Figur 2-10 är en låg byggnad (3 m) i förortsbebyggelse medan Figur 2-11 gäller för en hög byggnad (12 m) i storstadsmiljö. Enligt klimatdata som ges i Nevander och Elmarsson (1994) är medianvinden mätt i öppen terräng för många orter i Sverige < 5 m/s. Detta motsvarar en tryckskillnad mellan takfot och sockel som är mindre än 1 Pa för både den låga och den höga byggnaden om ΔC_p är cirka 0.3 eller lägre. Vid jämförelse med Figur 2-6 framgår att termik ger motsvarande tryckskillnad vid $\Delta T = 8$ °C om spalten är 3 meter hög respektive $\Delta T = 2$ °C om spaltens höjd är 12 meter.

Vindens betydelse som drivkraft för luftströmning i ytterväggsspalter har studerats av Andersen (2000) och av Sandin (1991). Den tidigare har genom litteraturstudier sammanställt resultat från olika experimentella undersökningar av formfaktorsskillnad mellan öppningarna på ventilerade ytterväggsspalter. I första hand avser de undersökningar som refereras vind rakt mot fasadytor nära byggnadsmitt på enplanshus. Andersen konstaterar stora skiljaktigheter i erhållna resultat, både gällande storlek på absolut formfaktorsskillnad $|\Delta C_p|$ (från < 0.1 upp till 0.5) och om resulterande tryckskillnad verkar för uppåtriktad eller nedåtriktad strömning i spalten. Sandin (1991) redovisar fältstudier av luft rörelser i spalter bakom skalmurar på en mindre byggnad. En slutsats från detta arbete är att vindens inverkan är svår att förutsäga då både vindhastighet och vindriktning ständigt varierar. Det konstateras också att obetydliga ändringar i vindriktning kan innebära att trycket i en specifik punkt pendlar mellan positiva och negativa värden, speciellt när vindriktningen är nära parallell mot fasaden.

Medan tryckskillnader av termik är relativt enkla att förutsäga är det uppenbart att vind ger upphov till tryckskillnader som är mer svårbestämbara. Detta beroende på vindens naturliga fluktuationer och på att de tryckmönster som skapas mot en byggnadsyta har en mycket komplex fördelning. Resultat från allmänna vindtunnelförsök ger en uppskattning av det senare men för en precis bestämning av formfaktorer, för en specifik byggnad med bestämd geometri och placering, krävs att byggnaden studeras i vindtunnelförsök, CFD-modelleras (Computational Fluid Dynamics) alternativt undersöks vid fältmätningar.

2.3 Beräkningsmodell för luftströmning i spalt

Luftströmning i en öppen, vertikal spalt uppstår när det finns en tryckskillnad Δp mellan spaltens öppningar se Figur 2-12.



Figur 2-12 Figuren illustrerar principiellt utförande av den spalt som studeras i detta arbete.

Spaltens överkant kan anta olika geometriska utformningar och underkanten kan vara helt öppen eller eventuellt kompletterad med en luftningsprofil (se Figur 2-19) som hinder mot skadedjur. Det luftspaltsbildande läktsystemet är antingen stående läkt eller liggande, perforerade stålprofiler (se Figur 2-18). Lufttrycksskillnaden $p_1 - p_2$ bestämmer riktningen på strömningen som kan vara från spaltens underkant till spaltens överkant eller tvärtom beroende på den aktuella trycksituationen. Fortsättningsvis i detta kapitel kommer spaltens underkant att benämnas inlopp och spaltens överkant utlopp.

Hur stor luftströmningen blir bestäms av att det totala tryckfallet över spalten måste vara lika med summan av de tryckfall som uppstår vid luftens väg från inlopp till utlopp. Tryckfall för en spalt, som visad i Figur 2-12, uppstår genom luftens friktion mot spaltytorna och genom engångsförluster vid:

- inströmning till spalten
- utströmning från spalten
- passage av eventuella horisontella, perforerade läkt
- passage av eventuell luftningsprofil
- passage av böj

Lufttrycksbalansen kan därmed tecknas

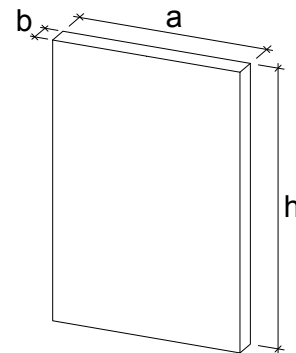
$$\Delta p_{driv} = \Delta p_{friktion} + \sum \Delta p_{engångsförluster} = \Delta p_{friktion} + \Delta p_{in} + \Delta p_{ut} + \sum \Delta p_{läkt} + \Delta p_{luftp} + \Delta p_{böj} \quad (2.24)$$

2.3.1 Begränsningar i modellen

Ett problem som uppkommer vid utveckling av lufttrycksbalansen ovan är att finna referenser som redovisar relevanta uppgifter på förlustfaktorer för de olika engångsmotstånd som finns i strömningsvägen. Många litteraturuppgifter avser rörströmning vid höga lufthastigheter långt över det laminära området. Vissa förenklingar och antaganden har därför varit nödvändiga vid val av förlustfaktorer.

2.3.2 Tryckfall på grund av friktion

För beräkning av tryckfall på grund av friktion används ekvation (2.9) enligt avsnitt 2.1.5. Vid utförande med stående läkt (se Figur 2-3) betraktas strömningen ske i en rektangulär kanal med höjd h och med sidomått a respektive b . Mått a är då spaltvidden och mått b är spaltbredden, se Figur 2-13. Fallet med horisontella, perforerade läkt antas motsvara strömning mellan två parallella plan där $a \gg b$. I Figur 2-13 är de uttryck som används för att kunna beräkna friktionsförluster enligt Darcy-Weisbach ekvation sammanställda.

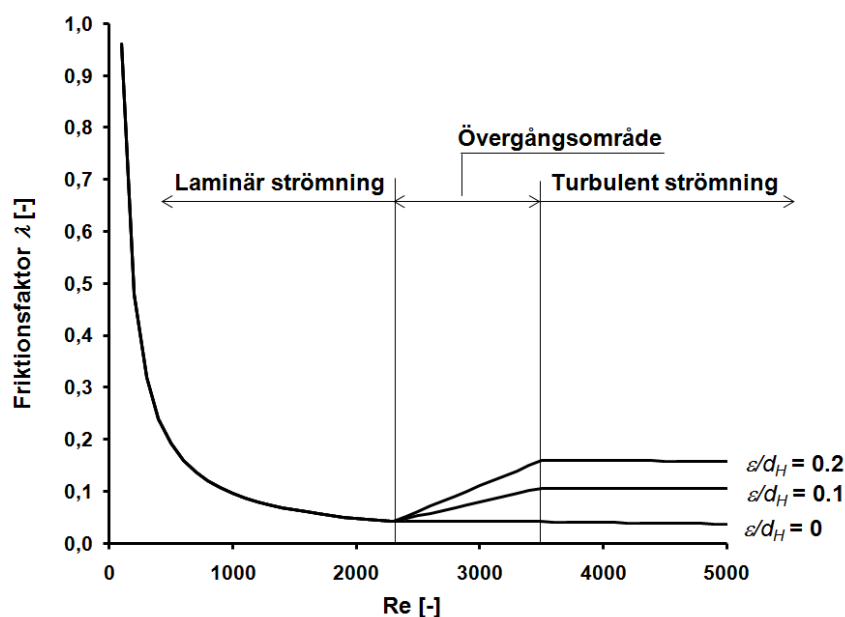


Figur 2-13 Måttdefinition.

Tabell 2-3 Sammanställning av ekvationer för beräkning av friktionsförluster.

Parameter	Spalt med horisontella läkt	Spalt med vertikala läkt
Hydraulisk diameter d_H	$2 \cdot b$	$\frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}$
Friktionsfaktor vid laminär strömning $Re \leq 2300$ $\lambda_{laminär}$	$\frac{96}{Re}$	$\frac{64}{\left[\frac{2}{3} + \frac{11}{24} \cdot \frac{b}{a} \left(2 - \frac{b}{a} \right) \right]} \cdot Re$
Friktionsfaktor i övergångsstadiet $2300 < Re < 3500$ $\lambda_{övergång}$	Linjär interpolering mellan friktionsfaktorns värde vid $Re = 2300$ respektive $Re = 3500$.	
Friktionsfaktor vid turbulent strömning $Re \geq 3500$ $\lambda_{turbulent}$	$\left[2 \cdot \log \left(\frac{-4.793}{Re} \cdot \log \left(\frac{10}{Re} + 0.2 \cdot \frac{\varepsilon}{d_H} \right) + 0.2698 \cdot \frac{\varepsilon}{d_H} \right) \right]^{-2}$	
Inloppssträcka då $Re \leq 2300$ L_x	$\frac{b \cdot u_m \cdot d_H \cdot \rho}{\eta \cdot 100}$	
Friktionsfaktor längs inloppssträcka då $Re \leq 2300$ λ_{Lx}	$1.6 \cdot \lambda_{laminär}$	
Inloppssträcka då $Re > 2300$ L_x	0	

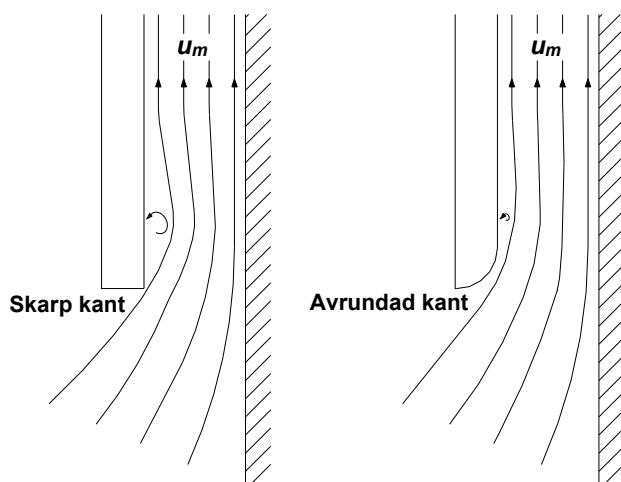
Av Figur 2-14 framgår hur friktionsfaktorn beror av Reynolds tal för några olika värden på spaltens relativa ytråhet ε/d_H . Relativ ytråhet 0.1 motsvarar materialytter med skrovlighet 2.5 mm i en spalt med bredd 25 mm.



Figur 2-14 Grafisk presentation av friktionsfaktorn λ .

2.3.3 Tryckfall vid in- och utlopp

Vid inloppet till en spalt strömmar luft från det fria in en volym med liten tvärsnittsarea. Denna plötsliga förändring i flödesvägen medför att strömningen tvingas till en abrupt insnävning där luftströmmen har svårt att följa konturen på fasadskiktet. När luftströmmen separerar från ytorna blir konsekvensen virvelbildning och tryckförlust. Avrundade kanter ger mindre separation och tryckförlust än skarpa kanter. Inströmningen till en spalt visas i Figur 2-15. Skarpa kanter kan förutsättas vara det normala för den typ av spalter som detta arbete handlar om.



Figur 2-15 Virvelbildning vid inloppet till en spalt.

Utströmningen från en spalt kan förutsättas ske utan betydande separation och tryckförlust (Andersen, 2000).

Tryckfallen vid in- och utlopp kan skrivas som (Kronwall, 1980)

$$\Delta p_{in} = \xi_{in} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.25)$$

respektive

$$\Delta p_{ut} = \xi_{ut} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.26)$$

u_m = medelhastighet hos luftströmmen efter inlopp respektive innan utlopp [m/s]

De värden på förlustfaktorerna ξ_{in} och ξ_{ut} som hittas i litteraturen anges ibland som konstanter och i andra fall som funktioner av Reynolds tal. Här återges ekvationer från (Kronwall, 1980) som gäller under förutsättning att in- och utlopp mynnar till det fria

$$\xi_{in} = 1 + K_c \quad (2.27)$$

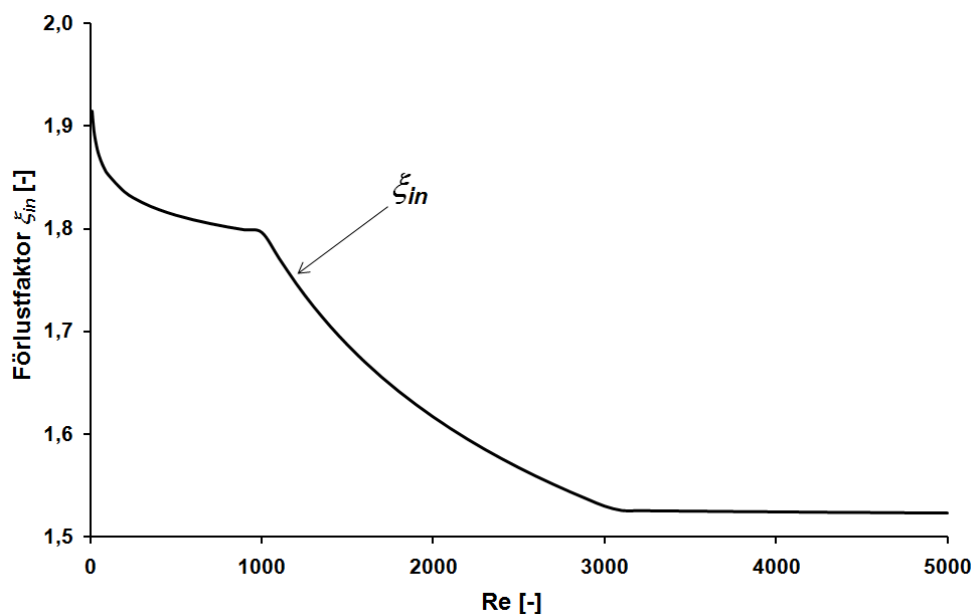
$$\xi_{ut} = 0 \quad (2.28)$$

Faktorn K_c (kontraktionsfaktor) varierar med Re enligt samband i Tabell 2-4.

Tabell 2-4 Samband mellan faktorn K_c och Re (Kronwall, 1980).

Re	K_c
< 1000	$0.98 \cdot Re^{-0.03}$
$1000 < Re < 3000$	$10.59 \cdot Re^{-0.374}$
> 3000	$0.57 \cdot Re^{-0.01}$

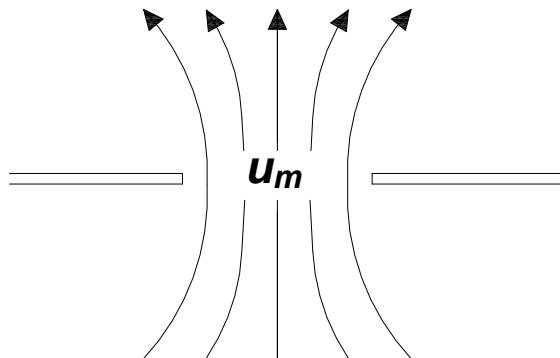
Förlustfaktorn ξ_{in} antar värden enligt Figur 2-16 vilka också är de som används i beräkningsmodellen.



Figur 2-16 Förlustfaktor ξ_{in} (Kronwall, 1980).

2.3.4 Tryckfall vid perforerade ställäkt

Figur 2-17 visar strömning av luft genom ett ensamt, runt och skarpkantat hål placerat i en tunn plåtskiva med stor utbredning.



Figur 2-17 Luftflöde genom ett hål i en tunn plåtskiva.

Luftflödet Q [m^3/s] vid tryckdifferens Δp [Pa] mellan skivans båda sidor kan beräknas som (Kronwall, 1980)

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (2.29)$$

C_d = flödeskoefficient [-]

A = hålets area [m^2]

ρ = luftens densitet [kg/m^3]

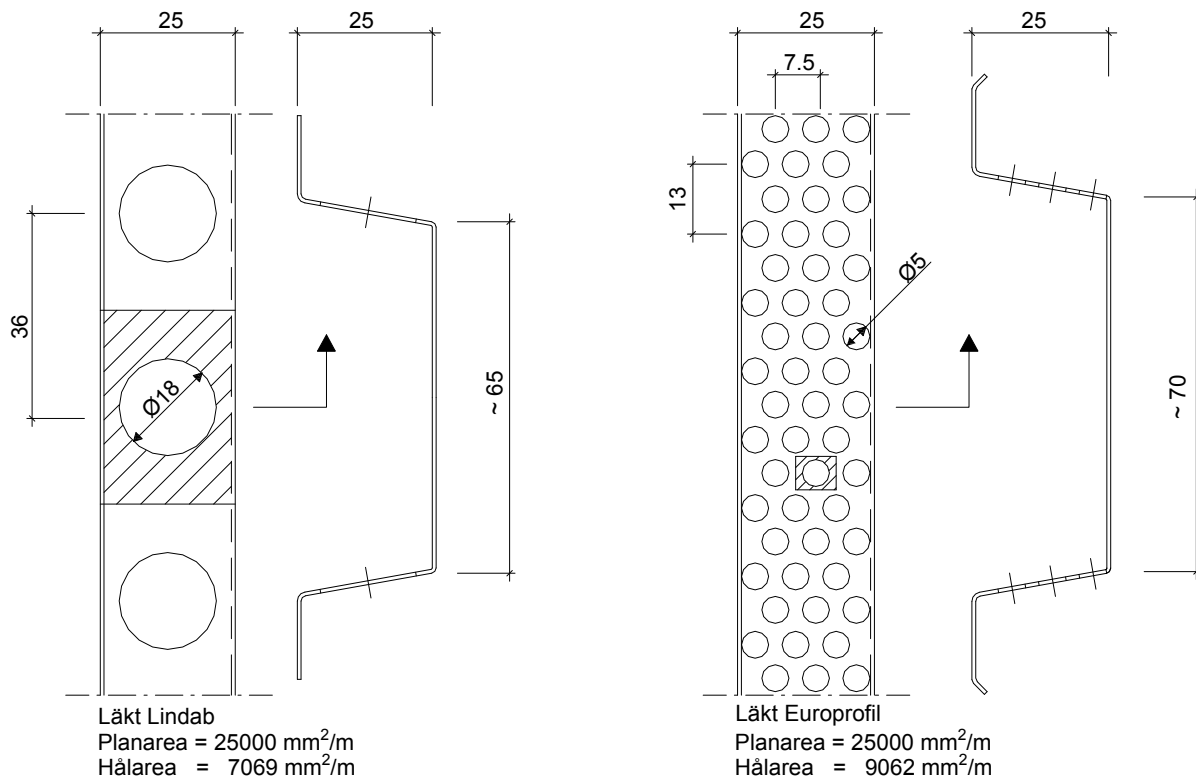
Arrangeras ekvationen om så kan tryckfallet beräknas ur ekvation (2.29)

$$\Delta p = \frac{1}{C_d^2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2 = \frac{1}{C_d^2} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.30)$$

u_m = medelhastighet hos luftströmmen i hålet [m/s]

Storleken på flödeskoefficienten C_d är ungefär 0.6 och termen $1/C_d^2$ kan tolkas som en förlustfaktor ξ med siffervärde 2.8 (Kronwall, 1980).

De perforerade läkten består av två tunna plåtar perforerade med cirkulära hål, se Figur 2-18. För båda läktyperna gäller att hålen ligger centrerade över varandra.



Figur 2-18 Perforerade plåtläkt i plan och sektion.

Förhållandet mellan hålarea och plåtareal är i dessa profiler avsevärt mycket större än i det fall som beskrivs i Figur 2-17. I syfte att uppskatta förlustfaktorn är en alternativ betraktelse att tänka sig luftströmmen i spalten som uppdelad i lameller där varje lamells planmått definieras med hjälp av avstånden mellan närliggande hål i läkten. De skrafferade områdena i Figur 2-18 exemplifierar principen. Det är då möjligt att jämföra med storlek på förlustfaktor som erhålls vid en strypfläns i en rörkanal, se Tabell 2-5 (Hörup Sörensen, 2004). Förlustfaktor i tabellen relaterar till lufthastigheten i strypflänsen.

Tabell 2-5 Förlustfaktor vid skarpkantad strypfläns (Hörup Sörensen, 2004).

			$A_{h\ddot{a}l}/A_1$	$\xi_{h\ddot{a}l}$
			~ 0	2.50
			0.2	1.86
			0.4	1.21
			0.6	0.64
			0.8	0.20
$A_1 = A_2$ $v_1 = v_2$			1.0	0

För läkt av fabrikat Lindab är förhållandet mellan hål- och lamellarea 0.283 och för läkt av fabrikat Europrofil är motsvarande förhållande 0.362. Tabell 2-5 ger då förlustfaktorn $\xi_{h\ddot{a}l}$ 1.59 respektive 1.33. Vid luftpassage av ett läkt är det två plåtar som skall passeras. Det är inte självklart vilken betydelse detta har för den totala förlustfaktorn. Här görs antagandet att plåtarna inte påverkar varandra och att tryckfallet över ett läkt därmed kan skrivas som

$$\Delta p_{\text{l\ddot{a}kt}} = 2 \cdot \xi_{h\ddot{a}l} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} = \xi_{\text{l\ddot{a}kt}} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.31)$$

u_m = medelhastighet hos luftströmmen vid passage av hålen i läktet [m/s]

Förlustfaktorn för då båda läkttyperna blir då

$$\xi_{läkt} = 2 \cdot 1.33 = 2.66 \text{ för Europrofil}$$

$$\xi_{läkt} = 2 \cdot 1.59 = 3.18 \text{ för Lindab}$$

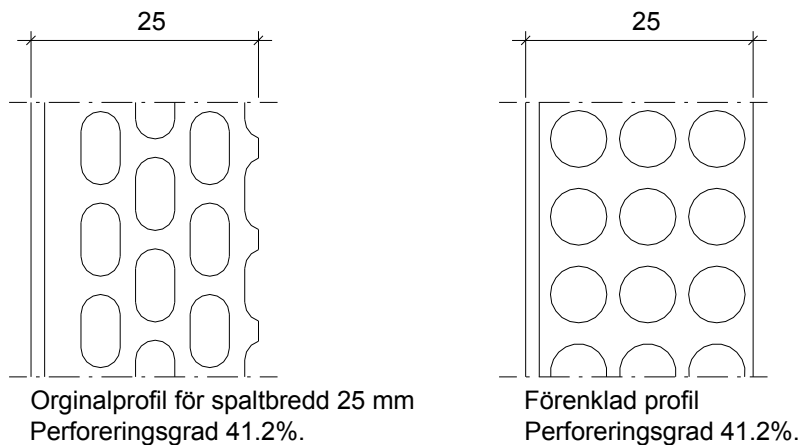
2.3.5 Tryckfall vid luftningsprofil

Luftningsprofil kan användas i underkant på spalter, dels av estetiska skäl men även som skydd mot skadedjur. Figur 2-19 visar luftningsprofil vid spaltavslut ovanför fönster.



Figur 2-19 Ventilerad putsfasad med STO luftningsprofil vid spaltavslut ovanför fönster.

I beräkningsmodellen förutsätts en luftningsprofil av fabrikat STO. Profilen är av plast och perforerad med tätt sittande, avlånga hål. Originalutseende och ett, av beräkningstekniska skäl, förenklat utseende med cirkulära hål visas i Figur 2-20.



Figur 2-20 Luftningsprofil i vy ovanifrån.

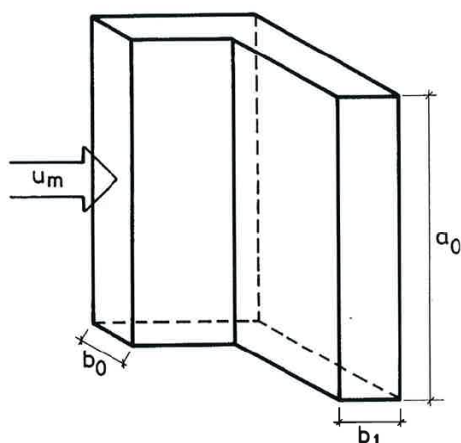
Med samma betraktelsesätt som för plåtläkten erhålls förhållandet mellan hål- och lamellarea som 0.412. Tabell 2-5 ger förlustfaktor $\xi_{h\ddot{a}l} = \xi_{luftp} = 1.18$. Tryckfallet över profilen kan skrivas som

$$\Delta p_{luftp} = \xi_{luftp} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.32)$$

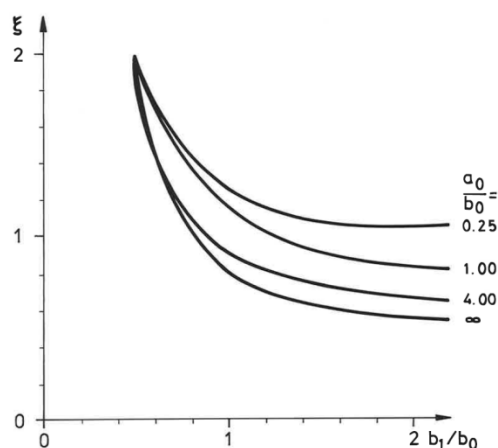
u_m = medelhastighet hos luftströmmen vid passage av hålen i luftningsprofilen [m/s]

2.3.6 Tryckfall vid böj

Vid passage i spaltens överkant uppstår förluster om luftströmmen tvingas böja, se Figur 2-12. Kronwall (1980) återger ekvationer från rysk litteratur (Idelchik, 1960) för tryckförlusten som uppkommer vid en böj om 90° när tvärsnittsformen är rektangulär och Reynolds tal överstiger 3000, se Figur 2-21. I samma referens anges att två eller fler böjar kan hanteras genom att summera förlustfaktorerna förutsatt att avståndet mellan dem är tillräckligt långt, ungefär 4 gånger spaltbredden (b_0 i Figur 2-21) eller mer. Vid kortare avstånd mellan böjarna blir den totala förlustfaktorn något lägre än summan av förlustfaktorer (inga siffervärden ges).



Figur 2-21 Rektangulär böj om 90° (Kronwall, 1980).



Figur 2-22 Förlustfaktor för beräkning av $\xi_{b,90}$ (Kronwall, 1980) .

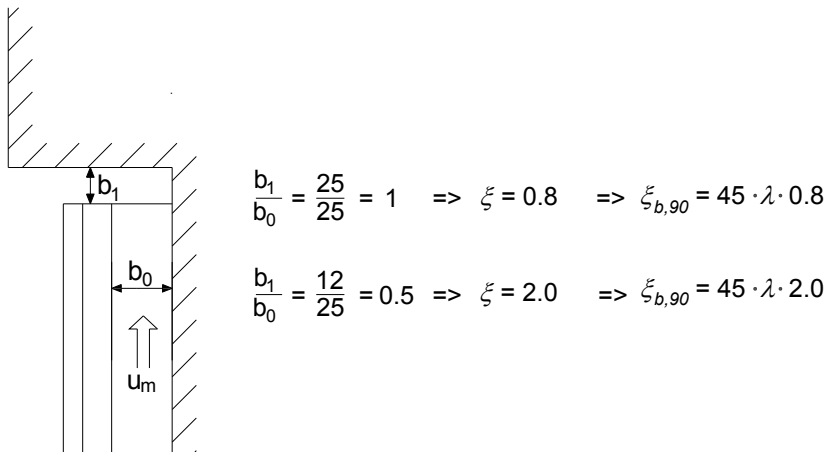
Förlustfaktorn $\xi_{b,90}$ beräknas som

$$\xi_{b,90} = 45 \cdot \lambda \cdot \xi \quad (3000 < Re < 40000) \quad (2.33)$$

ξ = en förlustfaktor som beror av förhållande a_0/b_0 respektive b_1/b_0 , se Figur 2-22 [-]

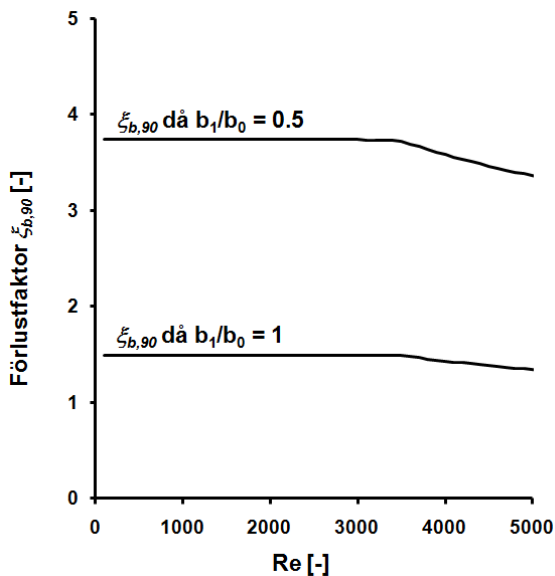
λ = friktionsfaktorn i kanalen som leder fram luftströmmen till böjen [-]

Två principiella varianter på utförande med böj i spaltens överkant återges i Figur 2-23. I det ena fallet är öppningsmåtten lika med spaltbredden och i det andra fallet är öppningsmåtten begränsat till halva spaltbredden. Notera att diagrammet i Figur 2-22 inte redovisar ξ för ett förhållande mellan b_1 och b_0 som är mindre än cirka 0.5 och att lutningen på kurvan är så brant att en uppskattning är svår att göra.

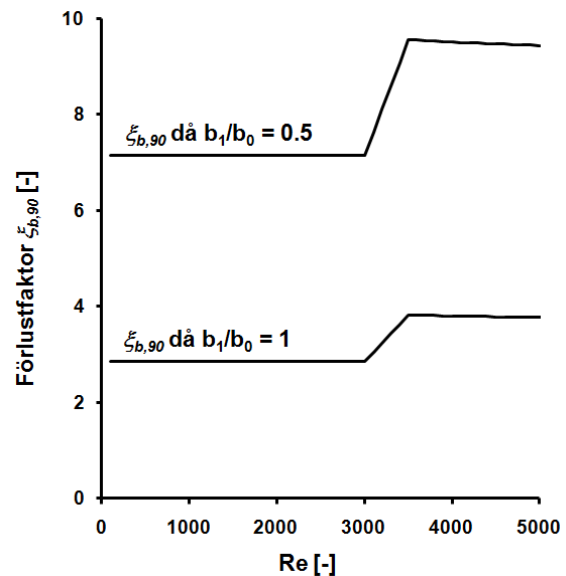


Figur 2-23 Två olika utföranden med böj om 90° i spaltens överkant. Beteckningar enligt Figur 2-21. Värden på ξ är erhållna ur Figur 2-22 med $a_0 \gg b_0$.

Ekvationen för $\xi_{b,90}$ är giltig för det turbulenta strömningsområdet. Tyvärr har det inte gått att finna litteratur som ger specificerade förlustfaktor för rektangulära böjar i det laminära området. Då friktionsfaktorn λ ingår som en parameter i beräkningen av förlustfaktorn inses vid studie av Figur 2-14 att konsekvenserna av ett antagande att uttrycket även kan tillämpas vid laminär strömning blir stora (orimliga) vid låga Reynolds tal. Här görs i stället antagandet att förlustfaktorns värde när Reynolds tal är 3000 kan utvidgas till att gälla som en konstant för $Re < 3000$. Med detta antagande som förutsättning visar Figur 2-24 och Figur 2-25 storleken på förlustfaktorn som funktion av Re för de två utförandena i Figur 2-23 vid relativ ytråhet $\varepsilon/d_H = 0$ respektive $\varepsilon/d_H = 0.1$. Lägg märke till att skalorna på värdeaxeln i de båda diagrammen skiljer.



Figur 2-24 Förlustfaktor $\xi_{b,90}$ då $\varepsilon/d_H = 0$.



Figur 2-25 Förlustfaktor $\xi_{b,90}$ då $\varepsilon/d_H = 0.1$.

2.3.7 Ekvation för beräkning av luftflöden

Ekvation (2.24) kan nu, med beaktande av att $\xi_{ut} = 0$, utvecklas till

$$\Delta p_{driv} = \left[\lambda \cdot \frac{h}{d_H} \cdot u_{m,spalt}^2 + \xi_{in} \cdot u_{m,spalt}^2 + n \cdot \xi_{läkt} \cdot u_{m,läkt}^2 + \xi_{luftp} \cdot u_{m,luftp}^2 + \xi_{b,90} \cdot u_{m,spalt}^2 \right] \cdot \frac{\rho}{2} \quad (2.34)$$

Eftersom medelhastigheten hos luftströmmen u_m [m/s] är kvoten mellan flöde Q [m³/s] och tvärsnittsarea A [m²] kan ekvationen omformuleras till

$$\Delta p_{driv} = \left[\left(\lambda \cdot \frac{h}{d_H} + \xi_{in} + \xi_{b,90} \right) \cdot \left(\frac{1}{A_{spalt}} \right)^2 + n \cdot \xi_{läkt} \cdot \left(\frac{1}{A_{läkt}} \right)^2 + \xi_{luftp} \cdot \left(\frac{1}{A_{luftp}} \right)^2 \right] \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{2} \quad (2.35)$$

eller

$$\Delta p_{driv} = \Omega \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{2} \quad (2.36)$$

där

$$\Omega = \left(\lambda \cdot \frac{h}{d_H} + \xi_{in} + \xi_{b,90} \right) \cdot \left(\frac{1}{A_{spalt}} \right)^2 + n \cdot 2 \cdot \xi_{läkt} \cdot \left(\frac{1}{A_{läkt}} \right)^2 + \xi_{luftp} \cdot \left(\frac{1}{A_{luftp}} \right)^2 \quad (2.37)$$

För beräkning av Ω [m⁻⁴] gäller att

h = spaltens höjd [m]

A_{spalt} = spaltens tvärsnittsarea [m²]

n = antal horisontella läkt

$A_{läkt}$ = ett läkts hålarea [m²]

A_{luftp} = luftningsprofilens hålarea [m²]

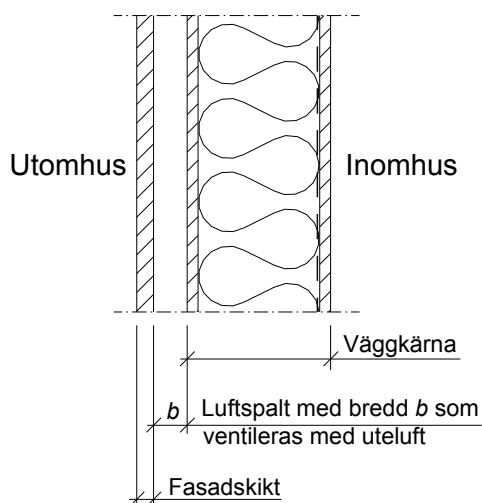
Alla övriga beteckningar enligt tidigare avsnitt i detta kapitel.

På andra ställen i detta arbete kommer diagram som visar flöde eller hastighet som funktion av drivkraft för olika spaltutformningar att återges. Den principiella beräkningsgången vid framtagningen av diagrammen har varit att ansätta ett litet luftflöde och därefter räkna fram tillhörande drivkraft. Genom att upprepa denna process många gånger samtidigt som flödet successivt ökats har till slut tillräckligt med punkter för att kunna rita en kurva som beskriver relationen mellan tryck och flöde (alternativt lufthastighet) erhållits. Ett omvänt förfarande där flödet skall beräknas vid en känd drivkraft leder till omständliga, iterativa beräkningar eftersom flera av termerna i Ω är hastighetsberoende.

3 Luftspalters värme- och fuktbalans

Med en öppen och uteluftsventilerad luftspalt bakom fasadskiktet på en yttervägg kan fukt avledas från materialskikt i väggen genom fuktkonvektion. I kapitlet redovisas ekvationer och samband för en luftspalts värme- och fuktbalans för att kvantitativt kunna bedöma luftspaltens konvektiva fuktransportförmåga.

Den principiella uppbyggnaden av ytterväggen som studeras framgår av Figur 3-1. Väggen kan betraktas som uppbyggd av tre olika delar; ett fasadskikt och en väggkärna som är åtskilda av en mellanliggande och ventilerad spalt. Som illustrerad i figuren är väggkärnan någon typ av isolerad regelstomme (med en plastfolie på den varma sidan om isoleringen) beklädd med skivmaterial på in- och utsida.



Figur 3-1 Principiell vägguppbyggnad.

Temperaturen i spalten kommer att bestämmas av den inströmmande luftens temperatur och det värmeutbyte som sker mellan spaltluften och spaltväggarna vid luftens transport längs spalten. Finns det lufttätheter så att värme konvektivt kan transporteras mellan spalten och inomhusmiljön påverkar även detta spalttemperaturen. Fuktbalansen i spalten kommer att bestämmas av den inströmmande luftens fuktinnehåll och fuktutbytet mellan spaltluften och spaltväggarna. På samma sätt som i fallet med temperaturen kan eventuella lufttätheter påverka balansen genom konvektiva flöden mellan inomhusluften och spalten. Om spalten tillförs fritt vatten via otätheter i fasadskiktet eller andra läckagepunkter måste detta naturligtvis beaktas.

Både temperatur- och fuktberäkningen involverar ett flertal transportmekanismer. För att utläggningen inte skall bli allt för omfattande förutsätts läsaren någorlunda bekant med de fysikaliska grunderna för värme- och fuktransport. Som hjälp för förståelsen ges dock inledningsvis några viktiga teoretiska samband i valda delar. För den som önskar fördjupa sina kunskaper kan Claesson et al (1984), Hagentoft (2001), Nevander och Elmarsson (1994) och Sandin (1988) vara lämplig litteratur.

3.1 Fysikaliska grunder

3.1.1 Värmetransport

Enligt termodynamikens lagar går värme alltid från ett område med högre temperatur till ett område med lägre. Värmetransporten kan ske genom de tre grundläggande mekanismerna ledning, konvektion och strålning. Ett ytterligare sätt för värme att transporteras är genom fuktvandring varvid (latent)värme frigörs vid kondensation eller binds vid avdunstning.

För endimensionell ledning genom ett materialskikt kan värmeflödet q_l [W/m^2] vid stationära förhållanden tecknas som

$$q_l = \lambda(u, T) \cdot \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (3.1)$$

$\lambda(u, T)$ = värmekonduktivitet (λ -värde) som varierar med materialets fukttinnehåll u och temperatur T [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]

$T_1 - T_2$ = temperaturskillnad mellan materialskiktets ytor [K]

d = tjocklek hos materialskiktet [m]

Värmeflödet är alltså proportionellt mot temperaturskillnaden $T_1 - T_2$ och omvänt proportionellt mot materialskiktets tjocklek d . Flödets riktning är från yta med hög temperatur till yta med lägre temperatur. Värmekonduktiviteten λ ökar med ökat fukttinnehåll och normalt varierar värmekonduktiviteten även med temperaturen. För byggnadsmaterial och inom de begränsade temperaturområden dessa används försummas dock temperaturberoendet (undantag är till exempel brandisolering och vissa tillämpningar av teknisk isolering). I byggnadstekniska tillämpningar och applikationer avses med värmeledning oftast den totala värmetransporten genom ett materialskikt och inbegriper för porösa material förutom renodlad ledning även strålnings- och konvektionsprocesser i materialets porer. Dessa senare komponenter är därför som regel inkluderade i λ -värdet så som det används i värmeledningsekvationen.

Vid beräkningar av värmeflöde är begreppet värmemotstånd R [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] användbart. För ett materialskikt definieras R som

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.2)$$

För en konstruktion med till exempel tre skikt och med temperaturskillnaden ΔT från den ena begränsningsytan till den andra gäller då att

$$q_l = \frac{\Delta T}{d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + d_3/\lambda_3} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T}{\Sigma R} \quad (3.3)$$

Vid konvektiv värmeöverföring transporteras värme av en strömmande fluid (en vätska eller en gas) som rör sig över en fast yta (förutsatt att det finns en temperaturskillnad mellan ytan och fluidet). Transportriktningen bestäms av temperaturgradienten och kan vara från fluidet till ytan eller tvärtom. Det i sammanhanget intressanta förhållandet är det värmeutbyte som sker när luft rör sig parallellt med utsidan på en yttervägg och utmed materialytorna i en luftspalt. Sådana luftförelser kan vara påtvingade av vind, en följd av densitetsskillnader i

luften (benämns fortsättningsvis egenkonvektion) eller en mix av påtvingad konvektion och egenkonvektion. Det konvektiva värmeflöde q_k [W/m^2] som uppstår är proportionellt mot temperaturskillnaden mellan yta och luft. Flödet från luften till ytan skrivs som

$$q_k = \alpha_k \cdot (T_l - T_y) \quad (3.4)$$

α_k = konvektiv värmeöverföringskoefficient [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

T_l = lufttemperatur [K]

T_y = yttemperatur [K]

Den konvektiva värmeöverföringskoefficienten inkluderar den totala värmetransporten genom ledning och konvektion mellan yta och luft. Värmeöverföringen sker över ett skikt i luften vars tjocklek definieras av avståndet från ytan till en punkt i luften där temperaturen T_l är opåverkad av yttemperaturen (termiskt gränsskikt). Värmeöverföringskoefficienten är alltså i motsats till λ -värdet inte en materialstorhet utan beror istället på de termiska egenskaperna hos det luftskikt som gränsar till materialet.

Storleken på den konvektiva värmeöverföringskoefficienten är starkt beroende på hur luften strömmar längs med ytan. För det teoretiskt renodlade fallet att luftrörelsen sker utmed en isoterm och vertikal yta med höjden h [m] och enbart är en följd av egenkonvektion anger Claesson et al (1984) följande empiriska formler

$$\alpha_k \cong 1.5 \cdot \left(\frac{|T_l - T_y|}{h} \right)^{1/4} \quad \text{om strömningen är laminär} \quad (3.5)$$

$$\alpha_k \cong 1.5 \cdot |T_l - T_y|^{1/3} \quad \text{om strömningen är turbulent} \quad (3.6)$$

I byggnadstekniska sammanhang uppträder sällan renodlade fall med egenkonvektion utan störningar. På ytor inomhus finns till exempel luftrörelser orsakade av friskluftsventilation och på utvändiga ytor finns påtvingad konvektion från vind. Den praktiska konsekvensen av detta är att α_k är större än vad som kan beräknas utifrån formlerna ovan. För ytterväggar på en byggnad utsatta för vindhastighet u [m/s] tillämpas ofta följande samband

$$\alpha_k \cong 5 + 4.5 \cdot u - 0.14 \cdot u^2 \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad \text{för lovartssida vid } u \leq 10 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

$$\alpha_k \cong 5 + 1.5 \cdot u \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad \text{för läsida vid } u \leq 8 \text{ m/s} \quad (3.8)$$

Ekvationerna ovan ger att värdet på α_k aldrig understiger cirka $5 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ på utsidan av en yttervägg. Brown (1956) har i undersökningar funnit ett medelvärde på α_k vid utvändiga vertikala ytor på strax under 10. Samma referens fann även att storleken på den konvektiva värmeöverföringskoefficienten vid vertikala ytor under klara nätter var $7 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

För egenkonvektion vid vertikala, ej vindutsatta innerytor är det brukligt att använda nedanstående uttryck för att beräkna α_k

$$\alpha_k \cong 2 \cdot |T_l - T_y|^{1/4} \quad (3.9)$$

Luftförelser i en ventilerad ytterväggsspalt kan vara orsakade av egenkonvektion, av påtvingad konvektion från vind eller en mix av egenkonvektion och påtvingad konvektion. I litteraturen går det att finna alternativa uttryck för α_k i ventilerade spalter. En formel som gäller vid påtvingad konvektion och laminär strömning mellan två parallella plan ges i Kays & Crawford (1980)

$$\alpha_k = 3.66 + \frac{0.104 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot b/h}{1 + 0.016 \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot b/h)^{0.8}} \quad (3.10)$$

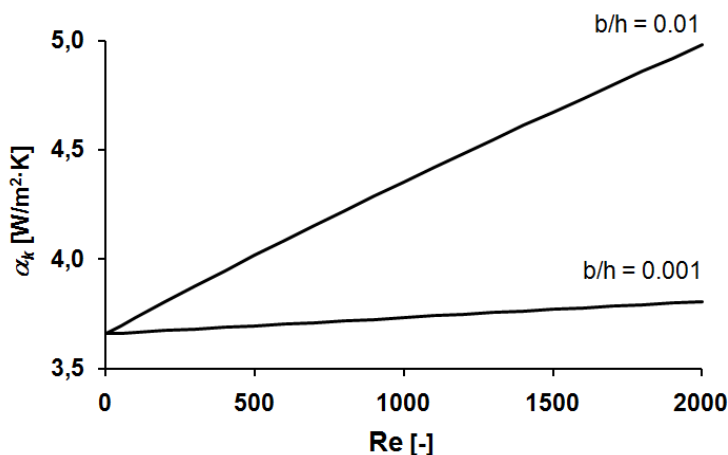
Re = Reynolds tal, se ekvation (2.4) [-]

Pr = Prandtls tal, ~ 0.72 vid -25 °C till $+100$ °C [-]

b = avstånd mellan de parallella planen [m]

h = längden på flödesvägen [m]

Figur 3-2 visar hur α_k enligt ekvation (3.10) varierar med Reynolds tal för två olika förhållanden mellan b/h .



Figur 3-2 α_k enligt ekvation (3.10) vid påtvingad konvektion och laminär strömning.

Enligt både Claesson et al (1984) och Nevander och Elmarsson (1994) finns det osäkerhet i alla formler för konvektiv värmeöverföring när de tillämpas på fall som inte är renodlade. I den senare referensen påpekas också att den konvektiva värmeöverföringskoefficienten α_k beror på luftens hastighet i spalten. Vid beräkningar av konvektivt värmeutbyte i spalter har i detta arbete valts att konsekvent använda ekvation (3.10).

Den tredje mekanismen för värmeutbyte är elektromagnetisk strålning. Sådan strålning avges kontinuerligt från alla kroppar och massor och brukar kallas emission. Mellan två parallella ytor (till exempel två motstående ytor i en luftspalt) med temperatur T_1 [K] respektive T_2 [K] kan nettovärmeflödet q_s [W/m²] på grund av strålning skrivas som

$$q_s = \alpha_s \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.11)$$

α_s [W/m²·K] är värmeöverföringskoefficienten för strålning. Denna kan approximativt beräknas som

$$\alpha_s = 4 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma_s \cdot T_m^3 \quad (3.12)$$

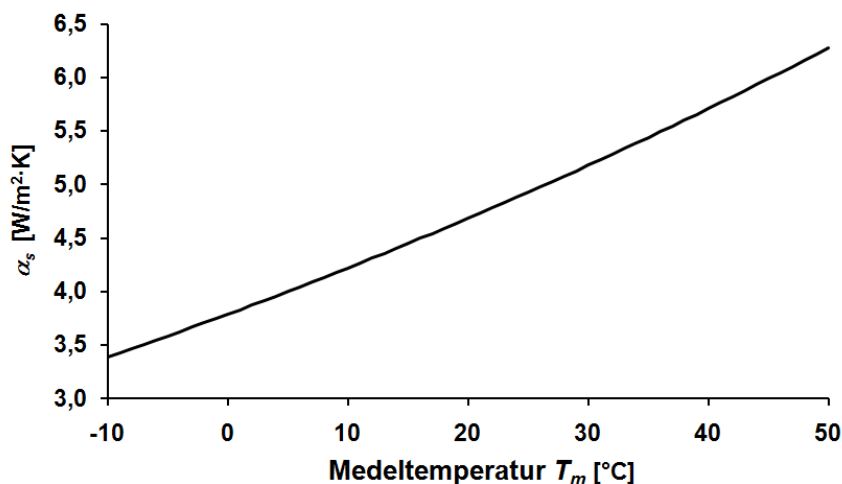
σ_s = Stefan Boltzmanns konstant $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²·K⁴]

T_m = medelvärdet av T_1 och T_2 [K]

ε_{12} [-] är den resulterande emissionskoefficienten och beror på de båda ytornas emittans, ε_1 respektive ε_2 . För fallet med två parallella plan gäller att ε_{12} ges av

$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (3.13)$$

Emittansen för de flesta byggnadsmaterial (dock inte metaller) är i storleksordningen 0.9 och ε_{12} kan då beräknas till 0.82. Av Figur 3-3 framgår hur α_s varierar med medeltemperaturen T_m . Observera att vid beräkning av α_s måste T_m uttryckas i Kelvin.



Figur 3-3 α_s som funktion av medeltemperaturen T_m [°C] då $\varepsilon_{12}=0.82$.

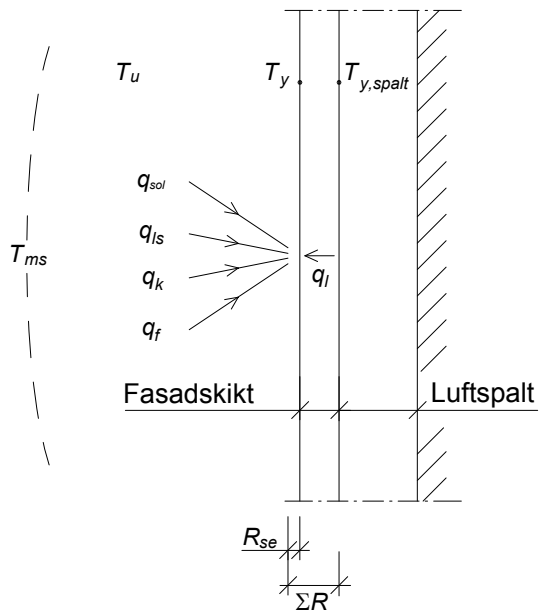
Sambanden för termisk strålning som getts ovan gäller för strålning mellan materialytor då temperaturen på ytorna inte avviker allt för mycket från normala temperaturer. Med normala temperaturer avses här intervallet från cirka -25 °C upp till 100 °C. Denna värmestrålning är långvågig med en våglängd kring 10 μm och kan inte uppfattas av det mänskliga ögat. En annan typ av strålning som påverkar byggnader är kortvågig dagsljusstrålning (våglängd cirka 1 μm) från solen. Solarkonstanten I_0 ger den instrålade effekten under klara dagar som 1090 W/m². Under molniga förhållanden minskar strålningen avsevärt. Den värmeeffekt q_{sol} [W/m²] som absorberas på en specifik yta beror på ytans absorptans för kortvågig strålning α_{sol} [-] och vinkeln φ mellan ytans normal och strålningsriktningen

$$q_{sol} = \alpha_{sol} \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi) \quad (3.14)$$

Absorptionsfaktorn α_{sol} är beroende på ytans kulör. För en mörk kulör är värdet cirka 0.9 medan värdet för en ljus (vit) kulör kan vara så lågt som 0.25.

Värmeutbytet mellan ytan på en fasad och omgivande luft kommer att påverkas av kortvågig solstrålning (q_{sol}), långvågig värmestrålning (q_{ls}) och konvektion (q_k). Till detta kommer

utbyte av latent värme (q_f) och värmeledning (q_l). Solstrålningen ger alltid ett värmefflöde till ytan medan de andra bidragen kan verka åt båda hållen, se Figur 3-4.



Figur 3-4 Energibalans på utsida av fasadsnittet.

Vid stationära förhållanden är yttemperaturen konstant och summan av den tillförda energin till ytan måste vara noll. Under denna förutsättning kan energibalansen skrivas som

$$q_{sol} + q_{ls} + q_k + q_f + q_l = 0 \quad (3.15)$$

eller utvecklat

$$\alpha_{sol} \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi) + \alpha_s \cdot (T_{ms} - T_y) + \alpha_k \cdot (T_u - T_y) + h_e \cdot g + \frac{T_{y,spalt} - T_y}{\Sigma R - R_{se}} = 0 \quad (3.16)$$

T_{ms} = motstrålande temperatur utomhus [K]

T_y = fasadens yttemperatur [K]

T_u = utomhustemperatur [K]

h_e = ångbildningsvärme för vatten vid kondensation eller förångning [J/kg]

g = kondensations- eller avdunstningsintensitet [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

$T_{y,spalt}$ = temperatur på fasadsnittets yta mot luftspalten [K]

R_{se} = värmeövergångsmotstånd på fasadsnittets utsida [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

ΣR = hela fasadsnittets värmemotstånd [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

Det långvågiga strålningsutbytet för en byggnadsyta utomhus påverkas av temperaturen på de omgivande ytor som byggnadsytan "ser". Ett platt tak har i huvudsak strålningsutbyte med himlavalvet medan fasadytan på en byggnad har strålningsutbyte med både himlavalvet och kringliggande mark. I det senare fallet uppstår även utbyte med eventuell bebyggelse och vegetation (typ träd och buskar) runt byggnaden. För pratiska beräkningar av det långvågiga strålningsutbytet används den motstrålande temperaturen T_{ms} . Denna temperatur representerar då temperaturen på en imaginär yta utanför byggnaden med vilken strålningsutbytet sker. För en fasadyta kan T_{ms} vid molnfri himmel approximativt beräknas som

$$T_{ms} = 1.1 \cdot T_u - 5 \quad (3.17)$$

Om himlen är täckt av moln kan den motstrålande temperaturen antas var densamma som temperaturen utomhus. Mellan de båda ytterlighetsfallen med klar och helmulen himmel får T_{ms} bedömas med hjälp av interpolering.

Yttemperaturen T_y kan beräknas ur ekvation (3.16) som

$$T_y = \frac{\alpha_{sol} \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi) + \alpha_s \cdot T_{ms} + \alpha_k \cdot T_u + h_e \cdot g + \frac{T_{y,spalt}}{\Sigma R - R_{se}}}{\alpha_s + \alpha_k + \frac{1}{\Sigma R - R_{se}}} \quad (3.18)$$

Uttrycket för yttemperatur enligt ekvation (3.18) kräver några kommentarer. Eftersom ekvationen inte beaktar materialens värmekapacitet resulterar ekvationen i en omedelbar temperaturhöjning vid till exempel plötslig solstrålning mot ytan. Detta är en förenkling av verkligheten som duger för att beskriva temperaturförloppet på fasadytor med liten värmekapacitet då konstruktionen snabbt kommer i jämvikt. I fall där konstruktionen har en stor värmekapacitet överskattar ekvationen yttemperaturen, åtminstone så länge värmekällan har en begränsad varaktighet (vilket gäller för solstrålning). Konstruktionen hinner helt enkelt inte komma i temperaturjämvikt. En annan aspekt gäller termen $h_e \cdot g$. Den beskriver det värmeutbyte som sker på ytan när vatten avdunstar eller kondenserar. Så länge det inte är frågan om att studera specifika förlopp (till exempel hur fort fukt avdunstar från en regnvåt fasadyta) brukar termen försummas.

3.1.2 Fukttransport och uttorkning

Fukt kan transporteras i ångfas eller i vätskefas. I ångfas är de viktigaste mekanismerna diffusion och konvektion. Drivkraft för fuktdiffusion är skillnader i ånghalt v [kg/m^3] och flödesriktningen är från högre till lägre ånghalt. Vid konvektion flyttas ånghaltig luft från ett område till ett annat med hjälp av strömmande luft. Fukt i vätskefas kan transporteras genom kapillära krafter, vattenövertäck, vindtryck eller tyngdkraft.

För det stationära och endimensionella fallet tecknas ångflödet g [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] vid diffusion genom ett poröst materialskikt som

$$g = \delta_v \cdot \frac{\Delta v}{d} = \frac{\Delta v}{d/\delta_v} = \frac{\Delta v}{Z_v} \quad (3.19)$$

δ_v = transportkoefficient som varierar med materialets fukttinnehåll [m^2/s]

Δv = ånghaltsskillnad mellan materialskiktets ytor [kg/m^3]

d = tjocklek hos materialskiktet [m]

$Z_v = d/\delta_v$ = materialskiktets ånggenomgångsmotstånd [s/m]

Strikt fuktmeکانiskt beskriver ekvation (3.19) inte renodlad diffusion utan en kombination av transport i ångfas och i vätskefas. Detta återspeglas i att transportkoefficienten δ_v ökar vid

stigande relativ fuktighet (RF) i materialet. För en konstruktion med n stycken materialskikt ges ångflödet som

$$g = \frac{\Delta v}{d_1/\delta_{v,1} + d_2/\delta_{v,2} + \dots + d_n/\delta_{v,n}} = \frac{\Delta v}{Z_{v,1} + Z_{v,2} + \dots + Z_{v,n}} = \frac{\Delta v}{\Sigma Z_v} \quad (3.20)$$

Notera den principiella likheten mellan ekvation (3.20) och ekvation (3.3) för beräkning av värmefflöde i en flerskiktad konstruktion.

Vid konvektiv fukttransport bestäms fuktflödet G [kg/s] som produkten av luftens ånghalt och volymflödet Q [m³/s]

$$G = v \cdot Q \quad (3.21)$$

För en ytterväggsspalt enligt Figur 2-13 med bredd b [m] och vidd a [m] som genomströmmas av luft med hastighet u_m [m/s] kan den konvektiva fukttransporten skrivas som

$$G = (v_{ut} - v_{in}) \cdot b \cdot a \cdot u_m \quad (3.22)$$

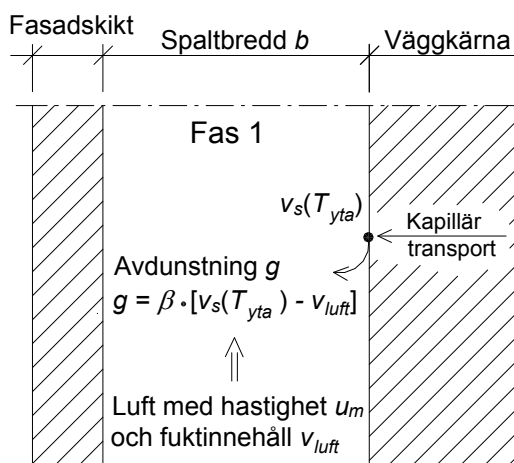
v_{ut} = luftens ånghalt vid utströmning från spalten [kg/m³]

v_{in} = luftens ånghalt vid inströmning till spalten [kg/m³]

Om spaltens höjd är h [m] kan det genomsnittliga fuktutbytet g [kg/m²·s] mellan spaltens ytor och spaltluften beräknas som

$$g = (v_{ut} - v_{in}) \cdot \frac{b \cdot u_m}{h} \quad (3.23)$$

Ett primärt intresse i föreliggande arbete är att undersöka vilken betydelse luftspalten och dess utformning har för uttorkning av fuktiga materialskikt i en ytterväggskonstruktion. Förutsatt initialt blöta materialskikt kan ett sådant uttorkningsförlopp delas in i tre principiellt olika faser. I fas 1 kan fukt avlägsnas genom avdunstning direkt från spaltytan till spaltluften vilket visas i Figur 3-5 för fallet med blöta materialskikt i väggkärnan.



Figur 3-5 Uttorkning mot spalt under fas 1.

Den hastighet med vilken avdunstningen g [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] sker kan tecknas

$$g = \beta \cdot (v_s(T_{yta}) - v_{luft}) \quad (3.24)$$

β = fuktövergångskoefficient [m/s]

$v_s(T_{yta})$ = temperaturberoende mättnadsånghalt i ytan [kg/m^3]

v_{luft} = ånghalt i spaltluften [kg/m^3]

Fuktövergångskoefficienten ges av Lewis formel (Nevander och Elmarsson, 1994)

$$\beta = \frac{\alpha_k}{\rho \cdot c} \approx 8 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_k \quad (3.25)$$

α_k = konvektiv värmeöverföringskoefficient [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

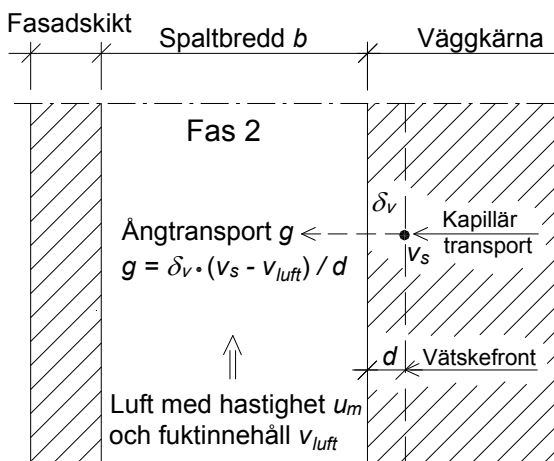
ρ = luftens densitet, cirka $1.25 \text{ kg}/\text{m}^3$

c = luftens specifika värmekapacitet, cirka $1010 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$

Med hjälp av ekvation (3.10) kan β bestämmas till cirka $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}/\text{s}$ om lufthastigheten i spalten är nära noll och genom att betrakta Figur 3-2 inses att storleksordningen på β är i intervallet $3\text{-}4 \cdot 10^{-3} \text{ m}/\text{s}$ om strömningstillståndet i spalten är laminärt. Notera att ekvation (3.24) även kan skrivas i samma form som ekvation (3.19) med ett övergångsmotstånd $Z_{yta} = 1/\beta$ vid ytan

$$g = \frac{1}{Z_{yta}} \cdot (v_s(T_{yta}) - v_{luft}) \quad (3.26)$$

Det följer att storleken på fuktövergångsmotståndet Z_{yta} är kring $300 \text{ m}/\text{s}$. Ekvation (3.24) gäller endast så länge den kapillära fukttransportförmågan fram till spaltytan överstiger avdunstningshastigheten. När fuktinnehållet minskar kommer vätsketransporten i ett skikt närmast spalten så småningom att upphöra. Då inträder fas 2 där uttorkningen sker genom att ånga diffunderar genom det torrare skiktet närmast spalten från en vätskefront på ett avstånd d [m] från spaltytan, se Figur 3-6.



Figur 3-6 Uttorkning mot spalt under fas 2.

Ångtransporten g [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] till spalten under fas 2 skrivs som

$$g = \delta_v \cdot \frac{(v_s - v_{luft})}{d} \quad (3.27)$$

δ_v = transportkoefficient för materialsiktet med tjocklek d [m^2/s]

v_s = mätnadsånghalt vid vätskefronten [kg/m^3]

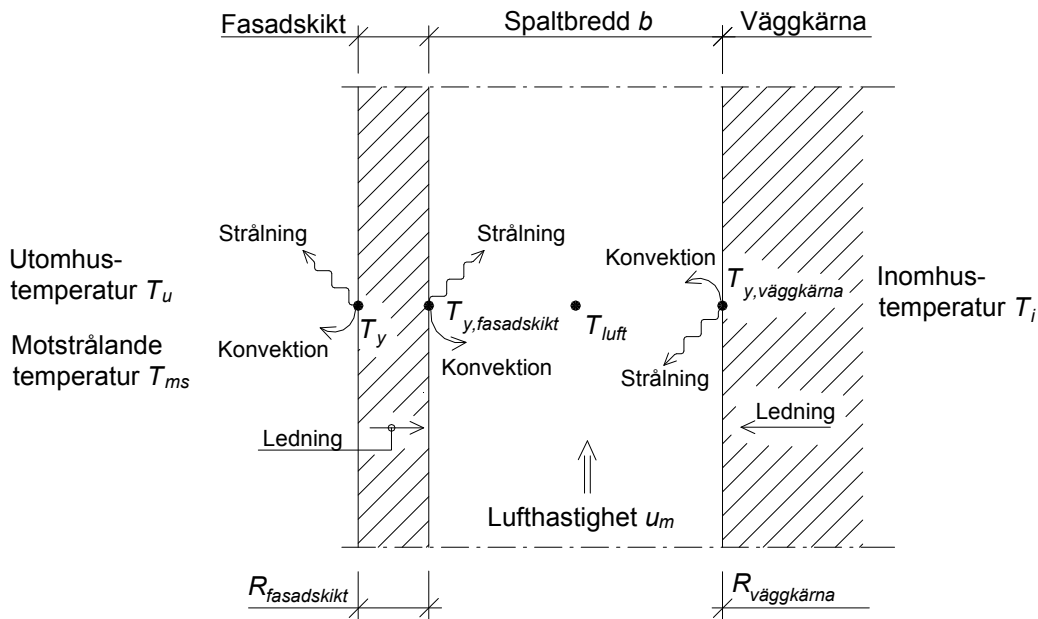
v_{luft} = ånghalt i spaltluften [kg/m^3]

Under uttorkningsfas 2 kommer vätskefrontens avstånd till ytan successivt att öka med konsekvens att fukttransporten till spalten gradvis avtar. I den tredje och sista fasen har all vätsketransport upphört och fortsatt uttorkning måste då ske helt i ångfas.

Ekvation (3.23), (3.24) och (3.27) kan vid känd lufthastighet och värmebalans användas för att beräkna fuktutbytet i en ytterväggsspalt.

3.2 Värmebalans

När luft strömmar i en spalt kommer det att ske ett konvektivt värmeutbyte mellan luften och de båda spaltväggarna. Värmeutbytet bestäms av den strömmande luftens temperatur och hastighet, temperaturerna på spaltväggarna och spaltens dimensioner. Figur 3-7 visar de transportmekanismer som påverkar spalttemperaturen T_{luft} . En fullständig beskrivning skulle även inkludera det värmeutbyte som inträffar vid avdunstning eller kondensation i spalten men denna parameter har här exkluderats från beräkningarna.



Figur 3-7 Mekanismer och faktorer som påverkar spalttemperaturen.

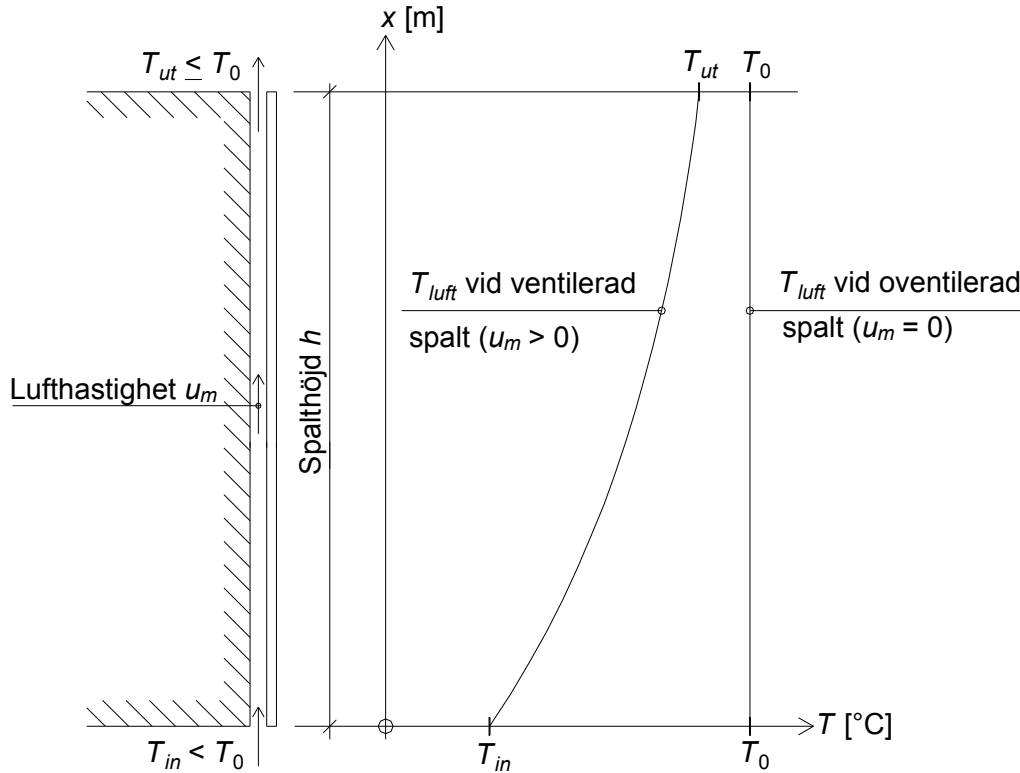
I Figur 3-8 visas det principiella temperaturförloppet i en spalt bakom ett solbelyst fasadskikt. I fallet med en helt oventilerad spalt ($u_m=0$) kommer spaltluften utmed hela spaltens höjd att anta jämviktstemperaturen T_0 . Om spalten istället ventileras så att uteluft med temperatur T_{in} ($T_{in} < T_0$) strömmar in i spalten kommer spaltluftens temperatur efterhand att stiga och anpassa sig mot T_0 . Om lufthastigheten är tillräckligt låg alternativt spalten tillräckligt lång kommer den utströmmande luften att vara helt anpassad till jämviktstemperaturen.

Lufttemperaturen i spalten kan beräknas som (Nevander och Elmarsson, 1994)

$$T_{luft}(x) = T_0 - (T_0 - T_{in}) \cdot e^{-x/L_0} \quad (3.28)$$

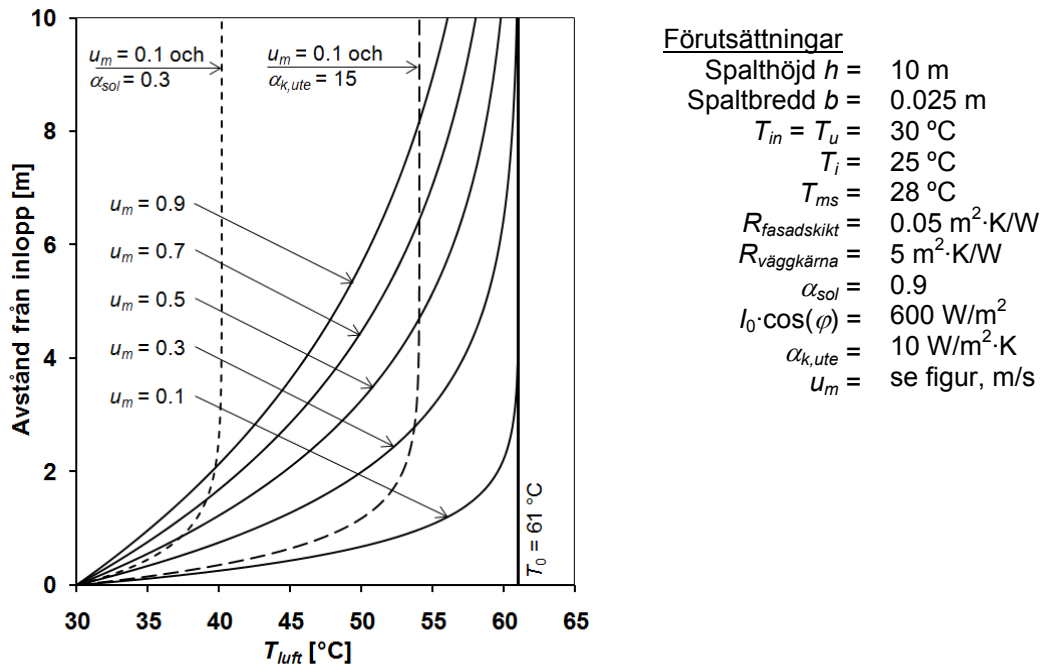
Storheten L_0 är här en konstant med dimensionen längd och kan ses som ett mått på hur fort luft som strömmar in i en spalt anpassar sig till temperaturen T_0 . Nevander och Elmarsson (1994) ger alla nödvändiga uttryck för att bestämma T_0 , L_0 och temperaturerna på spaltens väggar, $T_{y,fasadskikt}(x)$ respektive $T_{y,väggkärna}(x)$ (se Figur 3-7). Dessa uttryck återges inte här. Det kan observeras att när jämviktstemperaturen uppnåtts så gäller att

$$T_0 = \frac{T_{y,fasadskikt} + T_{y,väggkärna}}{2} \quad (3.29)$$

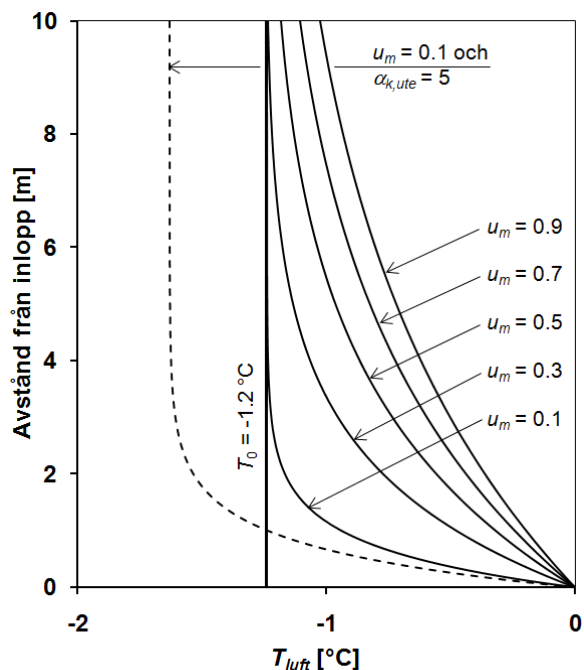


Figur 3-8 Principiell temperaturfördelning i en ventilerad respektive oventilerad spalt.
 Figurens innehåll är till stora delar hämtade ur Nevander och Elmarsson (1994).

Figur 3-9 och Figur 3-10 exemplifierar med redovisade förutsättningar temperaturprofiler i en 10 m hög spalt under en varm och klar sommardag och under en kall och klar natt.



Figur 3-9 Temperaturfördelning i en 10 m hög spalt en klar sommardag.



Förutsättningar

Spalthöjd h	= 10 m
Spaltbredd b	= 0.025 m
$T_{in} = T_u$	= 0 °C
T_i	= 20 °C
T_{ms}	= -5 °C
$R_{fasadskikt}$	= 0.05 m ² ·K/W
$R_{väggkärna}$	= 5 m ² ·K/W
α_{sol}	= 0.9
$I_0 \cdot \cos(\varphi)$	= 0 W/m ²
$\alpha_{k,ute}$	= 7 W/m ² ·K
u_m	= se figur, m/s

Figur 3-10 Temperaturfördelning i en 10 m hög spalt en klar natt.

Av Figur 3-9 framgår att:

- lufthastigheten har en stor betydelse för temperaturförloppet i spalten.
- kulörvalet kraftigt påverkar spalttemperaturen. Skillnaden mellan en mörk och ljus kulör (absorptans 0.9 respektive 0.3) är i exemplet drygt 20 °C om lufthastigheten i spalten är 0.1 m/s.
- beräkningsresultatet är relativt känsligt för vilka vindförhållanden som antas råda. En ökning av den konvektiva värmeöverföringskoefficienten på utsida fasad från 10 till 15 W/m²·K (högre vindhastighet) sänker jämviktstemperaturen i spalten med cirka 7 °C. En minskning av koefficienten från 10 till 5 W/m²·K (vilket motsvarar helt vindstilla, se ekvation (3.7) och (3.8)) ökar istället jämviktstemperaturen med cirka 12 °C.

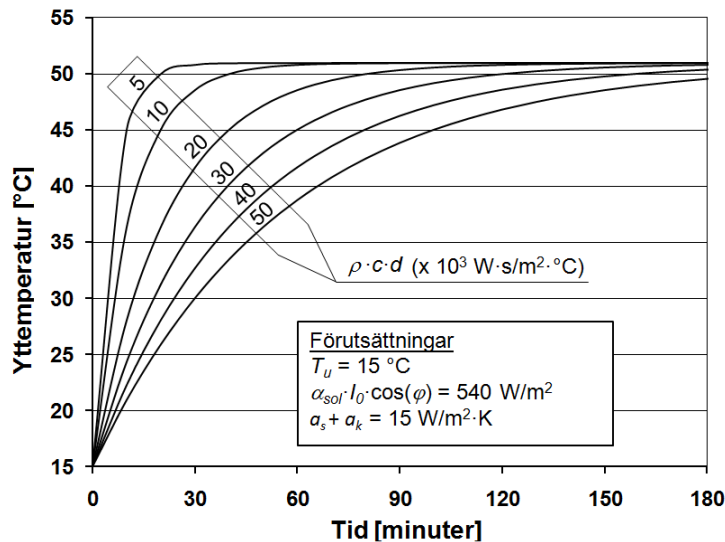
Figur 3-10 visar att spalttemperaturen under klara nätter antar temperaturer som är lägre än utetemperatur (nattutstrålning). Högre lufthastighet i spalten och ökad vindhastighet minskar temperaturskillnaden. Den negativa skillnaden mellan utomhustemperatur och spalttemperatur blir som störst när det är helt vindstilla och lufthastigheten i spalten är noll.

De här redovisade metoderna för att analysera temperaturförloppet i en spalt exkluderar materialens värmekapacitet och förutsätter konstanta randvillkor. Konsekvensen av den första förenklingen är att yttemperaturer under vissa förhållanden överskattas då värmekapaciteten har en dämpande effekt på temperaturutvecklingen. För fallet med ett materialskikt med hög ledningsförmåga placerat mot ett värmeisolerande underlag kan värmekapacitetens betydelse för temperaturen på en yta vid en hastig förändring i värmeflödet uppskattas med hjälp av följande ekvation (Claesson et al, 1984)

$$T_y = T_u + \frac{\alpha_{sol} \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi)}{\alpha_s + \alpha_k} \left[1 - e^{-\frac{-(\alpha_s + \alpha_k)t}{\rho \cdot c \cdot d}} \right] \quad (3.30)$$

ρ = materialskiktets densitet [kg/m^3]
 c = materialskiktets specifika värmekapacitet [$\text{W}\cdot\text{s/m}^2\cdot\text{K}$]
 d = materialskiktets tjocklek [m]
 t = tid [s]

En beräkning av temperaturförloppet på en materialyta med temperatur $15\text{ }^\circ\text{C}$ som vid tiden $t = 0$ plötsligt utsätts för solstrålning visas i Figur 3-11.



Figur 3-11 Temperaturförlopp på en yta vid varierande värmekapacitet.

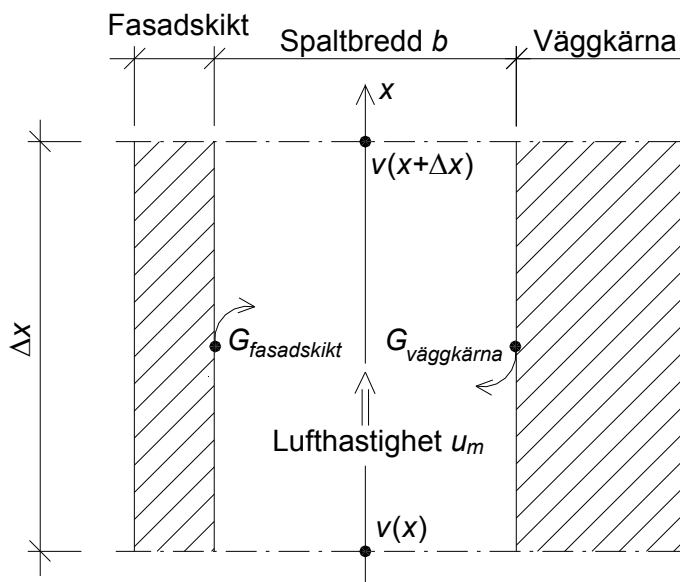
Beroende på termen $\rho \cdot c \cdot d$ uppnås jämviktstemperaturen olika snabbt. För ett fasadskikt utfört som puts på skivmaterial (typiska tjocklekar 4-8 mm + 12 mm) kan storleksordningen på $\rho \cdot c \cdot d$ beräknas till intervallet $10 \cdot 10^3 - 25 \cdot 10^3\text{ W}\cdot\text{s/m}^2\cdot\text{K}$ (beroende på exakta materialval). För det lägre värdet har cirka 90% av temperaturanpassningen skett efter 30 minuter. Vid det högre värdet är motsvarande tid en dryg timme. Vid en vägguppbyggnad enligt Figur 3-1 definieras spaltens begränsning inåt av ett skivmaterial som är monterat mot en isolerad regelstomme. För ett sådant skikt kan $\rho \cdot c \cdot d$ uppskattas till cirka $10 \cdot 10^3\text{ W}\cdot\text{s/m}^2\cdot\text{K}$. Det kan konstateras att beräkningar av yttertemperaturer utan hänsyn till materialskiktets värmekapacitet är användbara för att studerade temperaturförlopp i den aktuella konstruktionstypen förutsatt att tidsfaktorn överstiger en eller ett par timmar.

3.3 Fuktbalans

När luft med temperatur T_{in} [°C] och ånghalt v_{in} [kg/m³] strömmar in i en spalt finns det ett antal olika möjligheter för det fuktmekaniska förloppet:

- Om materialytorna i spalten befinner sig i fuktjämvikt med den inströmmande uteluften kommer inget fuktutbyte att ske varvid ånghalten i luften som lämnar spalten är densamma som den inströmmande luftens ånghalt ($v_{ut} = v_{in}$).
- Om ånghalten i den inströmmande luften är lägre än ånghalten på materialytorna i spalten kommer ett fuktutbyte från spaltväggarna till spaltluften att inträffa ($v_{ut} > v_{in}$). En begränsning för ånghalten vid utströmning är att den inte kan överstiga mättnadsånghalten för aktuell spalttemperatur ($v_{ut} \leq v_s(T_{ut})$).
- Om ånghalten i den inströmmande luften överstiger ånghalten på materialytorna blir fuktutbytet från spaltluften till spaltväggarna. Ånghalten i luften som lämnar spalten blir då lägre än den var vid inströmning ($v_{ut} < v_{in}$).
- Om ånghalten i spaltluften överstiger spaltytornas mättnadsånghalt bildas kondens. Ett typfall är då temperaturen på ytorna i spalten är lägre än lufttemperaturen utomhus på grund av nattutstrålning (se Figur 3-10). Om spaltväggarna inte kan absorbera kondensen kommer droppar att bildas på materialytorna. I extremfall med stora mängder kondensat är det tänkbart att fritt vatten så småningom rinner på materialytorna. Om spaltväggarna består av material med absorberande förmåga kan hela, eller delar av kondensatet sugas upp vilket leder till en ökning av fuktinnehållet i materialen.

Ånghaltsfördelningen utmed höjden på en spalt kan approximativt beräknas genom att dela upp spalten i många finita celler med längden Δx , se Figur 3-12.



Figur 3-12 Fuktbalans för en spalt mellan x och $x+\Delta x$.

Det måste gälla att fuktinnehållet i luften som lämnar en cell är summan av fuktinnehållet vid inströmning till cellen och fukttilförseln från spaltväggarna till spaltluften på sträcka Δx . Fuktbalansen för varje cell kan alltså tecknas

$$v(x + \Delta x) = v(x) + G_{\text{fasadskikt}} + G_{\text{väggkärna}} \quad (3.31)$$

$v(x + \Delta x)$ = ånghalt vid utströmning från cellen [kg/m^3]

$v(x)$ = ånghalt vid inströmning till cellen [kg/m^3]

$G_{\text{fasadskikt}}$ = fukttilförsel från fasadskikt till spaltluft på sträcka Δx [kg/m^3]

$G_{\text{väggkärna}}$ = fukttilförsel från väggkärna till spaltluft på sträcka Δx [kg/m^3]

För en spalt med vidd a [m] och bredd b [m] som genomströmmas av luft med hastighet u_m [m/s] beräknas fukttilförseln under uttorkningsfas 1 (se avsnitt 3.1.2) som

$$G_{\text{fasadskikt}} = \frac{\beta \cdot (v_s(T_{y,\text{fasadskikt}}) - v(x)) \cdot a \cdot \Delta x \cdot \Delta x}{u_m \cdot a \cdot b \cdot \Delta x} = \frac{\beta \cdot \Delta x}{u_m \cdot b} \cdot (v_s(T_{y,\text{fasadskikt}}) - v(x)) \quad (3.32)$$

respektive

$$G_{\text{väggkärna}} = \frac{\beta \cdot (v_s(T_{y,\text{väggkärna}}) - v(x)) \cdot a \cdot \Delta x \cdot \Delta x}{u_m \cdot a \cdot b \cdot \Delta x} = \frac{\beta \cdot \Delta x}{u_m \cdot b} \cdot (v_s(T_{y,\text{väggkärna}}) - v(x)) \quad (3.33)$$

Fuktövergångskoefficienten β ges av ekvation (3.25) och respektive mättnadsånghalt v_s [kg/m^3] beräknas utifrån aktuella yttemperaturer. Under uttorkningsfas 2 kan fukttilförseln beräknas genom att ersätta β i ekvation (3.32) och (3.33) med δ_v/d

$$G_{\text{fasadskikt}} = \frac{\delta_{v,\text{fasadskikt}} \cdot \Delta x}{d_{\text{fasadskikt}} \cdot u_m \cdot b} \cdot (v_s(T_{\text{fasadskikt}}) - v(x)) \quad (3.34)$$

respektive

$$G_{\text{väggkärna}} = \frac{\delta_{v,\text{väggkärna}} \cdot \Delta x}{d_{\text{väggkärna}} \cdot u_m \cdot b} \cdot (v_s(T_{\text{väggkärna}}) - v(x)) \quad (3.35)$$

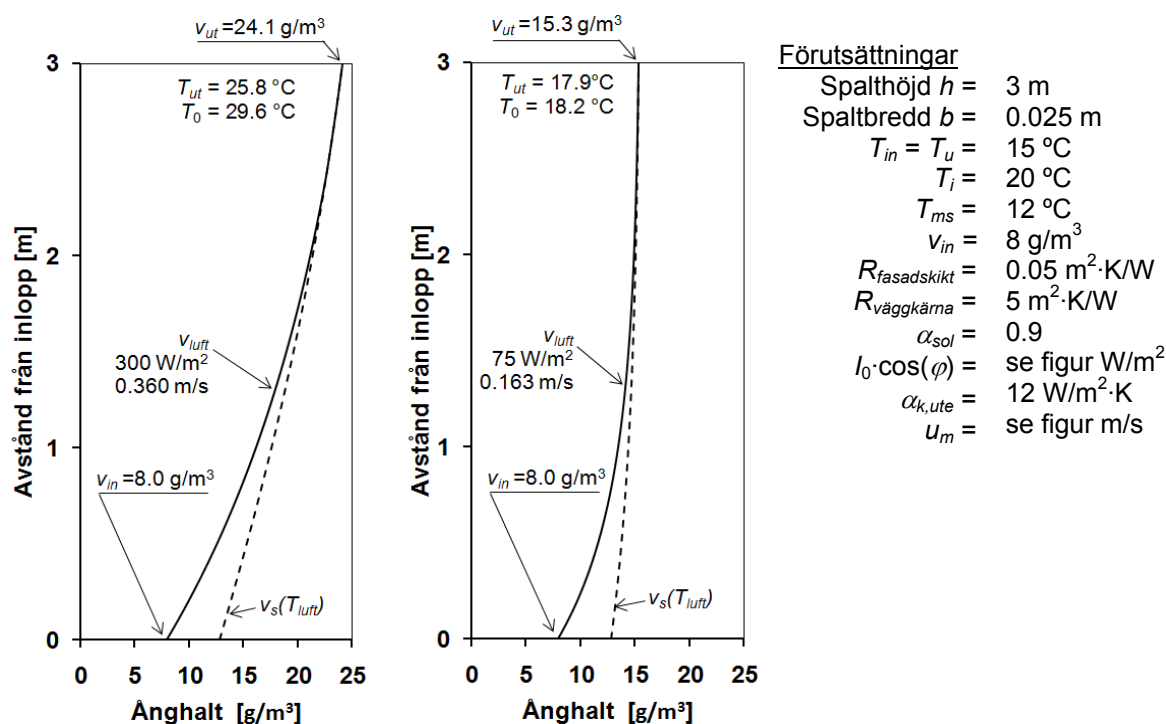
I ekvation (3.34) och (3.35) är δ_v material- och fuktberoende och v_s avser mättnadsånghalt för aktuell temperatur vid fronten för den kapillära transporten på ett avstånd $d_{\text{fasadskikt}}$ respektive $d_{\text{väggkärna}}$ från spaltytorna, se Figur 3-6.

Vid beräkningar med ekvation (3.31) måste kontrolleras så att ånghalten i spaltluften inte överstiger mättnadsånghalten vid rådande temperatur

$$\frac{v_{\text{luft}}}{v_s(T_{\text{luft}})} \leq 1 \quad (3.36)$$

Figur 3-13 och Figur 3-14 visar exempel på beräkningar av ånghaltfördelningar under uttorkningsfas 1 och uttorkningsfas 2 för en spalt med vertikala läkt och detaljutförande i över- respektive underkant enligt bilaga 4. Med givna förutsättningar har lufttemperatur, yttemperaturer och lufthastighet i spalten bestämts varefter ånghaltfördelningen beräknats med ekvation (3.31). Uttorkning från både fasadskikt och väggkärna har förutsatts.

I Figur 3-13 är premissen att det finns ett fuktöverskott på spaltyorna och fuktutbytet har därför beräknats med ekvation (3.32) och (3.33).



Figur 3-13 Ånghaltfördelning under uttorkningsfas 1.

Exemplet illustrerar klart den stora effekt solstrålning har för uttorkning av blöta materialytor i en spalt. Det genomsnittliga fuktutbytet beräknat med ekvation (3.23) blir för fallet med 300 W/m² infallande strålning hela 174 g/m²·h. Med den lägre strålningssiffran 75 W/m² sjunker fuktutbytet till 36 g/m²·h. Några saker är värda att belysa:

- Det högre fuktutbytet i det första fallet jämfört med det andra är en konsekvens av två faktorer; större ånghaltsskillnad mellan ut- och inströmmande luft och högre lufthastighet i spalten.
- Med ökat avstånd från inloppet blir ånghaltkurvornas (v_{luft}) gradient allt mer vertikal. Detta betyder att fuktutbytet mellan spaltväggarna och spaltluften minskar med höjden. Spalten torkar alltså som mest nära inloppet och som minst nära utloppet. På cirka 2/3-delar av höjden är spaltluften nästan helt fuktmättad. Ett fuktutbyte över denna höjd kan ändå ske eftersom jämviktstemperaturen T_0 ännu inte uppnåtts och luftens fuktkapacitet fortsätter att öka. Om spalterna varit högre än 3 meter skulle spaltluften till slut anta temperatur T_0 och ett fuktutbyte i de övre delarna skulle då inte vara möjligt förrän avdunstningen till spalten i de nedre delarna avtagit.

Vid beräkningarna av fuktutbytet har termen $h_e \cdot g$ (W/m²) helt försumrats. Som tidigare påpekats är detta inte särskilt välbetänkt när avdunstningshastigheten från en våt yta skall beräknas. Problemet med att beakta termen är att den kraftigt komplicerar beräkningarna genom att ett jämviktsläge måste itereras fram. Vid avdunstning kommer latent värme att bindas varvid temperaturerna på spaltyorna och i spaltluften dämpas. Om termen försummas överskattas både ånghaltsskillnaden $v_{ut} - v_{in}$ och lufthastigheten u_m i spalten. För att få en uppfattning om storleksordningen på felet presenteras i Tabell 3-1 överslagsberäkningar för

de två fallen i Figur 3-13. Principen som använts vid beräkningarna är att energin som krävs för att avdunsta beräknad mängd fukt (det vill säga fuktutbytet) i efterföljande iteration subtraheras från instrålade solenergi. Som värde på ångbildningsvärme h_e för vatten har $2500 \cdot 10^3$ J/kg använts.

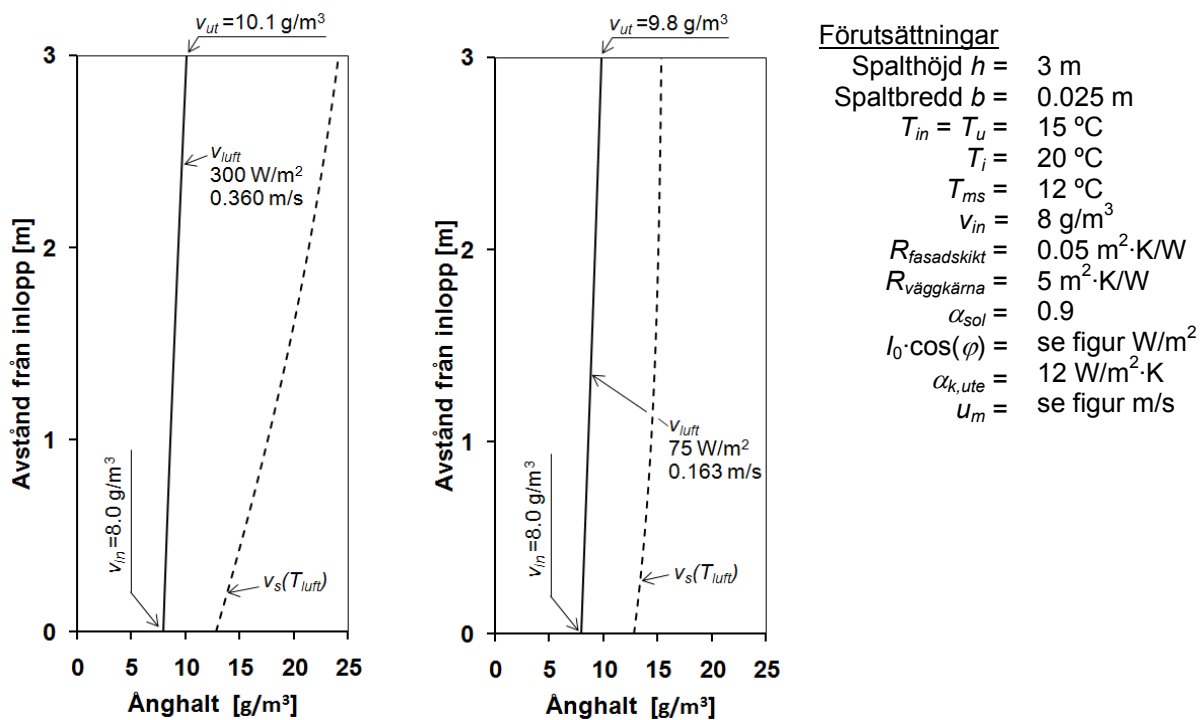
Tabell 3-1 Beräkningar för att bedöma betydelsen av termen $h_e \cdot g$.

Start	Instrålad solenergi $I_0 \cdot \cos(\varphi)$	[W/m ²]	300	75
	Termisk drivkraft Δp	[Pa]	0.807	0.262
	Lufthastighet i spalten u_m	[m/s]	0.360	0.163
	Ånghaltsskillnad $v_{ut} - v_{in}$	[g/m ³]	16.1	7.3
	Fuktutbyte g	[g/m ² ·h]	174	36
	Energi $h_e \cdot g$ som krävs för avdunstning	[W/m ²]	121	25
Iteration 1	$I_0 \cdot \cos(\varphi) - h_e \cdot g$		300-121	75-25
	Δp		0.546	0.175
	u_m		0.276	0.119
	$v_{ut} - v_{in}$		11.3	6.3
	g		94	22
	$h_e \cdot g$		65	15
Iteration 2	$I_0 \cdot \cos(\varphi) - h_e \cdot g$		300-65	75-15
	Δp		0.674	0.210
	u_m		0.319	0.138
	$v_{ut} - v_{in}$		13.5	6.7
	g		129	28
	$h_e \cdot g$		90	19
Iteration 3	$I_0 \cdot \cos(\varphi) - h_e \cdot g$		300-90	75-19
	Δp		0.619	0.195
	u_m		0.301	0.13
	$v_{ut} - v_{in}$		12.5	6.6
	g		113	26
	$h_e \cdot g$		78	18
Iteration 4	$I_0 \cdot \cos(\varphi) - h_e \cdot g$		300-78	75-18
	Δp		0.646	0.199
	u_m		0.310	0.132
	$v_{ut} - v_{in}$		13.0	6.6
	g		121	26
	$h_e \cdot g$		84	18
Iteration 5	$I_0 \cdot \cos(\varphi) - h_e \cdot g$		300-84	
	Δp		0.631	
	u_m		0.305	
	$v_{ut} - v_{in}$		12.7	
	g		116	
	$h_e \cdot g$		81	

Resultatet av beräkningen är att fuktutbytet i fallet med solstrålning 300 W/m^2 reduceras från 174 till $116 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ och med 75 W/m^2 från 36 till $26 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$. Detta betyder att fuktutbytet under uttorkningsfas 1 överskattas i storleksordningen 40-50% om termen $h_e\cdot g$ försummas.

Uttorkning genom avdunstning direkt från ytorna i en spalt till spaltluften måste betraktas som ett ytterlighetsfall med kort varaktighet (timmar). Detta hindrar inte att beräkningar av sådana förlopp kan vara intressanta att utföra för att jämföra den konvektiva fukttransportförmågan för olika spaltutformningar vid olika klimatförhållanden.

I Figur 3-14 har uttorkningen antagits ske från vätskefronter inne i fasadskiktet och inne i väggkärnan med i övrigt lika förutsättningar som ovan. För båda fasadskikt och väggkärna har förhållandet d/δ , satts till 5000 s/m och temperaturerna vid vätskefronterna har approximerats med yttemperaturerna i spalten. För fasadskiktet (med värmemotstånd $0.05 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$) är detta en marginell underskattning av temperaturen. Temperaturavvikelsen i väggkärnan är också liten förutsatt att vätskefrontens läge är i någon form av skivmaterial i direkt anslutning mot spalten (se Figur 3-1).

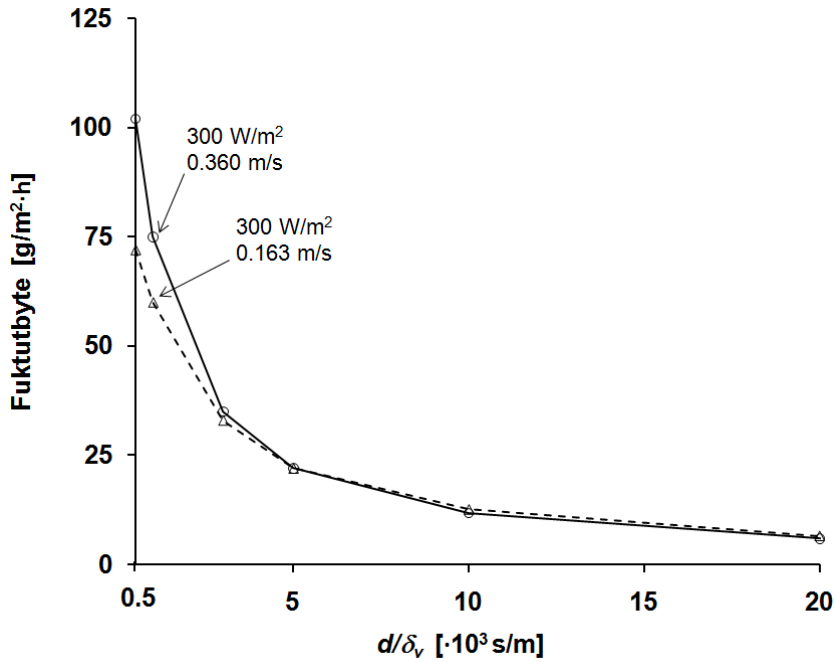


Figur 3-14 Ånghaltfördelning under uttorkningsfas 2.

Beräkningar med ekvation (3.23) ger nu att fuktutbytet blir kraftigt reducerat till 23 respektive $9 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$. I detta scenario är, till skillnad mot det förra, luftens fuktkapacitet vid utströmning endast delvis utnyttjad och den begränsande faktorn för fuktutbytet är transporthastigheten av fukt till spalten.

Det är inte alltid som ökad lufthastighet innebär en ökad konvektiv fukttransport vilket framgår av Figur 3-15. Beräkningarna av fuktutbytet i figuren baseras på de förutsättningar som ges i Figur 3-14 (och med beaktande av $h_e\cdot g$) men med två olika lufthastigheter vid samma infallande strålning 300 W/m^2 . Skillnaderna i lufthastighet kan till exempel vara en konsekvens av olika utformningar vid in- och utlopp. Så länge diffusionen till spalten kan ske

utan större motstånd är fuktutbytet vid den högre hastigheten effektivare. När d/δ_v överstiger cirka $5 \cdot 10^3$ s/m är skillnaden nära noll och vid högre motstånd är det till och med så att fuktutbytet är något större vid den lägre hastigheten (som en följd av högre yttemperaturer i spalten).



Figur 3-15 Fuktutbyte i en spalt vid olika lufthastigheter.

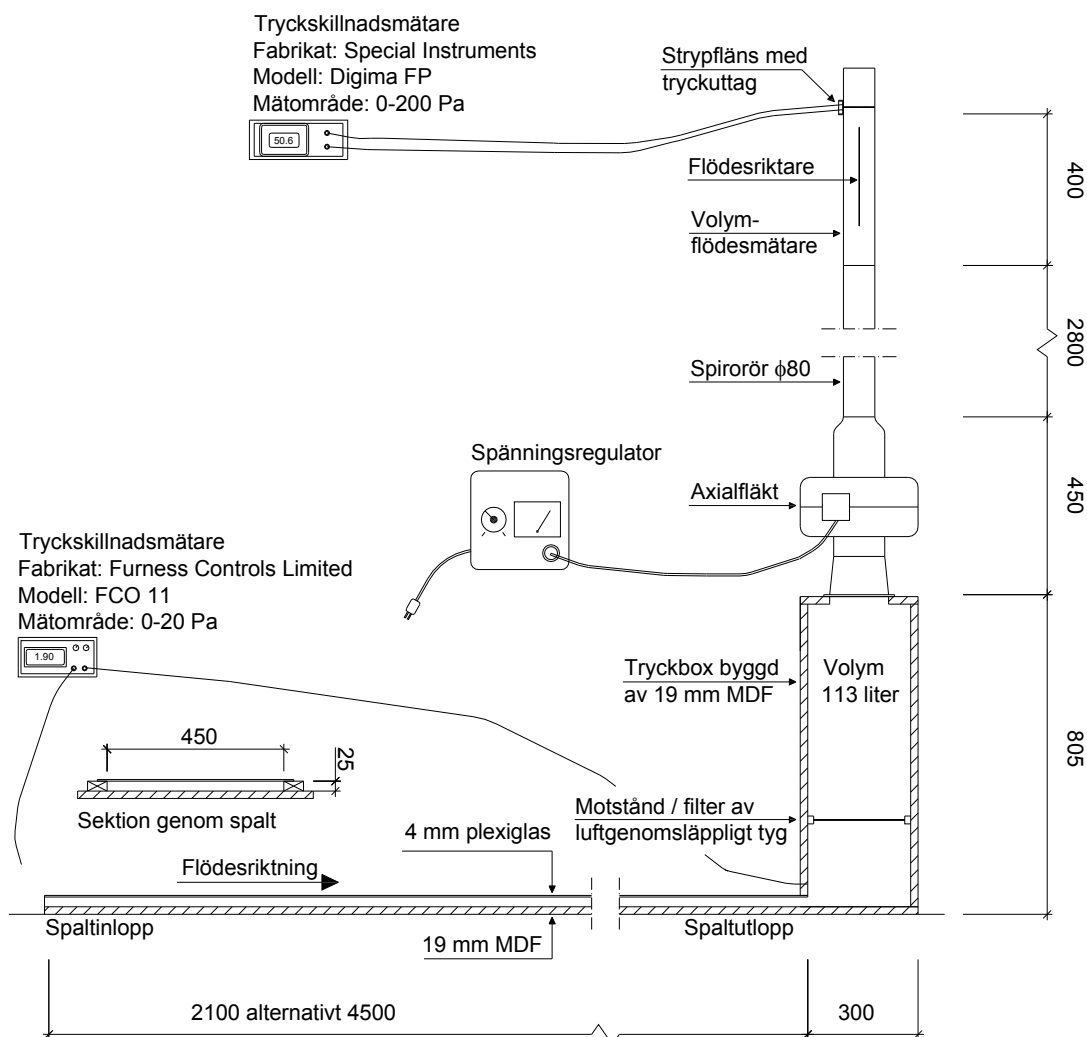
4 Verifiering av beräkningsmodell för luftflöden

Kapitlet beskriver flödes- och tryckfallsmätningar som utfördes i en experimentell uppställning i laboriemiljö. Syftet med mätningarna var att kontrollera och eventuellt korrigera beräkningsmodell och antagna värden på förlustfaktorer enligt kapitel 2.

Den experimentella verifieringen utfördes inledningsvis som ett examensarbete (Persson och Rudolfsson, 2009). Inom ramen för examensarbetet utprovades och designades de olika komponenterna i provuppställningen och ett antal serier med mätningar genomfördes. Resultaten indikerade att det fanns ett betydande luftläckage genom otätheter i materialskarvar i provuppställningen. Efter avslutat examensarbete företogs därför en omsorgsfull tätning av alla potentiella läckagepunkter varefter mätningarna upprepades. De resultat som presenteras i detta kapitel är samtliga erhållna från försök i den förbättrade provuppställningen.

4.1 Provuppställning

Provuppställningens uppbyggnad och delar framgår av Figur 4-1 nedan. Mer information ges i Persson & Rudolfsson (2009).



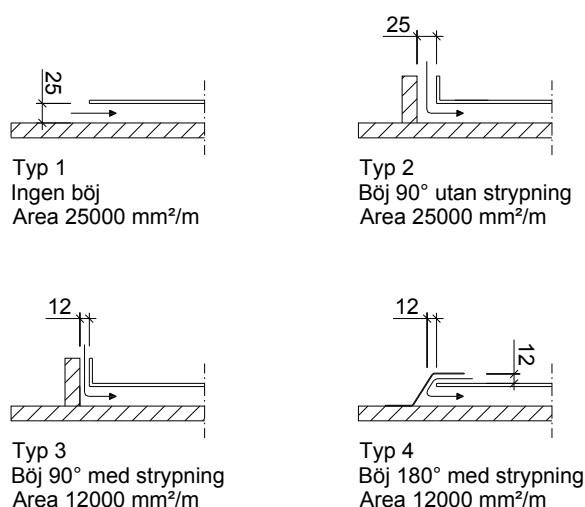
Figur 4-1 Provuppställning för flödes- och tryckfallsmätningar.

De parametrar som varierades vid provningarna är sammanställda i Tabell 4-1.

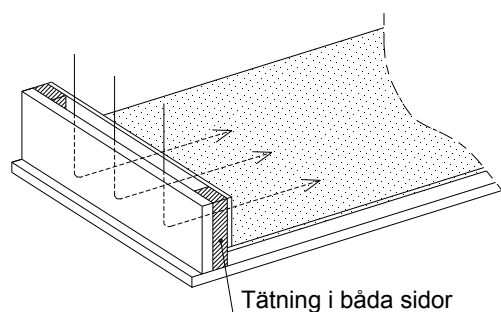
Tabell 4-1 Parametervariation vid provningarna.

Parameter	Variation
Luftspaltens längd	2.1 m 4.5 m
Läkt i spalten	Inga läkt, tvärsnittsarea 25000 mm ² /m Läkt Europrofil s600, hålarea 9062 mm ² /m Läkt Lindab s600, hålarea 7069 mm ² /m
Spaltinlopp	Ingen böj, tvärsnittsarea 25000 mm ² /m Böj 90°, tvärsnittsarea 25000 mm ² /m Böj 90°, tvärsnittsarea 12000 mm ² /m Böj 180°, tvärsnittsarea 12000 mm ² /m
Spaltutlopp	Ingen luftningsprofil, tvärsnittsarea 25000 mm ² /m STO luftningsprofil, hålarea 10300 mm ² /m

I Figur 4-2 visas sektioner genom de olika detaljutformningar som användes vid spaltinloppet. I samtliga fall tätades detaljerna i sida så att luftens enda väg in i spalten var som pilarna i figuren visar. Figur 4-3 förtydligar det principiella utförandet vid spaltinlopp vid provning av böj 90°.

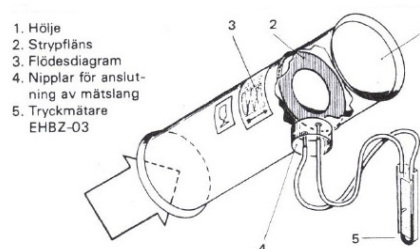


Figur 4-2 Variationer i utförandet vid spaltinlopp.



Figur 4-3 Tätning i sida vid spaltinlopp.

För volymflödesbestämning användes flödesmätare av fabrikat Fläkt, se Figur 4-4. Mätaren består av ett runt rör med diameter 80 mm och i röret sitter en inbyggd strypfläns med håldiameter 53 mm. På ömse sidor om strypflänsen finns uttag för mätning av tryckfallet över flänsen. Metoden att beräkna volymflödet utifrån tryckfallet finns beskriven i Persson & Rudolfsson (2009). Vid små volymflöden blir tryckfallet över en strypfläns med håldiameter 53 mm mycket litet. Av denna anledning tillverkades och användes ytterligare två strypflänsar av tunn plåt. Håldiametererna på dessa var 19.4 mm respektive 30 mm.



Figur 4-4 Volymflödesmätare

4.2 Genomförande

Med hjälp av fläkten skapades en tryckskillnad (drivkraft) mellan spaltens inlopp och utlopp. Maximal tryckskillnad över spalten som kunde registreras var 20 Pa då detta var kapacitetsgräns för den tryckskillnadsmätare som användes. En drivkraft på 20 Pa var fullt tillräckligt för att skapa flöden långt ovanför det laminära strömningsområdet i spalterna utan horisontella läkt.

Den principiella arbetsgången vid de mätserier som gjordes var:

1. Iordningställande av spalt (inlopp, utlopp, läkt).
2. Montage av volymflödesmätare med lämplig strypfläns. Inkoppling av slangar för tryckfallsmätning över strypflänsen.
3. Montage av slangar för mätning av tryckfall mellan spaltens in- och utlopp.
4. Start av fläkt och instrumentering.
5. Reglering av fläktens varvtal med hjälp av spänningsregulatorn till önskat tryckfall mellan spaltens öppningar.
6. Registrering av tryckfall mellan spaltens öppningar och samtidigt tryckfall över strypflänsen.
7. Stegvis ökning av fläktens varvtal och upprepning av punkt 6 tills kapacitetsgräns för tryckfallsmätning över strypfläns uppnåddes (200 Pa).
8. Stegvis återgång till startvärde på tryckfall. Under återgången mättes såväl tryckfall mellan spaltens öppningar som tryckfall över enskilda komponenter i spalten. Metodiken gav en extra kontroll av tillhörande värden på tryckfall mellan spaltöppningar och tryckfall över strypflänsen.
9. Stängning av fläkt och övrig instrumentering.
10. Byte av strypfläns.
11. Upprepning av punkt 4 till punkt 10.

Utöver ovanstående fanns en lufthastighetsgivare (beskrivs i avsnitt 7.1.2) monterad i spalten under mätningarna. Givarens placering var cirka 500 mm innan spaltutloppet. Vid mätningar med horisontella läkt i spalten innebar denna placering att givarläget var ungefär mitt emellan två läkt. Syftet med givaren var att registrera luftens topphastighet för jämförelse med medelhastighet beräknad utifrån volymflödesmätning.

En svårighet som fanns vid genomförandet av mätningarna var fluktuationer i mätvärden från de båda tryckskillnadsmätarna. Detta var delvis betingat av en inte helt jämn gång hos fläkten och delvis av tryckförändringar vid öppning och stängning av portar och dörrar i laboratoriet. Problemet hanterades genom upprepning av mätningar och genom att invänta stabilare förhållanden.

Lufttemperaturen i laboratoriehallen vid provningarna varierade mellan 20-22 °C.

4.3 Beräkningsförutsättningar

Det övergripande syftet med den experimentella undersökningen var att jämföra resultat från mätningar i provuppställningen med resultat enligt beräkningsmodell, ekvation (2.35). Då flera av de värden, uttryck och antaganden som beräkningarna har baserats på är direkt kopplade till aktuell spaltgeometri och aktuella materialval ges en sammanställning av beräkningsförutsättningar i Tabell 4-2.

Tabell 4-2 Sammanställning av beräkningsförutsättningar.

Parameter	Beräkningsvärde / Beräkningsuttryck / Antagande
Hydraulisk diameter d_H	$d_H = \frac{2 \cdot 450 \cdot 25}{450 + 25} = 47.4 \text{ mm}$
Friktionsfaktor λ då $Re \leq 2300$	$\lambda = \frac{64}{\left[\frac{2}{3} + \frac{11}{24} \cdot \frac{25}{450} \left(2 - \frac{25}{450} \right) \right] \cdot Re} = \frac{89.4}{Re}$ <p>I spalt utan horisontella läkt har ett högre värde på λ beräknats längs en sträcka efter inloppet enligt avsnitt 2.1.7. I spalt med horisontella läkt har läktpassage antagits innebära en sådan störning i hastighetsprofilen att förhöjd friktion gäller längs en inloppssträcka efter varje läktpassage.</p>
Friktionsfaktor λ då $2300 < Re < 3500$	$\lambda = \frac{(3500 - Re) \cdot \frac{89.4}{2300} + \lambda^{Re=3500} \cdot (Re - 2300)}{1200}$
Friktionsfaktor λ då $Re \geq 3500$	$\lambda = \left[2 \cdot \log \left(\frac{-4.793}{Re} \cdot \log \left(\frac{10}{Re} + 0.2 \cdot \frac{\varepsilon}{d_H} \right) + 0.2698 \cdot \frac{\varepsilon}{d_H} \right) \right]^{-2}$
Absolut ytråhet ε för plexiglas	Litteraturuppgift gällande ytråhet för plexiglas har inte hittats. I Pinon et al (2004) anges med hänvisning till ASHRAE att ytråhet 0.03 mm kan användas som ett approximativt värde för plexiglas. Värdet har använts vid beräkningarna.
Absolut ytråhet ε för MDF	Litteraturuppgift gällande ytråhet för MDF har inte hittats. I Pinon et al (2004) ges följande uppgifter: Björkplywood, längs fiberriktning, $\varepsilon = 0.03\text{-}0.05 \text{ mm}$ Björkplywood, tvärs fiberriktning, $\varepsilon = 0.12 \text{ mm}$ I beräkningarna har antagits ytråhet 0.03 mm för MDF vilket är samma värde som antagits för plexiglas.
Relativ ytråhet ε/d_H	$\frac{\varepsilon}{d_H} = \frac{0.03}{47.4} = 0.00063$

4.4 Resultat

Redovisningen av mätningarna har disponerats så att först avhandlas resultat avseende förlustfaktorer och hastighetsprofiler och därefter presenteras jämförelser mellan mätta och beräknade tryck-flödeskurvor.

4.4.1 Förlustfaktor vid perforerade ställäkt

Tryckfall över läkt mättes i spalter med längd 4.5 m där 8 stycken läkt var monterade med centrumavstånd cirka 600 mm. Tryckfall mättes över läkt 900 mm från inloppet (läkt nummer 2 från inloppet räknat) och över läkt 3900 mm från inloppet (läkt nummer 7 från inloppet räknat). Förlustfaktor $\xi_{\text{läkt}} [-]$ har utvärderats som

$$\xi_{\text{läkt}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot u_{m,\text{läkt}}^2} \quad (4.1)$$

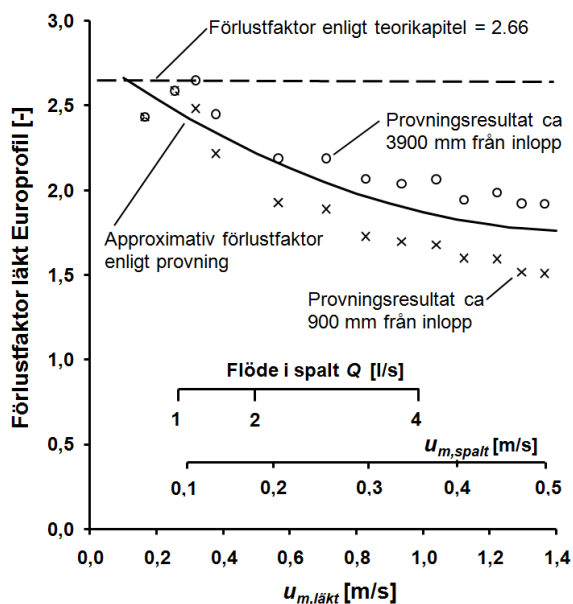
$\xi_{\text{läkt}}$ = förlustfaktor för läkt [-]

Δp = tryckfall över läkt [Pa]

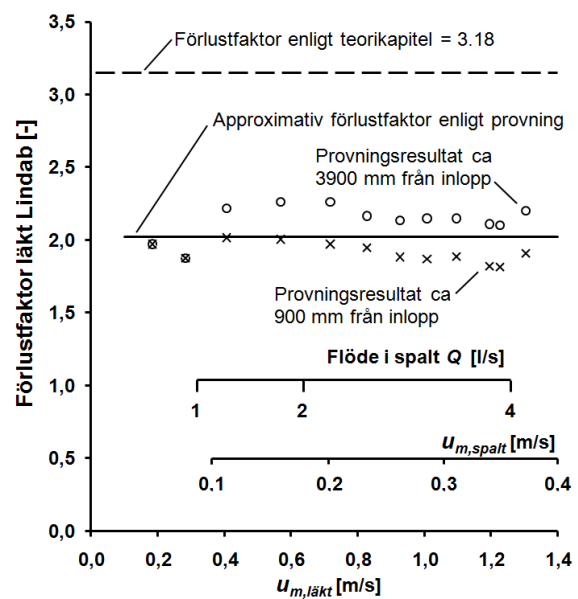
ρ = luftens densitet vid 21°C ~ 1.20 [kg/m³]

$u_{m,\text{läkt}}$ = medelhastighet hos luftströmmen vid passage av hål i läkt [m/s]

I Figur 4-5 och Figur 4-6 redovisas förlustfaktorn för de två olika läkttyperna. De teoretiska antaganden som återges i figurerna är hämtade från avsnitt 2.3.4.



Figur 4-5 Förlustfaktor för läkt Europrofil.

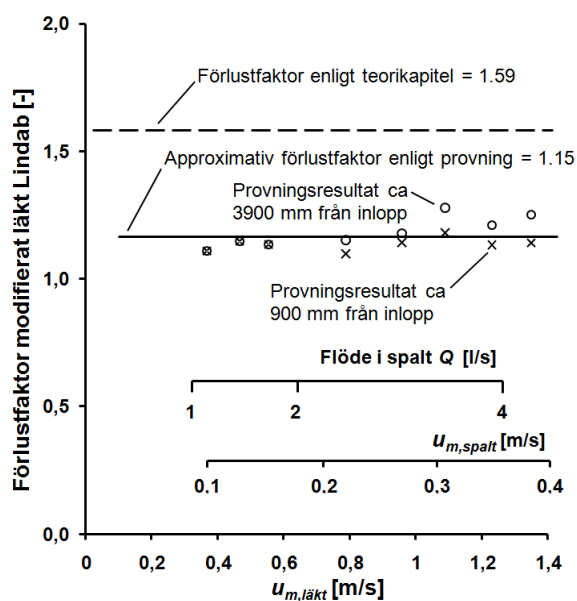


Figur 4-6 Förlustfaktor för läkt Lindab.

Av figurerna kan det utläsas att:

- det för båda läkttyperna finns en tydlig tendens att förlustfaktorn är större långt ifrån spaltinloppet än nära spaltinloppet. Förklaring till detta fenomen kan inte ges.

- antagen förlustfaktor för Europrofil ($2 \cdot 1.33 = 2.66$) är högre än vad provningen visar och det finns dessutom ett betydande hastighetsberoende hos förlustfaktorn i det studerade hastighetsområdet.
- antagen förlustfaktor för Lindab ($2 \cdot 1.59 = 3.18$) stämmer dåligt med provningen. Jämfört med Europrofil har Lindab stora hål i förhållande till avståndet mellan plåtarna i läktet (se Figur 2-18 och Tabell 6-1). Förhållandet mellan håldiameter och plåtavstånd skulle kunna innebära att luften efter passage av den första plåten får en strålform och därför lättare passerar den andra plåten än den första. För att undersöka frågan genomfördes en mätserie med modifierade Lindabläkt. Modifieringen bestod i att läkten längskapades så att varje läkt reducerades till en enda perforerad plåt. Enligt avsnitt 2.3.4 är antagen förlustfaktor för en sådan plåt 1.59 men som framgår av Figur 4-7 kunde förlustfaktorn vid provning uppskattas till cirka 1.15. Detta resultat indikerar att den stora avvikelser för Lindab enligt Figur 4-6 i huvudsak beror på att förlustfaktorn för varje plåt är avsevärt lägre än det ursprungliga antagandet på 1.59.



Figur 4-7 Förlustfaktor för längskapat Lindabläkt (en enda plåt).

Av Figur 4-5 och Figur 4-6 framgår för respektive läkttyp approximativ kurvpassning till förlustfaktor utvärderad från provningsresultaten. Ekvationer för kurvorna ges i Tabell 4-3.

Tabell 4-3 Approximativa förlustfaktorer för perforerade ställäkt.

Läkt	$u_{m,läkt}$ [m/s]	$\xi_{läkt}$ [-]
Europrofil	< 1.4	$2.8 - 1.4 \cdot u_{m,läkt} + 0.47 \cdot u_{m,läkt}^2$
	> 1.4	1.8
Lindab	> 0	2.0

4.4.2 Förlustfaktor vid spaltinlopp

Tryckfall över spaltinlopp mättes i spalter med längd 4.5 m. Inga horisontella läkt fanns i spalterna vid dessa mätningar. Anledningen till valet att endast mäta tryckfall över inloppet utan läkt i spalten var att med läkt blev tryckfallet över inloppet så litet att det var svårt att registrera med det aktuella mätinstrumentet. Även utan läkt blev tryckfallet över inloppet litet

vid låga lufthastigheter. I Figur 4-8 till Figur 4-10 har alla resultat vid tryckskillnad mindre än 0.2 Pa över inloppet konsekvent uteslutits då mätosäkerheten bedömts som alltför hög.

För inlopp utan böj har förlustfaktorn ξ_{in} [-] utvärderats utifrån mätdata som

$$\xi_{in} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot u_{m,spalt}^2} \quad (4.2)$$

Δp = tryckfall över inlopp [Pa]

$u_{m,spalt}$ = medelhastighet hos luftströmmen i spalten [m/s]

Som framgår av Figur 4-8 är förlustfaktorn lägre än det teoretiska antagandet (se avsnitt 2.3.3) men skillnaden är inte av den storleksordning att en korrigering bedömts som motiverad.

Vid spaltinlopp med böj uppstår både inloppsförluster (se avsnitt 2.3.3) och förluster genom att luftströmmen tvingas till en riktningssändring (se avsnitt 2.3.6). Resultat som presenteras i Figur 4-9 till Figur 4-10 inkluderar båda förlusterna då det vid mätning inte var möjligt att särskilja respektive tryckfall. Den totala förlustfaktorn $\xi_{in} + \xi_{b,90}$ [-] har alltså utifrån mätdata utvärderats som

$$\xi_{in} + \xi_{b,90} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot u_{m,spalt}^2} \quad (4.3)$$

Δp = tryckfall över inlopp med böj 90° [Pa]

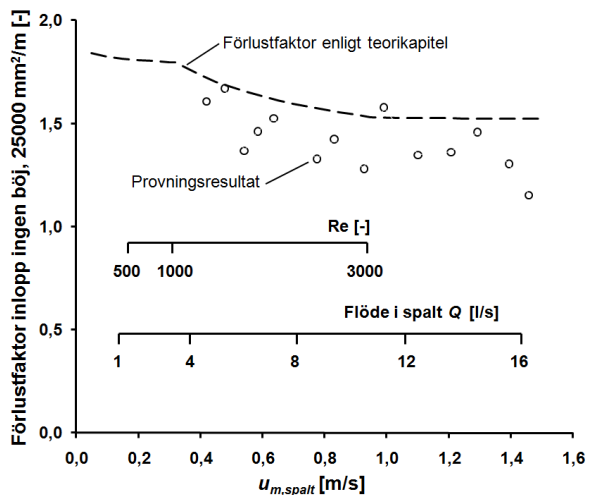
$u_{m,spalt}$ = medelhastighet hos luftströmmen i spalten [m/s]

Överensstämmelsen mellan teori och mätresultat är god för böj utan area minskning, se Figur 4-9, men sämre för böj där arean i inloppet begränsats till 12000 mm²/m (se Figur 4-10). Den totala förlustfaktorn $\xi_{in} + \xi_{b,90}$ [-] som redovisas med streckad linje i Figur 4-9 och Figur 4-10 har beräknats som (se avsnitt 2.3.3 och avsnitt 2.3.6)

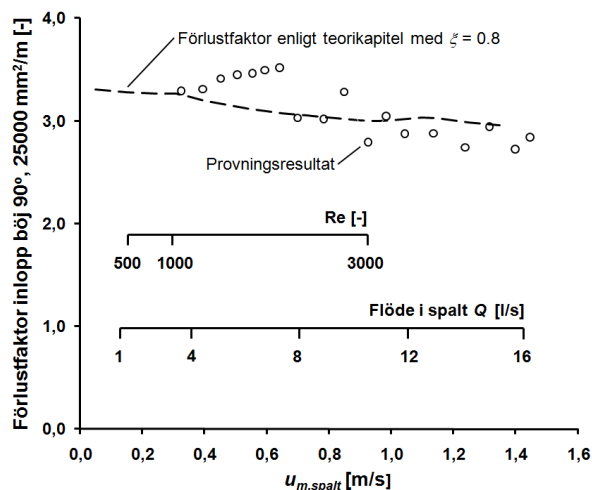
$$\begin{aligned} \text{Re} < 1000 & \quad \xi_{in} + \xi_{b,90} = (1 + 0.98 \cdot \text{Re}^{-0.03}) + (45 \cdot \lambda_{\text{Re}=3000} \cdot \xi) \\ 1000 < \text{Re} < 3000 & \quad \xi_{in} + \xi_{b,90} = (1 + 10.59 \cdot \text{Re}^{-0.374}) + (45 \cdot \lambda_{\text{Re}=3000} \cdot \xi) \\ \text{Re} > 3000 & \quad \xi_{in} + \xi_{b,90} = (1 + 0.57 \cdot \text{Re}^{-0.01}) + (45 \cdot \lambda \cdot \xi) \end{aligned}$$

I formlerna ovan är $\xi = 0.8$ för böj utan area minskning och $\xi = 2.0$ för böj med area minskning till 12 mm i inloppet (se Figur 2-23). Heldragen kurva i Figur 4-10 visar den beräknade totala förlustfaktorn $\xi_{in} + \xi_{b,90}$ då $\xi = 3.0$. Som framgår ger en ökning av ξ från 2.0 till 3.0 en betydligt bättre överstämmelse med provningsresultaten.

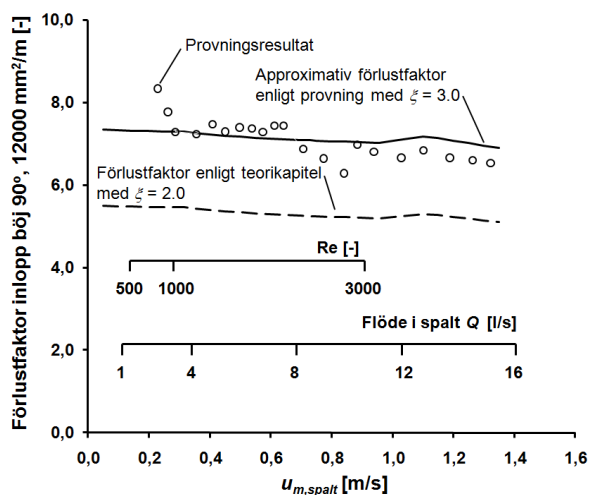
Figur 4-11 visar den totala förlustfaktorn då luftströmmen tvingas att böja 180° i ett tvärsnitt med area 12000 mm²/m. Enligt avsnitt 2.3.6 kan förlustfaktorn för en 180° böj uppskattas till att vara något lägre än summan av förlustfaktorer för två böjar om 90°. Kurvan som visas i figuren är beräknad som $\xi_{in} + 2 \cdot \xi_{b,90}$ (med $\xi = 3.0$). Det verkar vara en rimlig approximation att en böj om 180° kan hanteras som två böjar om 90°.



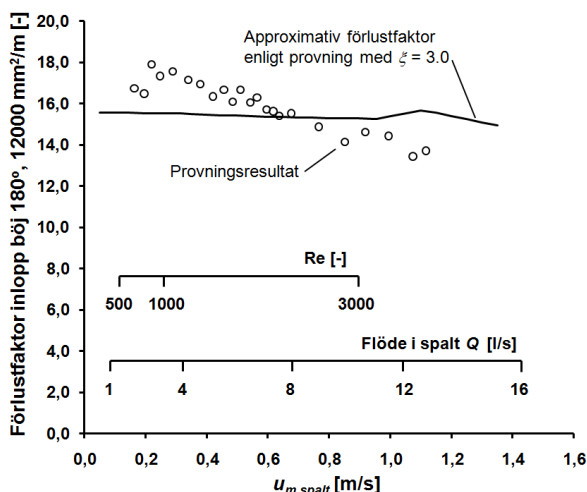
Figur 4-8 Förlustfaktor för inlopp utan böj och tvärsnittsarea 25000 mm²/m.



Figur 4-9 Förlustfaktor för inlopp med böj 90° och tvärsnittsarea 25000 mm²/m.



Figur 4-10 Förlustfaktor för inlopp med böj 90° och tvärsnittsarea 12000 mm²/m.



Figur 4-11 Förlustfaktor för inlopp med böj 180° och tvärsnittsarea 12000 mm²/m.

4.4.3 Förlustfaktor vid spaltutlopp

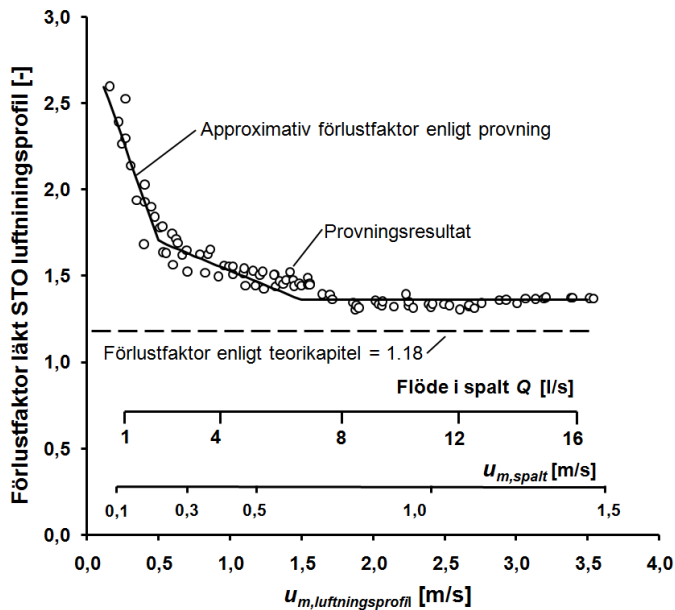
Tryckfall över spaltutlopp med STO luftningsprofil har mätts i spalter med längd 4.5 m, med och utan horisontella läkt i spalterna. Förlustfaktorn ξ_{luftp} [-] har utvärderats som

$$\xi_{luftp} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot u_{m,luftp}^2} \quad (4.4)$$

Δp = tryckfall över spaltutlopp med luftningsprofil [Pa]

$u_{m,luftp}$ = medelhastighet hos luftströmmen vid passage av hål i luftningsprofil [m/s]

Av Figur 4-12 framgår att förlustfaktorn är tydligt hastighetsberoende och, speciellt vid låga lufthastigheter, väsentligt högre än det teoretiska antagandet 1.18 (se avsnitt 2.3.5).



Figur 4-12 Förlustfaktor för STO luftningsprofil.

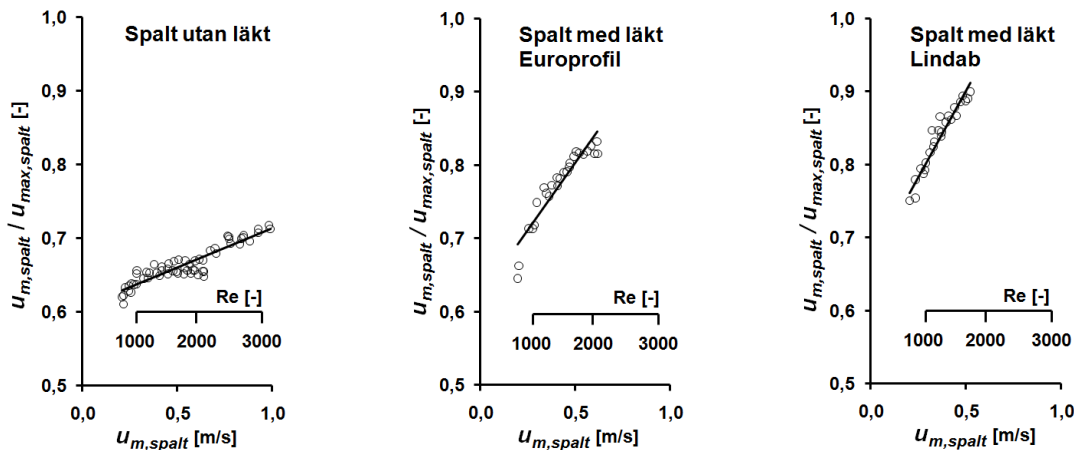
Av Figur 4-12 framgår en approximativ kurvpasning till förlustfaktor för STO profilen. Motsvarande ekvationer ges i Tabell 4-4.

Tabell 4-4 Approximativ förlustfaktor för STO luftningsprofil.

$u_{m,luftp}$ [m/s]	ξ_{luftp} [-]
< 0.5	$2.9 - 2.3 \cdot u_{m,luftp}$
$0.5 < u_{m,luftp} < 1.5$	$1.9 - 0.3 \cdot u_{m,luftp}$
> 1.5	1.4

4.4.4 Hastighetsprofiler

Figur 4-13 visar kvoten mellan luftens medelhastighet och topphastighet vid olika lufthastigheter i spalten, både för spaltutförande med och utan läkt. Topphastigheten är som tidigare nämnts mätt med lufthastighetsgivare medan medelhastigheten är beräknad via volymflödet.



Figur 4-13 Förhållande mellan medelhastighet och topphastighet.

Ekvationer för linjerna i Figur 4-13 framgår av Tabell 4-5.

Tabell 4-5 Hastighetsförhållande vid olika spaltutföranden.

Spaltutförande	$u_{m,spalt} / u_{max,spalt} [-]$
Spalt utan läkt	$0.61 + 0.11 \cdot u_{m,spalt} \quad (u_{m,spalt} < 1 \text{ m/s})$
Spalt med läkt Europrofil	$0.62 + 0.37 \cdot u_{m,spalt} \quad (u_{m,spalt} < 0.6 \text{ m/s})$
Spalt med läkt Lindab	$0.67 + 0.47 \cdot u_{m,spalt} \quad (u_{m,spalt} < 0.55 \text{ m/s})$

Enligt avsnitt 2.1.6 är förväntat förhållande mellan medelhastighet och topphastighet för en spalt utan läkt konstant 0.67 så länge strömningen är laminär och sker mellan två parallella plan. Om strömningen sker i en rektangulär tvärsnittsgeometri är förhållandet lägre än 0.67. Ekvationen för spalt utan läkt i Tabell 4-5 ger förhållandet som 0.61-0.69 i hastighetsområdet $0 \text{ m/s} < u_{m,spalt} < 0.73 \text{ m/s}$ (Re cirka 2300). Överensstämmelsen mellan mätresultat och teori får därmed anses som tillfredsställande.

För spalterna med läkt är det uppenbart att hastighetsprofilen avviker från den laminära vid Reynolds tal långt under 2300. En jämförelse av ekvationerna i Tabell 4-5 för de två olika läkttyperna indikerar dessutom att Lindab ger en mer utjämnad hastighetsprofil än Europrofil.

4.4.5 Jämförelse mellan mätta och beräknade tryck/flödes kurvor

I bilaga 1 – bilaga 3 redovisas diagram där mätt samband mellan tryck och flöde i provriggen jämförs med beräkningar utförda med ekvation (2.35). Beräkningarna baseras på korrigerade och approximativa förlustfaktorer enligt avsnitt 4.4.1 - 4.4.3 och förutsättningar som framgår av Tabell 4-2. Av respektive diagram framgår luftspaltens längd, typ och antal horisontella läkt, utförandet vid spaltinlopp (varianter enligt Figur 4-2) och utförande vid spaltutlopp (med eller utan STO luftningsprofil).

De olika parametrarnas relativa betydelse för luftströmningen analyseras och diskuteras i kapitel 5.

4.5 Kommentarer till provningsresultat

I den experimentella uppställningen har storlek på förlustfaktorer och samband mellan tryck och flöde för olika spaltutförningar undersökts. I vissa fall har de teoretiska antagandena gällande förlustfaktorer visat god överensstämmelse med provningsresultaten, i andra fall inte. Det är därför en närliggande slutsats att förlustfaktorer bör bestämmas experimentellt när geometri eller andra förutsättningar avviker från det som finns beskrivet i litteraturen.

Samband mellan tryck och flöde har bestämts för ett tiotal olika spaltutförningar. Med korrigerade förlustfaktorer är det generellt små avvikelser (< 10%) mellan beräknade flöden och de flöden som bestämts experimentellt.

5 Beräkningar av lufthastigheter vid olika spaltutföranden

I kapitlet redovisas beräknad medellufthastighet $u_{m,spalt}$ [m/s] som funktion av drivkraft Δp [Pa] för ett antal olika spaltutförningar. Beräkningarna är utförda med ekvation (2.35) och korrigerade förlustfaktorer enligt resultat från laboriemätningar beskrivna i kapitel 4. Uppgifter om aktuellt spaltutförande ges i respektive figur. Om inget annat anges i figurerna så gäller att:

- spaltbredd b är 25 mm (för definition se Figur 2-13)
- spaltytornas absoluta ytråhet ε är 0.5 mm.
- lufttemperaturen är 20 °C

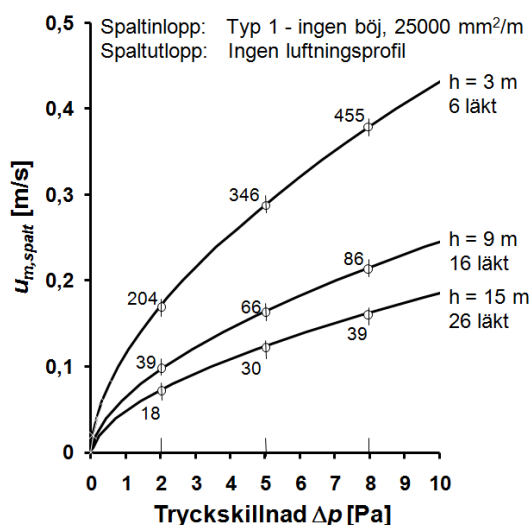
Figureerna redovisar resultat i drivkraftsintervallet 0-10 Pa. Ur ett praktiskt perspektiv kan relevansen för valt intervall diskuteras. Enligt studier av experimentväggar under dynamiska förhållanden som gjorts i detta arbete (se kapitel 7) är den tillgängliga drivkraften över lång tid ("medeldrivkraft") mindre än 1 Pa, åtminstone för lägre spalthöjder. Teoretiskt är det dock intressant att jämföra olika spaltutförningar vid högre drivkrafter än så. För spalter med större höjd än experimentväggarnas spalter (drygt 2.1 meter, se bilaga 4) uppträder periodvis med säkerhet också klimatförhållanden som skapar drivkrafter som är i storleksordningen 10 Pa eller till och med ännu högre.

I figurerna har, förutom lufthastighet, valts att redovisa antal luftomsättningar n [1/h] vid en drivkraft på 2, 5 och 8 Pa. Luftomsättningstalet ger en tydligare bild av ventilationsgraden än lufthastighet då även spalthöjden h [m] beaktas. Antal luftomsättningar har beräknats som

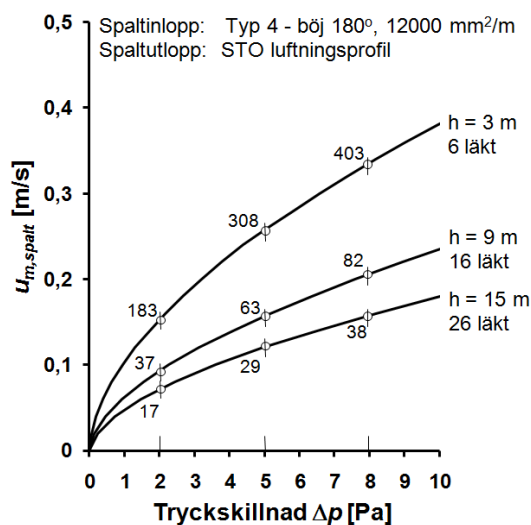
$$n = \frac{u_{m,spalt}}{h} \cdot 3600 \quad (5.1)$$

5.1 Spalt med horisontella, perforerade ställäkt

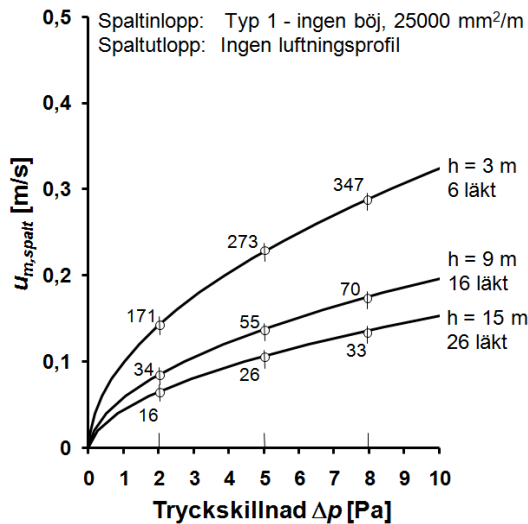
I Figur 5-1 till Figur 5-4 visas beräknade lufthastigheter för spalter utförda med horisontella, perforerade ställäkt med centrumavstånd 600 mm. Utförande vid spaltinlopp refererar till Figur 4-2.



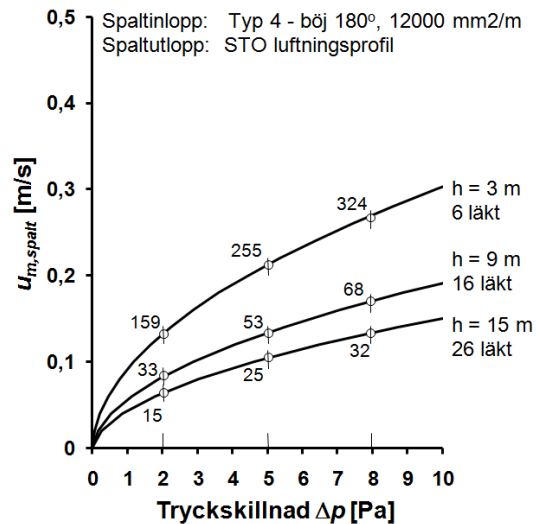
Figur 5-1 Spalt med läkt typ Europrofil.



Figur 5-2 Spalt med läkt typ Europrofil



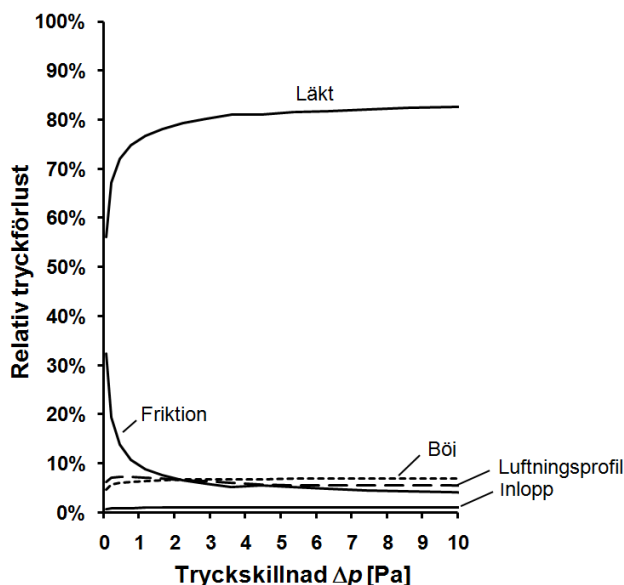
Figur 5-3 Spalt med läkt typ Lindab



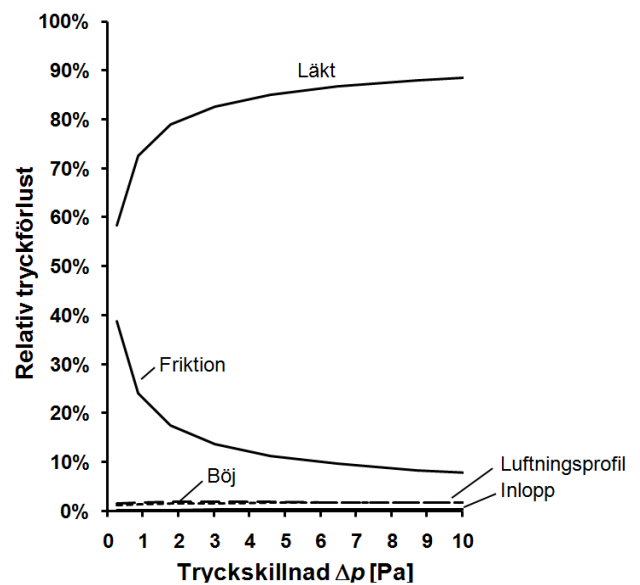
Figur 5-4 Spalt med läkt typ Lindab

Det första som kan noteras är att skillnader i lufthastighet beroende på utförande vid in- och utlopp är små för båda läkttyperna, speciellt vid högre spalthöjder. Detta är en effekt av att en mycket stor andel av det totala tryckfallet sker över läkten. Den relativa fördelningen av tryckförlusterna för två av spalterna i Figur 5-4 (höjd 3 och 15 m) framgår av Figur 5-5 och Figur 5-6 nedan. Summan av tryckförlusterna vid varje tryckskillnad är naturligtvis 100%. Av figurerna framgår det att:

- cirka 60-90% av det totala tryckfallet kan härledas till läkten.
- friktionsförlusterna vid små tryckskillnader (låga lufthastigheter) ger ett stort bidrag till den totala tryckförlusten.
- friktionens relativa betydelse ökar med ökad spaltlängd.
- för den långa spalten är tryckfallen som sker vid spaltens in- och utlopp i det närmaste helt försumbara i förhållande till friktionsförlusterna och de förluster som uppstår vid läktpassage.



Figur 5-5 Fördelning av förluster vid 3 m spalthöjd.



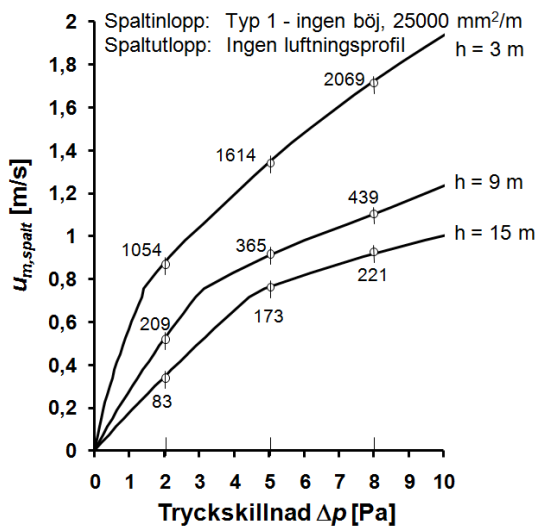
Figur 5-6 Fördelning av förluster vid 15 m spalthöjd.

Av figurerna kan också utläsas att lufthastigheten (och luftomsättningen) i spalter med läkt typ Lindab är i storleksordningen 10-25% lägre än i motsvarande spalter med läkt typ Europrofil vid samma drivkraft.

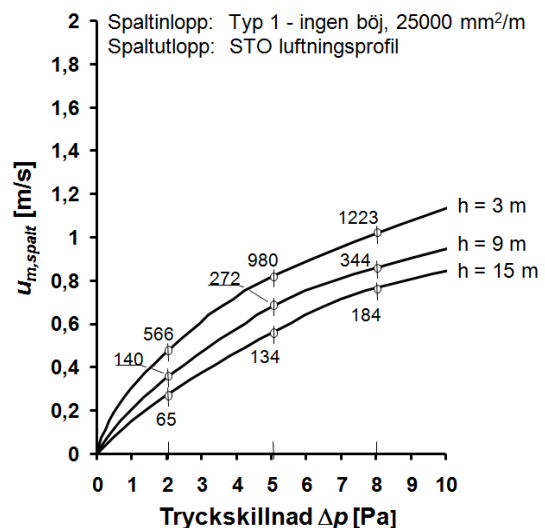
Det är även intressant att jämföra lufthastigheterna i spalter med horisontella läkt enligt Figur 5-1 - Figur 5-4 med de lufthastigheter som fås i spalter med vertikala läkt, se Figur 5-7 och Figur 5-10. Slutsatsen av en sådan jämförelse är att med horisontella läkt reduceras lufthastigheten med cirka 80% när spaltens in- och utlopp är utförda utan profiler, böjar eller areabegränsning. Med luftningsprofil och böj 180° med areabegränsning är reduktionen mindre, cirka 55-75%.

5.2 Spalt med vertikala läkt

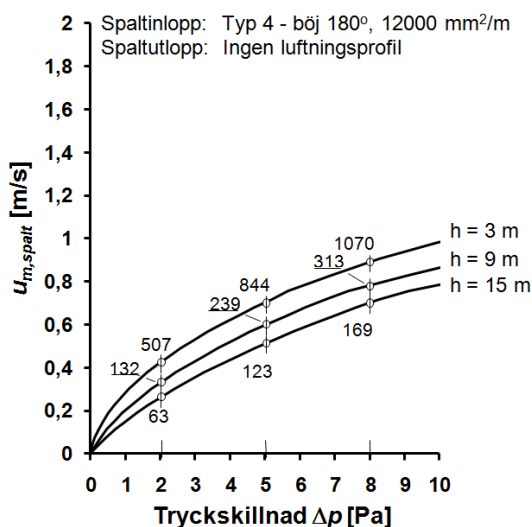
Vid beräkningar av lufthastighet i spalter med vertikala läkt har antagits luftspaltsbildande läkt med bredd 70 mm och centrumavstånd 600 mm. Det principiella utförandet ges då av Figur 2-3 med mått $a=530$ mm. Figur 5-7 till Figur 5-10 visar beräknad lufthastighet vid tre olika spalthöjder med alternativa utföranden vid in- och utlopp.



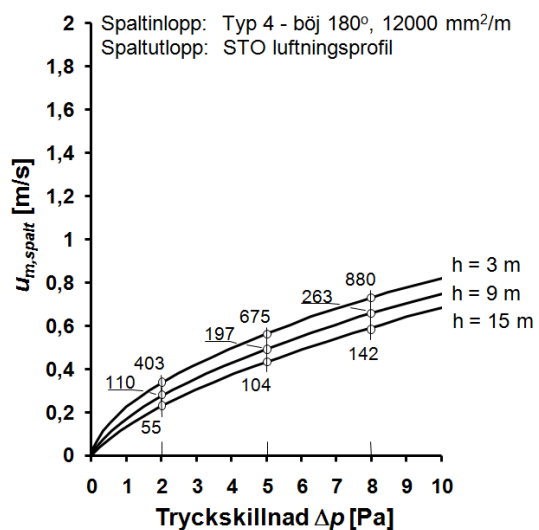
Figur 5-7 Spalt med vertikala läkt.



Figur 5-8 Spalt med vertikala läkt.



Figur 5-9 Spalt med vertikala läkt.

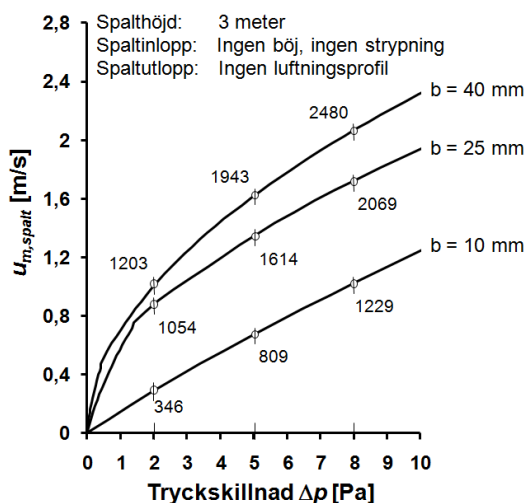


Figur 5-10 Spalt med vertikala läkt.

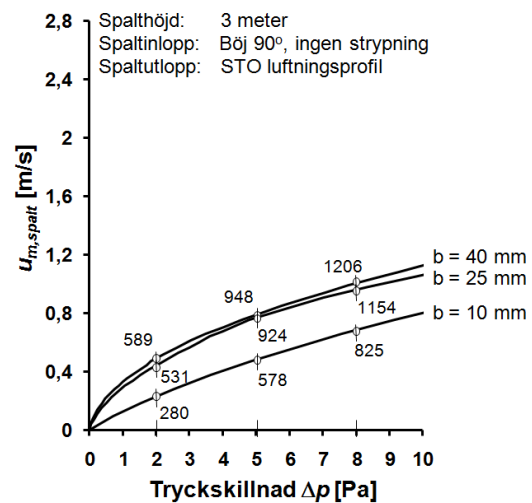
Till skillnad från spalter med horisontella läkt har in- och utloppets utformning stor betydelse för lufthastigheten. Detta är speciellt tydligt vid liten spalthöjd. Vid jämförelse mellan Figur 5-7 och Figur 5-10 ses att för en 3 m hög spalt är hastighetsreduktionen cirka 60% när förutsättningarna vid in- och utlopp förändras. Motsvarande reduktion vid spalthöjd 15 m är mindre, cirka 35%. Förklaringen till skillnaden är att i den långa spalten dominerar friktionsförlusterna och den relativa betydelsen av utförandet vid spaltöppningarna minskar.

I några beräkningar har lufthastighetens beroende av spaltbredden studerats, se Figur 5-11 till Figur 5-14. Observera de olika skalorna på den vertikala axeln i figurerna. Då spalterna har olika bredd (och därmed olika hydraulisk diameter) kommer övergången mellan laminärt och turbulent strömningstillstånd att inträffa vid olika lufthastigheter. Detta syns tydligt i till exempel Figur 5-13. Vid spaltbredd 10 mm är flödet laminärt i hela det studerade intervallet.

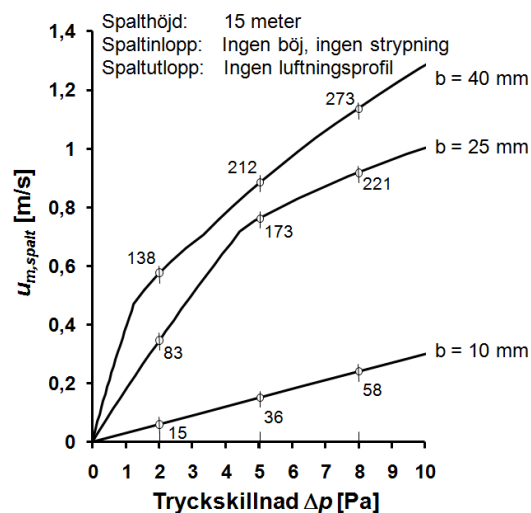
Figureerna visar att om spaltbredden minskar så minskar också lufthastigheten vid samma tryckskillnad. Det framgår dessutom att förändringarna i lufthastighet vid ändrade villkor vid in- och utlopp är minst för den smalaste spalten. Det senare som en konsekvens av att friktionsförlusten utgör en större andel av den totala tryckförlusten i denna spalt relativt de båda andra (se ekvation (2.13) och (2.14)).



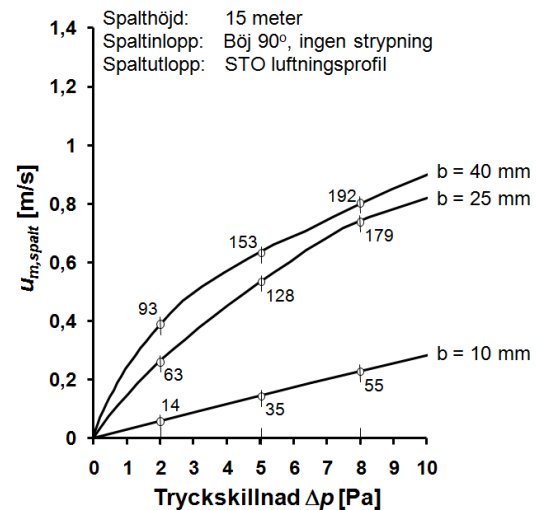
Figur 5-11 Spalt 3 m med vertikala läkt.



Figur 5-12 Spalt 3 m med vertikala läkt.

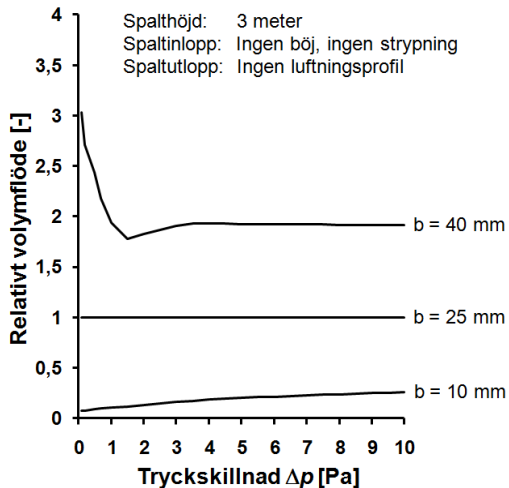


Figur 5-13 Spalt 15 m med vertikala läkt.

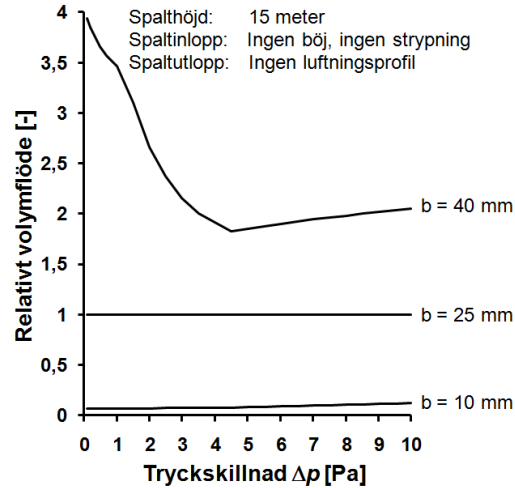


Figur 5-14 Spalt 15 m med vertikala läkt.

Vid samma drivkraft minskar alltså lufthastigheten och antalet luftomsättningar när spaltbredden minskar om förutsättningarna i övrigt är lika. En ytterligare faktor som påverkas vid förändring av bredden är volymflödet Q [m^3/s]. I Figur 5-15 och Figur 5-16 har relativa volymflöden för spalterna i Figur 5-11 respektive Figur 5-13 beräknats. Som utgångspunkt för den relativa jämförelsen har volymflödet för spalt med bredd 25 mm valts.



Figur 5-15 Relativt volymflöde vid spalthöjd 3 m.



Figur 5-16 Relativt volymflöde vid spalthöjd 15 m.

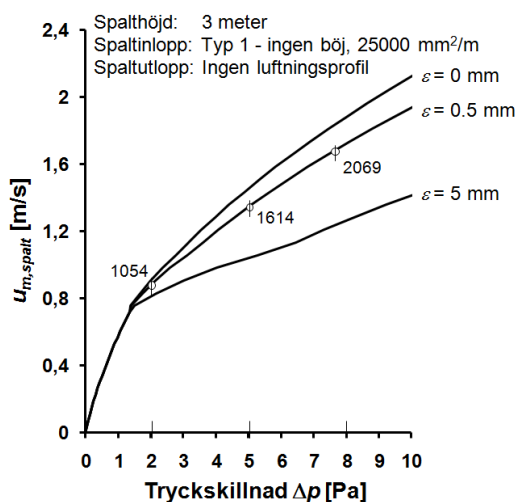
Av figurerna ovan kan följande slutsatser dras:

- vid små tryckskillnader (tiondelar av Pascal) reduceras volymflödet med över 90% när spaltbredden minskar från 25 till 10 mm. Detta gäller för båda spaltlängderna. Om spaltbredden istället ökar från 25 till 40 mm ökar volymflödet 150-200% i 3 m spalten och med nära 300% i den långa spalten. Skillnaden i volymflöde mellan 10 mm spaltbredd och 40 mm spaltbredd är vid små tryckskillnader (< 1 Pa) en faktor 20-40 för 3 m spalten och en faktor 50-60 för den 15 m långa spalten! Det kan därmed konstateras att spaltbredden bakom ett fasadskikt har en stor betydelse för luftspaltens värme- och fuktbalans.
- vid stora tryckskillnader (5-10 Pa) reduceras volymflödet med cirka 75% i 3 m spalten och med cirka 90% i 15 m spalten när spaltdjupet minskar från 25 till 10 mm. Vid en ökning av spaltdjupet från 25 till 40 mm ökar volymflödet i båda fallen med cirka 100%.

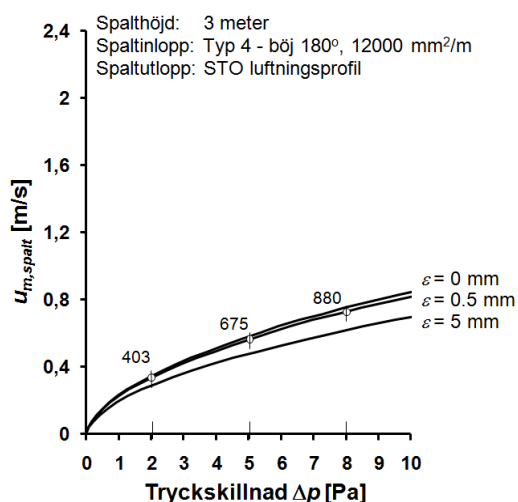
Lufthastighetens beroende av spaltyornas absoluta ytråhet ε visas i Figur 5-17 till Figur 5-20. Råhet 0 och 5 mm utgör i sammanhanget två extremvärden medan 0.5 mm är en representativ storleksordning för vanligt förekommande skivmaterial.

Enligt de teoretiska samband som använts vid beräkningarna finns två effekter av spaltyornas ytråhet. Dels påverkas friktionsförlusterna när det laminära strömningsområdet passerats (se ekvation (2.11) som ger friktionsfaktorn vid turbulent strömningstillstånd) och dels ingår ytråheten (via friktionsfaktorn) som en parameter vid beräkning av de strömningsförluster som uppstår vid en böj (se ekvation (2.33)). Brytpunkten i Figur 5-17 och Figur 5-19 uppstår vid en lufthastighet i spalten om drygt 0.7 m/s vilket motsvarar Reynolds tal 2300. En stor ytråhet som 5 mm ger över denna hastighet en kraftig dämpning av hastighetsökningen vid ökad drivkraft. Skillnaden mellan den helt glatta spalten och spalten med ytråhet 0.5 mm är förhållandevis liten.

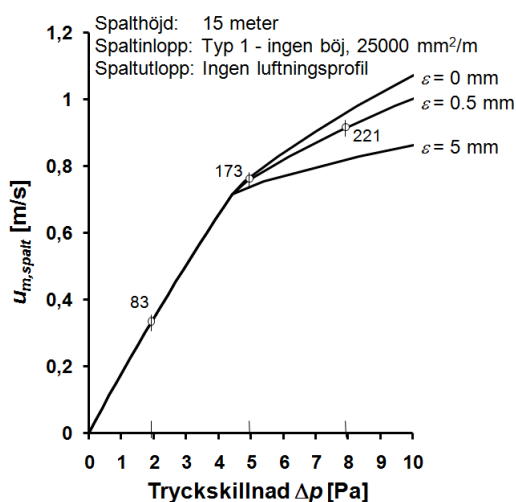
Vid utförande med luftningsprofil och böj enligt Figur 5-18 och Figur 5-19 påverkar ytråheten även hastigheten i det laminära området. Detta av anledning som har kommenterats ovan. Hastighetskillnaden mellan glatt spalt och spalt med ytråhet 0.5 mm är marginell medan 5 mm ytråhet ger en viss hastighetsdämpning.



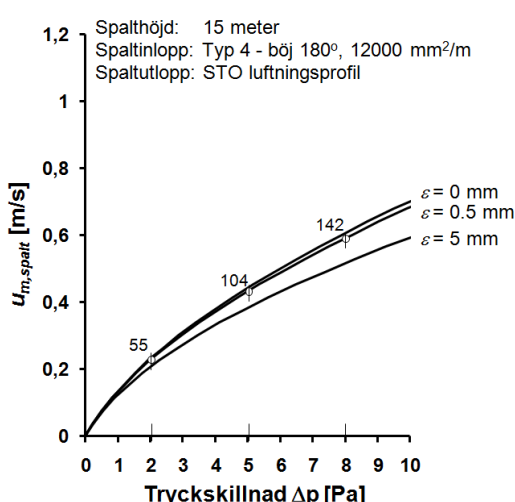
Figur 5-17 Spalt 3 m med vertikala läkt.



Figur 5-18 Spalt 3 m med vertikala läkt.



Figur 5-19 Spalt 15 m med vertikala läkt.



Figur 5-20 Spalt 15 m med vertikala läkt.

Två saker bör kommenteras. Den ena är att det är förhållandet mellan spaltytornas absoluta råhet och spaltens hydrauliska diameter (ϵ/d_H) som påverkar friktionsfaktorns storlek vid turbulent strömning. Den strömningstekniska betydelsen av en viss ytråhet skiljer därför vid olika spaltbredder. Den andra saken är ytråhetens betydelse när strömningen är laminär. Som nämnts i avsnitt 2.1.2 saknar ytråheten betydelse för friktionsförlusterna i det laminära strömningsslaget ”inom rimliga gränser på skrovligheten”. Vad som kan anses som rimligt eller inte vid de spaltdjup som studerats här förblir obesvarat.

Avslutningsvis skall några kommentarer av generell karaktär ges.

Flertalet av de jämförelser av olika spaltutföranden som görs i kapitlet avser skillnader i lufthastighet vid samma drivkraft. I praktiken kommer den övertemperatur ($T_{spalt} - T_{ute}$) som uppstår i en spalt under timmar med infallande solstrålning att variera beroende på spaltens

strömningsmotstånd. Ett ökat strömningsmotstånd leder till ökad övertemperatur vilket innebär ökad termisk drivkraft. Denna effekt bidrar därmed till att i någon mån utjämna de redovisade hastighetskillnaderna mellan olika spaltutformningar. Resonemanget kan förtydligas genom att gå tillbaka till jämförelserna av olika ställäkt i avsnitt 5.1. Här konstaterades att lufthastigheten i spalter med läkt Lindab blir cirka 10-25% lägre än i motsvarande spalter med läkt Europrofil vid samma drivkraft. Under identiska förhållanden i praktiken bör dock skillnaden i lufthastighet tendera till att vara något mindre då lufttemperaturen i en spalt med läkt Lindab blir högre än i en likvärdig spalt med läkt Europrofil.

I hela denna studie förutsätts att luftväxling i en ytterväggsspalt sker genom luftrörelser i vertikal riktning. I fallet med ett fasadskikt monterat mot vertikala läkt enligt princip visad i Figur 2-3 måste denna förutsättning i allt väsentligt vara korrekt då läkten effektivt hindrar horisontell kommunikation. När läksystemet utgörs av horisontella, perforerade profiler är det dock möjligt att tänka sig att drivkrafter från vind skulle kunna ge upphov till vissa rörelser även i horisontell riktning. Förutsättningen är då förstås att det finns öppningar i fasadskiktet som kan fungera som in- och utlopp för horisontell strömning. Den bedömning som gjorts här är att mekanismen är av mindre betydelse för den typ av fasadskikt som arbetet behandlar och frågan berörs därför inte ytterligare.

6 Experimentell uppställning – ventilerad putsfasad

Våren 2008 färdigställdes fyra experimentväggar i en provhusbyggnad. Bakom ett fasadskikt av puts på skivmaterial fanns i samtliga fall en luftspalt som ventilerades med utomhusluft. Det primära syftet med experimentväggarna var att, vid exponering i utomhusklimat, jämföra ventilationsgrad och fukt- och temperaturförhållanden i spalterna vid alternativa utföranden av det luftspaltsbildande läktsystemet. Detta kapitel beskriver provhusbyggnaden, de fyra experimentväggarnas utformning och använd instrumentering.

6.1 Beskrivning

6.1.1 Provhusbyggnad

Provhusbyggnaden ligger placerad intill V-huset på Lunds Tekniska Högskolas område i nordöstra delen av Lund. Landskapet runt huset är svagt kuperat och relativt storskaligt bebyggt. Inom en radie av några hundra meter från provhuset finns det en mängd spridda byggnadskroppar i varierande planstorlek och höjd.



Figur 6-1 Provhusbyggnadens långfasad mot söder.

Byggnadens planmått är cirka 5x7 meter med långfasaderna orienterade mot söder respektive mot norr. Takkonstruktionen är sadelformad med lutning cirka 30° och med ett avstånd frånnock till mark på knappt 5 meter. I långfasaderna finns ett bärande system av träpelare med mellanliggande provfält där fasaden är helt demonterbar. Detta kan utnyttjas för att prova olika typer av ytterväggskonstruktioner. Vid uppförandet av de fyra experimentväggarna användes två söderorienterade provfält (markerade till höger i Figur 6-1) för att skapa fyra olika fack, se bilaga 4. För att klimatförutsättningarna med tanke på vindpåverkan skulle bli så likvärdiga som möjligt för alla facken byggdes en 1.2 m bred skärm av plywood som en förlängning av långfasaden.

På taket av provhusbyggnaden fanns en väderstation för insamling av klimatdata. Denna väderstation var kopplad till en dator inne i byggnaden. Med hjälp stationen registrerades kontinuerligt lufttemperatur, luftfuktighet, vindhastighet, vindriktning och nederbörd. Samma

station används även för att registrera lufttemperatur och luftfuktighet inne i byggnaden under mätperioderna.

6.1.2 Experimentväggar

I bilaga 4 visas uppbyggnaden av experimentväggarna inklusive alla materialskikt och relevanta dimensioner.

Provfältens öppningsmått var ca 1.0x2.1 m (BxH). Vid uppförandet monterades först träregelverk med dimension 45x145 mm i provfältet. Regelverket ställdes i underkant mot en syllisolering av polyetencellplast (PE). I sida och i överkant monterades reglarna dikt mot den permanenta konstruktionen. På sträckor där oavsiktliga spalter uppstod drevades med mineralull varefter tätning med fogmassa gjordes längs hela anslutningen på den varma sidan. Regelbygget avslutades med att montera en stående regel mitt i respektive provfält så att fyra lika breda fack om knappt 450 mm bildades.

Vid utformningen av experimentväggarna var det viktigt att designa en teknisk lösning som möjliggjorde okulära studier av luft rörelser i spalterna med hjälp av rök. Av praktiska skäl var det dessutom angeläget att luftspalterna var lätt åtkomliga från insidan. Exempelvis skulle instrumentering i spalterna på ett enkelt sätt kunna installeras och underhållas. Önskemålet om att visuellt kunna studera förlopp i spalterna kunde uppfyllas genom att välja skivor av plexiglas som spalternas avgränsning inåt. Genom att montera plexiglas inifrån mot luftspaltsbildande, vertikala träläkt med tjocklek 25 mm kunde även önskemålet om tillgänglighet infrias. Träläkten skruvades fast mot de stående reglarna utifrån och i hörnen som bildades mellan läkt och regel tätades med fogmassa för att hindra luftläckage, se bilaga 4. För att fästa in plexiglasskivorna användes kort montageskruv genom förborrade hål. Med denna lösning var det enkelt att vid behov demontera skivorna. I mötet mellan horisontellt regelverk och plexiglas uppstod glipor. För att lufttäta utmed dessa sträckor användes kraftig tejp. Tejp användes även längs de vertikala, skruvade anslutningarna mellan plexiglas och läkt.





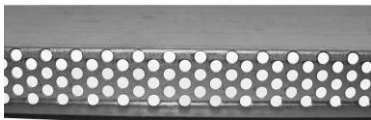

Efter montage av regler, läkt och plexiglas skruvades cementbaserade skivor *Aquapanel Outdoor* fast mot de 25 mm tjocka träläkten. Montaget utfördes i tillämpliga delar enligt de instruktioner som vid tidpunkten fanns publicerade på Knauf Danogips hemsida. I och med skivmontaget bildades två luftspalter i varje provfält. Luftspalternas nominella mått var cirka 25x390x2150.

Putsarbetena på experimentväggarna utfördes av yrkeskompetent personal från Maxit AB (byte 2009-01-01 namn till Weber). Det använda putssystemet *Serposol EF* är ett system som Maxit rekommenderar för applicering på cementbaserat skivunderlag. Putsbruket i systemet är ett fiberförstärkt KC-bruk med hydrofoba (vattenavvisande) egenskaper. Av bilaga 5 framgår översiktligt såväl de ingående materialskikten som de olika momenten vid utförandet. Avslutningsvis målades putsytorna med en silikatfärg i djupröd kulör. Valet av en relativt mörk kulör betingades av önskemålet om att få så stora temperaturutslag som möjligt i spalten under förhållanden med solstrålning.

Spalternas avslutning lämnades i underkant helt fria utan luftningsprofil, insektsnät eller annat. I överkant monterades plåtbleck för att skydda mot inträngning av fritt vatten och snö i spalterna. Bleckets utformning framgår av bilaga 4.

Det byggnadstekniska färdigställandet bestod i att montera horisontella, perforerade ställäkt i alla fack utom fack 1. För att kunna genomföra detta arbete var det naturligtvis nödvändigt att tillfälligt skruva loss och ta bort plexiglasskivorna. Efter tillkapning till rätt längder skruvades läkten fast mot baksidan av cementskivorna. Det inbördes centrumavståndet mellan läkten var cirka 600 mm. Förfarandet innebar att läkten i experimentväggarna inte användes för att bära upp skivor och puts. I en praktisk konstruktion är förstås principen att ställäkten skall föra in lasten från putsfasaden till väggstommen. För syftet med undersökningen var denna skillnad i funktion hos läkten utan betydelse. I anslutningarna mellan läktens vertikala plåtkanter och plexiglasen användes en tunn dammtätningsslist för att hindra luftpassage bakom läkten, se bilaga 4. Ställäkten som användes var av tre olika typer, se Tabell 6-1. Samtliga dessa läkt bygger 25 mm i tjockleksriktningen.

Tabell 6-1 Använda typer av perforerade ställäkt.

Fack	Produktuppgifter	Vy i profil	Perspektiv
2	<p>Tillverkare: Lindab</p> <p>Beteckning: KLS</p> <p>Perforering: Hål $\phi 8$ s100 i en rad => 503 mm²/m</p>		
3	<p>Tillverkare: Lindab</p> <p>Beteckning: FLV</p> <p>Perforering: Hål $\phi 18$ s36 i en rad => 7069 mm²/m</p>		
4	<p>Tillverkare: Europrofil</p> <p>Beteckning: VFL 70 AZ 0.7</p> <p>Perforering: Hål $\phi 5$ s13 i sex rader => 9062 mm²/m</p>		

I fack 1 där inga horisontella läkt användes bildades en vertikal luftspalt utan några hinder och spaltens area var cirka 25000 mm²/m. Läkten som användes i fack 2 har en mycket begränsad perforering, endast drygt 500 mm²/m, och utgör i sammanhanget ett mycket stort hinder för luftströmning. Därmed representerade fack 1 och fack 2 två ytterlighetsfall där möjligheterna till luftväxling maximerats respektive minimerats. Det skall nämnas att KLS-profilens egentliga användningsområde enligt Lindabs egen produktinformation är som läkt på bärande underlag i takkonstruktioner. De övriga två läkttyperna tillverkas och saluförs för användning som luftspaltsbildande läkt i ventilerade fasadkonstruktioner

6.1.3 Instrumentering

För kontinuerlig loggning av fukt- och temperaturförhållanden i spalterna monterades RF-givare och termoelement. Dessa var av typ Vaisala HMP44 respektive Pentronic T. Innan montage kalibrerades RF-givarna i en kalibreringsstation. Funktionen hos termoelementen kontrollerades genom neddoppning i isvattenbad.

RF-givare och termoelement monterades i respektive spalts underkant, överkant och nära mitten på spalthöjden. I anslutning till det senare monterades dessutom termoelement för att mäta yttemperaturen på cementskivans insida, temperaturen i gränsen mellan skiva och puts och putsens yttemperatur. Alla kabeldragningar gjordes genom borrade hål i regelstommen för att inte hindra demontage av plexiglasskivorna. Hålen tätades nogsamt med drev och tejp för att inte få luftkommunikation mellan spalterna och inomhusmiljön. Figur 6-2 ger en översiktlig bild av instrumenteringen innan inkoppling till mät dator.

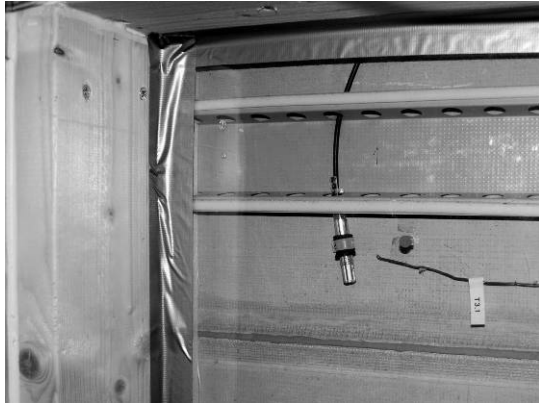


Figur 6-2 Experimentväggar med installerade givare i vy inifrån.

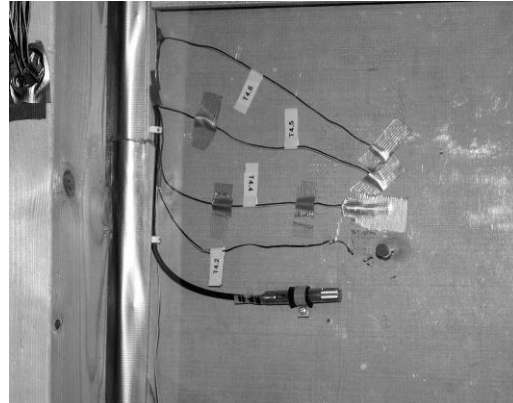
Av figuren ovan framgår att instrumenteringen genom sin fysiska storlek i viss mån inverkar på de geometriska förutsättningarna. Betydelsen har dock bedömts som liten och det har inte gjorts några ansträngningar att korrigera för detta vid utvärderingen av mätresultaten. I de tre spalterna med ställläkt drogs kabel till RF-givare på ett antal ställen genom hål i läkten. I fack 3 och 4 utnyttjades då existerande hål. Den mycket begränsade håltagningen i läkten i fack 2

motiverade att sådan dragning gjordes genom separat borrade hål något större än kabeldiametern.

Figur 6-3 och Figur 6-4 visar i detalj den helt färdiga installationen av givare i överkant av fack 3 och i mitten av samma fack. Notera att termoelementen för mätning av spalttemperatur monterats på distans från skivytorna för att undvika termisk shuntning. Av figurerna framgår också några av de detaljer i utförandet som tidigare har beskrivits i text.



Figur 6-3 Givarinstallation i överkant av fack 3.



Figur 6-4 Givarinstallation i mitten av fack 3.

6.1.4 Redovisning av mätresultat

Av avsnitt 6.1.3 framgår att det i projektet mätts såväl temperatur som relativ fuktighet i experimentväggarnas spalter. I kapitel 7 tillkommer därutöver mätningar som gjorts med lufthastighetsgivare. Upplysningsvis så har all redovisning av resultat från RF-mätningar helt exkluderats från den vidare framställningen. Därutöver redovisas resultat från mätningar av temperatur endast i den omfattning som befunnits relevant med hänsyn till de frågeställningar gällande luftomsättningar och konvektiv fukttransport som behandlas i resterande kapitel. Båda dessa val har varit nödvändiga för att begränsa arbetets omfattning.

Läsaren kommer också att finna att fack 2 (ytterlighetsfallet med minimal luftväxling) i stort sett helt exkluderats från behandlingen i vidare kapitel. Skälet till detta är att det med använda mätmetoder (enligt kapitel 7.1) inte var möjligt att bedöma vare sig storlek eller riktning på eventuell luftströmning. I det fortsatta avser alla hänvisningar till spalt med Lindabläkt fack 3 med läkt typ FLV, se Tabell 6-1.

7 Luftrörelser under dynamiska förhållanden

I detta kapitel beskrivs och redogörs för de mätningar och observationer som gjorts av luftrörelser i experimentväggarnas spalter. Experimentväggarnas uppbyggnad samt övriga förhållanden och förutsättningar beskrivs i kapitel 6.

7.1 Metoder

7.1.1 Rök

För studier av luftrörelser med rök har två metoder provats, Dräger dragprovare och Dräger Flow Check.

Dragprovaren är ett litet glasrör som innehåller fyllnadsmaterial impregnerat med svavelsyra. När glasröret bryts så att kontakt med luft uppstår bildas vit rök (rykande svavelsyra). Genom tryck på en gummiblåsa fastsatt på röret kan rökslingor bildas. Ett brutet glasrör går att använda i högst några timmar innan kapaciteten att bilda rök kraftigt avtar. Flow Check är en batteridrivna apparat där vit rök skapas med en start/stopp knapp. Apparaten använder vätskeampuller som innehåller en blandning av alkoholer. Rök bildas genom att vätskan upphettas och sedan kondenserar vid kontakt med omgivande luft. En ampull ger kontinuerlig rök i cirka 3 minuter.

Vid användning av rök för att studera luftrörelser i experimentväggarna har isoleringen först plockats bort och applicering i spalten har sedan skett inifrån genom hål på olika punkter i plexiglasskivan.

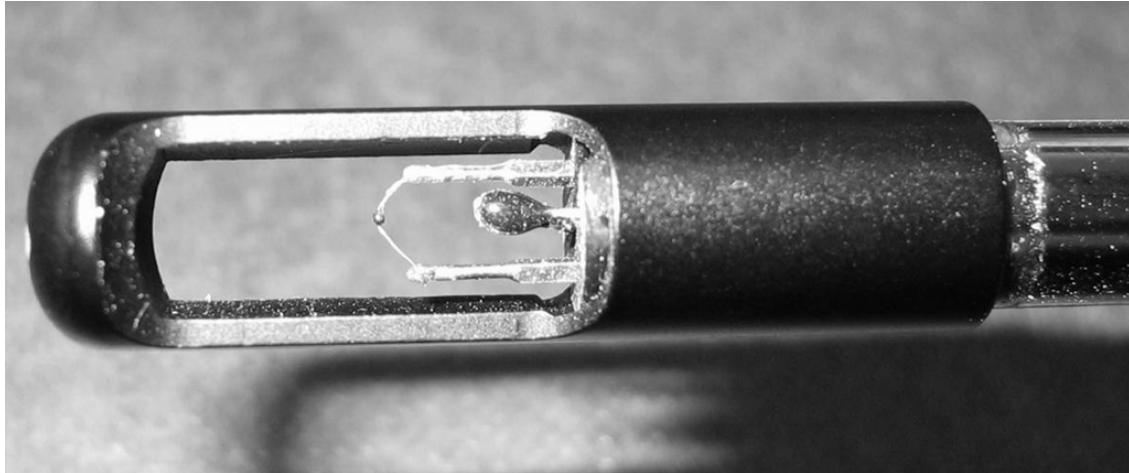
Rök ger en momentan bild av luftrörelsen och det är möjligt att visuellt bedöma om strömningsriktning är uppåtriktad, nedåtriktad eller varierande. Om luftrörelsen inte är alltför hög eller låg är det dessutom möjligt att uppskatta hastigheten. Förutom att det endast handlar om ögonblicksbilder uppstår praktiska svårigheter med metoden vid förhållanden med stora temperaturskillnader mellan spaltluften och luften i provhuset. Eftersom isoleringen måste demonteras påverkas temperaturen i spalten snabbt och ursprungsförhållandena störs. Potential för störningar uppstår också när spaltytan mot fasadskiktet är tydligt varmare eller kallare än spaltluften. Oförsiktig applicering av rök vid sådana situationer kan leda till missbedömningar då rök som kommer i kontakt med ytan kan röra sig motriktat eller med annan hastighet än den verkliga luftrörelsen.

De dokumenterade studierna med rök genomfördes med hjälp av dragprovaren. En stor nackdel med Flow Check är att röken lämnar apparaten med en hastighet som, framförallt under förhållanden med små luftrörelser i spalten, ger alltför stora störningar. Dragprovaren däremot ger möjlighet till god precision vid applicering, både avseende mängden rök och avseende var i spaltbredden som röken släpps.

7.1.2 Lufthastighetsgivare

För mätningar av lufthastighet har använts lufthastighetsgivare kopplad till instrument med loggningsfunktion (Testo 435-1). Instrumentets minneskapacitet är drygt 16000 loggpunkter och loggning av lufthastighet kan till exempel utföras var 10:e sekund i cirka 45 timmar eller var 20:e sekund i cirka 90 timmar. Själva givaren innehåller två elektriska motstånd vars

resistans varierar med temperaturen (så kallad termistor). Det ena motståndet – vindtermistor – sitter så att det träffas av luftströmmen medan det andra motståndet – temperaturtermistor – är skyddat. Motstånden är kopplade i en strömkrets och beroende på lufthastighet kommer vindtermistorn att kylas av så att dess resistans ändras. Detta utnyttjas för att beräkna lufthastigheten. Figur 7-1 visar en detaljbild på givaren. Den lilla punkten på tråden är vindtermistorn och till höger om den sitter temperaturtermistorn. Givaren sitter monterad på ett skaft med teleskopfunktion.



Figur 7-1 Detaljbild på lufthastighetsgivare. Längden på det svarta partiet är cirka 30 mm.

Vid mätning med lufthastighetsgivare har montage i spalten skett inifrån genom snävt borrarade hål i plexiglas. Vindtermistorns läge i spalten har uppskattningsvis varit 10-12 mm från den ena kanten och 13-15 mm från den andra. Teoretisk mittpunkt för spalten är 12.5 mm från respektive kant. Förutom lufthastighet ger givaren även temperaturinformation från temperaturtermistorn.

En viktig begränsning med denna typ av lufthastighetsgivare är att givaren inte kan avgöra om strömningsriktningen är konstant eller växlar. Används hastighetsresultaten för att direkt beräkna luftomsättning kan alltså grova fel göras.

7.2 Observationer med rök

Observationer gjorda med hjälp av rök finns sammanställda i bilaga 6 - bilaga 8. Av bilagorna framgår vid vilka tidpunkter som försöken genomfördes, vilka yttre förutsättningar som gällde och vilka observationer som gjordes. Vid proven togs isoleringen i facket tillfälligt bort så att plexiglas mot spalten exponerades. Rök tillfördes genom borrarat hål som var centrerat i spalten (mitt emellan sidokanterna och på halva spalthöjden). Vid några tillfällen användes också hål nära underkanten respektive nära överkanten. Varje försök tog cirka 5- 10 minuter att genomföra. Under denna tid applicerades rök upprepade gånger samtidigt som realtidsvärden på vindhastighet och vindriktning från klimatstationen avlästes och noterades. Vid flertalet försök fanns det så stora fluktuationer i både vindhastighet och vindriktning att en direkt koppling mellan den specifika vindsituationen och luftens samtidiga rörelse i spalten inte var möjlig. I dessa fall anges i bilagorna de gränser inom vilka vinden varierade. Rådande temperaturförhållanden är redovisade som en temperaturskillnad mellan spaltluften och uteluften ($T_{spalt} - T_{ute}$) med spalttemperaturen beräknad som ett medelvärde av tre mätpunkter (se ekvation (7.1)). Avläsning av temperatur skedde både innan och efter varje försök för att kontrollera vilka störningar borttagningen av isoleringen orsakat. Faktiska problem med

temperaturstörningar i spalten uppstod endast på natten den 19/1. I bilagorna redovisas även den beräknade termiska drivkraften (Δp_{termik}) och de lufthastigheter (både medellufthastighet $u_{m,\text{spalt}}$ och topphastighet $u_{\text{max,spalt}}$) som denna termiska drivkraft beräkningsmässigt ger upphov till.

Lufthastigheten i spalten uppskattades genom att mäta den tid det tog för röken att förflytta sig en bestämd sträcka. Eftersom lufthastigheten har en profil över spaltbredden är det inte självklart vilken lufthastighet det var som mättes vid rökproven. Strävan var att släppa röken mitt i spaltbredden. Vid tester som gjordes konstaterades att det inte var möjligt att avgöra några säkra hastighetsskillnader när röken släpptes mycket nära halva spaltbredden eller med en viss, avsiktlig förskjutning inåt eller utåt. Detta förhållande var detsamma i alla facken och indikerade att profilen nära mitten på spaltbredden var ganska jämn. Följaktligen bör gjorda uppskattningar av hastigheten vid rökproven var nära luftens topphastighet.

En allmän observation är att situationer med enbart vind som drivkraft ger upphov till svårförutsägbara luftrörelser i spalterna, ofta utan någon dominerande strömningsriktning. Ett extremfall är mätningarna gjorda i fack med horisontella läkt på morgonen den 3/7. En vind om 2-4 m/s nära parallell med experimentväggarna orsakade här en ”vaggande” luftrörelse i spalten med täta växlingar i strömningsriktningen. Förklaringen måste vara att tryckskillnaden mellan överkant och underkant spalt under dessa betingelser omväxlande antog positivt och negativt värde. Samman morgon studerades även luftrörelsen i fack 1. Vindstyrkan hade precis vid mättillfället ökat något (3-6 m/s) samtidigt som vindriktningen ändrats från relativt stadig ost till varierade från nordost till sydost. Strömningsriktningen i spalten var vid detta tillfälle huvudsakligen uppåt. Luftrörelsen i en spalt kan uppenbarligen påverkas betydligt av relativt små förändringar i vindförhållandena.

I spalterna med horisontella läkt fanns vid några mättillfällen stora övertemperaturer, 14 till 21 °C med motsvarande termiska drivkrafter cirka 1.1 till 1.6 Pa. Enligt försöken är den dominerande luftrörelsen vid sådana tillfällen en icke växlande, uppåtgående luftströmning, åtminstone vid vindstyrkor som är måttliga 5-6 m/s eller lägre. En jämförelse mellan beräknade och mätta lufthastigheter vid dessa tillfällen indikerar att vinden ömsom förstärker den termiska drivkraften och ömsom motverkar densamma.

Även vid tillfällen med mindre övertemperaturer, 3 till 9 °C och termisk drivkraft cirka 0.2 till 0.7 Pa, visade försöken företrädesvis på en icke växlande, uppåtgående luftströmning. Vid flertalet av dessa observationer var dock vinden svag < 4 m/s.

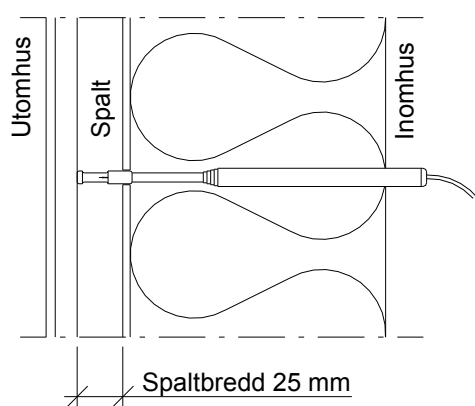
En sen kväll i januari gjordes rökprov när den termiska drivkraften var obetydlig samtidigt som vinden var mycket svag, mindre än 1 m/s. Vid sådana förutsättningar är naturligtvis lufthastigheten i spalten mycket låg och en tillförlitlig bestämning av luftens hastighet och riktning med rökmetoden visade sig vara svår.

Sammanfattningsvis är den viktigaste kunskapen från försöken med rök att vind tycks orsaka oregelbundna och svårförutsägbara luftrörelser i en ytterväggsspalt. Förhållandevis små förändringar i anblåsningsvinkeln kan innebära en omkastning av strömningsriktningen. Konsekvensen är att det i praktiska sammanhang bör vara mycket osäkert att förutsätta att en specifik anblåsningsvinkel eller vindriktning verkar för en konstant strömningsriktning åt det ena eller det andra hållet i en spalt.

7.3 Mätningar med lufthastighetsgivare

Lufthastighetsgivare ger möjlighet till att studera luft rörelser kontinuerligt under flera dygn. Mätningar med sådan givare har därför bedömts vara ett värdefullt komplement till visuella observationer med rök. Målsättningen med mätningarna har varit att de skall ge underlag för en uppskattning av ventilationsgraden under lång tid ("medelventilation") och öka förståelsen för hur termisk drivkraft, vindhastighet och vindriktning inverkar.

Under perioden oktober 2008 till februari 2009 genomfördes lufthastighetsmätningar i experimentväggarna under totalt cirka 2400 timmar. Då endast ett instrument med givare användes alternerade mätningarna under denna period mellan spalt med vertikala läkt och spalter med horisontella läkt. Mätningarna av lufthastighet gjordes utan undantag på halva spalthöjden. Figur 7-2 visar hur givaren var monterad i spalterna.

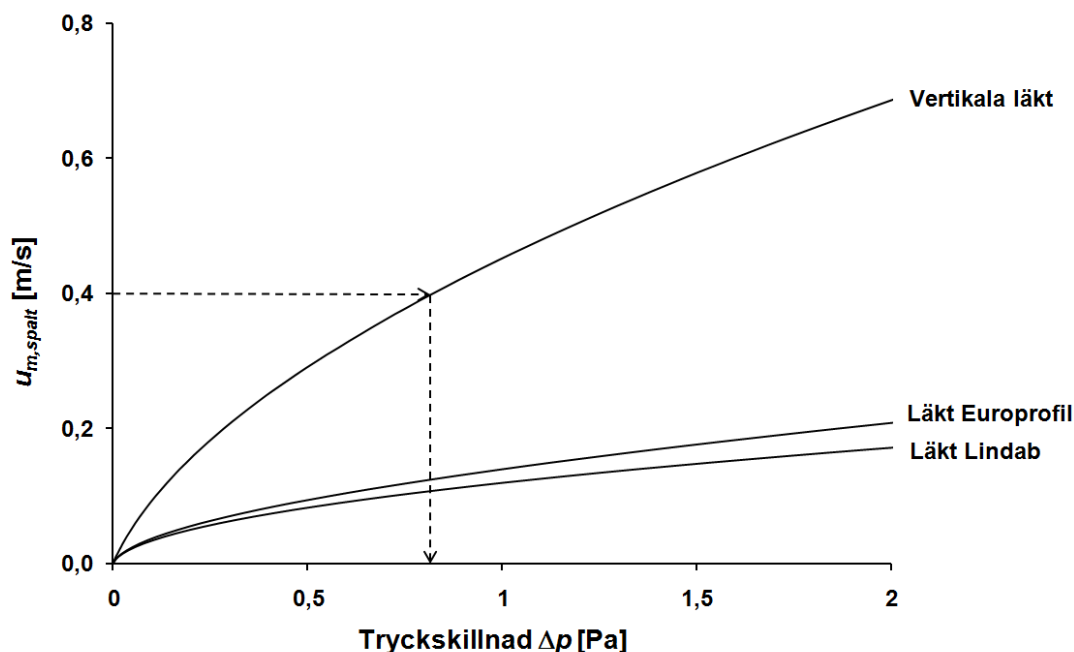


Figur 7-2 Montage av lufthastighetsgivare i spalt.

Avsikten var att givaren skulle registrera luftens topphastighet mitt i spaltbredden. Som tidigare nämnts blev det verkliga läget av praktiska skäl något förskjutet (cirka 1-3 mm, se avsnitt 7.1.2) i förhållande till mittpunkten. I det fortsatta har denna avvikelse försumrats. Som tidsintervall för registrering under mätningarna användes var 10:e till var 20:e sekund.

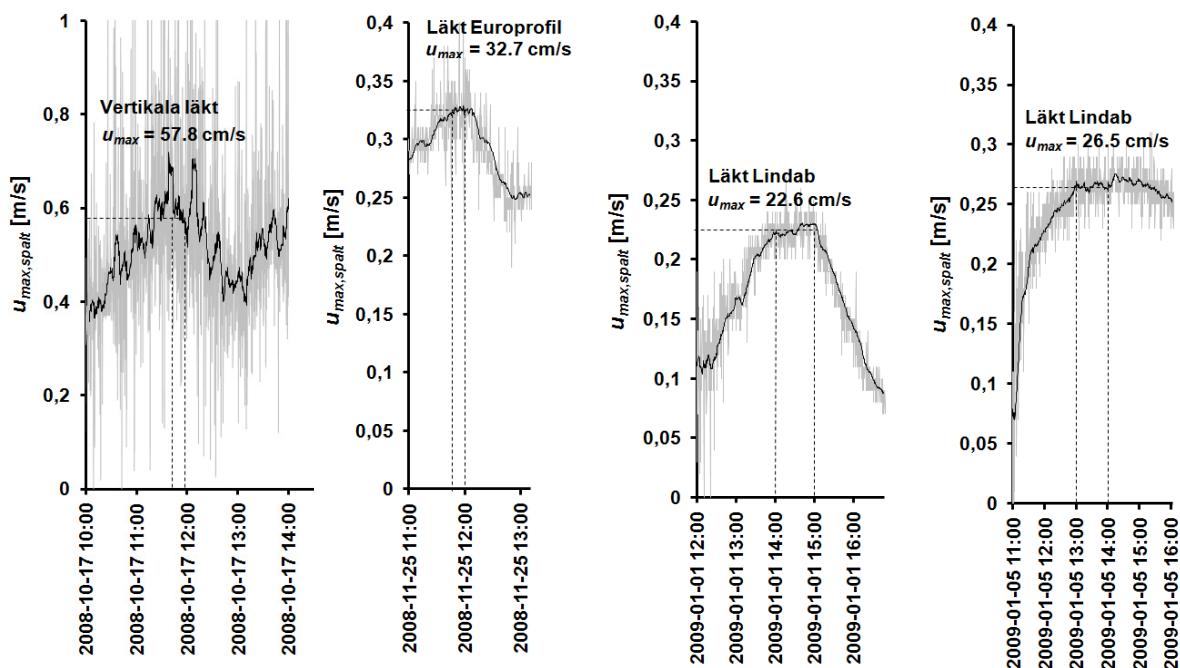
Det skall nämnas att det under mätningarna periodvis fanns problem, både med provhusets klimatstation och med den dator som användes för spara information från termoelementen i spalterna. Detta har naturligtvis försvårat analysen av vindens respektive termikens betydelse för lufthastigheten i spalterna. Med hjälp av den stora datamängd som samlats in har det dock varit möjligt att göra en uppskattning av de drivkrafter som verkat för att skapa luftströmning i experimentväggarnas spalter, både under korta och långa tidsperioder. Metodiken som använts för denna utvärdering är följande:

1. Med hjälp av ekvation (2.35) har samband mellan tryckskillnad och medellufthastighet för de aktuella spaltutformningarna beräknats. Kurvorna framgår av Figur 7-3.
2. Registrerat mätvärde på lufthastighet har förutsatts vara luftens topphastighet. För bestämning av luftens medelhastighet har förhållande mellan medelhastighet och topphastighet som redovisas i Figur 4-13 och Tabell 4-5 utnyttjats.
3. Med medellufthastighet som ingångsvärde har tillhörande drivkraft bestämts. Som exempel visas i Figur 7-3 ett fall där topphastigheten i spalt med vertikala läkt mäts till 0.615 m/s vilket motsvarar en medellufthastighet om 0.40 m/s. Med det analytiska uttrycket för kurvan kan tillhörande drivkraft beräknas till 0.82 Pa.



Figur 7-3 Samband mellan drivkraft och lufthastighet för spalterna i experimentväggarna.

För att kontrollera att beräkningsmodellen ger en rimlig prediktion av förhållandet mellan drivkraft och lufthastighet i experimentväggarnas spalter har beräkningsresultat jämförts med resultat från mätningar som erhållits vid förhållanden med svag vind samtidigt som termiken varit stark. Trots många mättimmar har sådana situationer varit ganska fåtaliga. De för syftet bästa mätresultaten redovisas i Figur 7-4. I samliga fall i Figur 7-4 gäller att lufthastighet (topphastighet) har registrerats med 20 sekunders intervall och att de heldragna kurvorna skapats genom glidande medelvärdesbildning av 30 registreringar. Angivna hastigheter u_{max} är medelvärdet av lufthastigheten under markerade tidsperioder.



Figur 7-4 Mätta topphastigheter u_{max} i experimentväggarnas spalter.

Utifrån mätta temperaturförhållanden i uteluft och i spalt har de termiska drivkrafterna bestämts varefter medellufthastigheterna beräknats. I Tabell 7-2 ges en sammanställning av aktuella temperaturförhållanden, resulterande drivkraft och beräknad respektive mätt topphastighet. Den genomsnittliga spalttemperaturen T_{spalt} [°C] över spalthöjden är beräknad utifrån 3 mätpunkter som

$$T_{spalt} = \frac{1}{6} \cdot T_{uk} + \frac{2}{3} \cdot T_{mitt} + \frac{1}{6} \cdot T_{ök} \quad (7.1)$$

T_{uk} = mätt temperatur i underkant spalt [°C]

T_{mitt} = mätt temperatur på halva spalthöjden [°C]

$T_{ök}$ = mätt temperatur i överkant spalt [°C]

Konstanterna i ekvation (7.1) har valts efter jämförelse med ett stort antal temperaturprofiler som beräknats med hjälp av ekvation (3.28). Vid beräkningarna har spalthöjd h , spaltbredd b och absorptionsfaktor α_{sol} varit konstant 2.15 m, 25 mm respektive 0.9. De parametrar som varierades framgår av Tabell 7-1.

Tabell 7-1 Parametervariation vid beräkning av temperaturprofiler.

Parameter	Variation
Lufthastighet u [cm/s]	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70
Konvektiv värmeöverföringskoefficient α_k [W/m ² ·K] (utsida fasadskikt)	5, 10, 15, 20
Solstrålning $I_o \cdot \cos(\varphi)$ [W/m ²]	0, 100, 250, 500, 750
Utomhustemperatur T_u [°C]	0, 10, 20

Jämförelsen visade att ekvation (7.1) ger en genomsnittlig spalttemperatur som avviker mindre än 5% från densamma beräknad med hjälp av ekvation (3.28). Därmed har ekvation (7.1) bedömts vara användbar för att uppskatta den genomsnittliga spalttemperaturen.

Vid beräkning av topphastighet har samband mellan medelhastighet och topphastighet enligt Tabell 4-5 i använts.

Tabell 7-2 Jämförelse mellan beräknade (enbart termisk drivkraft) och mätta lufthastigheter.

Läkt	Tid	T_{ute} [°C]	T_{spalt} [°C]	Δp [Pa]	Beräkning $u_{max,spalt}$ [cm/s]	Mätning $u_{max,spalt}$ [cm/s]
Vertikala	2008-10-17 kl 11.45-12.00	12.2	22.2	0.88	41.8 / 0.66 = 63.3 (+9.5%)	57.8
Europrofil	2008-11-25 kl 11.45-12.00	0.8	25.6	2.26	22.6 / 0.70 = 32.3 (-0.6%)	32.5
Lindab	2009-01-01 kl 14.00-15.00	-0.9	19.8	1.93	16.9 / 0.75 = 22.5 (-0.4%)	22.6
Lindab	2009-01-05 kl 13.00-14.00	-6.5	25.7	3.00	21.4 / 0.77 = 27.8 (+4.9%)	26.5

Som framgår av Tabell 7-2 är avvikelserna mellan mätning och beräkning som mest knappt 10% och slutsatsen är därmed att beräkningsmodellen ger tillförlitliga resultat. Orsaker till de avvikelser som finns kan vara flera. En uppenbar felkälla är att förhållandena inte varit helt stabila på grund av vindpåverkan. Några andra felkällor är till exempel att:

- temperaturprofilen i spalten är uppskattad utifrån tre mätpunkter
- beräkningsmodellen i alla sina delar inte beskriver verkligheten helt korrekt
- det finns begränsningar i mätnoggrannheten, både avseende lufttemperatur och lufthastighet
- givarplacering inte varit exakt på halva spaltdjupet

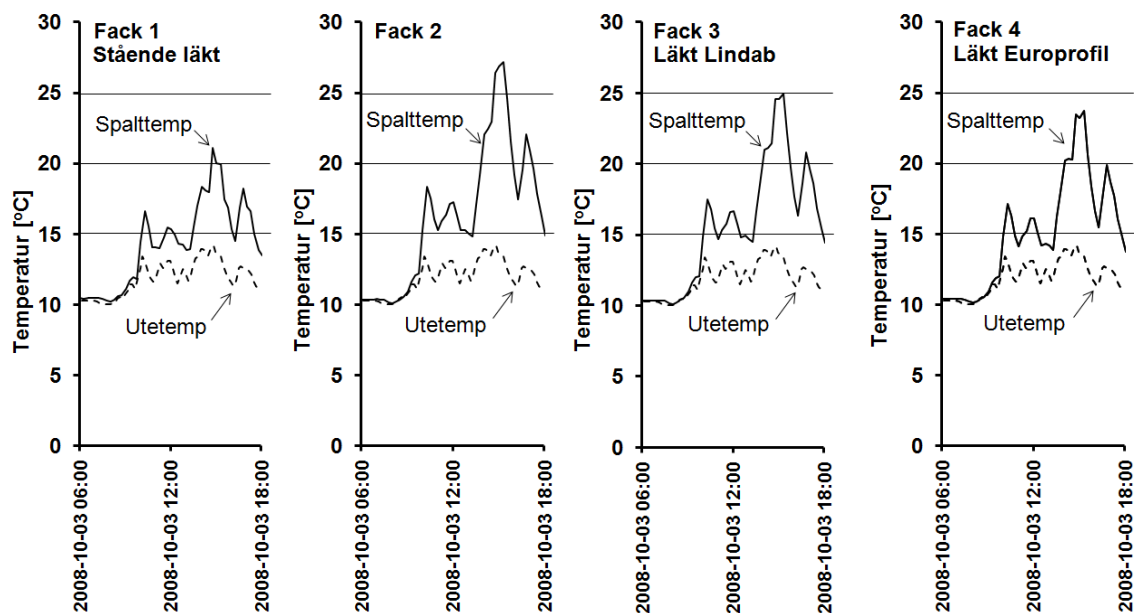
Med metodik som beskrivits tidigare har insamlad datamängd från lufthastighetsmätningar använts för att beräkna vilka drivkrafter för luftströmning som funnits under mätperioderna. I Tabell 7-3 redovisas resultat baserat på samtliga mätningar som gjorts.

Tabell 7-3 Drivkrafter för luftströmning i experimentväggarna (tabellen fortsätter på nästa sida).

Läkt	Mätperiod	Mät-timmar	Antal mätvärden	Medellufthastighet $u_{m,spalt}$ [m/s]	Medeldrivkraft Δp [Pa]
Vertikala (fack 1)	081009-081010	23.6	8509	0.168	0.287
	081015-081017	44.9	16157	0.213	0.406
	081022-081024	45.3	16312	0.253	0.501
	081030-081103	90.6	16312	0.127	0.191
	081113-081116	74.6	8508	0.211	0.396
	081116-081118	45.3	16312	0.182	0.349
	081118-081122	90.6	16312	0.168	0.292
	081215-081219	88.7	15977	0.149	0.235
	081219-081221	45.3	16312	0.254	0.595
	090108-090112	90.6	16312	0.202	0.388
	090114-090118	90.6	16312	0.203	0.390
	090208-090212	90.6	16312	0.199	0.415
	090213-090216	71.0	12786	0.202	0.356
		Σ 892	Σ 192433	0.195	0.372
Lindab (fack 3)	081008-081009	23.8	8508	0.068	0.505
	081013-081015	45.3	16312	0.061	0.454
	081020-081022	45.2	16312	0.083	0.749
	081025-081027	45.1	16312	0.084	0.817
	081110-081113	61.7	11114	0.085	0.924
	081207-081211	90.6	16312	0.040	0.213
	081213-081215	45.4	8165	0.084	0.835
	081230-090102	79.6	14329	0.058	0.406
	090102-090106	90.6	16312	0.060	0.478
	090118-090121	70.5	12684	0.052	0.379
	090121-090125	90.6	16312	0.058	0.475
090127-090131	90.6	16311	0.048	0.250	
		Σ 779	Σ 168983	0.064	0.521

Europrofil (fack 4)	081004-081006	45.3	16312	0.099	0.844
	081007-081008	26.3	9452	0.092	0.717
	081010-081012	45.3	16312	0.094	0.665
	081017-081019	45.3	16312	0.087	0.632
	081027-081029	45.3	16312	0.069	0.464
	081103-081106	54.4	16312	0.072	0.504
	081107-081110	73.4	13206	0.071	0.497
	081125-081129	90.6	16312	0.074	0.511
	081130-081204	90.6	16312	0.061	0.348
	081222-081226	90.6	16312	0.073	0.454
	090201-090205	90.6	16312	0.089	0.697
		Σ 698	Σ 169466	0.080	0.571

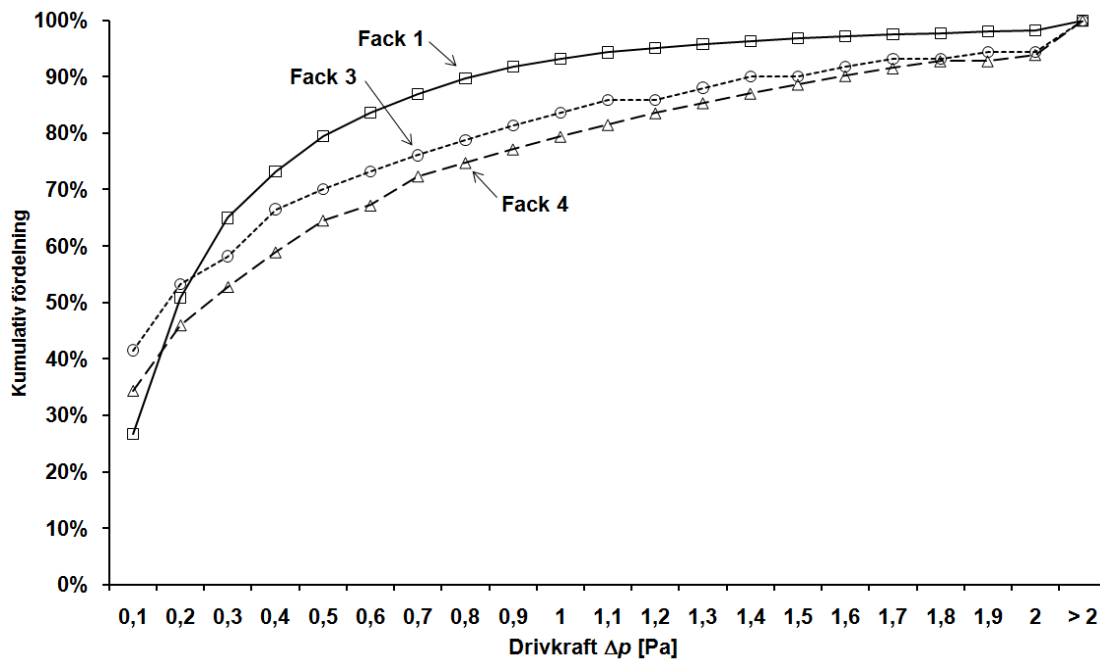
Beaktat samtliga mätperioder och spaltutföranden är en generell observation att den tillgängliga medeldrivkraften under en period aldrig överstigit 1 Pa och aldrig varit lägre än cirka 0.2 Pa. För spalterna med horisontella läkt är snittet över samtliga mätperioder drygt 0.5 Pa och något lägre för spalten med vertikala läkt, knappt 0.4 Pa. Att drivkraften är större i spalterna med horisontella läkt kan förklaras av att spaltluften under soltimmar når högre temperaturer än i spalten med vertikala läkt. Figur 7-5 visar ett typiskt exempel på detta förhållande en höstdag med växlande molnighet.



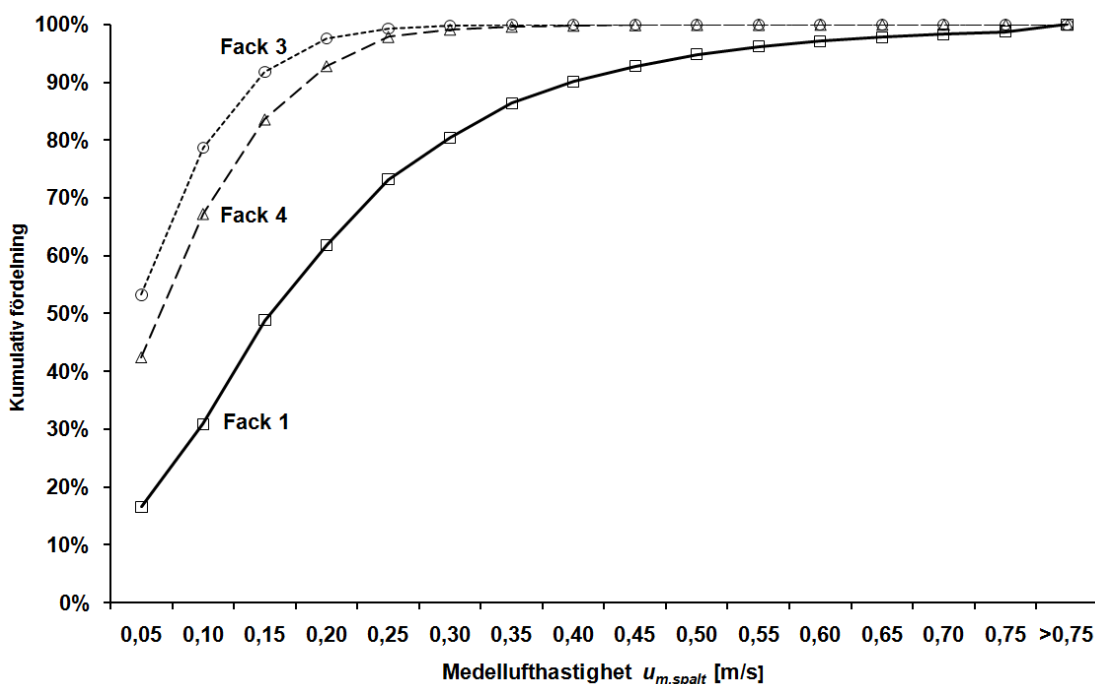
Figur 7-5 Spalttemperaturer och utomhustemperatur en oktoberdag med växlande molnighet

Spalttemperaturen i Figur 7-5 är beräknad med hjälp av ekvation (7.1). Det är tydligt att övertemperaturen blir som lägst i spalten med störst luftväxling (fack1) och som högst i spalten med minimal luftväxling (fack 2). Övertemperaturen i de två andra facken visar också ett klart samband med luftväxlingen. Temperaturrelationen mellan fack 3 och fack 4 borde över tid innebära något högre drivkrafter för fack 3. Resultatet i Tabell 7-3 är dock det omvända. En närliggande förklaring är att detta helt enkelt beror på skillnader i de klimatbetingelser som rått under mätperioderna (som inte sammanfaller mellan de olika facken).

En mer nyanserad bild av hur tillgänglig drivkraft varierat för spalterna under mätperioderna visas i Figur 7-6. Av figuren framgår att förhållanden med små drivkrafter (≤ 0.1 Pa) verkat under ungefär 30% av tiden medan förhållanden med drivkrafter över 2 Pa varit relativt sällsynta, 5- 10% av tiden. Figur 7-7 visar hur medellufthastigheten varierat under mätperioderna. I spalterna med horisontella läkt har hastigheter över 0.2-0.25 m/s varit ovanliga. För spalten med stående läkt varierar lufthastigheten inom ett större intervall. Lufthastigheter över 0.7 m/s har sällan inträffat.



Figur 7-6 Kumulativ fördelning av tillgänglig drivkraft.



Figur 7-7 Kumulativ fördelning av medellufthastighet $u_{m,spalt}$.

7.4 Analys av lufthastighetsmätningar

I avsnitt 7.4.1-7.4.3 kommer tre av mätperioderna i Tabell 7-3 att analyseras med målsättning att noggrannare bestämma luftomsättningen i experimentväggarnas spalter och förstå vilken relativ betydelse drivkraft från vind respektive termik haft. Som nämnts tidigare fanns det tyvärr en del tekniska problem med utrustningen under mätningarna. Detta har mycket kraftigt begränsat antalet perioder som varit användbara för analysen. Styrande för val av mätperioder har varit att samtidig och fullständig mätdata från klimatstation respektive temperaturgivare i spalten föreligger och att fack 1, fack 3 och fack 4 skall behandlas.

Mätresultat för de tre perioderna är placerade i bilaga 9 - bilaga 11 med diagram vars innehåll förklaras nedan.

D1. Mätt lufthastighet - topphastighet $u_{max,spalt}$

Visar rådata från mätning av topphastighet $u_{max,spalt}$ och glidande medelvärde av mätpunkter under 10 minuter. Observera att mätvärden som återges i diagrammet är absolutbelopp beroende på begränsningar i den använda lufthastighetsgivaren, se avsnitt 7.1.2. Vid varje tidpunkt är det alltså i utgångsläget av analysen obekant om luften strömmat uppåt eller nedåt i spalten. Det glidande medelvärde som redovisas baseras direkt på mätvärdena varför även detta skall betraktas med förbehåll enligt ovan. Teckenregel som används i kommande avsnitt är att positiv lufthastighet ger uppåtriktad strömning i spalten medan negativ lufthastighet ger det motsatta.

D2. Mätt, korrigerad lufthastighet $u_{m,spalt}$ / Beräknad lufthastighet $u_{m,spalt}$ av termik

Visar medelhastighet $u_{m,spalt}$ som beräknats utifrån topphastighet $u_{max,spalt}$ och samband mellan medelhastighet och topphastighet enligt Tabell 4-5. Glidande medelvärdesbildning på samma sätt som i diagram D1. Visar även lufthastighet $u_{m,spalt}$ beräknad med ekvation (2.35) och med drivkraft baserad på termiska förhållanden enligt diagram D5 och D6.

D3. Vindhastighet

Visar vindhastighet som mätts med egen klimatstation i provhusbyggnaden. Givarplacering strax över taknock cirka 5 meter över marken. Vindhastighet visas dels som medelvärde under 10 minuter och dels som vindstöt (maximal vindhastighet under 10 minuter). I avsnitten betecknas vindhastighet som mätts med egen klimatstation som $U_{m,5}$.

D4. Vindriktning

Visar vindriktning som mätts med egen klimatstation i provhusbyggnaden. Givarplacering cirka 5 meter över marken. Vid vindriktning 180 grader har vinden blåst vinkelrät mot experimentväggarna (vind från syd). Vid vindriktning 90 respektive 270 grader har vinden varit parallell med väggarna (vind från öst respektive från väst).

D5. Temperaturer i spalten och utomhus

Visar utomhustemperatur som registrerats med egen klimatstation och temperaturer i spalten som mätts med 3 stycken termoelement placerade utmed spaltens vertikala centrumlinje och mitt i spaltbredden.

D6. Övertemperatur i spalten

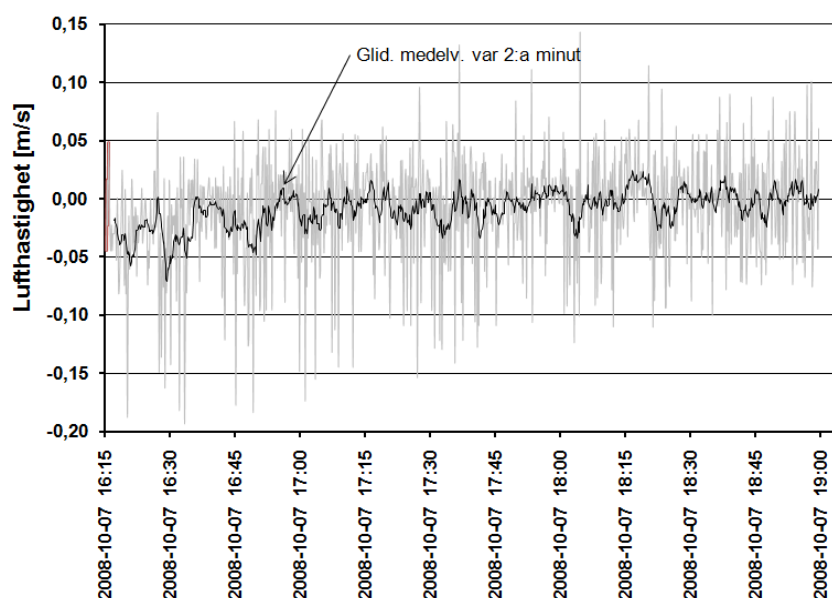
Visar skillnad mellan genomsnittlig lufttemperatur i spalten (beräknad med ekvation (7.1)) och lufttemperatur utomhus.

7.4.1 Mätperiod 081007-081008 fack 4, läkt Europrofil

Vid periodens start är övertemperaturen i spalten drygt 20 °C och medelvinden är svag, 2-4 m/s. Vindriktningen varierar mellan sydväst till sydost. Omkring kl 17 sker en förändring i vindförhållandena och medelvinden sjunker till ca 2 m/s samtidigt som vindriktningen övergår till att pendla mellan syd-sydost. Fram till kl 02 på natten är vindförhållandena sedan relativt konstanta.

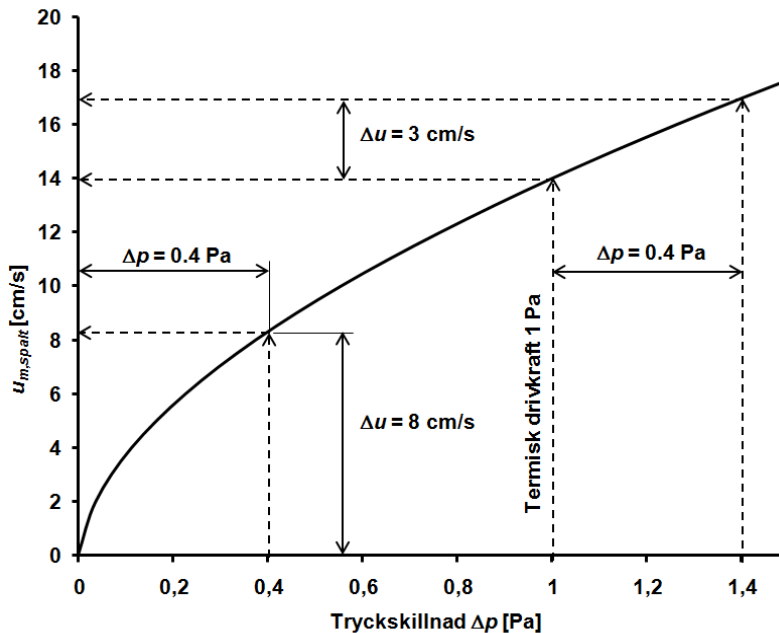
Som framgår av diagram D2 i bilaga 9 är överensstämmelsen mellan mätt, medelvärdesbildad lufthastighet och lufthastighet beräknad utifrån termiska förhållanden mycket god från ungefär kl 17 till strax före kl 21. Innan kl 17 finns en liten men tydlig skillnad. Den termiska drivkraften för uppåtriktad luftströmning är inledningsvis uppåt 2 Pa. Med hjälp av Figur 2-8 kan $|\Delta C_p|$ uppskattas till ≤ 0.1 och det krävs då vindhastighet på nära 6 m/s för att motverka termiken och vända strömningsriktningen. Med rådande vindhastighet 2-4 m/s är det därför troligt att strömningsriktningen i spalten vid mätningens start varit stadigvarande uppåt. Omkring kl 19 har den termiska drivkraften sjunkit till cirka 0.4 Pa och vindhastigheten varierar kring 2 m/s. Drivkraft som kan skapas av vind vid denna tidpunkt är mindre än 0.2-0.3 Pa varför uppåtriktad strömning fortfarande kan antas gälla.

Med premisen att strömningsriktningen fram till kl 19 inte växlat beroende på en stark termik kan vindens inverkan på lufthastigheten i spalten under tidsperioden studeras. Detta är möjligt om skillnaden mellan mätt, korrigerad lufthastighet och beräknad lufthastighet enligt aktuella termiska förhållanden (båda lufthastigheterna framgår av diagram D2) förutsätts vara en följd av vindpåverkan. Skillnaden mellan dessa hastigheter från kl 16:15 till kl 19 visas i Figur 7-8. Lufthastigheten i figuren är alltså avvikelser från den beräknade hastigheten av termik och avvikelserna är orsakade av vindpåverkan. Negativ hastighet betyder att vinden motverkat termiken medan positiv hastighet betyder att vinden verkat för uppåtriktad strömning och därmed förstärkt den termiska drivkraften.



Figur 7-8 Hastighetsvariation i spalten orsakad av vindpåverkan.

Det skall observeras att lufthastigheterna i Figur 7-8 beskriver vindens inverkan vid samtidigt verkande termik. Om samma drivkrafter från vind verkat vid frånvaro av termiska drivkrafter skulle riktningen på strömningen vid varje tidpunkt vara oförändrad men lufthastigheten skulle vara högre. En förklaring ges enklast med ett exempel, se Figur 7-9.



Figur 7-9 En drivkraftskillnad på 0.4 Pa skapar olika lufthastigheter.

I exemplet finns det en termisk drivkraft på 1 Pa som ger en lufthastighet på 14 cm/s i spalten. För att vind skall öka lufthastigheten med 3 cm/s till 17 cm/s krävs då att vinden skapar en drivkraft på 0.4 Pa så att den totala drivkraften blir 1.4 Pa. Utan samtidig termisk drivkraft skulle samma vind gett en lufthastighet på drygt 8 cm/s. Orsaken till skillnaden i de två fallen är att sambandet mellan tryck och lufthastighet inte är linjärt.

Det är möjligt att använda mätdata för att uppskatta hur stor skillnaden i formfaktor ΔC_p (se avsnitt 2.2.3) mellan spaltens öppningar varit under tidsperioden. Figur 7-10 redovisar resultat från en beräkning som baseras på medelvärden i intervall om 10 minuter. Tätare upplösning än så är inte möjlig då vindhastigheten endast är registrerad som ett medelvärde av vinden under 10 minuter. Värdena på ΔC_p har beräknats genom sambandet

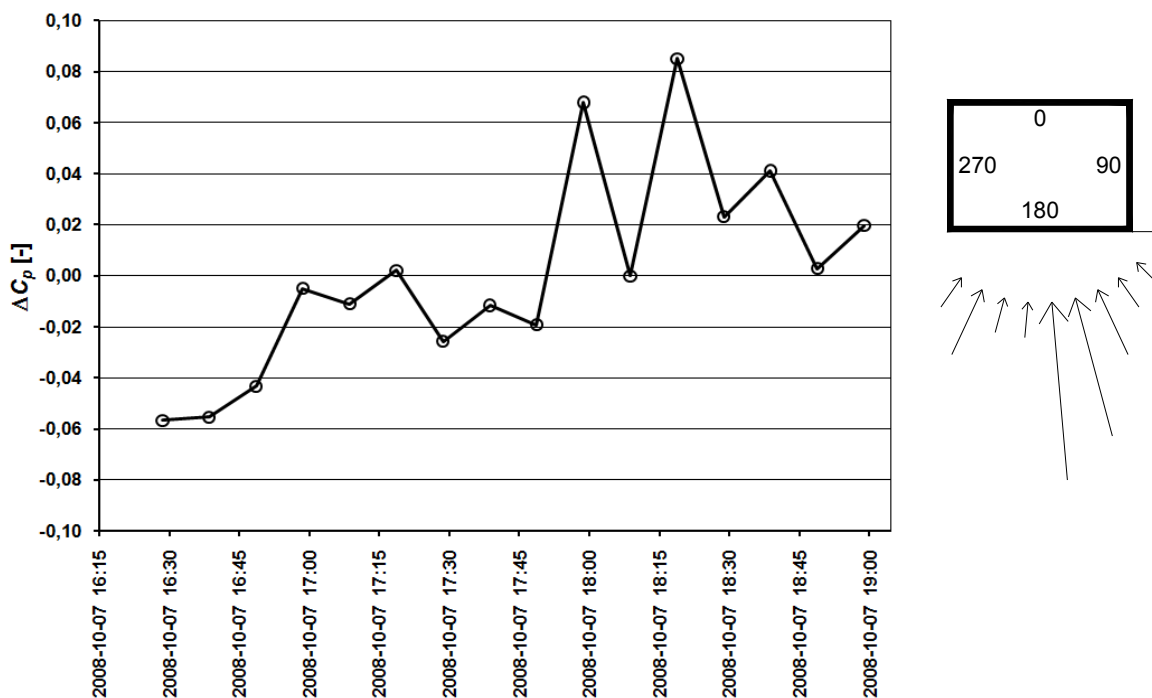
$$\Delta C_p = \frac{2 \cdot \Delta p_{vind}}{\rho \cdot U_{m,5}^2} \quad (7.2)$$

Δp_{vind} = medeldrivkraft av vind under 10 minuter [Pa]

$U_{m,5}$ = medelvindhastighet under 10 minuter [m/s]

ρ = luftens densitet, ungefär 1.2 kg/m³

För tydlighetens skull har Figur 7-10 kompletterats med en grafisk framställning (baserad på diagram D4) som visar hur vindriktningen varierat under perioden. Längden på pilarna speglar med vilken frekvens en specifik vindriktning förekommit.



Figur 7-10 Skillnad i formfaktor mellan spaltens öppningar den 7/10-08.

Metodik som utnyttjats för beräkning av medeldrivkraft av vind under ett 10 minuters intervall framgår av Tabell 7-4.

Tabell 7-4 Metodik för beräkning av medeldrivkraft av vind under 10 minuter.

Tidpunkt	Mätresultat, korrigerad lufthastighetsmätning		Beräknad drivkraft av termik Δp_{term} [Pa]	Drivkraft av vind Δp_{vind} [Pa]
	$u_{m,spalt}$ [m/s]	$\Delta p_{term} + \Delta p_{vind}$ [Pa]		
16:30:01	0.148 =>	1.105	1.865	1.105 - 1.865 = -0.760
16:30:11	0.216 =>	2.132	1.865	2.132 - 1.865 = 0.267
.....
16:39:41	0.193 =>	1.750	1.706	1.750 - 1.706 = 0.044
16:39:51	0.163 =>	1.303	1.706	1.303 - 1.706 = -0.403
Medeldrivkraft av vind under 10 minuter = $\Sigma \Delta p_{vind} / 60 =$				-0.440

Tolkning av Figur 7-10 är att vid negativa värden på ΔC_p har vinden företrädesvis verkat för att luften skall strömma uppifrån och ner i spalten. Det finns dock ingen objektiv möjlighet att avgöra om strömningsriktningen bestäms av skillnader i övertryck eller undertryck mellan spaltöppningarna. Det är noterbart att de absoluta värdena på ΔC_p som medelvärde under 10 minuter understiger 0.1. Vid en jämförelse med Figur 2-8 kan följande vara intressant att uppmärksamma:

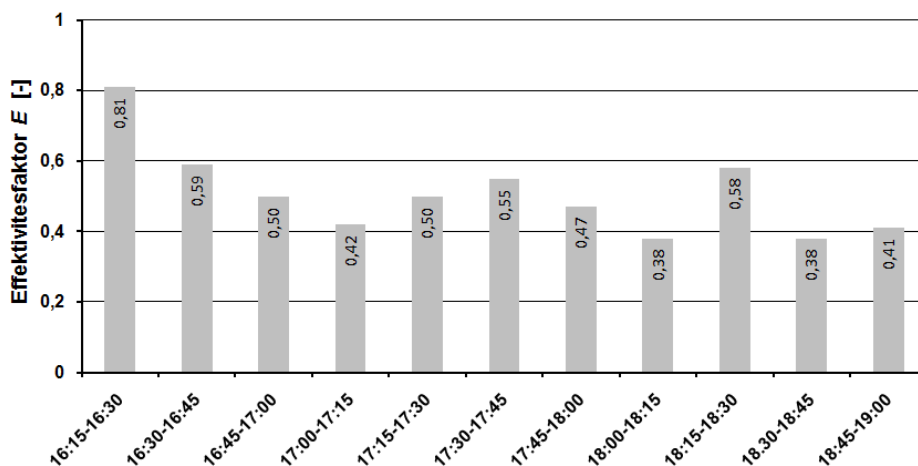
- för de aktuella anblåsningvinklarna visar Figur 2-8 en skillnad i formfaktorer som skall ge en strömningsriktning uppifrån och ner (orsakad av skillnader i övertryck) i spalten. Figur 7-8 och Figur 7-10 visar tydligt att skillnaden i formfaktor mellan spaltöppningarna i praktiken pendlat så att riktningen på luftströmningen orsakad av vind växlat över tid.
- upplösningen i Figur 2-8 är för grov för att avläsa formfaktorer på den detaljningsnivå som visas i Figur 7-10.

Baserat på mätresultatet kan luftomsättningen under tidsperioden beräknas till 229 oms/h. Eftersom de termiska drivkrafterna är kända kan luftomsättningen vid enbart termik beräknas till 244 oms/h. Under perioden har alltså vinden motverkat termiken så att luftomsättningen minskat med 15 oms/h. Som visas i Tabell 7-4 så är det möjligt att bestämma både storleken på drivkraft av vind och om denna drivkraft verkat för uppåt- eller nedåtriktad strömning i spalten. Om dessa riktningbestämda drivkrafter från vinden verkat utan samtidig termik skulle luftomsättningen uppgått till 61 oms/h. En motsvarande beräkning baserad på de absoluta beloppen av Δp_{vind} ger luftomsättning 120 oms/h. Kvoten mellan de båda talen 61 respektive 120 oms/h ger en uppfattning om på vindens effektivitet att skapa luftomsättningar. Det är här användbart att definiera kvoten mellan de båda talen som en effektivitetsfaktor E

$$E = \frac{n_v}{n_k} \quad (0 \leq E \leq 1) \quad [-] \quad (7.3)$$

n_v = antal luftomsättningar av vind med hänsyn till att strömningsriktningen i spalten växlar
 n_k = antal luftomsättningar av vind utan hänsyn till att strömningsriktningen i spalten växlar

Eftersom de mätningar med lufthastighetsgivare som gjorts i detta arbete inte ger någon information om riktningen på strömningen är storleksordningen på effektivitetsfaktorn framförallt intressant för att i det fortsatta kunna bedöma tidsperioder när vind verkat utan samtidig termik. För den aktuella tidsperioden 16:15-19:00 blir faktorn $61/120=0.51$. En mer detaljerad bild av hur E varierat under perioden ges i Figur 7-11. Inledningsvis är faktorn hög, vilket i det här fallet betyder att vinden under en stor del av tiden verkat för en nedåtriktad strömning (se Figur 7-8), men sjunker sedan till att pendla kring cirka 0.5.



Figur 7-11 Effektivitetsfaktorn E i intervall om 15 minuter.

Storleken på faktorn är starkt kopplad till flera parametrar: antal riktningväxlingar, spalthöjd och luftens hastighet i spalten. Färre antal riktningväxlingar, lägre spalthöjd och högre lufthastighet i spalten tenderar till att höja effektivitetsfaktorn medan det motsatta tenderar till att sänka faktorn. Som jämförelse visas i Tabell 7-5 vilka värden E antar för tidsintervallet kl 16:15-19 vid några konstruerade förändringar där alla övriga parametrar hållits oförändrade.

Tabell 7-5 Storleken på E vid olika förändringar.

Förändring	Effektivitetsfaktor E [-]
Referens, ingen förändring	0.51
Lufthastighet -30%	0.45
Lufthastighet - 60%	0.32
Lufthastighet + 30%	0.56
Lufthastighet + 60%	0.60
Fördubblad spalthöjd ($2 \cdot 2.15 = 4.3$ m)	0.37
Halverad spalthöjd ($0.5 \cdot 2.15 = 1.08$ m)	0.68

Det skall för tydlighetens skull påpekas att termiska drivkrafter ger upphov till strömning med en konstant riktning varför effektivitetsfaktorn för termik är 1. Ett förtydligande gällande begreppet luftomsättning skall också ges. I detta arbete används som kriterium för att en luftomsättning inträffat att hela luftvolymen i spalten blivit utskiftad. I fall med en stadigvarande uppåt- eller nedåtriktad luftströmning (eventuellt med varierande hastighet) beräknas luftomsättningen n [oms/h] enkelt med ekvation (5.1) som

$$n = \frac{u_{m,spalt}}{h} \cdot 3600$$

$u_{m,spalt}$ = genomsnittlig lufthastighet i spalten [m/s]

h = spaltens höjd [m]

Vid växlande strömningsriktning duger inte uttrycket ovan och n kan svårligen beräknas utan hjälp av datorkraft. I bilaga 12 illustreras den principiella metodiken som använts för att beräkna antal luftomsättningar vid sådana förutsättningar.

Sammanfattningsvis för perioden kl 16:15-19 kan konstateras att den termiska drivkraften ensam kunnat skapa 244 oms/h. Hade bara drivkraft från vind funnits skulle luftomsättningen blivit 61 oms/h. Vid samtidig drivkraft från vind och termik summerar luftomsättningen till 229 oms/h.

Under dagtid dygnet senare verkar återigen en stark termik samtidigt som vindförhållandena ändrats något. Vinden kommer från samma håll som tidigare men medelvindhastigheten har ökat till 2-6 m/s med vindstötarna nära 8 m/s. Jämförs drivkraft av termik med de drivkrafter som vinden kunnat skapa går det inte att utesluta att strömningsriktningen vid vissa tillfällen varit nedåtriktad (även om temperaturförhållandena i spalten enligt diagram D5 indikerar att en uppåtriktad strömning varit kraftigt dominerande). Konsekvensen är att ett okänt antal av de mätvärden som i diagram D1 och D2 är redovisade som positiva sannolikt skall vara negativa. Dessa förutsättningar innebär att vindens inverkan på strömningen i spalten inte kan bestämmas lika enkelt som för den föregående perioden. För att uppskatta omfattning av nedåtriktad strömning har mätdata analyserats i intervall om 10 minuter. Detta är finast möjliga tidsupplösningen då vindhastigheten inte registrerats med tätare frekvens. För varje 10 minuters period har aktuell termisk drivkraft jämförts med den största drivkraft som vinden kunnat skapa. En möjlighet har varit att basera maximal drivkraft av vind på vindstöt/vindby (den högsta registrerade vindhastigheten under 10 minuter) men detta skulle uppenbarligen

vara i en grov överskattning av vindens verkan. Istället har med stöd av avsnitt 2.2.3 antagits att vindhastigheten under respektive 10 minuters period fluktuerat med en amplitud på $\pm 50\%$ kring medelvärdet. Tillsammans med antagandet $|\Delta C_p| \leq 0.1$ har maximal drivkraft av vind $\Delta p_{vind,max}$ [Pa] för varje 10 minuters intervall därmed kunnat beräknas som

$$\Delta p_{vind,max} = 0.1 \cdot \frac{1.2 \cdot (1.5 \cdot U_{m,5})^2}{2} \quad (1.5 \cdot U_{m,5} < U_{vindby}) \quad (7.4)$$

eller som

$$\Delta p_{vind,max} = 0.1 \cdot \frac{1.2 \cdot U_{vindby}^2}{2} \quad (1.5 \cdot U_{m,5} \geq U_{vindby}) \quad (7.5)$$

$U_{m,5}$ = mätt vindhastighet som medelvärde under 10 minuter [m/s]

U_{vindby} = mätt maximal vindhastighet under 10 minuter [m/s]

I bilaga 13 ges en sammanställning av vind- och drivkraftsförhållanden under perioden. Notera speciellt att beräkningen av $\Delta p_{vind,max}$ baseras på ekvation (7.5) om $1.5 \cdot U_{m,5} > U_{vindby}$. Av bilagan framgår att under drygt hälften av alla tidsintervall (27 av 51) har vinden varit kapabel att skapa sådan drivkraft att nedåtriktad strömning varit möjlig. Det framgår också för respektive 10 minuters period den högsta möjliga nedåtriktade lufthastigheten. Exempelvis kunde vinden mellan kl 12:10-12:20 motverka termiken och åstadkomma en nedåtriktad strömning med hastighet upp till 0.115 m/s. Det finns dock ingen möjlig metod att avgöra vilka av de mätvärden som är ≤ 0.115 m/s under tidsintervallet som avser uppåtriktad respektive nedåtriktad strömning. Den generella ansats som använts vid analysen är att alla mätvärden som uppfyller kriteriet för nedåtriktad strömning har antagits vara negativa. Undantag har gjorts i de tre intervall som återges i Tabell 7-6.

Tabell 7-6 Tre tidperioder med kraftig drivkraft från vind.

Tidsperiod	$U_{m,5}$ [m/s]	U_{vindby} [m/s]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$\Delta p_{vind,max}$ [Pa]	Max drivkraft för nedåtriktad strömning [Pa]	Max lufthastighet vid nedåtriktad strömning [m/s]
10:30-40	4,7	7,6	1,38	2,98	-1,60	0,183
11:10-20	5,9	7,8	1,58	3,65	-2,07	0,213
13:10-20	5,5	7,8	1,61	3,65	-2,04	0,211

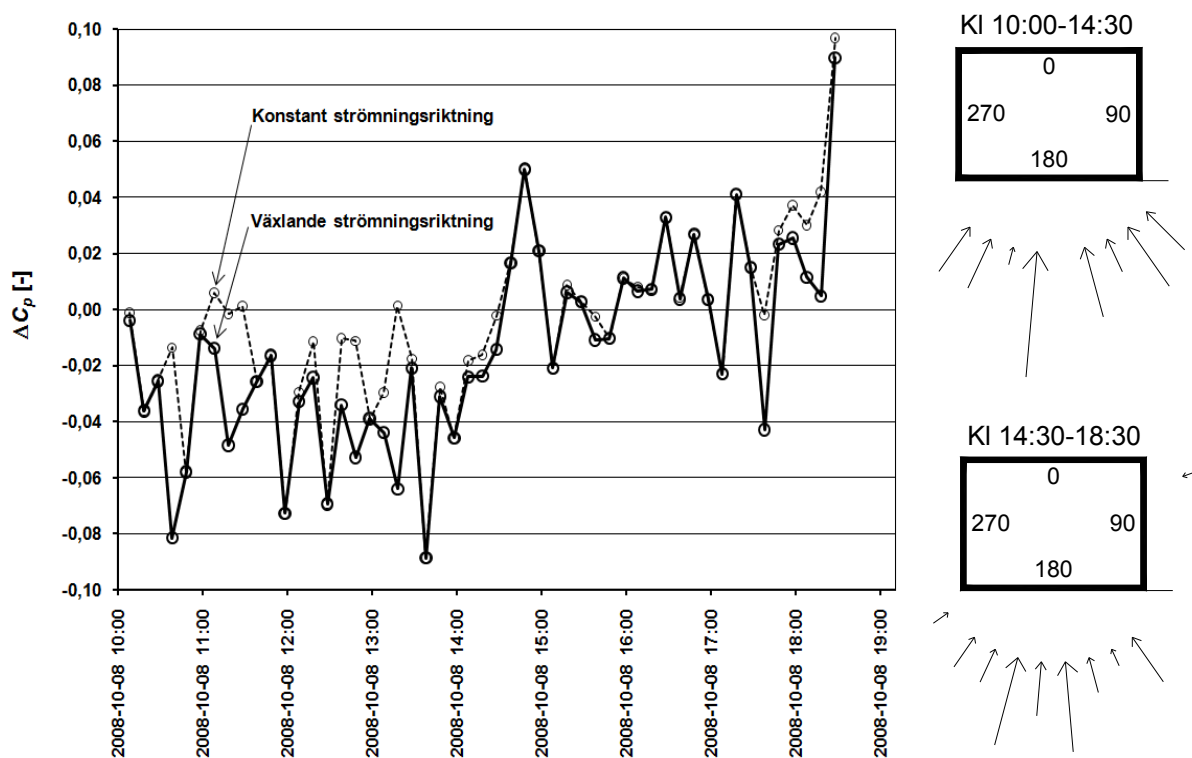
Lufthastigheterna till höger i Tabell 7-6 är så höga att metoden att ansätta alla mätvärden som är lägre än dessa som negativa får konsekvensen att nedåtriktad strömning varit dominerande. Betraktas temperaturprofilen i spalten enligt diagram D5 så finns det inget stöd för ett sådant utfall. En idé om hur frekvent vinden faktiskt skapat drivkrafter i nivå med värdena i Tabell 7-6 kan fås genom att undersöka hur många gånger som drivkraften verkat åt andra hållet (det vill säga förstärkt termiken). Utfallet blir då i samtliga tre fall ≤ 2 gånger. Detta styrker uppfattningen att det bör vara ett någorlunda litet antal mätvärden med så höga lufthastigheter som avser nedåtriktad strömning. En gissning som bör innebära en viss överskattning av antalet negativa värden har använts för perioderna i Tabell 7-6: samtliga mätvärden som är mindre än 0.15 m/s och hälften av alla värden mellan 0.15 m/s och den maximala hastigheten enligt tabellen har antagits vara negativa. I fall där även detta angreppssätt leder till en dominerande nedåtriktad strömning (medelvärdet av lufthastigheten under tidsintervallet mindre än noll) har det senare antalet begränsats så att medellufthastigheten inte blir negativ.

Det kan vara motiverat med en kort uppsummering. Mätresultat enligt diagram D1 och D2 är en lufthastighet i spalten som inte är rikttningsbestämd och ett specifikt mätvärde kan avse uppåtriktad eller nedåtriktad strömning. Både för att kunna beräkna luftomsättning och för att förstå hur vinden påverkat strömningen krävs att luftströmningens riktning bestäms eller uppskattas. För perioden mellan kl 16:15-19 visades det att drivkraften från termik var så stor att strömningsriktningen på goda grunder kunde antas vara nerifrån och upp utan växlingar. Därmed kunde också fluktuationer i lufthastighet som orsakats av vind beräknas och utgöra grund för vidare utvärdering. För perioden mellan kl 10-18:30 gäller inte att en stadigvarande uppåtriktad strömning kan förutsättas trots betydande termisk drivkrafter. Det har därför gjorts en utläggning och förts ett resonemang vars huvudsakliga syfte har varit att göra en så kvalificerad bedömning av strömningsriktningen i spalten som möjligt. Resultatet är att det funnits potential för nedåtriktad strömning under flertalet 10 minuters intervall (se bilaga 8). Genom att ansätta alla mätvärden (undantag enligt Tabell 7-6) som kan vara luftströmning nedåt som negativa bör resultatet bli en viss överskattning av nedåtriktad strömning

I och med ovanstående har två ytterlighetsfall för det verkliga förloppet i spalten ringats in

1. strömningsriktningen har varit konstant uppåt
2. strömningsriktningen har växlat och bedömd omfattning av nedåtriktad strömning är en överskattning

Skillnaden i formfaktor ΔC_p har beräknats för de två ytterlighetsfallen, se Figur 7-12. Det framgår att storleksordningen på ΔC_p är jämförbar med vad som erhöles dygnet tidigare och att skillnaden mellan fallen konstant eller växlande strömningsriktning inte är dramatisk. Den markanta växlingen från negativa till i huvudsak positiva värden på ΔC_p någon gång mellan kl 14-15 är svår att härleda till förändringar i vindriktningen.



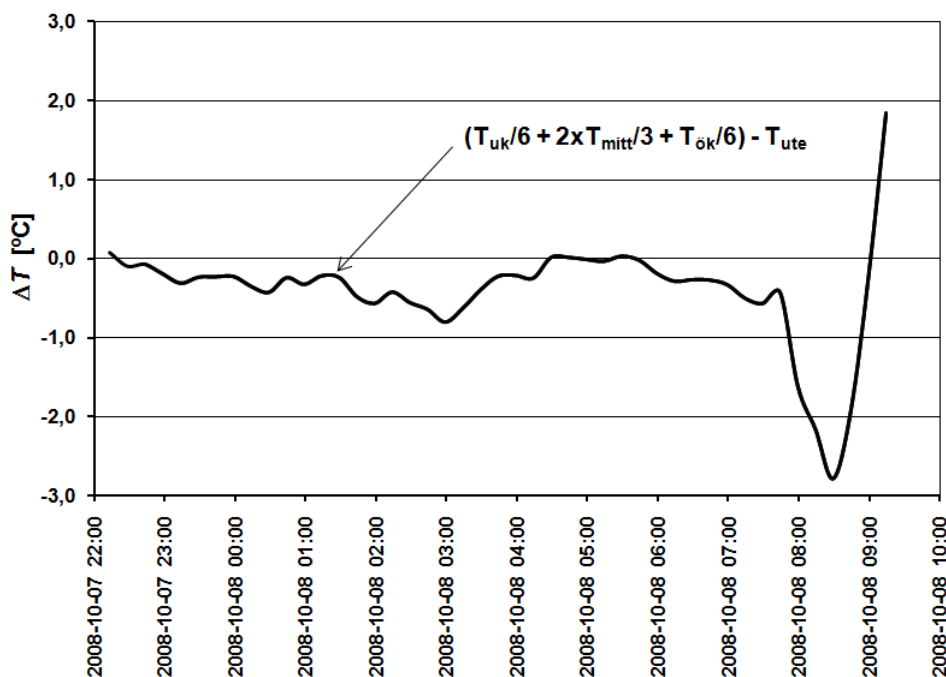
Figur 7-12 Skillnad i formfaktor mellan spaltens öppningar den 8/10-08.

I Tabell 7-7 har antal luftomsättningar och effektivitetsfaktor för vinden under perioden kl 10-18:30 sammanställts. Som tidigare är effektivitetsfaktorn beräknad vid frånvaro av termiska drivkrafter. De alternativa värdena på luftomsättningen vid samtidig vind och termik representerar gränserna för den verkliga luftomsättningen. Vid bara vind och ingen termik reduceras den verkliga luftomsättningen med ca 45-65%.

Tabell 7-7 Antal luftomsättningar och effektivitetsfaktor.

	Antal luftoms. 10:00-14:30 [oms/h]		Antal luftoms. 14:30-18:30 [oms/h]	
	Konstant	Växlande	Konstant	Växlande
Enbart termik	304	304	283	283
Vind + termik	267	235	278	267
E för vinden	0.61	0.64	0.60	0.61
	$n_v/n_k = 111/183$	$n_v/n_k = 133/207$	$n_v/n_k = 99/165$	$n_v/n_k = 104/171$

Under natten är temperatursituationen väsentligt annorlunda än under dagtid. Som framgår av Figur 7-13 (delförstoring av diagram D6 i bilaga 9) sker en växling från övertemperatur till undertemperatur i spalten cirka kl 22:30. Strax innan kl 08 förstärks undertemperaturen med ett par grader under en kort stund varefter temperaturen i spalten snabbt stiger. Från och med cirka kl 09 övergår förhållandena till ett läge med övertemperatur i spalten igen. Vindens medelhastighet under natten är svag kring 2 m/s och vindriktningen pendlar huvudsakligen mellan syd-sydost.



Figur 7-13 Temperaturskillnad mellan spaltluften och uteluften under natt/morgon.

Relationen mellan termisk drivkraft och drivkraft från vind är under natten sådan att det inte går att bestämma strömningsriktningen i spalten. Detsamma gäller i stor utsträckning även för tidsperioderna kl 19-22:30 och kl 09-10 där drivkrafterna av termik är stadigt avtagande respektive stadigt ökande. I Tabell 7-8 redovisas en uppställning för uppskattning av antal

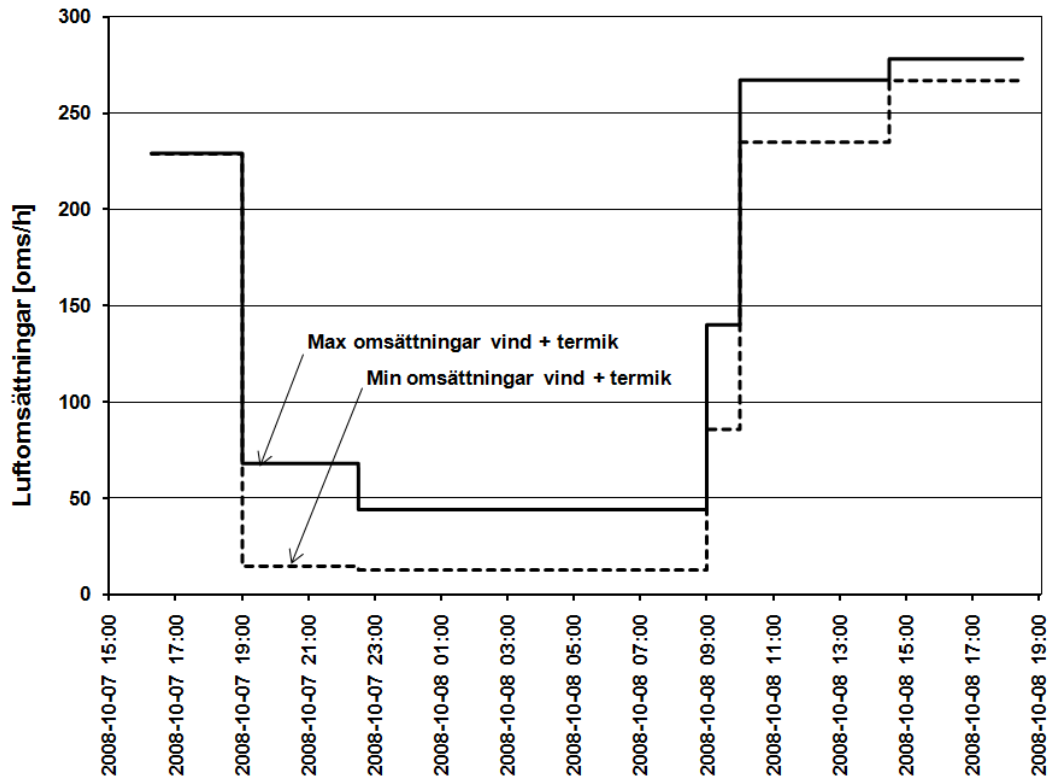
luftomsättningar baserad på genomsnittliga temperatur- och vindförhållanden under de tre tidsintervallen. Tabellen fordrar några förklaringar:

- Med negativ luftomsättning menas att den dominerande strömningsriktningen i spalten varit nedåt.
- Vindförhållandena är relativt lika de som gällde under senare delen av perioden 16:15-19:00. Studeras mätdata kan konstateras att vinden då under ungefär 60% av tiden verkade för uppåtriktad strömning och ungefär 40% av tiden för nedåtriktad strömning. Vid beräkning av gränserna för luftomsättningen i tabellen har som ytterligheter antagits att vinden samverkar med alternativt motverkar termiken 70% av tiden. Vid beräkning av drivkraft från vind har ΔC_p med stöd av Figur 7-10 antagits till att inte vara större än 0.05.
- Resultatet som presenteras nederst i tabellen är en övre och en undre gräns för antal luftomsättningar. För de två tidsintervall där strömningsriktningen växlar är omsättningen beräknad enligt metodik i bilaga 12.

Tabell 7-8 Uppskattning av luftomsättning mellan kl 19:00-10:00.

	Tidsintervall: 09:00-22:30	22:30-09:00	09:00-10:00
Korrigerat, ej rikttningsbestämt mätresultat enligt diagram D2	±90 oms/h	±60 oms/h	±172 oms/h
Genomsnittlig drivkraft av termik Δp_{termik}	+0.11 Pa	-0.04 Pa	+0.35 Pa
Beräknad luftomsättning baserad på Δp_{termik}	+66 oms/h	-35 oms/h	+127 oms/h
Medelvindhastighet $U_{m,5}$	2.0 m/s	1.8 m/s	3.1 m/s
Genomsnittlig drivkraft av vind $\Delta p_{vind} =$ $= \pm 0.05 \cdot \frac{1.2 \cdot U_{m,5}^2}{2}$	±0.12 Pa	±0.10 Pa	±0.29 Pa
Drivkraft när vind och termik samverkar	0.23 Pa (6.0 cm/s)	- 0.14 Pa (-4.5 cm/s)	0.64 Pa (10.8 cm/s)
Drivkraft när vind och termik motverkar	- 0.01 Pa (-0.8 cm/s)	0.06 Pa (2.7 cm/s)	0.06 Pa (2.7 cm/s)
Övre gräns för luftomsättning – vind samverkar med termik 70% av tiden	+68 oms/h	-44 oms/h	+140 oms/h
Undre gräns för luftomsättning – vind motverkar termik 70% av tiden	+15 oms/h	+13 oms/h	+86 oms/h

Slutligen ges i Figur 7-14 en schematisk sammanställning av hur antal luftomsättningar (absolutvärden) varierat under mätperioden från start till slut. Det verkliga antalet luftomsättningar under perioden summerar till 115-145 oms/h. Resultatet i Tabell 7-3 ($0.092 \cdot 3600 / 2.15 = 154$ oms/h) kan därmed bedömas vara en överskattning i intervallet 5-35%. Det skall också tilläggas att luftomsättningen beräknad utifrån termiska förhållanden summerar till cirka 150 oms/h. Vindens har alltså under perioden gett en reduktion i antal luftomsättningar med 5-35 oms/h.



Figur 7-14 Schematisk sammanställning av antal luftomsättningar.

7.4.2 Mätperiod 081213-081215 fack 3, läkt Lindab

Under i stort sett hela perioden finns det en övertemperatur i spalten. Mitt på dagen den 14/12 stiger övertemperaturen kraftigt under några timmar. Inledningsvis är vindhastigheten svag, 2-4 m/s. Under kvällen den 13/12 ökar vindhastigheten till 4-6 m/s med 8-10 m/s i vindbyarna. Under natten kulminerar vinden och sjunker sedan till vindstyrkor som varierar mellan 2-6 m/s. Vindriktningen pendlar under hela perioden mellan sydost till nordost.

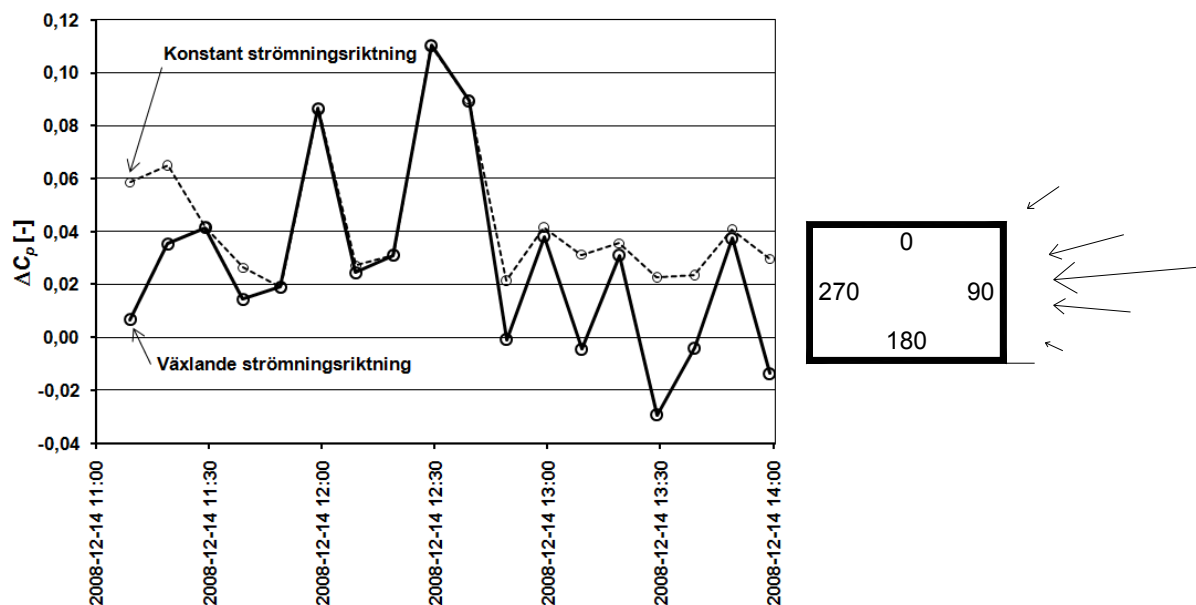
För att få en uppfattning om vindens betydelse för luftomsättningen är intervallet mellan kl 11-14 den 14/12 lämpligt att undersöka. Under denna tidsperiod varierar den termiska drivkraften mellan cirka 0.9-1.4 Pa. Med antagandet $|\Delta C_p| < 0.1$ och rådande vindhastigheter går det inte att förutsätta en konstant strömningsriktning uppåt. Mätdata har därför analyserats i intervall om 10 minuter enligt samma princip som för föregående mätperiod. I bilaga 14 ges en sammanställning av förhållandena.

Under nästan hälften av alla tidsintervall (8 av 18) är de möjliga drivkrafterna från vind stora i förhållande till de termiska drivkrafterna, se Tabell 7-9. Studeras temperaturprofilen i spalten (diagram D5 i bilaga 10) ger en strikt tillämpning av kriteriet för potentiell nedåtriktad strömning orealistiska resultat (det vill säga att strömning uppifrån och ner dominerar). Den ansats som använts i dessa fall är att alla mätvärden som är mindre än 0.10 m/s och hälften av alla värden mellan 0.10 m/s och den maximala lufthastigheten enligt tabellen har antagits vara negativa (med samtidig tillämpning av kriteriet att medelvärdet av lufthastigheten under tidsintervallet inte får understiga noll).

Tabell 7-9 Åtta tidsperioder med kraftig drivkraft från vind.

Tidsperiod	$U_{m,5}$ [m/s]	U_{vindby} [m/s]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$\Delta p_{vind,max}$ [Pa]	Max drivkraft för nedåtriktad strömning [Pa]	Max lufthastighet vid nedåtriktad strömning [m/s]
11:00-10	3,9	6,9	0,94	2,05	-1,11	0,127
11:10-20	3,7	7,1	1,03	1,85	-0,82	0,108
12:10-20	4,9	5,9	1,36	2,09	-0,73	0,102
12:40-50	5,9	6,7	1,41	2,69	-1,28	0,137
13:00-10	4,7	6,7	1,43	2,69	-1,26	0,135
13:20-30	4,7	7,3	1,30	2,98	-1,68	0,157
13:30-40	4,5	6,9	1,23	2,73	-1,50	0,148
13:50-00	4,7	6,7	1,22	2,69	-1,47	0,146

I Figur 7-15 visas beräknade värden på ΔC_p (ekvation (7.2)) för fallet med konstant respektive växlande strömningsriktning. Under ett 10 minuters intervall överstiger ΔC_p precis 0.1.



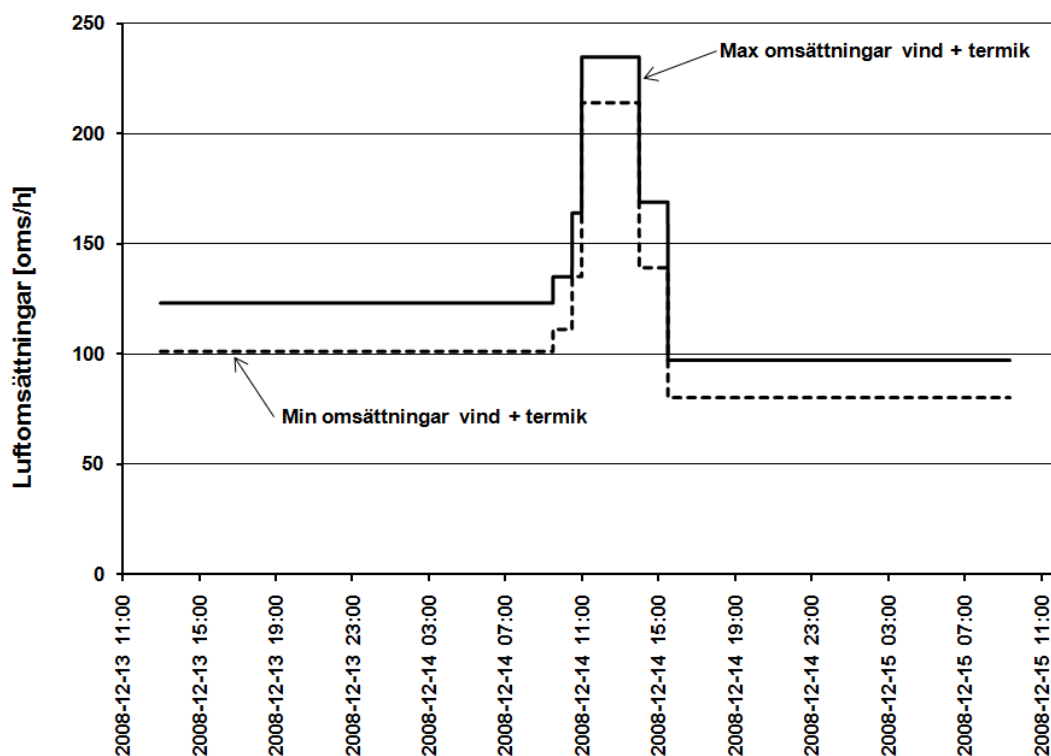
Figur 7-15 Skillnad i formfaktor mellan spaltens öppningar.

Antal luftomsättningar och effektivitetsfaktor för vinden ges i Tabell 7-10. Vid bara vind och ingen termik reduceras den verkliga luftomsättningen med cirka 35-50%.

Tabell 7-10 Antal luftomsättningar och effektivitetsfaktor.

	Antal luftoms. 11:00-14:00 [oms/h]	
	Konstant	Växlande
Enbart termik	214	214
Vind + termik	235	214
E för vinden	0.77	0.78
	$n_v/n_k = 122/159$	$n_v/n_k = 141/180$

Förutom några timmar i direkt anslutning till intervallet kl 11-14 gäller att de termiska drivkrafterna är små jämfört med de drivkrafter som vinden kan skapa. Luftomsättningen får därmed uppskattas från det ej riktningbestämda mätresultatet enligt diagram D2 med hjälp av effektivitetsfaktorn E . Med vägledning av den storleksordning på E som erhållits i Tabell 7-10 har en undre gräns för luftomsättningen beräknats med $E=0.7$ och en övre gräns med $E=0.85$. Luftomsättningen för hela mätperioden är sammanställd i Figur 7-16 och den summerar till 100-120 oms/h. Resultatet i Tabell 7-3 ($0.084 \cdot 3600/2.15 = 141$ oms/h) är då en överskattning i intervallet 15-40%.



Figur 7-16 Schematisk sammanställning av antal luftomsättningar.

Av diagram D6 framgår att det funnits en nära konstant övertemperatur på uppåt $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ i spalten under många mättimmar. Förklaringen till övertemperaturen är troligen transport av värme från inneluften till spaltluften via ledning genom väggkärnan, se Figur 3-7. Antagandet kan prövas genom att undersöka två intervall enligt Tabell 7-11. Temperatur T_{spalt} i tabellen är beräknad med ekvation (7.1) och luftens hastighet $u_{m,spalt}$ är uppskattad med hjälp av Figur 7-16.

Tabell 7-11 Temperaturförhållanden och lufthastighet i spalten.

Tidsintervall	T_{inne} [$^\circ\text{C}$]	T_{spalt} [$^\circ\text{C}$]	T_{ute} [$^\circ\text{C}$]	$T_{spalt} - T_{ute}$ [$^\circ\text{C}$]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]
2008-12-13 kl 21:00 - 2008-12-14 kl 07:00	18.6	3.2	2.8	0.4	~ 7
2008-12-14 kl 19:00 - 2008-12-15 kl 09:30	18.8	3.3	2.7	0.6	~ 5

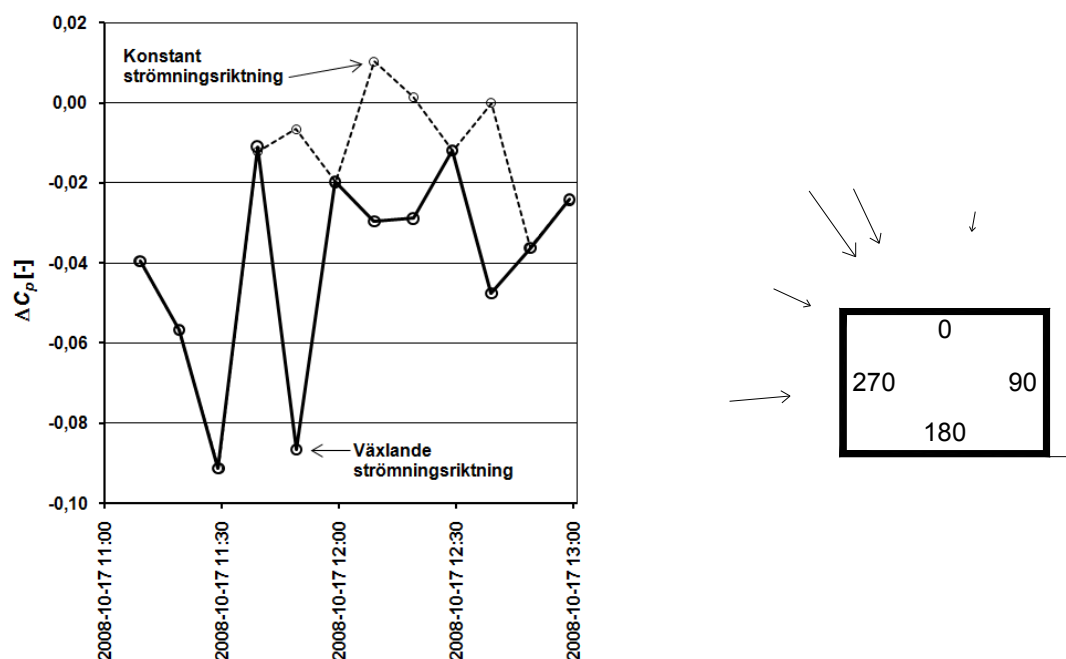
En beräkning av temperaturfördelningen i spalten med ekvation (3.28) ger den genomsnittliga spalttemperaturen i båda tidsintervallen som $3.2 \text{ }^\circ\text{C}$ under förutsättning att den motstrålande

temperaturen T_{ms} sätts lika med utomhustemperaturen. Innebörden av detta är att himlen förutsätts varit helt täckt av moln. Vilken grad av molnighet som gällt under de båda intervallen är okänt men det finns alltså en möjlighet att den antagna förklaringen om värmetransport inifrån till spalten är den riktiga.

7.4.3 Mätperiod 081015-081017 fack 1, vertikala läkt

Klimatet under perioden har gett övertemperaturer i spalten under dagtid, speciellt den 17/10 då övertemperaturen stundvis pendlar kring 10-12 °C, se diagram D6 i bilaga 11. Både vindhastighet och vindriktning uppvisar sådana variationer att de enklast låter sig beskrivas genom att hänvisa till diagram D3 och D4. Mätdata för vindhastighet och vindriktning saknas under de sista timmarna av mätperioden.

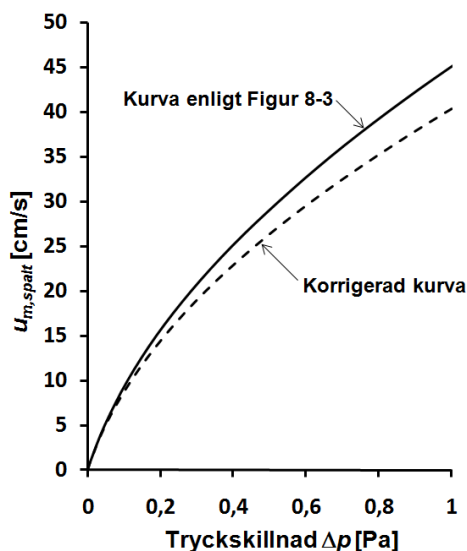
Inledningsvis studeras tidsperioden mellan kl 11-13 den 17/10. Den termiska drivkraften varierar då mellan som lägst drygt 0.5 Pa och som högst knappt 1 Pa. Med vind mellan 2-4 m/s och upp till över 6 m/s i byarna kan konstant strömningsriktning inte förutsättas och metodik enligt tidigare får tillämpas där bilaga 15 ger aktuella förutsättningar. Av Figur 7-17 framgår beräknade värden på ΔC_p för fallen konstant och växlande strömningsriktning. Det absoluta värdet på ΔC_p över 10 minuter är återigen mindre än 0.1.



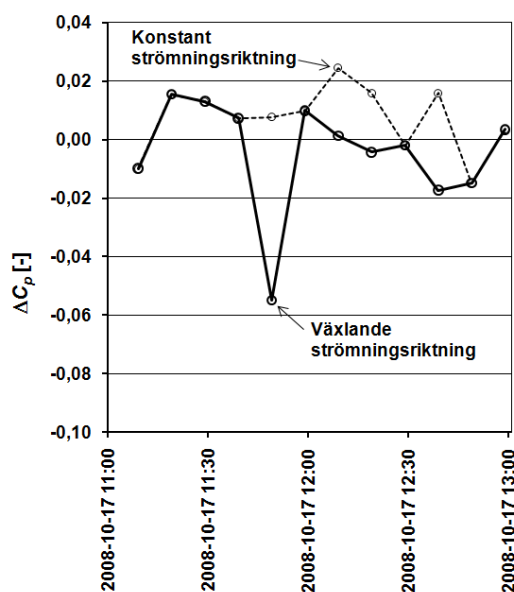
Figur 7-17 Skillnad i formfaktor mellan spaltens öppningar.

Både diagram D2 och Figur 7-17 visar att vinden väsentligen verkat för en nedåtriktad luftströmning i spalten. Med tanke på den aktuella vindriktningen är detta något oväntat. En möjlig förklaring är att beräkningsmodellen för spalt utan horisontella läkt överskattar lufthastigheten vid given tryckskillnad. Att ett sådant förhållande skulle kunna vara riktigt antyds både av jämförelsen mellan mätt och beräknad lufthastighet redovisad i Tabell 7-2 och av resultat från provningar i laboratorium, se bilaga 1. Konsekvensen för utfallet av ΔC_p kan undersökas genom att korrigera sambandet mellan tryckskillnad och lufthastighet. Figur 7-18 visar två alternativa kurvor för spalten i drivkraftsintervallet upp till 1 Pa. Heldragen kurva överensstämmer med kurva för spalt med vertikala läkt enligt Figur 7-3 medan streckad kurva

har erhållits genom att öka förlustfaktorn ξ för böjen i spaltens överkant med 50% från 1.6 till 2.4 (se ekvation (2.33)). Skillnaden mellan kurvorna är en hastighetsreduktion som är upp till cirka 10% vid drivkrafter mindre än 1 Pa. Den korrigerade kurvan ger effekten att den beräknade lufthastigheten i spalten orsakad av termik (heldragen kurva i diagram D2) sjunker något. Som följd av detta fås att vinden inte lika frekvent verkar för en nedåtriktad luftströmning. En beräkning av ΔC_p i intervall om 10 minuter med den korrigerade kurvan som grund ger ett resultat som framgår av Figur 7-19. I jämförelse med resultatet i Figur 7-17 varierar nu ΔC_p på ett sätt som möjligen kan tyckas vara i bättre överstämmelse med Figur 2-8.



Figur 7-18 Alternativa samband mellan drivkraft och lufthastighet.



Figur 7-19 Skillnad i formfaktor mellan spaltens öppningar, alternativ beräkning.

Tabell 7-12 visar hur antal luftomsättningar och effektivitetsfaktor för vinden varierar beroende på konstant eller växlande strömningsriktning och beroende på vilket samband mellan drivkraft och lufthastighet som använts vid utvärderingen av mätresultatet.

Tabell 7-12 Antal luftomsättningar och effektivitetsfaktor.

	Kurva enl. Figur 7-3		Korrigerad kurva	
	Antal luftoms. 11:00-13:00 [oms/h]		Antal luftoms. 11:00-13:00 [oms/h]	
	Konstant	Växlande	Konstant	Växlande
Enbart termik	646	646	584	584
Vind + termik	588	560	588	560
E för vinden	0.82	0.85	0.72	0.76
	$n_v/n_k = 243/297$	$n_v/n_k = 318/372$	$n_v/n_k = 167/233$	$n_v/n_k = 215/283$

Av tabellen framgår att det inte föreligger någon skillnad i den verkliga luftomsättningen (vind + termik) för de två olika sambanden mellan drivkraft och lufthastighet. Vid antagande om konstant strömningsriktning är detta självklart då luftomsättningen erhålls direkt ur mätresultatet. Vid växlande strömningsriktning skulle en skillnad vara väntad men resultaten råkar även här vara identiska. Det korrigerade sambandet ger en lägre effektivitetsfaktor för vinden till följd av ett ökat antal riktningväxlingar och lägre lufthastighet. I det fortsatta

baseras resonemang och beräkningar på att samband mellan drivkraft och lufthastighet enligt Figur 7-3 gäller.

Under de sista timmarna mellan kl 13-16:10 finns en betydande övertemperatur i spalten men mätdata för aktuella vindförhållanden saknas. Det går därmed inte att bedöma vindens inverkan på samma sätt som för perioden kl 11-13. Den termiska drivkraften under intervallet ger 717 oms/h och förutsatt konstant strömningsriktning är inverkan av vind att den motverkar termiken med 37 oms/h. Differensen mellan talen utgör den övre gränsen för luftomsättningen som alltså blir $717-37 = 680$ oms/h. Då lufthastigheterna är höga kan den nedre gränsen för antal luftväxlingar uppskattas genom att räkna antal tillfällen när produkten av lufthastighet $u_{m,spalt}$ och gällande tidssteg $\Delta t = 10$ sekunder varit större än spaltens höjd, se Tabell 7-13. Den undre gränsen för antal luftväxlingar erhålls då som 642 oms/h.

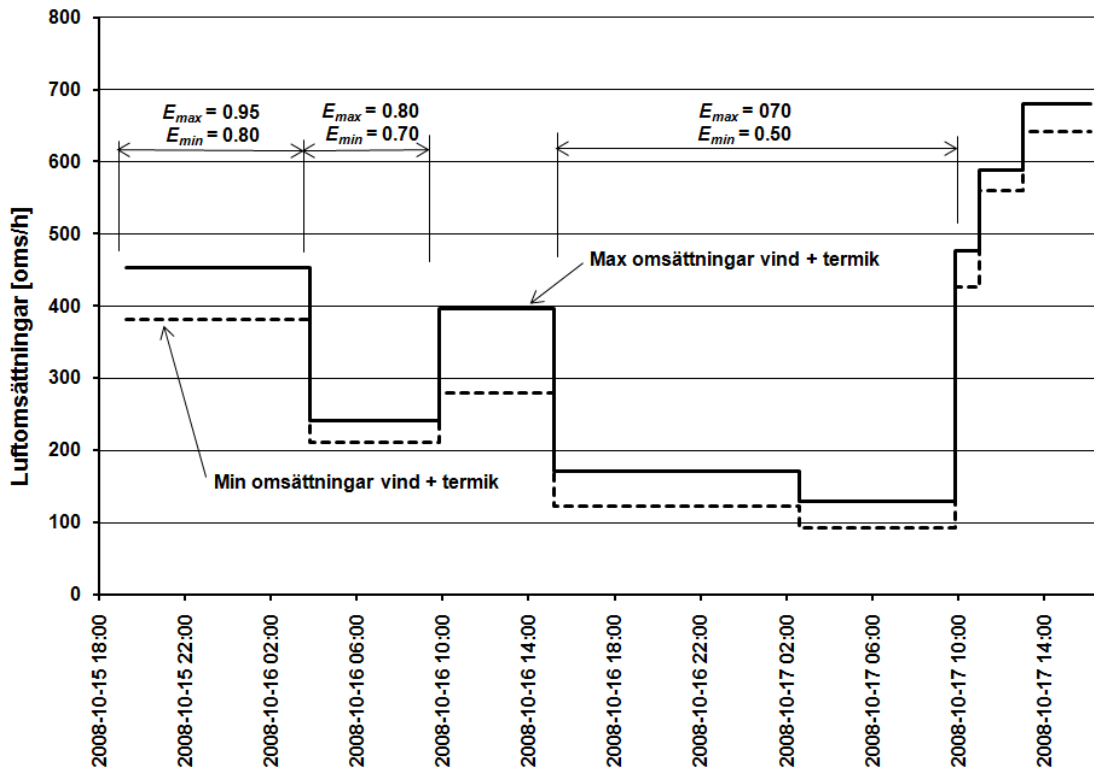
Tabell 7-13 Uppskattning av nedre gräns för antal luftomsättningar kl 13:00-16:10.

$u_{m,spalt} \cdot \Delta t$ [m]	Antal tillfällen [ggr]	Antal luftomsättningar n [oms/h]	
$\geq 2.15-2.20$	0	$0 \cdot ((2.15+2.20)/2)/2.15$ oms / 3.17 h	= 0
$> 2.20-2.25$	9	$9 \cdot ((2.20+2.25)/2)/2.15$ oms / 3.17 h	= 3
$> 2.25-2.30$	8	$8 \cdot ((2.25+2.30)/2)/2.15$ oms / 3.17 h	= 3
$> 2.30-2.35$	8	$8 \cdot ((2.30+2.35)/2)/2.15$ oms / 3.17 h	= 3
$> 2.35-2.40$	0	$0 \cdot ((2.35+2.40)/2)/2.15$ oms / 3.17 h	= 0
$> 2.40-2.45$	15	$15 \cdot ((2.40+2.45)/2)/2.15$ oms / 3.17 h	= 5
.....
$> 19.95-20.00$	0	$0 \cdot ((19.95+20.00)/2)/2.15$ oms / 3.17 h	= 0
	Σ 1056		Σ 642

Mellan kl 10-15 den 16/10 finns en övertemperatur i spalten som når mellan 3-8 °C. Betraktas temperaturprofilen i spalten under denna tid (se diagram D5 i bilaga 11) är det dock tydligt att termiken inte varit tillräcklig för att ge en dominerande uppåtriktad strömning. Vid en jämförelse mellan de termiska drivkrafterna och möjliga drivkrafter från vind kan också konstateras att vinden under större delen av tidsintervallet haft kapacitet för att vända strömningsriktningen. Om enbart termisk drivkraft beaktas kan luftomsättningen beräknas till 439 oms/h. Omsättningen vid samtidig drivkraft från vind och termik sjunker till 397 oms/h förutsatt att strömningsriktningen inte växlat vilket då representerar den övre gränsen för luftomsättningen. Undre gräns för luftomsättningen kan uppskattas till 280 oms/h utifrån en uppställning enligt principen i Tabell 7-13. Med samma resonemang och metodik erhålls övre och undre gräns för tidsintervallet mellan kl 10-11 den 17/10 som 476 och 427 oms/h.

Under övriga tider är termiken svag i förhållande till drivkrafterna från vind. Gränserna för antal luftväxlingar har uppskattats från mätresultatet i diagram D2 genom multiplicering med en effektivitetsfaktor tillsammans med en kontroll av undre gräns för luftomsättningen med metod visad i Tabell 7-13. Med de varierande vindförhållanden som gällt under perioden, både avseende hastighet och riktning, är det inte självklart vad som är relevanta värden på faktorn E . Under den tidsperiod som inledningsvis studerades med vindhastigheter 2-4 m/s erhöles E strax över 0.8, se Tabell 7-12. Den bästa bedömning som kan göras är att E är högre än 0.8 under timmar när vinden överstiger 2-4 m/s och lägre än 0.8 när vindförhållandena är

lugnare. Antagna värden på E visas tillsammans med en schematisk sammanställning av antal luftomsättningar för hela mätperioden i Figur 7-20.



Figur 7-20 Schematisk sammanställning av antal luftomsättningar.

Sammanfattningsvis för hela mätperioden så har termiken gett drygt 150 oms/h. Den verkliga luftomsättningen skapad av vind och termik kan uppskattas till 260-320 oms/h. Resultatet i Tabell 7-3 ($0.213 \cdot 3600/2.15 = 357$ oms/h) är då en överskattning i storleksordningen 10-40%.

7.4.4 Formfaktorskillnad för praktisk tillämpning

Vid analysen av de tre mätperioderna har vindens inverkan på lufrörelserna i spalterna sammanställts i ett antal diagram och tabeller. Ur ett praktiskt perspektiv är det motiverat att försöka formulera de erhållna resultaten så att de blir mer tillämpbara. Framförallt är det intressant att belysa vad som kan vara relevanta värden på ΔC_p vid omsättningsberäkningar och hur ΔC_p varierar med vindens anblåsningvinkel. För den inledande tidsperioden kl 16:15-19:00 i avsnitt 7.4.1 konstaterades att 61 oms/h skulle skapats om vind verkat utan samtidig termik. Ur denna luftomsättning n_v (se ekvation (7.3)) kan en genomsnittlig hastighet i spalten på 3.6 cm/s beräknas med ekvation (5.1). Via samband mellan hastighet och tryck enligt Figur 7-3 fås tillhörande drivkraft som 0.096 Pa. Med känd medelvindhastighet $U_{m,5}$ under tidsperioden ger ekvation (7.2) ett medelvärde på ΔC_p . Samma tillvägagångssätt kan användas för att beräkna ΔC_p för samtliga tidsintervall där den verkliga luftomsättningen n_v av vind varit möjlig att uppskatta. Av Tabell 7-14 framgår att en god uppskattning av ΔC_p för de olika mätperioderna hamnar i intervallet 0.025-0.05. Därutöver kan det också konstateras att anblåsningvinkeln tycks vara av mindre betydelse för storleken på ΔC_p .

Tabell 7-14 Uppställning för beräkning av formfaktorsskillnad ΔC_p .

Mätperiod	Vind $U_{m,5}$ [m/s] (Vindriktning)	Luftoms. [oms/h]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]	Δp_{vind} [Pa]	ΔC_p [Pa]
Fack 4 kl 16:15-19:00	2.48 (134-212)	$n_v = 61$	$\Rightarrow 3.6$	$\Rightarrow 0.096$	$\Rightarrow 0.026$
Fack 4 kl 10:00-14:30	3.87 (130-219)	$n_v = 111$ $n_v = 133$	$\Rightarrow 6.6$ $\Rightarrow 7.9$	$\Rightarrow 0.271$ $\Rightarrow 0.372$	$\Rightarrow 0.030$ $\Rightarrow 0.041$
Fack 4 kl 14:30-18:30	3.40 (144-231)	$n_v = 99$ $n_v = 104$	$\Rightarrow 5.9$ $\Rightarrow 6.2$	$\Rightarrow 0.223$ $\Rightarrow 0.243$	$\Rightarrow 0.032$ $\Rightarrow 0.035$
Fack 3 kl 11:00-14:00	4.16 (54-112)	$n_v = 122$ $n_v = 141$	$\Rightarrow 7.3$ $\Rightarrow 8.4$	$\Rightarrow 0.403$ $\Rightarrow 0.524$	$\Rightarrow 0.039$ $\Rightarrow 0.050$
Fack 1 kl 11:00-13:00	3.0 (265-9)	$n_v = 243$ $n_v = 318$ $n_v = 167$ $n_v = 215$	$\Rightarrow 14.5$ $\Rightarrow 19.0$ $\Rightarrow 10.0$ $\Rightarrow 12.8$	$\Rightarrow 0.180$ $\Rightarrow 0.265$ $\Rightarrow 0.119$ $\Rightarrow 0.169$	$\Rightarrow 0.033$ $\Rightarrow 0.049$ $\Rightarrow 0.022$ $\Rightarrow 0.031$

Notera att beräkningen i Tabell 7-14 som enda resultat ger ett fiktivt värde på faktorn ΔC_p som kan användas för att med hjälp av ekvationer (2.23), (2.35) och (5.1) beräkna samma luftomsättning från vindpåverkan som det verkliga och komplexa strömningsförloppet (enligt till exempel Figur 7-8) gett upphov till.

7.5 Kommentarer och slutsatser

Det primära syftet med analysen i tidigare avsnitt har dels varit att få en bättre och tydligare bild av antal luftomsättningar i experimentväggarnas spalter och dels att förstå vilken betydelse termik respektive vind har haft för att skapa luftomsättningar. Den valda mätmetoden med lufthastighetsgivare har medfört att luftomsättningen överskattas om den beräknas direkt ur de lufthastigheter som redovisas i Tabell 7-3. Undersökningen av de tre mätperioderna indikerar en överskattning i storleksordningen 5-40%. En genomgång av samtliga mätperioder har inte varit möjlig då samtliga vinddata och data från termoelement saknas för en majoritet av mätperioderna. Den bästa bedömning som därmed kan göras är att beräkningar av antal luftväxlingar som baseras på medellufthastigheter i Tabell 7-3 generellt är överskattningar i intervallet mellan 5-40%. Mot denna bakgrund kan medelventilationen i de tre facken under månaderna oktober till februari approximeras till:

- Fack 1, 230-310 oms/h ($u_{m,spalt}$ 13.7 till 18.5 cm/s)
- Fack 3, 75-100 oms/h ($u_{m,spalt}$ 4.5 till 6.0 cm/s)
- Fack 4, 95-130 oms/h ($u_{m,spalt}$ 5.7 till 7.8 cm/s)

Det är värt att uppmärksamma att för de undersökta mätperioderna uppvisar luftväxlingen mycket stora variationer över dygnet och att timmar med infallande solstrålning som regel lett till en ventilationsgrad som avsevärt överstiger medelventilationen. Maximal luftomsättning

under de undersökta mätperioderna var en faktor 2-3 gånger större än medelventilationen ovan.

Analysen har visat att både drivkraft från termik och drivkraft från vind har haft betydelse för luftomsättningen i experimentväggarnas spalter. Något generellt och entydigt svar på de två drivkrafternas relativa betydelse går inte att ge. För mätperioderna gäller att luftomsättningen under timmar med solstrålning till hög grad kunnat bestämmas genom beräkningar som enbart baseras på termiska drivkrafter. Vind med måttlig styrka eller lägre har vid sådana tillfällen haft en förhållandevis liten betydelse för luftomsättningen. Under timmar med ingen eller svag termik är det naturligtvis vind som varit dominerande orsak till luftväxling i spalterna.

Jämförs spalterna med horisontella läkt med spalten med vertikala läkt är lufthastigheten i de förra väsentligt lägre. Lägre lufthastighet leder till en högre övertemperatur vid solstrålning och medverkar dessutom till en lägre effektivitetsfaktor för vinden. Därmed följer att förhållandet mellan antal luftomsättningar skapade av drivkraft från termik respektive från vind skiljer beroende på spaltens utformning. Den relativa betydelsen av termik som drivkraft för att skapa luftväxlingar ökar alltså när strömningsmotståndet i en spalt ökar. I en lång och smal spalt (storleksordning $h > 5$ m och $b < 10$ mm) är vindens betydelse för luftomsättningen sannolikt marginell, åtminstone för fasader som är söderorienterade.

När endast termiska drivkrafter verkar uppstår en stadig luftströmning med konstant riktning i spalten. Effekterna av vind är av en betydligt besvärligare karaktär och resultaten från den här studien kan sammanfattas i följande punkter:

- Vindpåverkan ger upphov till ständiga hastighetsvariationer i spalten. Detta framgår tydligt av mätresultaten i bilaga 9 - bilaga 11 och Figur 7-8.
- Drivkraft från vind verkar inte för en konstant strömningsriktning i spalten. Under kortare stunder (timmar) kan strömning åt ett håll i spalten överväga men obetydliga förändringar i vindförhållandena kan innebära att strömningen växlar karaktär.
- Vid jämförelse med aktuell vindriktning enligt egen klimatstation är den dominerande strömningsriktningen i spalten orsakad av vind ibland i överensstämmelse med vad som kan utläsas ur Figur 2-8 och ibland inte. En trolig förklaring till skillnaderna är att de nivålinjer som visas i figuren avser starkt idealiserade förhållanden med en statisk anblåsningvinkel medan vindriktningen under mätningarna oavbrutet varierat. Eftersom mätningarna endast avser medelvärden under perioder om 10 minuter är den verkliga variationen därtill större än vad som kan utläsas av respektive diagram i bilagorna. De resultat som erhållits tyder alltså på att det i praktiken inte går att förutsätta att vind från ett visst håll skall ge en konstant strömningsriktning i spalten.
- Absolutvärdet på skillnad i formfaktor mellan spaltens öppningar är som medelvärde under 10 minuter maximalt kring 0,1, ofta betydligt mindre. För omsättningsberäkningar vid enbart vindpåverkan har representativa värden på ΔC_p befunnits vara i intervallet 0.025-0.05.

För att kunna prediktera luftväxlingen i en ytterväggsspalt krävs både en beräkningsmodell som ger sambandet mellan drivkraft och flöde för den aktuella spaltgeometrin och kännedom om vilka drivkrafter det är som verkar över tid. Det torde vara uppenbart att en korrekt beskrivning av verkande drivkraft som ett resultat av interaktion mellan vind och termik tenderar till att bli mycket komplicerad. I nästa kapitel skall därför undersökas om en luftomsättningsberäkning som baseras på en förenklad hantering av drivkrafterna kan vara användbar för att uppskatta gränserna för medelventilationen i experimentväggarnas spalter.

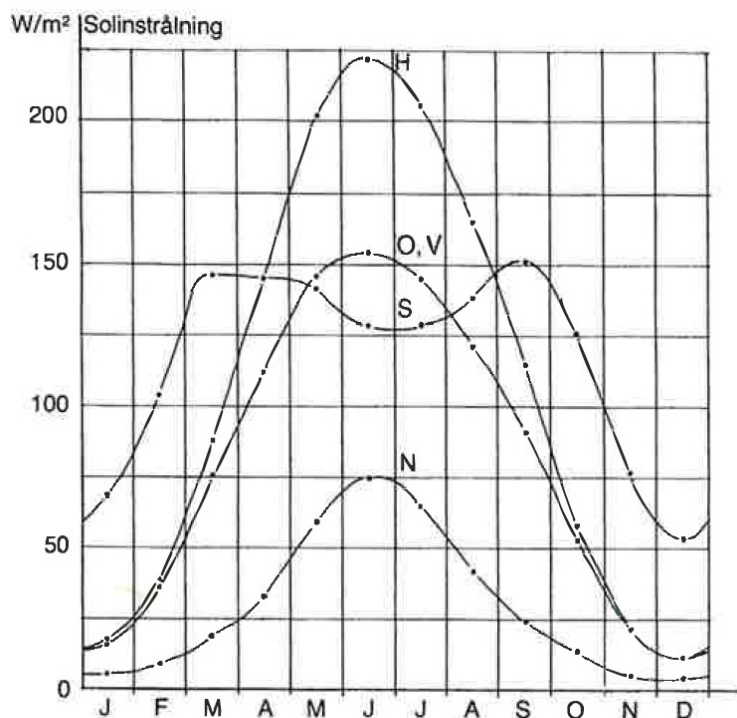
8 Prediktion av luftomsättningar

I avsnitt 7.5 presenterades en storleksordning på den genomsnittliga ventilationsgraden i experimentväggarnas spalter under månaderna oktober-februari. Det är intressant att jämföra detta resultat med en teoretisk beräkning av luftomsättningen för samma månader utgående från allmänna klimatdata. Den största utmaningen vid en sådan beräkning är att göra en realistisk uppskattning av vilka drivkrafter från vind och termik som kommer att finnas. En grovt förenklad modell, som inte kan göra anspråk på att vara fysikaliskt riktig men som skulle kunna vara användbar för överslagsberäkningar, är att separera dygnet i en ljus och en mörk del och basera beräkningarna på:

- drivkraft från termik under dygnets ljusa del
- drivkraft från vind under dygnets mörka del

Ett argument som motiverar en sådan modell är att vindens betydelse för luftomsättningen dämpas vid närvaro av termiska drivkrafter. Med hänvisning till resonemang i avsnitt 7.5 bör precisionen med metodiken öka med ett ökat strömningsmotstånd i spalten.

Termisk drivkraft beräknas utifrån utomhustemperatur och spalttemperatur med ekvation (2.18). Med vald ansats är det termisk drivkraft under dagtid som skall bedömas och de mest relevanta klimatdata för utomhustemperatur som hittats är månadsmedelvärden för Malmö flygplats mellan kl 08-18 (Taesler, 1972). Den genomsnittliga spalttemperaturen bestäms utifrån en temperaturprofil i spalten beräknad med ekvation (3.28). För att bedöma instrålning från sol kan Figur 8-1 hämtad ur Nevander och Elmarsson (1994) användas. Figuren visar hur medelsolinstrålningen mot ytor med olika orientering varierar över året i Malmö. H avser horisontella ytor och övriga beteckningar (N, O, V, S) avser väggar med olika orientering.



Figur 8-1 Medelsolinstrålning, Malmö (Nevander och Elmarsson, 1994).

Figur 8-1 ger enligt referensen strålningen fördelad över dygnets både ljusa och mörka timmar. Instrålningen under dagtid är alltså betydligt större och kan beräknas med hjälp av figuren och fördelning mellan natt och dag. Strålningsvärdet som då erhålls avser en klar dag. Nevander och Elmarsson (1994) anger att för halvklara dagar och mulna dagar skall värdet multipliceras med en faktor 0.65 respektive 0.25. Antal klara och mulna dagar per månad för Malmö flygplats ges av Taesler (1972). En sammanställning av klimatdata för beräkning av spalttemperatur återges i Tabell 8-1.

Tabell 8-1 Sammanställning av klimatdata för perioden oktober-februari.

Parameter	Okt	Nov	Dec	Jan	Feb	Referens
Medeltemperatur utomhus T_u [°C] mellan kl 08-18	15.0	5.6	2.6	0.2	0.3	Taesler, 1972
Ljusa timmar/dygn [%]	44	36	31	33	41	www.prognosen.se
Mörka timmar/dygn [%]	56	64	69	67	59	www.prognosen.se
Klara dagar/månad	4±3	2±2	2±2	3±2	3±3	Taesler, 1972
Mulna dagar/månad	14±4	19±4	21±4	19±4	16±4	Taesler, 1972
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ [W/m ²] (Figur 8-1, kurva S)	125	80	55	65	105	Nevander och Elmarsson, 1994
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ klar dag [W/m ²]	285	220	175	195	255	
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ halvklar dag [W/m ²]	185	145	115	125	165	
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ mulen dag [W/m ²]	70	55	45	50	65	

Övriga förutsättningar som gällt vid beräkning av spalttemperatur framgår av Tabell 8-2. Den konvektiva värmeöverföringskoefficienten på utsida fasadskikt har antagits till 12 W/m²·K vilket motsvarar vindförhållanden kring 2-3 m/s, se ekvation (3.7) och (3.8).

Tabell 8-2 Förutsättningar vid beräkning av temperaturprofil.

Parameter	Värde
Spalthöjd h	2.15 m
Spaltbredd b	0.025 m
Inloppstemperatur T_{in} (se Figur 3-8)	T_u
Inomhustemperatur T_i	20 °C
Motstrålning temperatur T_{ms} klar dag	$1.1 \cdot T_u - 5$ (ekvation (3.17))
Motstrålning temperatur T_{ms} halvklar dag	$((1.1 \cdot T_u - 5) + T_u)/2$
Motstrålning temperatur T_{ms} mulen dag	T_u
$R_{fasadskikt}$ (se Figur 3-7)	0.05 m ² ·K/W
$R_{väggkärna}$ (se Figur 3-7)	4.0 m ² ·K/W
α_{sol}	0.9
$I_0 \cdot \cos(\varphi)$	enligt Tabell 8-1
$\alpha_{k,ute}$	12 W/m ² ·K
Lufthastighet $u_{m,spalt}$	enligt ekvation (2.35)

Vid beräkningsstart är lufthastigheten i spalten obekant och måste antas. Den med ekvation (3.28) beräknade temperaturprofilen ger tillsammans med utomhustemperaturen en termisk drivkraft och ekvation (2.35) kan användas för att beräkna lufthastigheten i spalten. Om denna lufthastighet skiljer från den antagna upprepas beräkningarna tills dess att ett jämviktsläge uppnås.

Tabell 8-3 redovisar resultat från beräkningar för de aktuella månaderna. T_{spalt} är en medeltemperatur i spalten beräknad ur den erhållna temperaturprofilen utmed spaltens höjd.

Tabell 8-3 Beräknad spalttemperatur, termisk drivkraft och lufthastighet under dygnets ljusa del.

	Fack 1			Fack 3			Fack 4		
	T_{spalt} [°C]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]	T_{spalt} [°C]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]	T_{spalt} [°C]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]
Klar dag									
Oktober	20.7	0.50	29.2	24.4	0.81	10.8	23.9	0.78	12.2
November	10.3	0.45	27.0	13.2	0.71	9.9	12.9	0.68	11.1
December	6.6	0.39	24.5	8.9	0.60	9.0	8.6	0.58	10.1
Januari	4.5	0.43	26.1	7.2	0.68	9.6	6.9	0.65	10.7
Februari	5.6	0.52	29.6	9.1	0.85	10.8	8.7	0.81	12.2
Halvklar dag									
Oktober	19.3	0.38	24.2	21.7	0.58	9.0	21.4	0.56	10.1
November	9.2	0.34	22.6	11.1	0.51	8.2	11.0	0.50	9.3
December	5.7	0.30	20.6	7.2	0.45	7.7	7.1	0.43	8.5
Januari	3.5	0.32	21.8	5.2	0.49	8.1	5.1	0.48	9.0
Februari	4.3	0.39	24.7	6.6	0.62	9.1	6.4	0.60	10.2
Mulen dag									
Oktober	17.2	0.20	15.4	18.0	0.27	5.9	18.0	0.26	6.5
November	7.6	0.19	15.0	8.3	0.26	5.7	8.3	0.25	6.3
December	4.4	0.17	14.1	5.0	0.24	5.4	5.0	0.23	6.0
Januari	2.2	0.19	15.2	2.9	0.27	5.8	2.8	0.26	6.4
Februari	2.6	0.23	17.1	3.6	0.32	6.4	3.5	0.32	7.1

Medianvinden för Sturup är på 10-meters höjd 5.2 m/s (Nevander och Elmarsson, 1994). Med hjälp av ekvation (2.20) och Tabell 2-2 kan denna hastighet räknas om till en vindhastighet på 5 meters höjd vid provhusbyggnaden. Aktuella terrängförhållanden (se avsnitt 6.1.1) stämmer närmast med ett mellanting av de två undre terrängbeskrivningarna (urban och city) i Tabell 2-2. Vindhastigheten vid provhusbyggnaden kan då beräknas till cirka 2.3 m/s. Som visats i avsnitt 7.4.4 kan ΔC_p för beräkningar av luftväxling uppskattas till intervallet 0.025-0.05 och en undre respektive övre gräns för Δp_{vind} kan därmed beräknas till 0.08 respektive 0.16 Pa. De lufthastigheter som dessa drivkrafter ger upphov till framgår av Tabell 8-4.

Tabell 8-4 Beräknad lufthastighet under dygnets mörka del.

	Fack 1	Fack 3	Fack 4
	$u_{m,spalt}$ [cm/s]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]
Min vind, $\Delta C_p = 0.025$	7.9	2.9	3.2
Max vind, $\Delta C_p = 0.05$	13.4	4.4	4.8

Gränserna för luftomsättningen i de tre facken kan nu beräknas. Övre gräns för omsättningen erhålls om antal klara dagar maximeras, antal mulna dagar minimeras och det högre värdet på

lufthastighet under mörka timmar enligt Tabell 8-4 används. Omvända förhållanden ger en undre gräns. I Tabell 8-5 redovisas en jämförelse mellan resultat från beräkningar och resultat som baseras på mätningar. I alla tre fallen ger beräkningarna en lägre luftomsättning men avvikelserna (< 20%) får i sammanhanget betraktas som små.

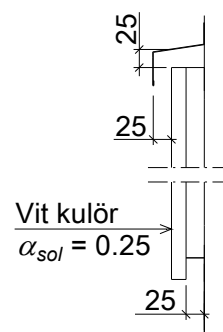
Tabell 8-5 Medelventilation under perioden oktober-februari.

	Beräkningar baserade på klimatdata [oms/h]	Utvärdering av mätningar i experimentväggar [oms/h]
Fack 1, stående läkt	190-270	230-310
Fack 3, Lindab	70-95	75-100
Fack 4, Europrofil	80-105	95-130

Med stöd av resultatet i Tabell 8-5 har konsekvenserna för luftväxlingen i spalterna vid fiktiva förändringar i experimentväggarnas utformning eller vid andra klimatförhållanden uppskattats med beräkningar. Alla jämförelser nedan relaterar till de beräknade luftomsättningarna i Tabell 8-5.

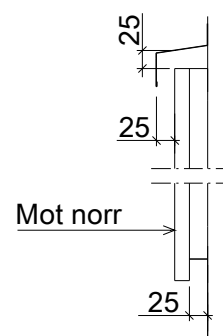
- *Alla fack - ljus kulör.*

Om kulören varit ljus med en absorptionsfaktor $\alpha_{sol} = 0.25$ reduceras luftomsättningen i alla tre facken med cirka 25%. Det skall påpekas att reduktionen i detta fall är en direkt följd av svagare termik varför osäkerheten i antagandet att vindens inverkan under dagtid kan försummas ökar.



- *Alla fack – orientering mot norr.*

Med en orientering mot norr skulle instrålning från sol varit mycket liten under den aktuella tidsperioden, se Figur 8-1. Det följer att vind skulle varit den dominerande drivkraften under hela dygnet. Utifrån lufthastigheterna i Tabell 8-4 kan uppskattas att omsättningen i samtliga fack reduceras med i storleksordning 20-30%.



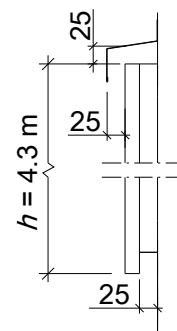
- *Alla fack – tidsperiod från april till och med augusti*

Under tidsperioden april-augusti ökar den beräkningsmässiga luftomsättningen i alla facken med cirka 20%. Ökningen är framförallt en effekt av att termiska drivkrafter finns och verkar under en större andel av dygnet. Använd klimatdata för beräkning av spalttemperatur under dagtid redovisas i bilaga 16.



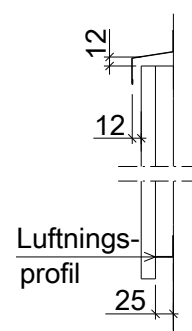
- *Alla fack – fördubblad spalthöjd*

Fördubblad spalthöjd ger ett ökat strömningsmotstånd men också större termiska drivkrafter. Under dagtid blir resultatet en hastighetsökning med cirka 40% i fack 1 och kring 10% i facken med horisontella läkt. Luftomsättningen under dagtid reduceras då med cirka 30% respektive 45%. Vindens betydelse för luftomsättningen om spalthöjden varit 4.3 m får uppskattas genom att variera den (fiktiva) skillnaden i formfaktor mellan spaltöppningarna, se avsnitt 7.4.4. Om möjligt intervall för ΔC_p antas till 0.01-0.1 erhålls att luftomsättningen för hela perioden reduceras i intervallet 35-55% för fack 1 och 50-60% för fack 3 och 4.



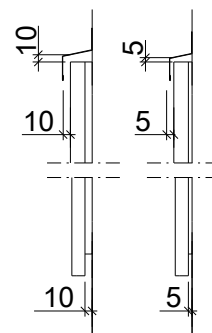
- *Alla fack - annan utformning vid spaltöppningarna.*

Vid mätningarna har under- och överkant spalt i alla facken varit utförda enligt ritningar i bilaga 4. Alltså utan luftningsprofil (se Figur 2-19) i underkant och med en 180° böj med samma bredd som spalten i överkant. Vid ett alternativt utförande där underkant spalt varit försedd med en luftningsprofil och där överkant spalt varit utförd enligt typ 4 i Figur 4-2 minskar luftomsättningen i fack 1 med cirka 40% medan effekten för facken med horisontella läkt är en mindre reduktion kring 10%.



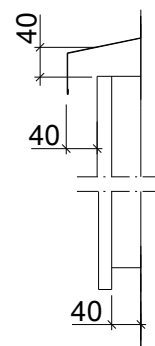
- *Fack 1 - minskad spaltbredd.*

Om spaltbredd och mått vid böj varit 10 mm istället för 25 mm minskar omsättningen med drygt 60% och volymflödet Q [m³/s] reduceras med cirka 85%. Om spaltbredd och böj varit 5 mm istället för 25 mm blir motsvarande siffror cirka 90 och 98%.



- *Fack 1 - ökad spaltbredd.*

Med spaltbredd och mått vid böj 40 mm ökar den beräknade luftomsättningen med cirka 20% medan volymflödet Q nära dubblas.



För tydlighetens skull har resultaten från beräkningarna även sammanställts i Tabell 8-6.

Tabell 8-6 Beräknad luftomsättning för de tre olika facken.

Spaltutförande/ Klimatförutsättning	Fack 1 [oms/h]	Fack 3 [oms/h]	Fack 4 [oms/h]
Enligt kapitel 6	190-270	70-95	80-105
Ljus kulör	145-210	55-70	60-80
Orientering mot norr	130-225	50-75	55-80
Period april-augusti	240-300	90-110	100-120
Fördubblad spalthöjd	90-170	30-50	35-55
Böj 12 mm och luftningsprofil	120-160	70-85	75-90
Spaltbredd 10 mm	70-105		
Spaltbredd 5 mm	20-30		
Spaltbredd 40 mm	240-320		

Den goda överensstämmelsen i Tabell 8-5 är självklart delvis en följd av att de studier som gjorts i provhusbyggnaden gett värdefull information om till exempel storleksordningen på vindens inverkan. Därutöver har också alla geometriska mått för spalterna varit kända i detalj. För det generella fallet föreligger inte samma förutsättningar varför en förutbestämning av ventilationsgraden med den precision som redovisats här sannolikt är svår att göra.

9 Konvektiv fukttransport i praktiken

I avsnitt 3.1.2 och 3.3 redovisas ekvationer för att beräkna konvektiv fukttransport i spalter under två uttorkningsfaser – fas 1 och fas 2. Ekvationerna kommer i detta kapitel att tillämpas för att jämföra uttorkningsförmågan hos experimentväggarna och varianter av dessa som studerats i kapitel 8.

9.1 Beräkningar

För att beskriva beräkningsgången används spalten i fack 1 med det utförande som redovisas i kapitel 6 och bilaga 4. Som tidigare gäller data enligt Tabell 8-1 och Tabell 8-2. I Tabell 9-1 redovisas beräknad konvektiv fukttransport G i spalten under dagtid fördelad över dygnets 24 timmar förutsatt fuktöverskott på spaltens båda ytor (uttorkningsfas 1 enligt avsnitt 3.1.2). Av skäl som diskuterats i avsnitt 3.3 har beräkningarna genomförts utan hänsyn till termen $h_e \cdot g$.

Tabell 9-1 Beräknad konvektiv fukttransport G . Ljusa timmar och uttorkningsfas 1.

Fack 1	v_{in} [g/m ³]	T_{in} [°C]	T_{ut} [°C]	T_0 [°C]	v_{ut} [g/m ³]	RF_{ut} [%]	$v_{ut} - v_{in}$ [g/m ³]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]	G [g/dygn]
Klar dag									
Oktober	7.6	15.0	24.6	28.6	22.5	100	14.9	29.2	1654
November	5.9	5.6	13.5	16.5	11.7	100	5.8	27.0	488
December	4.9	2.6	9.1	11.3	8.9	100	4.0	24.5	262
Januari	4.3	0.2	7.4	10.0	8.0	100	3.7	26.1	273
Februari	4.1	0.3	9.3	13.2	9.0	100	4.9	29.6	514
Halvklar dag									
Oktober	7.6	15.0	21.9	24.1	19.3	100	11.7	24.2	1076
November	5.9	5.6	11.4	13.1	10.3	100	4.4	22.6	308
December	4.9	2.6	7.5	8.7	8.0	100	3.1	20.6	172
Januari	4.3	0.2	5.5	6.9	7.0	100	2.7	21.8	170
Februari	4.1	0.3	6.9	9.1	7.7	100	3.6	24.7	316
Mulen dag									
Oktober	7.6	15.0	18.3	18.7	15.6	100	8.0	15.4	471
November	5.9	5.6	8.6	8.9	8.6	100	2.7	15.0	126
December	4.9	2.6	5.2	5.5	6.9	100	2.0	14.1	75
Januari	4.3	0.2	3.1	3.5	6.0	100	1.7	15.2	73
Februari	4.1	0.3	3.8	4.4	6.3	100	2.2	17.1	132

Angiven ånghalt vid inströmning till spalten v_{in} har antagits till månadsmedelvärde för Sturup och hämtats ur Nevander och Elmarsson (1994). Redovisade temperaturer T_0 och T_{ut} (se Figur 3-8) är resultat som erhållits vid värmebalansberäkningar medan lufthastigheter $u_{m,spalt}$ är hämtade ur Tabell 8-3. För beräkning av v_{ut} har ekvation (3.31), (3.32) och (3.33) använts. Det framgår att luftens fuktkapacitet i samtliga fall är utnyttjad till 100% när den lämnar spalten. Den konvektiva fukttransporten G har beräknats med ekvation (3.22) och med beaktande av aktuell fördelning mellan natt och dag enligt Tabell 8-1. Exempelvis har G en klar dag i oktober beräknats som $14.9 \cdot 0.025 \cdot 0.4 \cdot 0.292 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 0.44 = 1654$ g/dygn där 0.025 är spaltbredden b , 0.4 är spaltvidden a och 0.44 hämtats ur Tabell 8-1.

Under dygnets mörka del är temperaturskillnaden mellan spaltluften och uteluften mycket liten. I kombination med hög luftfuktighet utomhus innebär detta att möjlig ånghaltsskillnad mellan in- och utströmmande luft under alla månader utom oktober bara är kring 0.5 g/m^3 och då förutsatt helmulen himmel. Under nätter med mindre molnighet när den motstrålande temperaturen understiger utomhustemperaturen är potentialen ännu mindre. Beräkningar av konvektiv fukttransport har därför begränsats till mulna nätter. Fukttransporten under två av månaderna - januari och februari - har satts till noll då utomhustemperaturen understiger fryspunkten. Resultatet har sammanställts i Tabell 9-2. För att beräkna G_{max} respektive G_{min} har data gällande fördelning mellan ljusa och mörka timmar från Tabell 8-1 använts och som exempel har värdena på den konvektiva fukttransporten under oktober erhållits som

$$G_{max} = 1.0 \cdot 0.025 \cdot 0.4 \cdot 0.134 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 0.56 = 65 \text{ g/dygn}$$

$$G_{min} = 1.0 \cdot 0.025 \cdot 0.4 \cdot 0.079 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 0.56 = 38 \text{ g/dygn}$$

Tabell 9-2 Beräknad konvektiv fukttransport G . Mörka timmar och uttorkningsfas 1.

Fack 1	T_u^* [°C]	v_{in} [g/m ³]	v_{ut} [g/m ³]	$v_{ut} - v_{in}$ [g/m ³]	Max	Min	G_{max} [g/dygn]	G_{min} [g/dygn]
					$u_{m,spalt}$ [cm/s]	$u_{m,spalt}$ [cm/s]		
Mulen natt								
Oktober	8.5	7.6	8.6	1.0	0.134	0.079	65	38
November	4.2	5.9	6.5	0.6	0.134	0.079	44	26
December	1.2	4.9	5.3	0.4	0.134	0.079	32	19
Januari	-0.5	4.3	4.3	0	0.134	0.079	0	0
Februari	-0.8	4.1	4.1	0	0.134	0.079	0	0

* Månadsmedelvärde för Sturup (Nevander och Elmarsson, 1994)

Med hjälp av Tabell 8-1 och uppgifterna i de två tabellerna ovan kan ett intervall för den genomsnittliga fukttransporten under perioden oktober-februari beräknas. En övre gräns för varje månad erhålls som

$$G_{max}^{okt} = \frac{7 \cdot 1654 + 14 \cdot 1076 + 10 \cdot 471}{31} + \frac{18 \cdot 65}{31} = 1011 + 38 = 1049 \text{ g/dygn}$$

$$G_{max}^{nov} = \frac{4 \cdot 488 + 11 \cdot 308 + 15 \cdot 126}{30} + \frac{23 \cdot 44}{30} = 241 + 34 = 275 \text{ g/dygn}$$

$$G_{max}^{dec} = \frac{4 \cdot 262 + 10 \cdot 172 + 17 \cdot 75}{31} + \frac{25 \cdot 32}{31} = 130 + 26 = 156 \text{ g/dygn}$$

$$G_{max}^{jan} = \frac{5 \cdot 273 + 11 \cdot 170 + 15 \cdot 73}{31} + \frac{23 \cdot 0}{31} = 140 + 0 = 140 \text{ g/dygn}$$

$$G_{max}^{feb} = \frac{6 \cdot 514 + 10 \cdot 316 + 12 \cdot 132}{28} + \frac{20 \cdot 0}{28} = 280 + 0 = 280 \text{ g/dygn}$$

Det framgår av uträkningarna ovan att fukttransporten under dagtid är mycket större än transporten under natt.

För hela perioden oktober-februari kan nu G_{max} beräknas som

$$G_{max} = \frac{31 \cdot 1049 + 30 \cdot 275 + 31 \cdot 156 + 31 \cdot 140 + 28 \cdot 280}{151} = 383 \text{ g/dygn}$$

Det maximala genomsnittliga fuktutbytet i spalten blir då

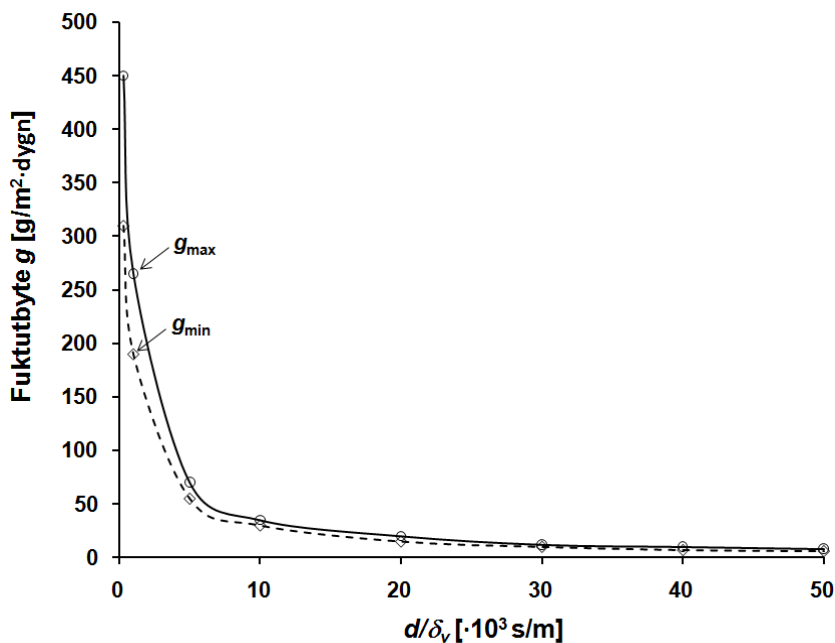
$$g_{max} = \frac{383}{2.15 \cdot 0.4} \approx 450 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dygn}$$

Beräknas en undre gräns blir motsvarande siffror

$$G_{min} = 267 \text{ g/dygn}$$

$$g_{min} \approx 310 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dygn}$$

Genom att upprepa beräkningarna för uttorkningsfas 2 (se avsnitt 3.1.2) med successivt ökade värden på ånggenomgångsmotståndet d/δ_v , har kurva enligt Figur 9-1 erhållits. Det framgår att fuktutbytet kraftigt sjunker så fort den kapillära transporten ända fram till spaltytorna upphört. Siffrvärdena under fas 1 kan betraktas som potentialen för spaltens konvektiva fukttransportförmåga vid aktuellt klimat. Med hänsyn tagen till att ångbildningsvärmnet reducerar fuktutbytet med i storleksordningen 40-50% (se avsnitt 3.3) blir denna förmåga i aktuellt fall 200-300 $\text{g/m}^2 \cdot \text{dygn}$. Det kan konstateras att med $d/\delta_v = 5000$ utnyttjas mindre än 30% av fukttransportförmågan och med $d/\delta_v = 50000$ är utnyttjandet mindre än 3%.



Figur 9-1 Beräknad storlek på möjligt fuktutbyte i fack 1 som funktion av d/δ_v .

I Tabell 9-3 återges beräknat fuktutbyte för alla tre experimentväggarna och de varianter av dessa som beskrivits i kapitel 8.

Tabell 9-3 Beräknat genomsnittligt fuktutbyte under olika uttorkningsfaser. Uttorkning från båda spaltytorna och exklusive $h_e \cdot g$.

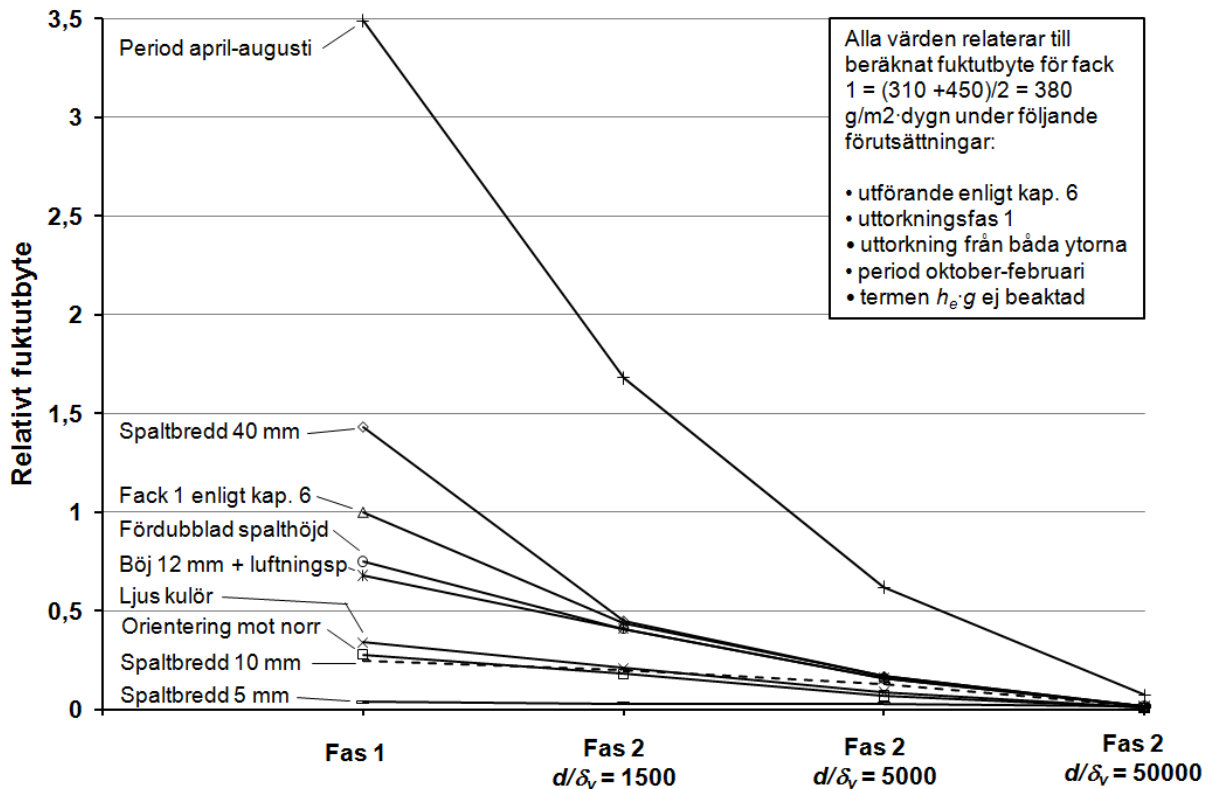
Spaltutförande / Klimatförutsättning	Fack 1 [g/m ² ·dygn]		Fack 3 [g/m ² ·dygn]		Fack 4 [g/m ² ·dygn]	
Uttorkningsfas 1						
Enligt kapitel 6	310-450	0.75*	135-200	0.95*	150-220	0.95*
Ljus kulör	110-145	0.92*	45-55	1.0*	50-60	1.0*
Orientering mot norr	75-140	0.93*	30-45	1.0*	30-50	1.0*
Period april-augusti	1130-1500	0.79*	490-660	0.95*	540-730	0.95*
Fördubblad spalthöjd	230-340	0.82*	75-115	0.95*	80-130	0.95*
Böj 12 mm+luftningsp.	210-310	0.86*	125-190	0.95*	135-205	0.95*
Spaltbredd 10 mm	70-120	0.98*				
Spaltbredd 5 mm	10-20	1.0*				
Spaltbredd 40 mm	450-635	0.70*				
Uttorkningsfas 2, $d/\delta_v = 1500$						
Enligt kapitel 6	145-190	0.55*	100-145	0.65*	100-145	0.65*
Ljus kulör	70-90	0.7*	40-55	0.85*	40-55	0.85*
Orientering mot norr	60-80	0.65	30-40	0.85*	30-40	0.85*
Period april-augusti	570-710	0.55*	385-500	0.70*	385-500	0.70*
Fördubblad spalthöjd	130-180	0.55*	65-100	0.80*	65-100	0.80*
Böj 12 mm+luftningsp.	130-180	0.55*	100-140	0.65*	100-140	0.65*
Spaltbredd 10 mm	65-90	0.8*				
Spaltbredd 5 mm	10-15	1.0*				
Spaltbredd 40 mm	150-190	0.55*				
Uttorkningsfas 2, $d/\delta_v = 5000$						
Enligt kapitel 6	55-70	~ 0.5*	50-65	~ 0.6*	50-65	~ 0.6*
Ljus kulör	30-35	~ 0.6*	25-30	~ 0.6*	25-30	~ 0.6*
Orientering mot norr	25-30	~ 0.6*	20-25	~ 0.6*	20-25	~ 0.6*
Period april-augusti	210-255	~ 0.5*	190-235	~ 0.6*	190-235	~ 0.6*
Fördubblad spalthöjd	50-70	~ 0.5*	40-60	~ 0.6*	40-60	~ 0.6*
Böj 12 mm+luftningsp.	50-70	~ 0.6*	50-65	~ 0.6*	50-65	~ 0.6*
Spaltbredd 10 mm	40-55	~ 0.6*				
Spaltbredd 5 mm	10-15	~ 1.0*				
Spaltbredd 40 mm	55-70	~ 0.5*				
Uttorkningsfas 2, $d/\delta_v = 50000$						
Enligt kapitel 6	6-8	~ 0.5*	6-8	~ 0.5*	6-8	~ 0.5*
Ljus kulör	4-5	~ 0.5*	4-5	~ 0.5*	4-5	~ 0.5*
Orientering mot norr	3-4	~ 0.5*	3-4	~ 0.5*	3-4	~ 0.5*
Period april-augusti	25-30	~ 0.4*	25-30	~ 0.5*	25-30	~ 0.5*
Fördubblad spalthöjd	6-8	~ 0.5*	6-8	~ 0.5*	6-8	~ 0.5*
Böj 12 mm+luftningsp.	6-8	~ 0.5*	6-8	~ 0.5*	6-8	~ 0.5*
Spaltbredd 10 mm	6-8	~ 0.5*				
Spaltbredd 5 mm	5-7	~ 0.6*				
Spaltbredd 40 mm	6-8	~ 0.5*				

*Faktor som fuktutbytet skall multipliceras med om endast uttorkning från väggkärna.

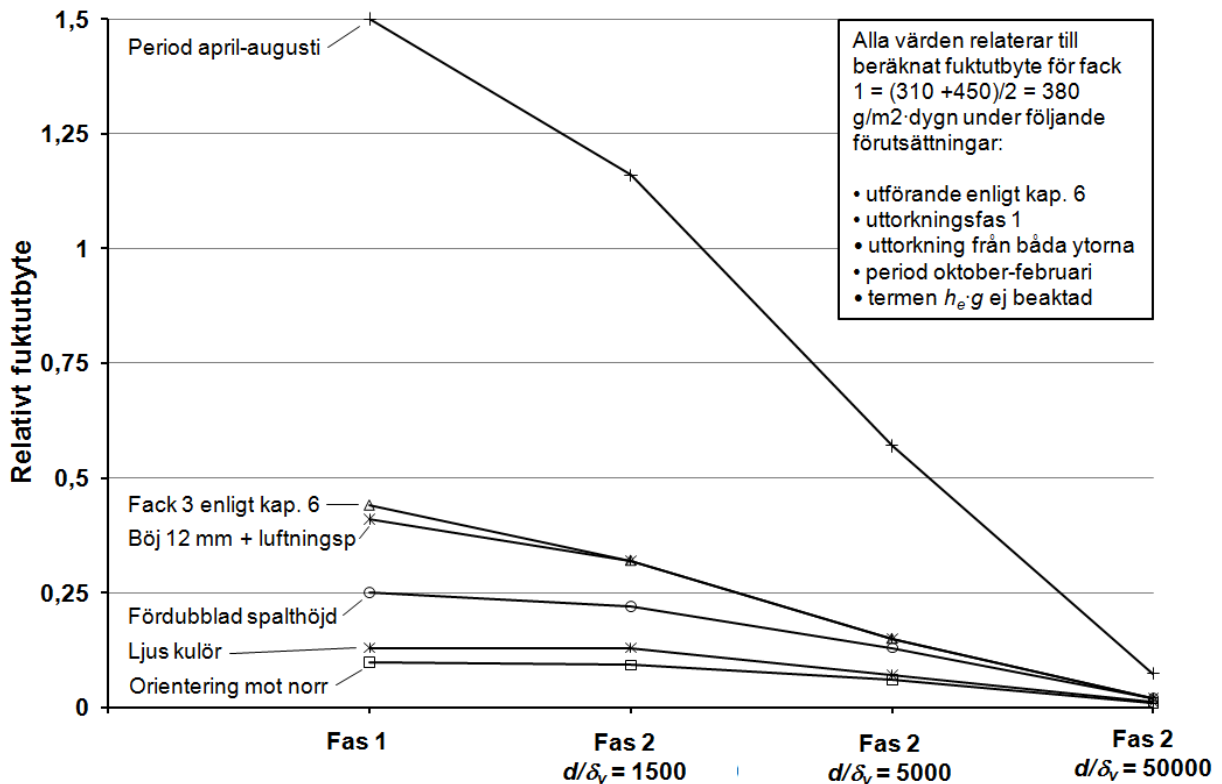
Observera förutsättningarna för värdena i Tabell 9-3:

- Uttorkning från både fasadskikt och väggkärna mot spalten. Om endast uttorkning från väggkärna (som visat i Figur 3-5 och Figur 3-6) gäller att ungefärlig storlek på fuktutbytet fås genom multiplicering med faktorn till höger om respektive värde i tabellen.
- Beräkningarna har utförts utan hänsyn till termen $h_e \cdot g$ vilket innebär att fuktutbytet under fas 1 är överskattningar. Enligt avsnitt 3.3 kan storleken på denna överskattning bedömas vara 40-50%. Vid tillämpning av denna korrektion blir konsekvensen för några spalter (till exempel 5 mm spalten) att fuktutbytet under fas 1 är mindre än under fas 2 med $d/\delta_v = 1500$. I de fall detta förhållande gäller bör det senare värdet vara den bästa beskrivningen även för fas 1.

Baserat på Tabell 9-3 visas i Figur 9-2 och Figur 9-3 förhållandet mellan fuktutbytet i de olika spalterna. Som utgångspunkt för jämförelsen har i båda figurerna experimentväggarnas fack 1 under uttorkningsfas 1 använts. Figur 9-2 visar specifikt fack 1 medan Figur 9-3 gäller för fack 3.



Figur 9-2 Relativt fuktutbyte i fack 1 med stående läkt.



Figur 9-3 Relativt fuktutbyte i fack 3 med horisontella, perforerade läkt.

9.2 Kommentarer till beräkningsresultat

I föregående avsnitt har storleken på möjlig konvektiv fukttransport i experimentväggarnas spalter under olika uttorkningsfaser kvantitativt bedömts genom beräkningar. Resultaten har presenterats som ett genomsnittligt fuktutbyte g [g/m²·dygn] mellan spaltens ytor och spaltluften. Därutöver har fuktutbytet beräknats och redovisats för ett antal fiktiva varianter av experimentväggarna (till exempel vit kulör i stället för röd kulör). Det skall betonas att det i utfört arbete inte föreligger några som helst mätningar av fuktutbyte som beräkningarna kunnat jämföras mot. Det är därmed inte heller möjligt att avgöra hur väl erhållna resultat representerar en verklighet eller sanning. Följaktligen kan det vara sunt att värdera trender och relationer som beräkningarna visar på högre än de absoluta värdena. Med detta sagt kommer de huvudsakliga resultaten från beräkningsavsnittet att sammanfattas och kommenteras nedan.

9.2.1 Uttorkningsfas 1, potential för fuktutbyte

När det finns förutsättningar för avdunstning av fukt direkt från spaltytorna till spaltluften är det en mycket stor spridning på det beräknade fuktutbytet, från storleksordningen 10 till över 1000 g/m²·dygn. Den stora spridningen är då inte enbart ett resultat av skilda geometriska förutsättningar utan även av årstid, kulörval och väderstreck.

Med de faktiska experimentväggarna som referens visar beräkningarna att storleken på det genomsnittliga fuktutbytet:

- ökar under vår/sommar jämfört med höst/vinter
- ökar om spaltbredden ökar
- minskar om spalthöjden ökar

- minskar om strömningsmotståndet vid in- och utlopp ökar
- minskar om kulören är ljus jämfört med mörk
- minskar vid orientering mot norr jämfört med söder

Inget av ovanstående förhållande är att betrakta som direkt överraskande, även om till exempel konsekvensen av ökad spalthöjd på förhand inte var helt given.

Ett tydligt resultat från beräkningarna är spaltbreddens stora betydelse för fuktutbytet. Vid en spaltbredd om 40 mm blir fuktutbytet en faktor 30 gånger större än vad som uppnås i en 5 mm bred spalt. Smala spalter är alltså mycket mindre effektiva än breda i fråga om att transportera bort fukt från våta ytor i spalten. Beräkningarna visar också på den betydelse kulör och orientering/väderstreck har för fuktutbytet. I fallet att experimentväggarna målats vita skulle potentialen för fuktutbyte reduceras till ungefär en tredjedel. Om väggarna varit orienterade mot norr är motsvarande förhållande cirka en fjärdedel.

En av de ursprungliga frågeställningarna i arbetet var hur luftomsättning och möjlighet till uttorkning av fukt påverkas om fasadskiktet monteras mot horisontella, perforerade ställäkt i stället för stående träläkt. Beräkningarna visar att potentialen för fuktutbytet med ställäkt mer än halveras förutsatt att strömningsarean vid spaltöppningarna är i paritet med spaltens nominella strömningsarea. Om arean vid spaltens in- och utlopp begränsas (till exempel av profiler och plåtavtäckningar) blir skillnaden i fuktutbyte mellan läktalternativen mindre. Det kan också noteras att fuktutbyte i en spalt med någon av de två typer av perforerade ställäkt som studerats blir större än i en spalt med stående läkt och bredd 10 mm. Detta förhållande är inte en självklarhet eftersom hålarean hos de båda läktyperna med marginal understiger $10000 \text{ mm}^2/\text{m}$, se Tabell 6-1.

Vid avdunstning från vått material orienterat mot väggkärnan och ingen avdunstning från fasadskiktet är reduktionsfaktorn för fuktutbytet i flertalet beräkningsexempel nära eller mycket nära 1. Detta betyder att spaltens transportkapacitet mer eller mindre blir tagen i anspråk trots att det bara är en av de två spaltytorna som är våt. Ett tydligt undantag är den 40 mm breda spalten där en våt yta mot väggkärnan inte förmår att avdunsta mer fukt än att cirka 70% av spaltens fukttransportförmåga utnyttjas.

9.2.2 Uttorkningsfas 2

När transport av fukt till spalten måste ske via diffusion genom ett ”torrt” skikt närmast spalten blir det absoluta fuktutbytet i alla fall utom ett mindre eller mycket mindre jämfört med fas 1. Undantag är den 5 mm breda spalten där fuktutbytet vid ett motstånd på $5 \cdot 10^3 \text{ s/m}$ i det närmaste är lika stort som när fukt kan avdunsta direkt från spaltytorna. Spaltens förmåga att transportera fukt är alltså även i detta skede i det närmaste helt utnyttjad.

Med ett motstånd på $5 \cdot 10^3 \text{ s/m}$ är förhållandet mellan den 40 mm breda spalten och 5 mm spalten nu reducerad till en faktor 5. Även en upprepning av tidigare jämförelse gällande betydelse av kulör och orientering visar på tendensen att skillnaderna i fuktutbyte utjämnats.

Under uttorkningsfas 2 är skillnaderna mellan fack 1 och de två övriga facken nästan helt utjämnade när d/δ_v är $5 \cdot 10^3 \text{ s/m}$.

Ett förhållande som inte förändrats vid övergång från fas 1 till fas 2 är den gynnsamma effekt som ett vår- och sommarklimat har på fuktutbytet. Under alla tre faserna medför de varmare månaderna ett fuktutbyte som är 3-4 gånger så stort som under höst/vinter.

9.2.3 Slutkommentar

Många ytterväggssystem inkluderar en dränerad och ventilerad spalt bakom fasadskiktet. En given avsikt med en sådan utformning är förstås att skapa möjlighet för fukt att ventileras bort från väggen. I detta kapitel har en storleksordning på konvektiv fukttransport i ventilerade ytterväggsspalter beräknats. Resultaten visar på betydande skillnader beroende på vilka villkor som föreligger. Egen erfarenhet tyder på att det i byggprojekt är sällsynt att luftspalter med tillhörande läktsystem och detaljer utformas och dimensioneras för att säkerställa en specifik nivå på den fukttransporterande förmågan. Bland de skäl som ligger bakom detta kan till exempel finnas komplexiteten i att räkna på luftspalter och osäkerheter om vilka drivkrafter som kommer att finnas.

Den metodik som här använts för att beräkna fukttransport i spalter lider av att vara såväl omständlig som tidskrävande och lämpar sig därmed mindre bra för praktisk hantering. Det är alltså inte troligt att denna typ av manuella beräkningar kommer att utföras oftare framöver än tidigare. Värdet av detta arbete ligger snarare i en ökad insikt om den faktiska inverkan olika faktorer och parametrar har för en spalts förmåga att konvektivt förflytta fukt från spalten till utomhusluften. En annan förtjänst som arbetet erbjuder är kunskap som kan vara användbar vid beräkningar i datorprogram som simulerar uttorkningsförlopp i väggkonstruktioner med ventilerad luftspalt, både avseende indata och tolkning/granskning av utdata.

10 Enkla, jämförande uttorkningsberäkningar

För att illustrera och konkretisera betydelsen av det beräknade fuktutbytet i Tabell 9-3 skall siffervärdena här användas för att uppskatta och jämföra uttorkningstider för en blöt vindskyddsskiva av gips vid alternativa utföranden av experimentväggarnas spalter. Som nämnts i kapitel 1 har enstegstätade putsfasader (ingen luftspalt) på regelstommar i betydande omfattning drabbats av fuktproblem. Det har därför befunnits intressant att också uppskatta uttorkningstider för vindskyddsskivan när fasadskiktet utgörs av puts mot isolering av cellplast eller mineralull.

De beräkningar och resultat som presenteras i kapitlet baseras på handräkningar och några förenklade antaganden gällande materialegenskaper och möjlig fukttransportriktning. Det senare innebär att all uttorkning av vindskyddsskivan inåt förutsatts förhindrad. I praktiken kommer fukt att kunna omfördelas från skivan till den isolerade delen av väggkärnan men med en vägguppbyggnad med plastfolie på insidan (se Figur 3-1) kommer fukten dock inte att kunna torka ut från väggen. Konsekvensen av antagandet blir därmed att beräkningarna tenderar att:

- underskatta tiden som krävs för fukten helt skall torka ut från väggen
- överskatta tiden som krävs för fukten skall torka bort från vindskyddsskivan

10.1 Fukttransportdata

Vindskyddsskivan har antagits vara en impregnerad, kartongklädd utegipsskiva med tjocklek 10 mm och ytvikt 7.2 kg/m^2 . Fukttransportdata för en sådan skiva framgår av Tabell 10-1 (Hedenblad, 1996). Notera att ånggenomsläppligheten är nära konstant i hela det redovisade RF-området vilket förenklar beräkningarna.

Tabell 10-1 Fukttransportdata för impregnerad, kartongklädd utegipsskiva (Hedenblad, 1996).

Relativ fuktighet (RF) [%]	Jämviktsfukthalt vid uttorkning W_{des} [kg/m^3]	Ånggenomsläpplighet δ_v [$\cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]
100	30	~3
95	12	3
90	10	3
80	7	3
70	6	3
50	5	3
35	4	3

Maximal fukthalt W_{max} har uppskattats till 72 kg/m^3 vilket motsvarar en vattenabsorption på 10%. Som jämförelse anger till exempel tillverkaren Norgips (www.norgips.se) en absorption $< 10\%$ för sin impregnerade utegipsskiva *Utvändig-X 9*.

För uttorkningsberäkningar då fasadskiktet utgörs av puts på isolering behövs värden på ånggenomsläpplighet för puts- och isoleringsskikt. Hedenblad (1996) ger några uppgifter vilka sammanställts i Tabell 10-2.

Tabell 10-2 Fukttransportdata för putsbruk och isolering (Hedenblad, 1996).

Material	Relativ fuktighet RF [%]	Ånggenomsläpplighet δ_v [$\cdot 10^{-6}$ m ² /s]
Kalkcementbruk (KC-bruk)	90-95	~ 1.5
	35-90	~1
Cellplast EPS, $\rho \sim 20$ kg/m ³	35-100	0.9 – 1.3
Mineralull, $\rho \sim 15$ kg/m ³	-	15-24
Mineralull, $\rho \sim 200$ kg/m ³	-	8-12

Förutsatt en puts- och en isolertjocklek på 20 respektive 50 mm kan storleksordningen på möjligt intervall för det totala ångmotståndet Z_v för puts och isolering uppskattas till:

$$Z_{v,max} = \frac{0.02}{1 \cdot 10^{-6}} + \frac{0.05}{0.9 \cdot 10^{-6}} \approx 75 \cdot 10^3 \text{ s/m (puts + cellplast)}$$

$$Z_{v,min} = \frac{0.02}{1.5 \cdot 10^{-6}} + \frac{0.05}{15 \cdot 10^{-6}} \approx 15 \cdot 10^3 \text{ s/m (puts + mineralull)}$$

Typisk densitet på mineralull som används som putsbärare är kring 100 kg/m³ vilket motiverar antagandet $\delta_v = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

10.2 Beräkningsresultat

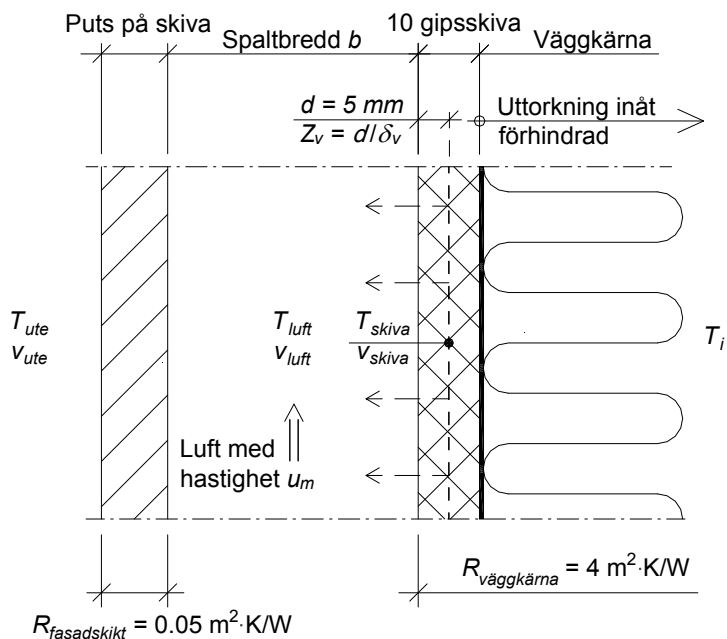
Vid uttorkningsstart har gipsskivan över hela fasadytan antagits hålla fukthalt $W_{max} = 72$ kg/m³. Som slutpunkt för uttorkningen har valts RF=80% vilket motsvarar fukthalt 7 kg/m³. Den mängd fukt som skall torka ut från skivan är alltså $72-7=65$ kg/m³, eller uttryckt per ytenhet 650 g/m².

10.2.1 Ventilerad putsfasad

I detta fall följer uttorkningsförloppet de faser som beskrivits i avsnitt 3.1.2. Uttorkning från $W_{max}=72$ kg/m³ till $W=30$ kg/m³ kan ske genom avdunstning direkt från ytan på vindskyddet till spaltluften och storleken på fuktutbytet kan hämtas från Tabell 9-3 (uttorkningsfas 1). Vid fortsatt uttorkning inträder den andra uttorkningsfasen. Enligt metod som beskrivs i Sandin (1988) kan storlek på ångtransport i detta skede överslagsmässigt beräknas genom att anta att all fukt (i genomsnitt) avges från skivmitt. Med beteckningar och mått enligt Figur 10-1 och fukttransportdata enligt Tabell 10-1 erhålls då

$$g = \frac{v_{skiva} - v_{luft}}{Z_v} = \frac{v_{skiva} - v_{luft}}{d/\delta_v} = \frac{v_{skiva} - v_{luft}}{0.005/3 \cdot 10^{-6}} \approx \frac{v_{skiva} - v_{luft}}{1650} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s]} \quad (10.1)$$

För beräkningar i fas 2 kan därmed fuktutbyte vid ett motstånd $Z_v=1500$ s/m enligt Tabell 9-3 användas utan större fel. Värdena i Tabell 9-3 utgår från att ånghalten i materialet på ett avstånd d från ytan är mätnadsånghalten v_s vid aktuell temperatur (se Figur 3-6). Med hänvisning till resonemang i avsnitt 3.3 har denna temperatur approximerats med gipsskivans ytemperatur. När den relativa fuktigheten på avstånd d understiger 100% måste värdena korrigeras för detta.



Figur 10-1 Uttorkning av gipsskiva mot ventilerad spalt.

Tabell 10-3 redovisar gången i en uttorkningsberäkning för experimentväggarnas fack 1 med ett medelvärde av fuktutbytet enligt Tabell 9-3. Fuktutbytet under steg 1 är dels korrigerat med anledning av att termen $h_e \cdot g$ inte är beaktad i Tabell 9-3 och dels för att det bara är väggkärnans yta som torkar mot spalten. Under de tre övriga stegen avser gjorda korrekationer ensidig uttorkning och relativ fuktighet i skivan. Som framgår nederst i tabellen summerar uttorkningstiden till cirka 5 dygn.

Tabell 10-3 Förenklad uttorkningsberäkning för gipsskiva, experimentvägg fack 1.

Steg	RF [%]	W [kg/m ³]	$\Delta W \cdot 0.01$ [g/m ²]	RF _{med} [%]	Fuktutbyte g [g/m ² ·dygn]	Δt [dygn]
Start	100	72				
1			420	100	$\frac{((310 + 450) / 2) \cdot 0.75}{1.5} \approx 190$	$420 / 190 \approx 2.2$
	100	30				
2			180	97.5	$((145 + 190) / 2) \cdot 0.55 \cdot 0.975 \approx 90$	$180 / 90 = 2$
	95	12				
3			20	92.5	$((145 + 190) / 2) \cdot 0.55 \cdot 0.925 \approx 85$	$20 / 85 \approx 0.2$
	90	10				
4			30	85	$((145 + 190) / 2) \cdot 0.55 \cdot 0.85 \approx 80$	$30 / 80 \approx 0.4$
	80	7				
Slut	80	7				

$\Sigma \Delta t \approx 5$ dygn

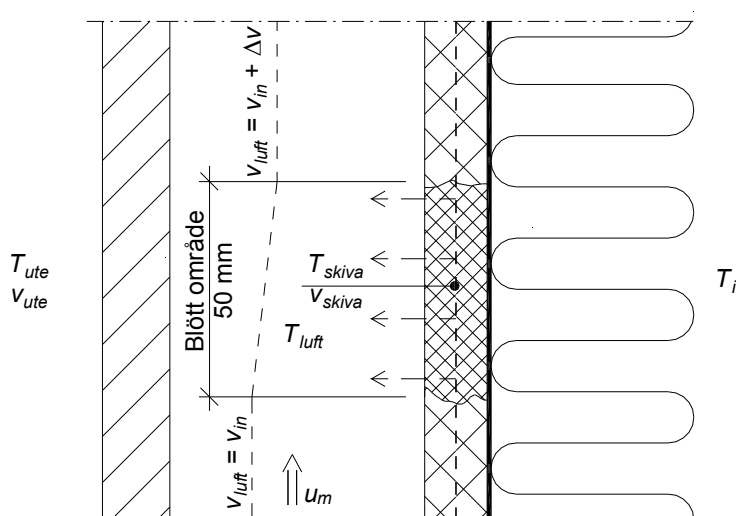
På samma sätt som ovan har uttorkningstider beräknats för experimentväggarnas fack 3 och fack 4. Av Tabell 10-4 framgår att uttorkningstiden för dessa fack blir cirka 7 dygn. Tabellen ger också beräknade uttorkningstider för de alternativa utföranden av experimentväggarna som studerats i kapitel 8 och 9.

Tabell 10-4 Ventilerad spalt. Beräknad uttorkningstid av gipsskiva som är blöt över hela ytan.

Spaltutförande/ Klimatförutsättning	Fack 1 [dygn]	Fack 3 [dygn]	Fack 4 [dygn]
Enligt kapitel 6	~ 5	~ 7	~ 7
Ljus kulör	~ 10	~ 16	~ 16
Orientering mot norr	~ 12	~ 22	~ 22
Period april-augusti	~ 1	~ 2	~ 2
Fördubblad spalthöjd	~ 6	~ 10	~ 10
Böj 12 mm och luftningsprofil	~ 6	~ 7	~ 7
Spaltbredd 10 mm	~ 11		
Spaltbredd 5 mm	~ 53		
Spaltbredd 40 mm	~ 4		

Uttorkningstider enligt Tabell 10-4 avser endast konvektiv fukttransport och inkluderar alltså inte eventuell diffusion genom fasadskiktet. Beroende på spaltutförning och på fasadskiktets ånggenomgångsmotstånd kan även fukttransport via diffusionsmekanismer vara av betydelse för uttorkningstiden. Om fasadskiktets (puts + skiva) ånggenomgångsmotstånd Z_v skulle vara $20 \cdot 10^3$ s/m visar en kontrollberäkning att uttorkningstiden för 5 mm spaltbredd reduceras med hela 20 dygn från 53 till 33 dygn (-38%). Med $Z_v = 50 \cdot 10^3$ s/m blir reduktionen mindre, cirka 11 dygn (-21%). För 10 mm spaltbredd visar en beräkning att diffusionens positiva påverkan på uttorkningstiden är mindre än 10% om $Z_v \geq 20 \cdot 10^3$ s/m. Inte oväntat följer alltså att uttorkning genom diffusion framför allt är relevant för spalter med liten ventilation. Det kan i sammanhanget nämnas att Knauf Danogips uppger ett ånggenomgångsmotstånd kring $30 \cdot 10^3$ s/m för de cementbaserade skivor *Aquapanel Outdoor* som putsskiktet utfördes mot i experimentväggarna (se kapitel 6).

Uttorkningstider enligt Tabell 10-4 gäller för ytterlighetsfallet att vindsyddsskivan är blöt över hela sin yta mot spalten. Beräkningar har även gjorts för fallet att skivan endast är blöt i en begränsad fläck. Fläckens form har antagits vara rektangulär med horisontell utbredning lika med spaltvidd samt höjd 50 mm, se Figur 10-2.



Figur 10-2 Uttorkning av lokalt blöt gipsskiva mot ventilerad spalt.

Spaltluftens ånghalt v_{luft} vid underkant fläck är lika med luftens ånghalt v_{in} vid inströmning till spalten. Efter passage har ånghalten ökat med Δv . Då skivans ytemperatur varierar längs med spalthöjden blir resultatet något beroende av fläckens höjdläge i spalten. Vid beräkning av de uttorkningstider som presenteras i Tabell 10-5 har ytemperaturen vid fläcken antagits vara densamma som vindskyddets genomsnittliga ytemperatur i spalten. En annan förutsättning är att termen $h_e \cdot g$ försummas.

Tabell 10-5 Ventilrad spalt. Beräknad uttorkningstid av gipsskiva som är lokalt blöt.

Spaltutförande/ Klimatförutsättning	Fack 1 [dygn]	Fack 3 [dygn]	Fack 4 [dygn]
Enligt kapitel 6	~ 3	~ 3	~ 3
Ljus kulör	~ 5	~ 5	~ 5
Orientering mot norr	~ 6	~ 6	~ 6
Period april-augusti	< 1	< 1	< 1
Fördubblad spalthöjd	~ 3	~ 3	~ 3
Böj 12 mm och luftningsprofil	~ 3	~ 3	~ 3
Spaltbredd 10 mm	~ 3		
Spaltbredd 5 mm	~ 4		
Spaltbredd 40 mm	~ 3		

Vid jämförelse av resultat i Tabell 10-5 med det i Tabell 10-4 framgår att uttorkningstiden blir reducerad till cirka 3 dygn för många av de studerade fallen. Uttorkningen tar ytterligare några dagar för *Ljus kulör* och *Orientering mot norr* medan uttorkningstiden för *Period april-augusti* är mindre än ett dygn. Det kan tyckas förvånande att det nästan inte är någon skillnad i uttorkningstid mellan spalter med bredd 5 och 40 mm. Förklaringen är att uttorkningen sker vid likvärdig ånghaltsskillnad och att spaltluften inte i något av fallen blir fuktmättad. Om fläcken varit högre än 50 mm skulle uttorkningshastigheten i den smalare spalten begränsats av att luftens mätnadsånghalt uppnåtts inom fläckens höjd.

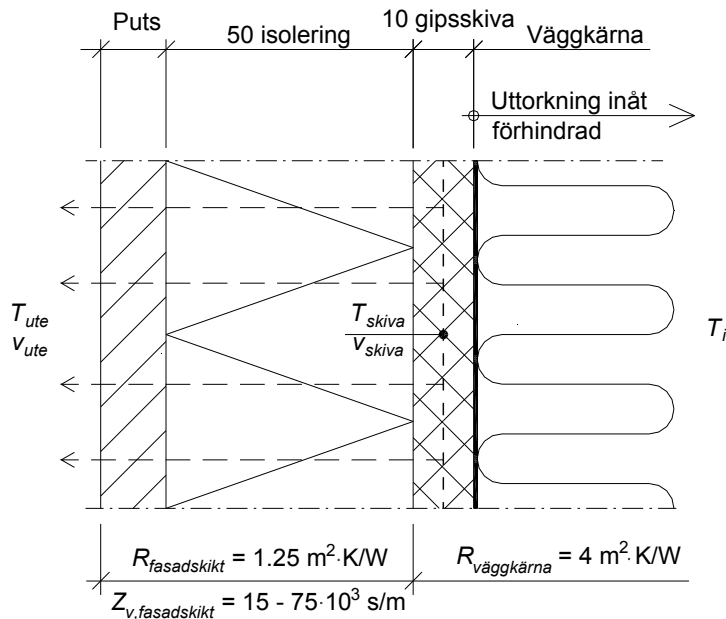
10.2.2 Fasad med puts på isolering

I den enstegstätade väggen måste hela uttorkningsförloppet ske genom att ånga diffunderar genom puts och isolering. Uttorkningsfas 1 enligt avsnitt 3.1.2 är alltså inte aktuell i detta fall. Med beteckningar enligt Figur 10-3 erhålls ångtransporten som

$$g = \frac{v_{skiva} - v_{ute}}{Z_{v,fasadskikt}} = \frac{v_s(T_{skiva}) \cdot RF_{skiva} - v_{ute}}{Z_{v,fasadskikt}} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad (10.2)$$

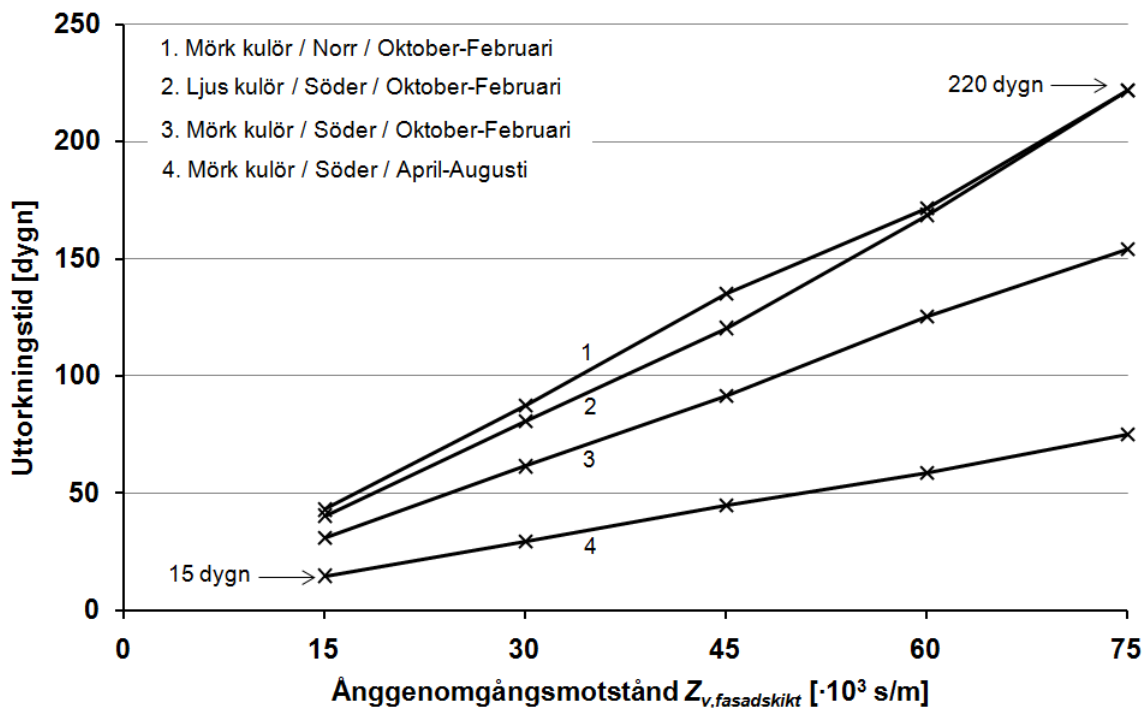
Om ånggenomgångsmotståndet i gipsskivan försummas erhålls gränserna för $Z_{v,fasadskikt}$ enligt avsnitt 10.1 som

$$15 \cdot 10^3 \leq Z_{v,fasadskikt} \leq 75 \cdot 10^3 \text{ s/m}$$



Figur 10-3 Uttorkning av gipsskiva med fasadskikt av puts på isolering.

Precis som för den ventilerade fasaden har beräkningarna baserats på klimatdata enligt Tabell 8-1 (oktober-februari) eller klimatdata enligt bilaga 16 (april-augusti). I tillämpliga delar har även förutsättningar enligt Tabell 8-2 använts. Uttorkningstider som funktion av fasadskiktets ånggenomgångsmotstånd visas i Figur 10-4. Det framgår att intervallet för uttorkningstid är mycket stort, från 15 till över 200 dygn. Den högre siffran skall betraktas mot bakgrund av att tidsperioden oktober till februari endast omfattar cirka 150 dygn och att förhållandena före och efter är gynnsammare för uttorkning.



Figur 10-4 Puts på isolering. Beräknad uttorkningstid av gipsskiva som är blöt över hela ytan.

Inga ansatser har gjorts för att beräkna uttorkningstider för en lokalt blöt vindskyddsskiva i den enstegstätade väggen. Det är troligt att uttorkningstiden under sådana omständigheter blir reducerad, speciellt när isoleringen har en hög ånggenomsläpplighet (mineralull) så att fukt via isoleringen kan diffundera i fasadytans plan.

10.3 Kommentarer och slutsatser

I Tabell 10-4 presenteras uttorkningstider för en blöt vindskyddsskiva av gips i en ventilerad putsfasad. Till grund för uttorkningsberäkningarna ligger studier av luftomsättningar och konvektiv fukttransport vilka redovisats i kapitel 8 respektive kapitel 9. Specifik utformning av studerade spalter framgår av Bilaga 4 (experimentväggarna) och kapitel 8 (fiktiva varianter av experimentväggarna).

Det är motiverat att inledningsvis uppmärksamma de förutsättningar som antagits vid spaltöppningarna. I alla fall utom ett (*Böj 12 mm och luftningsprofil*) har spaltens nominella bredd (5, 10, 25 eller 40 mm) förutsatts gälla även vid spaltens öppningar. I praktiken är det troligt att underkant spalt förses med en luftningsprofil (eller annat liknande skydd) och att öppningsmåttet vid överkant spalt ställs så att risken för inträngning av nederbörd hålls låg. Förutsatt STO luftningsprofil i underkant och ett utförande i överkant som typ 4 enligt Figur 4-2 har i avsnitt 5.1 visats att betydelsen av inskränkningar i area vid spaltöppningarna har liten betydelse för luftströmningen i spalten när läkten utgörs av horisontella stålprofiler. För spalter med vertikala läkt kan enligt avsnitt 5.2 inverkan däremot vara stor, speciellt om spaltens höjd endast är ett par meter. Mot bakgrund av denna utläggning kan bedömas att de beräknade uttorkningstiderna för fack 1, framför allt gällande spaltbredd 40 och 25 mm, vid ett praktiskt utförande blir något längre än vad som framgår av Tabell 10-4. Undantaget är fallet *Böj 12 mm med luftningsprofil* som vid jämförelse med utförande *Enligt kapitel 6* också ger en indikation på hur detaljerna vid öppningarna påverkar uttorkningstiden.

Vid jämförelse av uttorkningstider för fack 1 med fack 3 och fack 4 kan fastslås att läkning med horisontella stålprofiler ger en förlängd uttorkningstid. Mest tydligt är det för de två spaltutförandena *Ljus kulör* och *Orientering mot norr* där uttorkningstiderna blir cirka 60% respektive cirka 80% längre än för motsvarande spalt utan horisontella, perforerade ställäkt. Det finns alltså en tendens att skillnader i uttorkningstid mellan vertikal och horisontell läkning ökar när fasadytans absorptionsförmåga för solstrålning, eller instrålning, minskar. Med hänvisning till resonemang ovan bör den praktiska skillnaden vara något mindre än vad som framgår av Tabell 10-4.

Enligt avsnitt 9.2.1 blir fuktutbytet under uttorkningsfas 1 cirka 30 gånger större i en 40 mm bred spalt jämfört med fallet att spalten är 5 mm bred. Förutsättningen var då uttorkning från både fasadskiktets och från väggkärnans yta. Utifrån värdena i Tabell 9-3, tillsammans med tillhörande anvisningar, kan fuktutbytesförhållandet för spaltbredd 40 och 5 mm vid ensidig uttorkning från väggkärnan uppskattas till följande:

$$\text{under uttorkningsfas 1,} \quad \frac{(0.7 \cdot ((450 + 635) / 2)) / 1.5}{(10 + 15) / 2} \approx 20$$

$$\text{under uttorkningsfas 2 med } d/\delta_v = 1500, \quad \frac{0.55 \cdot ((150 + 190) / 2)}{(10 + 15) / 2} \approx 7$$

Avsnitt 10.2.1 ger slutligen ett resultat som visar att förhållandet mellan uttorkningstid för de båda spaltbredderna är en faktor cirka 8-10 om fasadskiktets ånggenomgångsmotstånd är i intervallet $20\text{-}50\cdot 10^3$ s/m. Om 40 mm spalten byts ut mot en spalt med bredd 25 mm ändras förhållandet till en faktor cirka 7-8.

Förutsatt att stora ytor är blöta har beräkningarna visat att den ur uttorkningsperspektiv effektivaste spaltgeometrin är den 40 mm breda spalten utan reduktion i tvärsnittsarea vid in- och utlopp. Nästan samma effektivitet i uttorkning uppnås med 25 mm spaltbredd. Med detaljlösningar vid spaltöppningarna som är vanliga i praktiken utjämnas de skillnader som finns mellan dessa två spalter än mer. Spalter med horisontella ställäkt har en klart förlängd uttorkningstid jämfört med spalter med vertikala läkt, speciellt om fasadytan har en ljus kulör eller om infallande solstrålning är liten. Spalt med liten bredd (5 mm) ger i sammanhanget mycket långa uttorkningstider, särskilt om fasadskiktet har stort ånggenomgångsmotstånd.

Uttorkningstid för en blöt fläck med begränsad utbredning är kort och inom en vecka för alla studerade spaltutföranden och klimatförutsättningar.

Uttorkningstid för vindskyddsskivan blir längre eller mycket längre med ett fasadskikt av puts på isolering jämfört med det ventilerade alternativet. Ett villkor för detta förhållande är dock att spaltbredden inte understiger cirka 10 mm. Om uttorkningstid för spaltbredd 25 mm sätts till 1 framgår av Tabell 10-6 att beräknad uttorkningstid för puts på isolering i bästa fall är kring 4 gånger så lång och i sämsta fall hela 75 gånger längre.

Tabell 10-6 Relativa uttorkningstider för ventilerad spalt och puts på isolering.

Kulör/Riktning/Klimat	Ventilerad spalt b = 25 mm	Putts på mineralull $Z_{v,fasadskikt} = 15\cdot 10^3$ s/m	Putts på cellplast $Z_{v,fasadskikt} = 75\cdot 10^3$ s/m
Mörk kulör Norrorientering Oktober-februari	1	4	20
Vit kulör Söderorientering Oktober-februari	1	4	20
Mörk kulör Söderorientering Oktober-februari	1	6	30
Mörk kulör Söder April-augusti	1	15	75

11 Resultat och slutsatser

Det har visats att luftomsättning och konvektiv fukttransport i spalter påverkas av ett mycket stort antal faktorer. Huvudslutsatserna från arbetet är att:

- konvektiv fukttransport och uttorkningsförlopp i spalter gynnas av en stor spaltbredd 25-40 mm och vertikala läkt som inte tillför strömningsmotstånd
- med horisontella, perforerade ställäkt reduceras den konvektiva fukttransporten jämfört med vertikala läkt, speciellt när spaltöppningarna inte begränsar strömningsarean
- spalter med bredd < 10 mm har en starkt begränsad konvektiv fukttransportförmåga och uttorkningstider kan bli mycket långa
- årstid, fasadkulör, fasadorientering, spalthöjd och detaljutformning vid spaltöppningarna är alla faktorer som har betydelse för storleken på möjlig konvektiv fukttransport

Strömningsmodell för spalter

Etablerad strömningsmekanik kan användas för att bestämma samband mellan flöde och drivkraft för en spalt med specifik utformning. Förlustfaktorer för spaltdetaljer bör bestämmas experimentellt när geometri eller andra förutsättningar avviker från det som finns beskrivet i litteraturen.

Drivkrafter för luftströmning

I experimentväggarnas spalter var under perioden oktober-februari verkande drivkraft mindre än 0.2-0.3 Pa ungefär halva tiden. Cirka 30% av tiden var verkande drivkraft mindre än 0.1 Pa. Drivkrafter över 2 Pa uppträdde sällan.

Luftströmning i spalter orsakad av termik har annan karaktär än luftströmning orsakad av vind. När endast termisk drivkraft verkar uppstår en stadig strömning med konstant riktning. Vid enbart vind uppstår ständiga variationer i både lufthastighet och i strömningsriktning. Resultaten indikerar att det i praktiken inte går att förutsätta att vind från en viss riktning skall ge en konstant uppåt- eller nedåtriktad strömning. Därmed är den luftomsättning som skapas av vind mycket svår att prediktera. För att beräkna luftomsättning när enbart vind verkar var relevanta värden på formfaktorsskillnad mellan spaltöppningarna i intervallet 0.025-0.05 [-] oberoende av vindens riktning.

Under timmar med solstrålning och svag till måttlig vind var luftomsättningen med god precision möjlig att bestämma med beräkningar som enbart baserades på termisk drivkraft. Detta var speciellt tydligt för spalterna med horisontella ställäkt. En slutsats är att drivkraft från vind har mindre betydelse än termisk drivkraft för luftomsättningen i en söderorienterad spalt. Detta förhållande förstärks när fasaden har en mörk kulör och när strömningsmotståndet i spalten är stort.

Luftomsättning över lång tid

Den genomsnittliga luftomsättningen i experimentväggarnas spalter under perioden oktober till februari kunde uppskattas till:

- 230-310 oms/h vid utförande med vertikala läkt
- 75-100 oms/h vid utförande med horisontella läkt Lindab
- 95-130 oms/h vid utförande med horisontella läkt Europrofil

Luftomsättningen varierade kraftigt över dygnet med maximal luftomsättning minst en faktor 2-3 gånger större än den genomsnittliga. Maximal observerad luftomsättning inträffade dagtid i samband med solstrålning.

Med generella klimatdata och en enkel drivkraftsmodell, med enbart drivkraft från termik under ljusa timmar och enbart från vind under mörka timmar, beräknades luftomsättningen i experimentväggarnas spalter. Beräkningsresultat visade god överensstämmelse med resultat från mätningar, avvikelse mindre än 20% . För det generella fallet kan luftomsättningar i spalter inte uppskattas med denna enkla drivkraftsmodell utan betydande osäkerhet.

Fuktutbyte och konvektiv fukttransport

Med blöta materialytor mot spalten skiljer beräknat fuktutbyte [$\text{g/m}^2 \cdot \text{dygn}$] inom vida gränser. Liten spaltbredd, norrorientering, ljus fasadkulör och horisontella läkt påverkar fuktutbytet negativt. I denna uttorkningsfas gäller att fuktutbytet:

- är cirka 30 gånger större vid 40 mm spaltbredd jämfört med 5 mm (söderorientering)
- reduceras till en cirka en fjärdedel vid norrorientering istället för söderorientering
- reduceras till en cirka en tredjedel om färgen är ljus istället för mörk (söderorientering)
- reduceras till mindre än hälften med horisontella läkt istället för vertikala

För alla studerade spaltutformningar och klimatförutsättningar utnyttjas hela den konvektiva fukttransportförmågan när båda ytorna mot spalten är blöta. Också när endast en yta mot spalten är blöt är utnyttjandegraden generellt hög. Ett vår- och sommarklimat är mycket gynnsamt för storleken på fuktutbytet jämfört med ett höst- vinterklimat.

När uttorkning mot spalten måste ske via diffusion genom ett ”torrt” skikt närmast spalten dämpas fuktutbytet kraftigt och skillnaderna mellan olika spaltutformningar tenderar att jämnas ut. För stora värden på det ”torra” skiktets ånggenomgångsmotstånd är den enskilt gynnsammaste faktorn för fuktutbytet ett vår- och sommarklimat.

Uttorkningstider

Uttorkningsberäkningar för fallet med en vindskyddsskiva av gips som är blöt över stora ytor visar att uttorkningstiden:

- vid utförande med vertikala läkt är ungefär densamma vid spaltbredd 25 mm som vid spaltbredd 40 mm
- förlängs 8-10 gånger om spaltbredden är 5 mm istället för 40 mm
- vid utförande med horisontella ställäkt kan bli förlängd med upp till 60-80% jämfört med vertikala läkt

Uttorkningstid med ett fasadskikt av puts på isolering blir längre eller mycket längre (en faktor 4 till 75) jämfört med en 25 mm bred spalt och vertikala läkt. Smala spaltbredder mindre än 10 mm kan medföra uttorkningstider som är jämförbara med puts på isolering.

Uttorkningstid för en blöt fläck med liten utbredning är kort för alla studerade spaltutföranden och klimatförutsättningar.

12 Fortsatt arbete

I och med detta arbete betraktas den byggnadsfysikaliska delen av forskningsprojektet som avslutad. Fortsatt arbete kommer som omnämnts i kapitel 1 att behandla den ventilerade putsfasadens mekaniska beteende.

13 Litteraturlista

Nedan redovisas insamlad litteratur som behandlar ventilation och konvektiv fukttransport i ytterväggsspalter men vars innehåll inte refererats i detta arbete.

Bassett, M. and McNeil, S. (2009), Overton, G., *Ventilation and evaporation rates in wall cavities in New Zealand*, Proceedings of the 12th Canadian Conference on Building Science and Technology, Montreal, Quebec.

Davidovic, D., Srebric, J. and Burnett, E. (2006), *Modeling convective drying of ventilated chambers in building enclosures*, International Journal of Thermal Sciences 45:180-189.

Finch, G. and Straube, J. (2007), *Ventilated wall claddings: review, field performance, and hygrothermal modeling*, Proceedings of the Whole Buildings X International Conference, Clearwater Beach, Florida.

Morrison Hershfield Limited (1999), *Stucco-clad wall drying experiment*, Report for Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa.

Nore, K. (2009), *Hygrothermal performance of ventilated wooden cladding*, PhD-thesis at NTNU 2009:31, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim.

Plescia, S. (2001), *The envelope drying rates analysis study*, Technical Series 01-139, Canadian Mortgage and Housing Corporation, Ottawa.

Rousseau, J. (1999), *Drying of walls with ventilated stucco cladding, parametric analysis*, Technical Series 99-117, Canadian Mortgage and Housing Corporation, Ottawa.

Salonvarra, M., Karagiozis, A. N., Pazera M. and Miller, W. (2007), *Air cavities behind claddings – what have we learned?*, Proceedings of the Whole Buildings X International Conference, Clearwater Beach, Florida.

TenWolde, A., Carll, C. and Malinauskas, V. (1995), *Airflows and moisture conditions in walls of manufactured homes*, Airflow Performance of Building Envelopes, Components and Systems, ASTM STP 1255 Mark P. Modera and Andrew K. Persily, (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 137-155.

Xing, S. and Burnett, E. (2007), *Ventilation drying in enclosure walls with vinyl cladding*, Proceedings of the Whole Buildings X International Conference, Clearwater Beach, Florida.

Van Straaten, R. (2003), *Measurement of ventilation and drying of vinyl siding and brick clad wall assemblies*, Master-thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario.

14 Referenser

- Andersen, K.T. (2000), *Ventilerede hulrum i vægkonstruktioner. En teoretisk analyse*, By og Byg Dokumentation 001, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm.
- ASHRAE (2001), *ASHRAE Handbook-Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Brown, G. (1956), *Värmeövergång vid byggnaders yttertor*, Handlingar nr 27, Statens nämnd för Byggnadsforskning, Norrköping.
- Burnett, E., Straube, J. and Karagiozis, A. (2004), *Synthesis Report and guidelines*, ASHRE 1091 Report # 12, The Pennsylvania Housing Research/Resource Center, The Pennsylvania State University.
- Claesson, J., Nevander, L.E. och Sandin, K. (1984), *Kompendium i byggnadsfysik – Värme*, Institutionen för Byggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund, Lund.
- Eriksson, D. och Norberg, C. (2006), *Kompendium i grundläggande strömningslära*, Institutionen för Energivetenskap, Lunds Tekniska Högskola, Lund.
- Gudum, C. (2003), *Moisture transport and convection in building envelopes – Ventilation in light weight outer walls*, PhD- thesis R-047, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Hagentoft, C. E. (2001), *Introduction to building physics*, Studentlitteratur, Lund.
- Hedenblad, G. (1996), *Materialdata för fukttransportberäkningar*, T19:1996, Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Hörup Sørensen, H. (red) (2004), *Ventilation ståbi (2.udgave)*, Nyt Tekniskt Forlag Köpenhamn.
- Kays, W.M. and Crawford, M.E. (1980), *Convective heat and mass transfer*, McGraw-Hill, New York.
- Kronwall, J. (1980), *Air flows in building components*, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, Report TVBH-1002, Lund.
- Nevander L.E. och Elmarsson, B. (1994), *Fukthandbok – Praktik och teori*, Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Persson, J. och Rudolfsson, J. (2009), *Luftrörelser i spalt – Experimentell verifiering av teoretisk modell*, LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg, Lunds Tekniska Högskola, Lund.
- Pinon, J., Davidovic, D., Burnett, E. and Srebric, J. (2004), *Characterization of ventilation airflow in screen-type wall systems*”, Volume 1, ASHRE 1091 Report # 5, The Pennsylvania Housing Research/Resource Center, The Pennsylvania State University.

Sandin, K. (1988), *Kompendium i byggnadsfysik (rev 1990) Värme – luftströmning – fukt*, Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

Sandin, K. (1991), *Skalmurskonstruktionens fukt- och temperaturbetingelser*, Rapport R43:1991, Byggeforskningsrådet, Stockholm.

Sandin, K. (1997), *Fuktsäkerhet i byggnader - Introduktion till fuktmekaniken*, T16:1997, Byggeforskningsrådet, Stockholm.

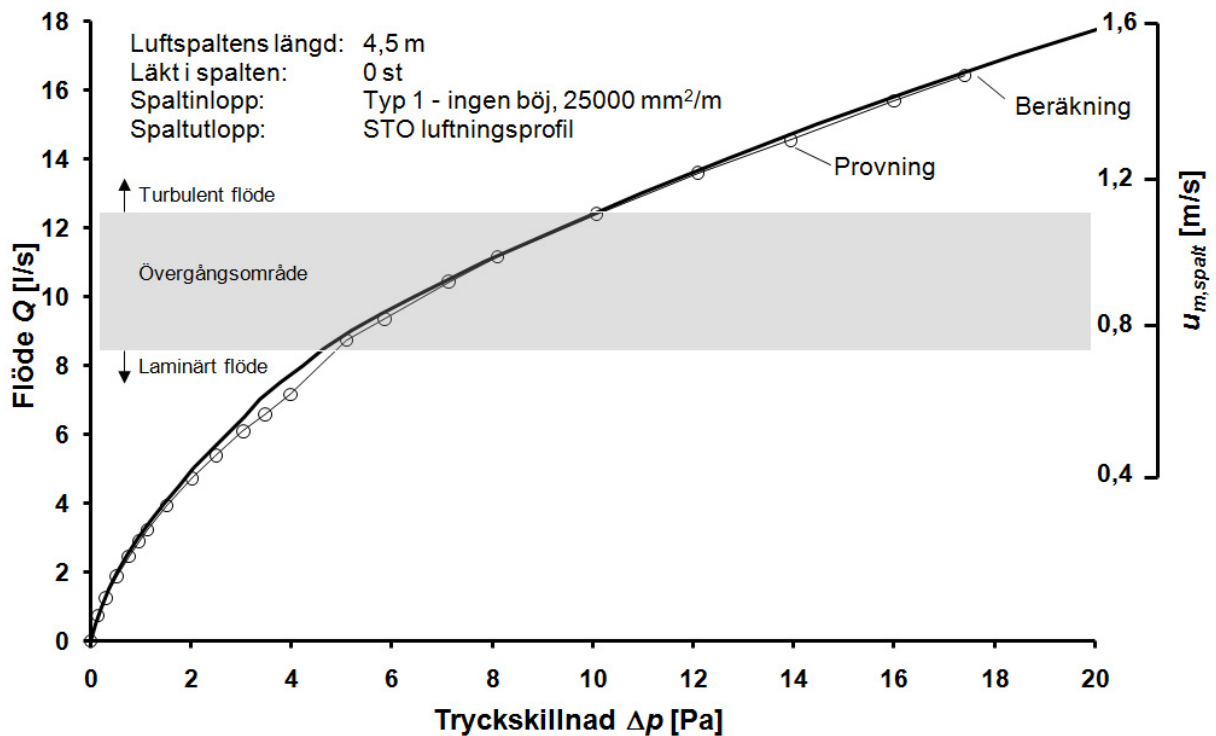
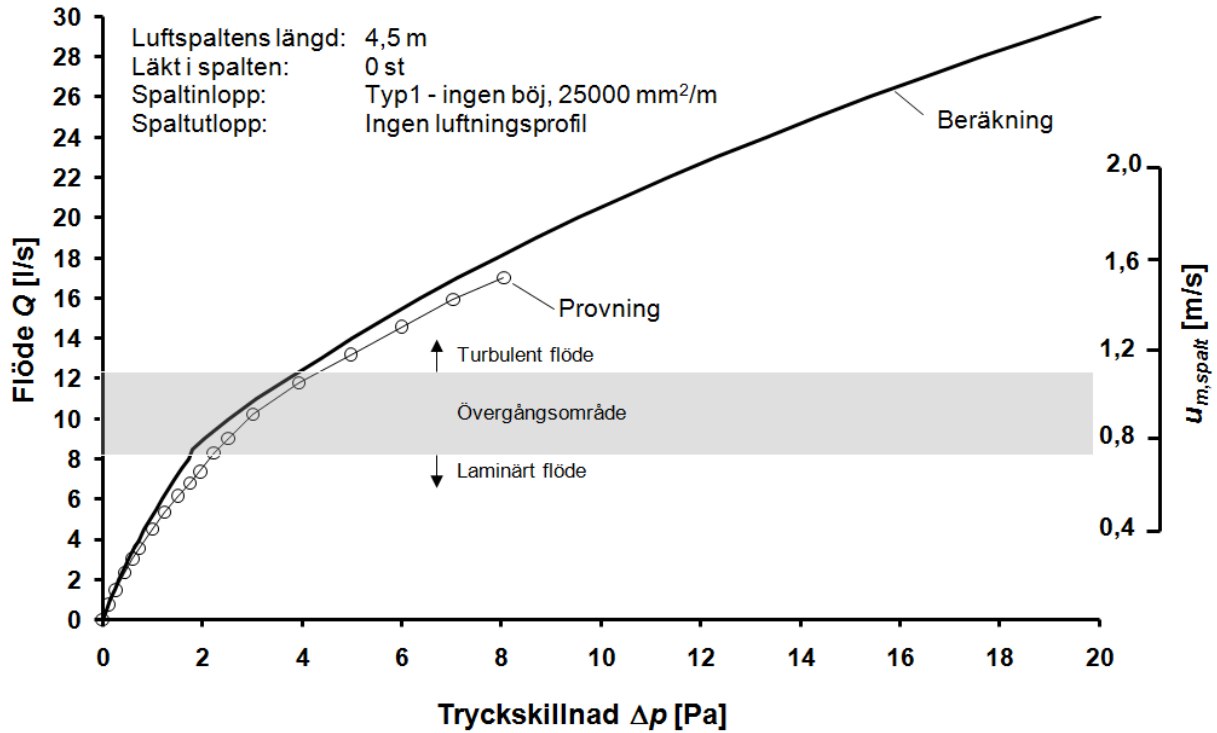
Samuelson, I. och Jansson, A. (2009), *Putsade regelväggar*, SP rapport 2009:16, SP Energiteknik, Borås.

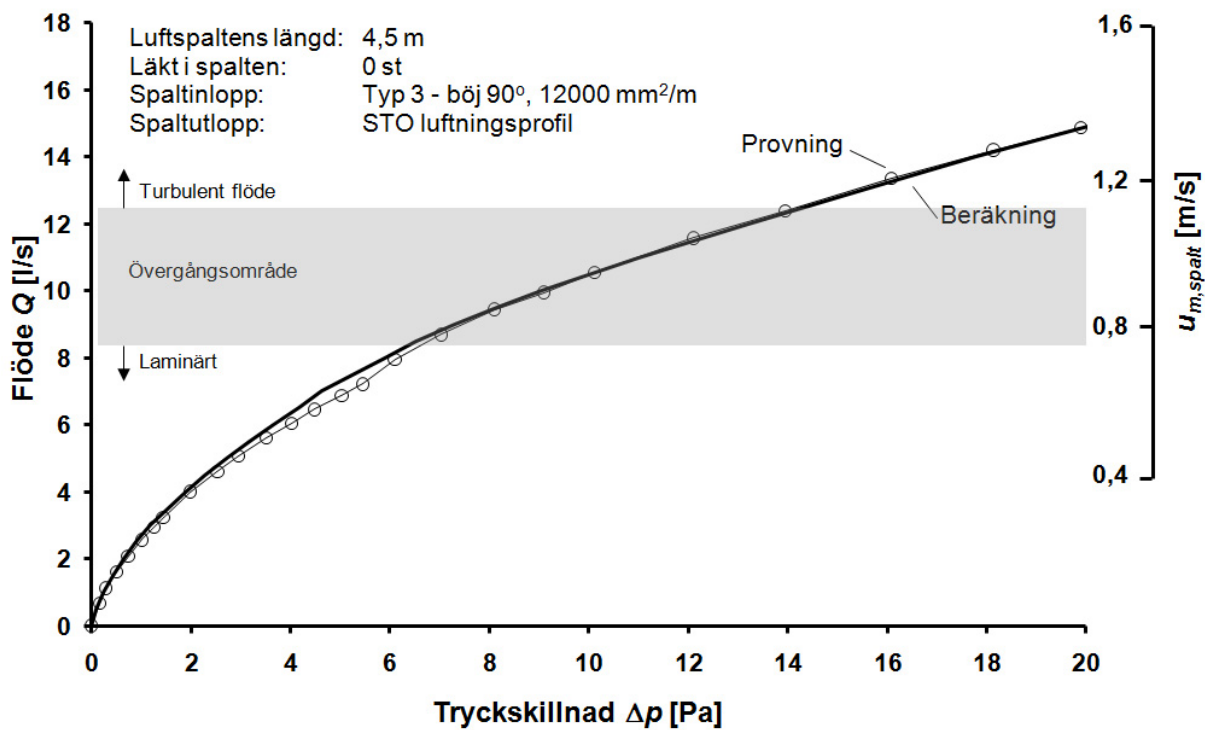
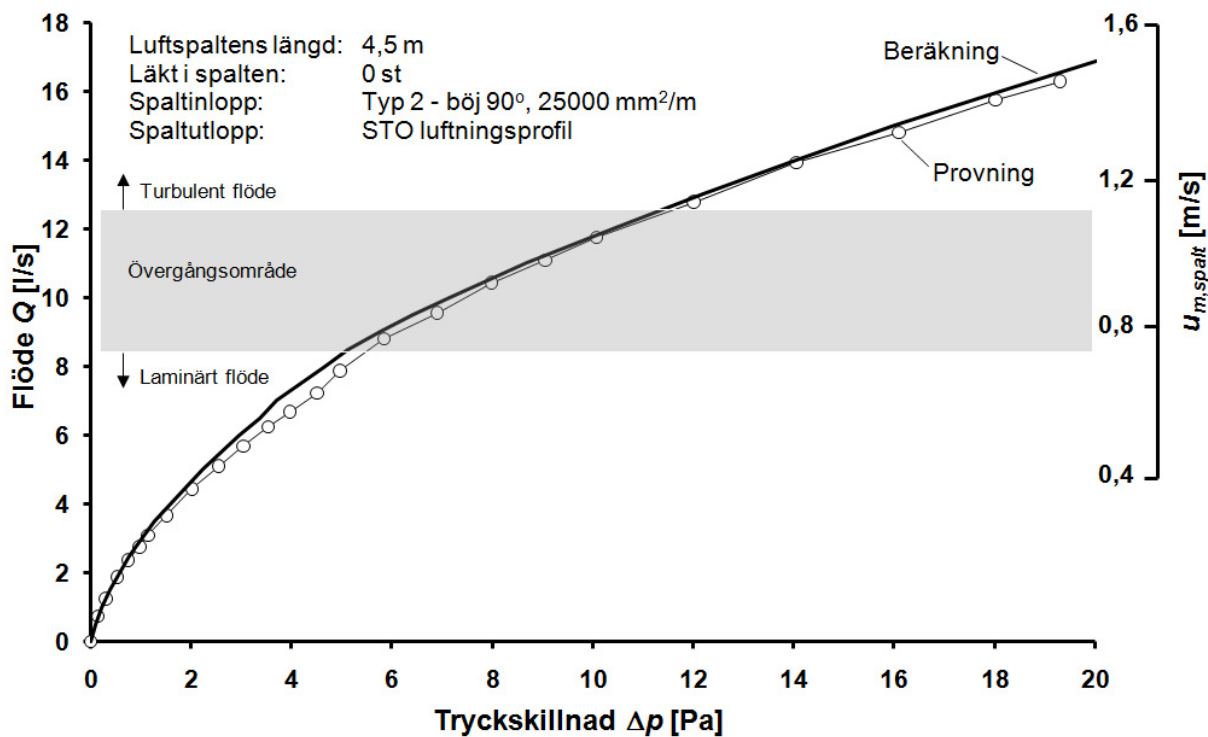
Straube, J., VanStraaten, E., Burnett, E. and Schumacher, C. (2004), *Review of literature and theory*, ASHRE 1091 Report # 1, Building Engineering Group University of Waterloo.

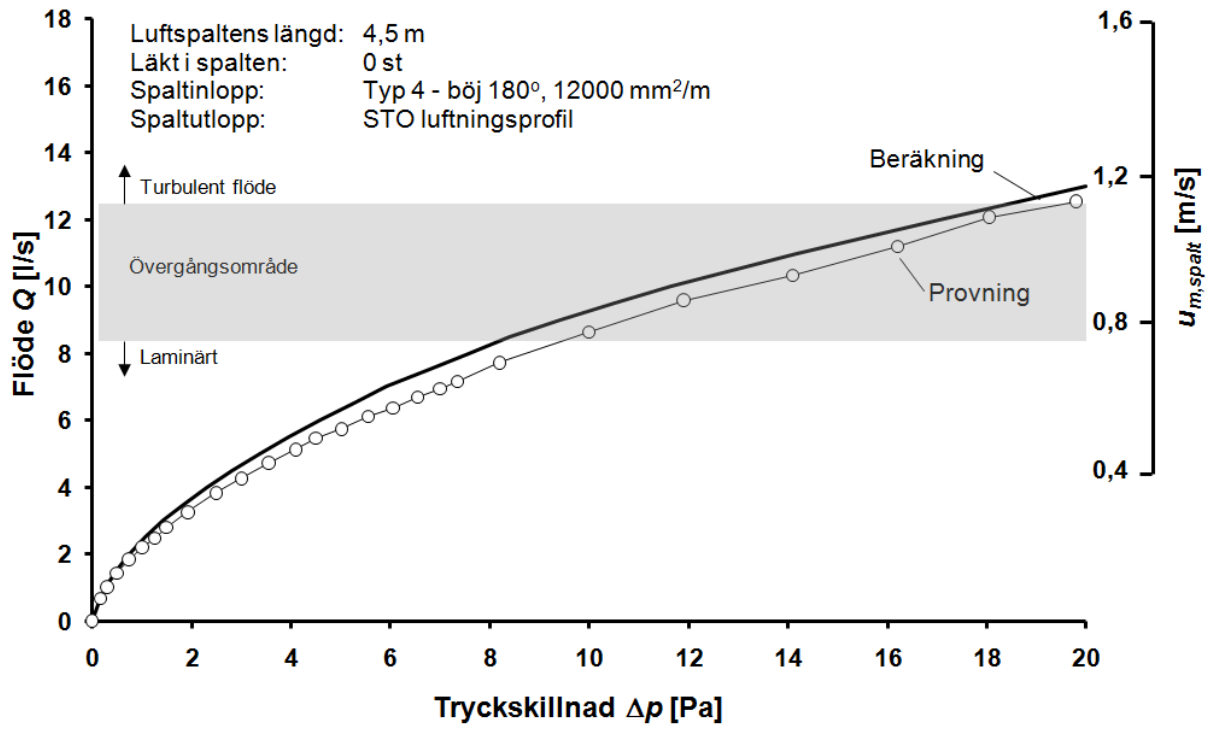
Taesler, R. (1972), *Klimatdata för Sverige*, Statens råd för Byggnadsforskning, Stockholm.

BILAGA 1 – Kurvor tryck/flöde för spalt utan horisontella läkt

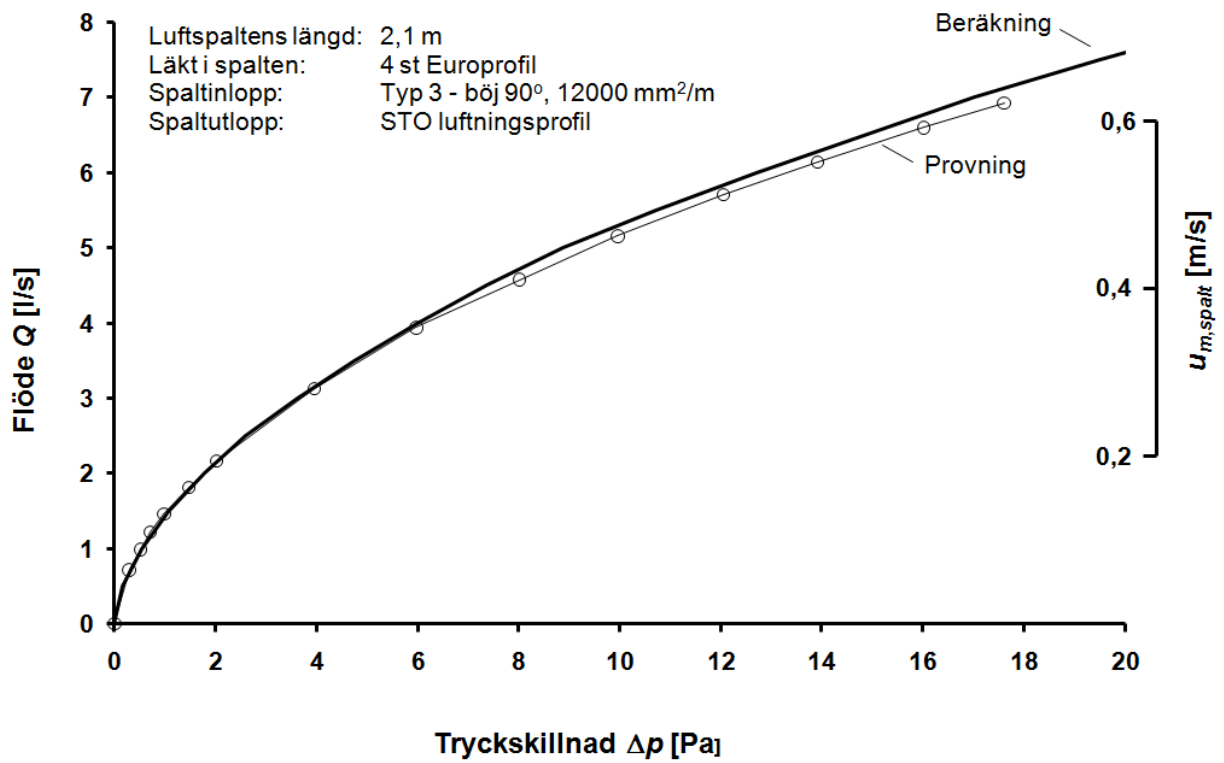
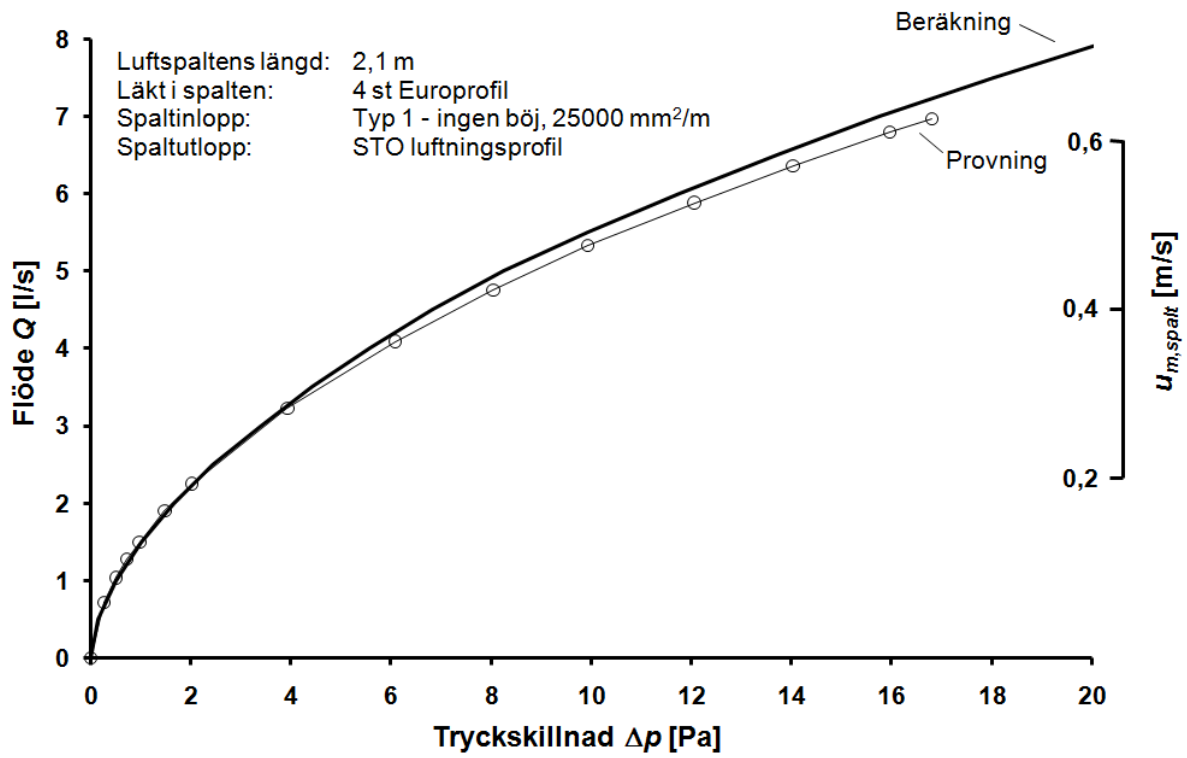
Diagrammen i bilaga 1- bilaga 3 visar samband mellan tryck och luftflöde som bestämts experimentellt för spalter med varierande utformning. Av diagrammen framgår också resultat från beräkningar utförda med ekvation (2.35) och korrigerade, approximativa förlustfaktorer för aktuella engångsmotstånd enligt kapitel 4.

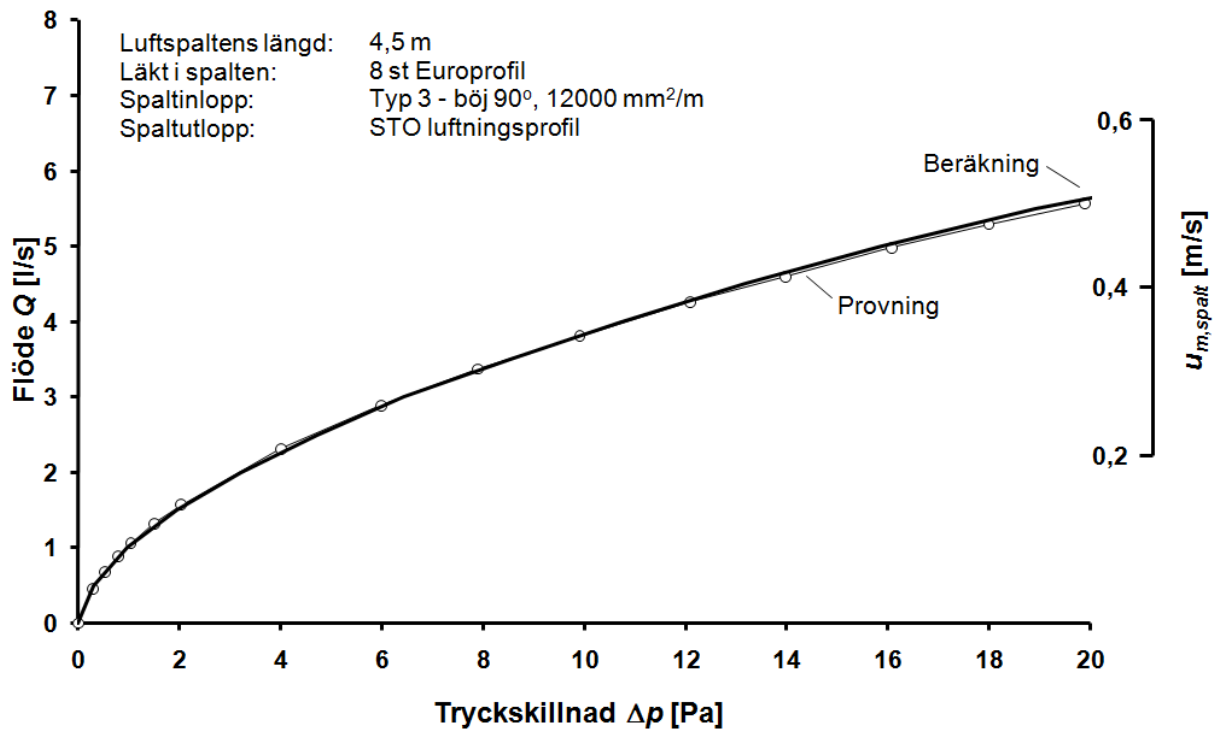




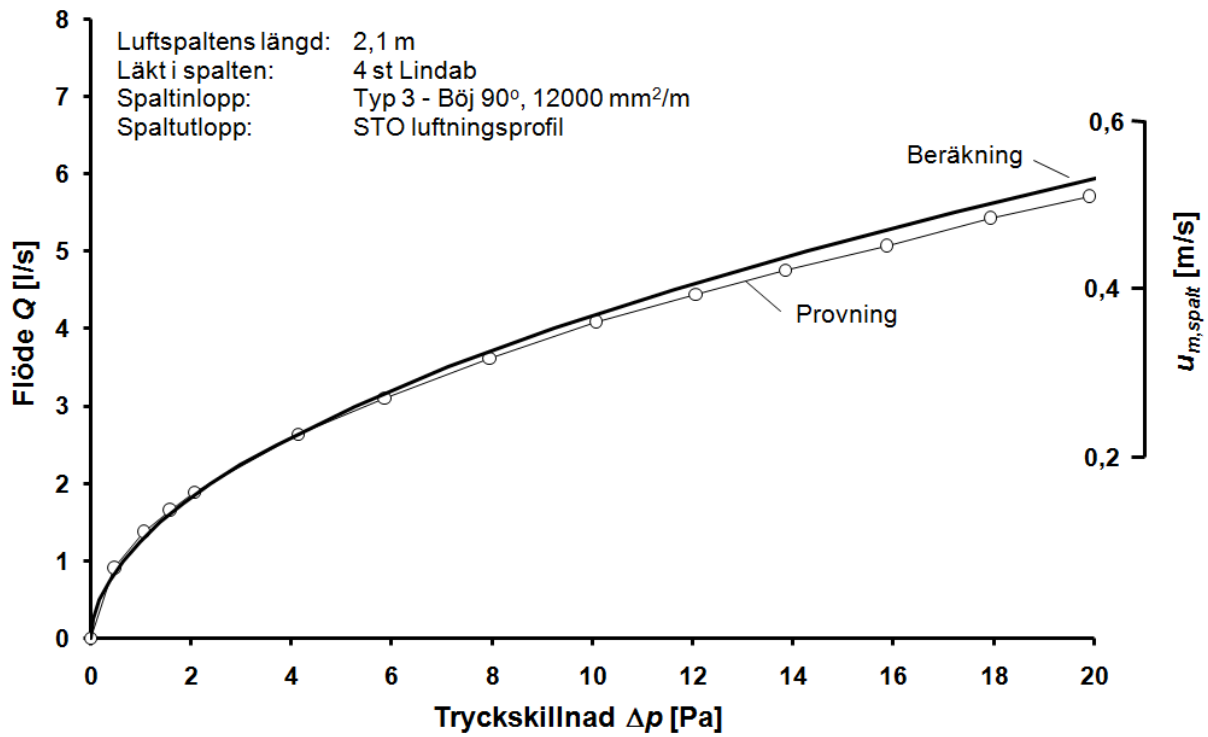
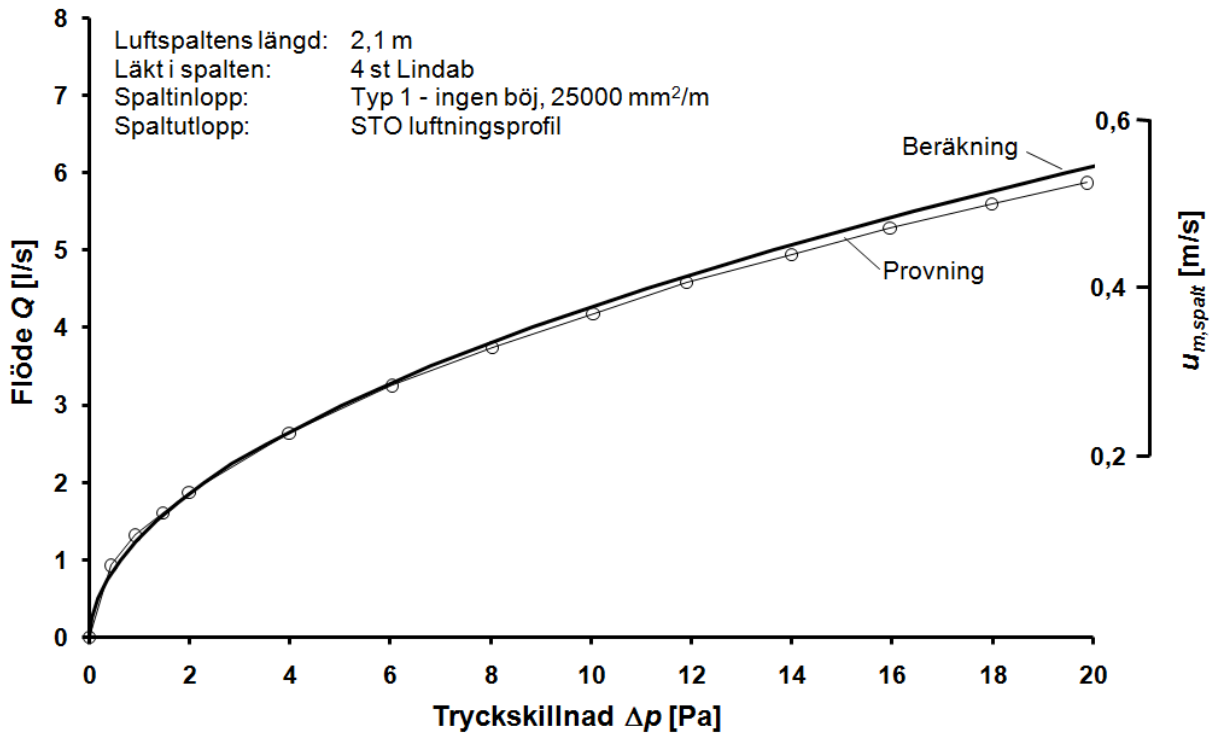


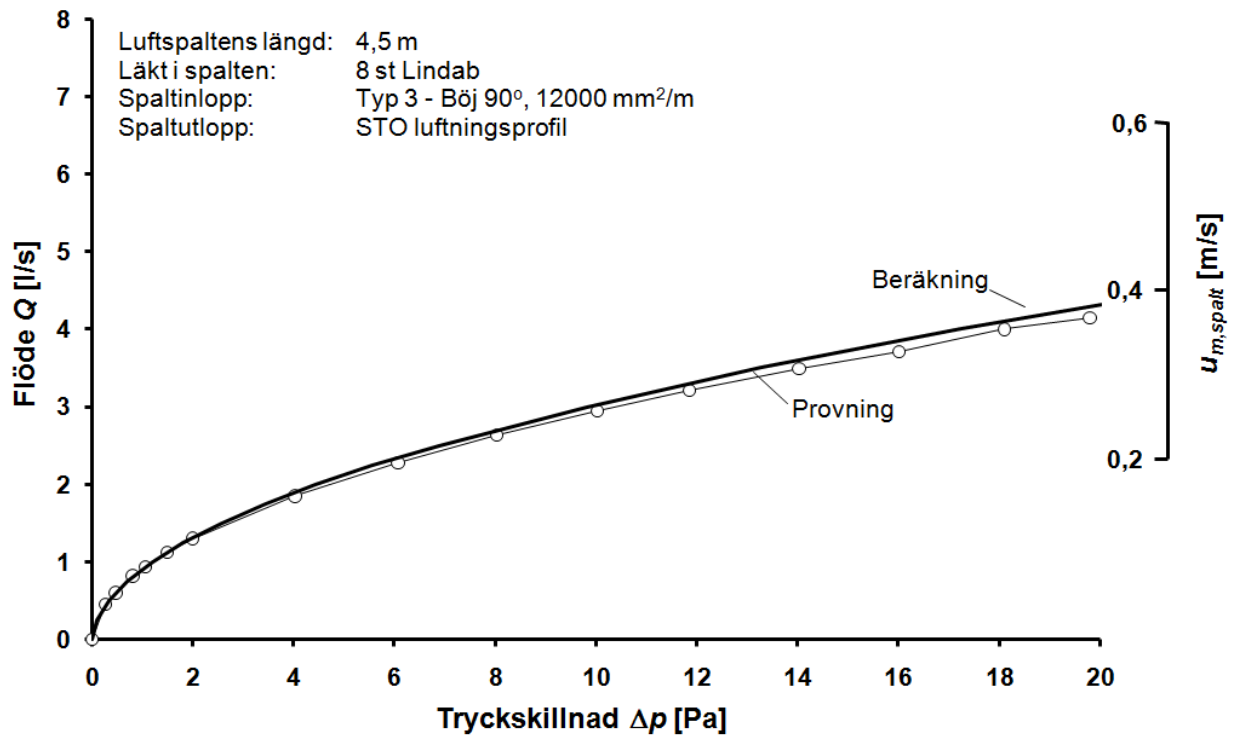
BILAGA 2 – Kurvor tryck/flöde för spalt med läkt Europrofil





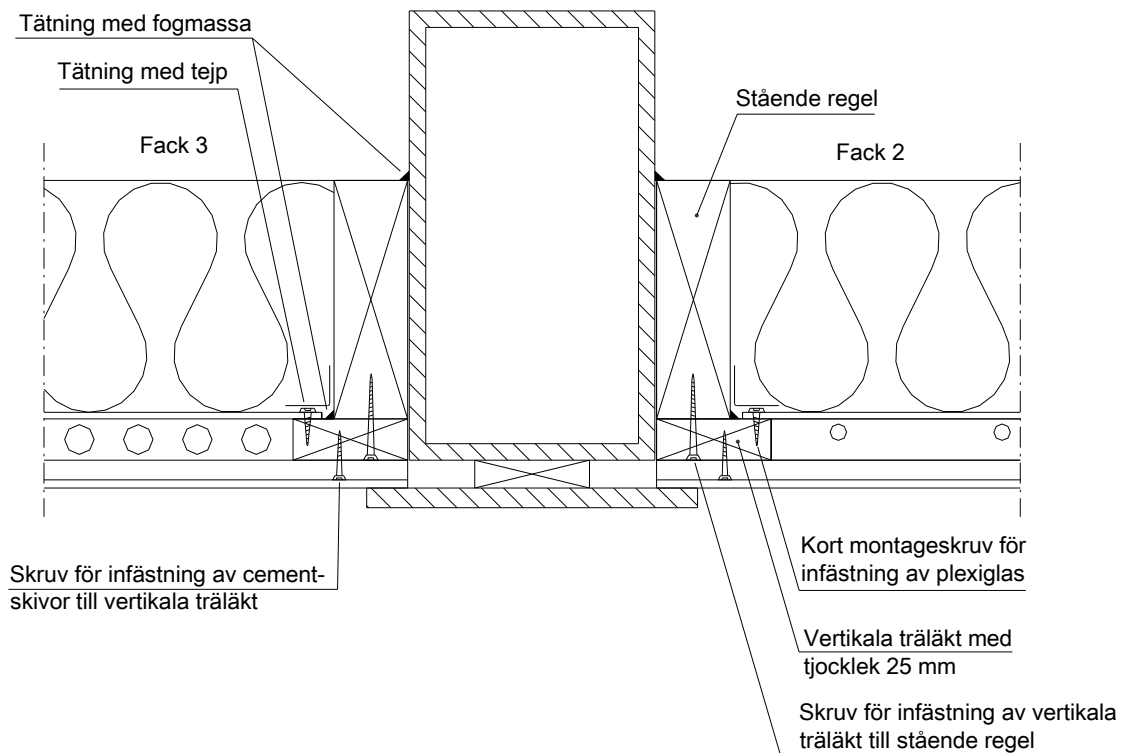
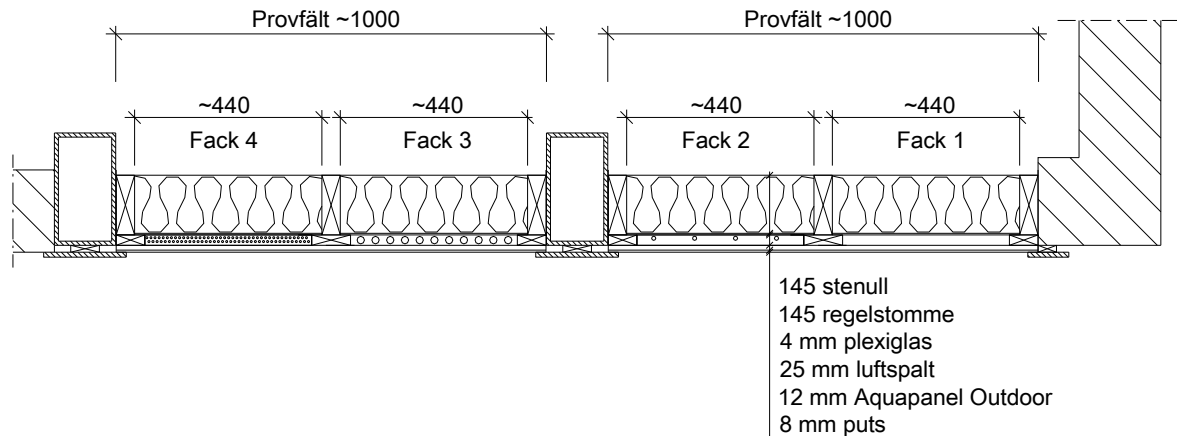
BILAGA 3 – Kurvor tryck/flöde för spalt med läkt Lindab



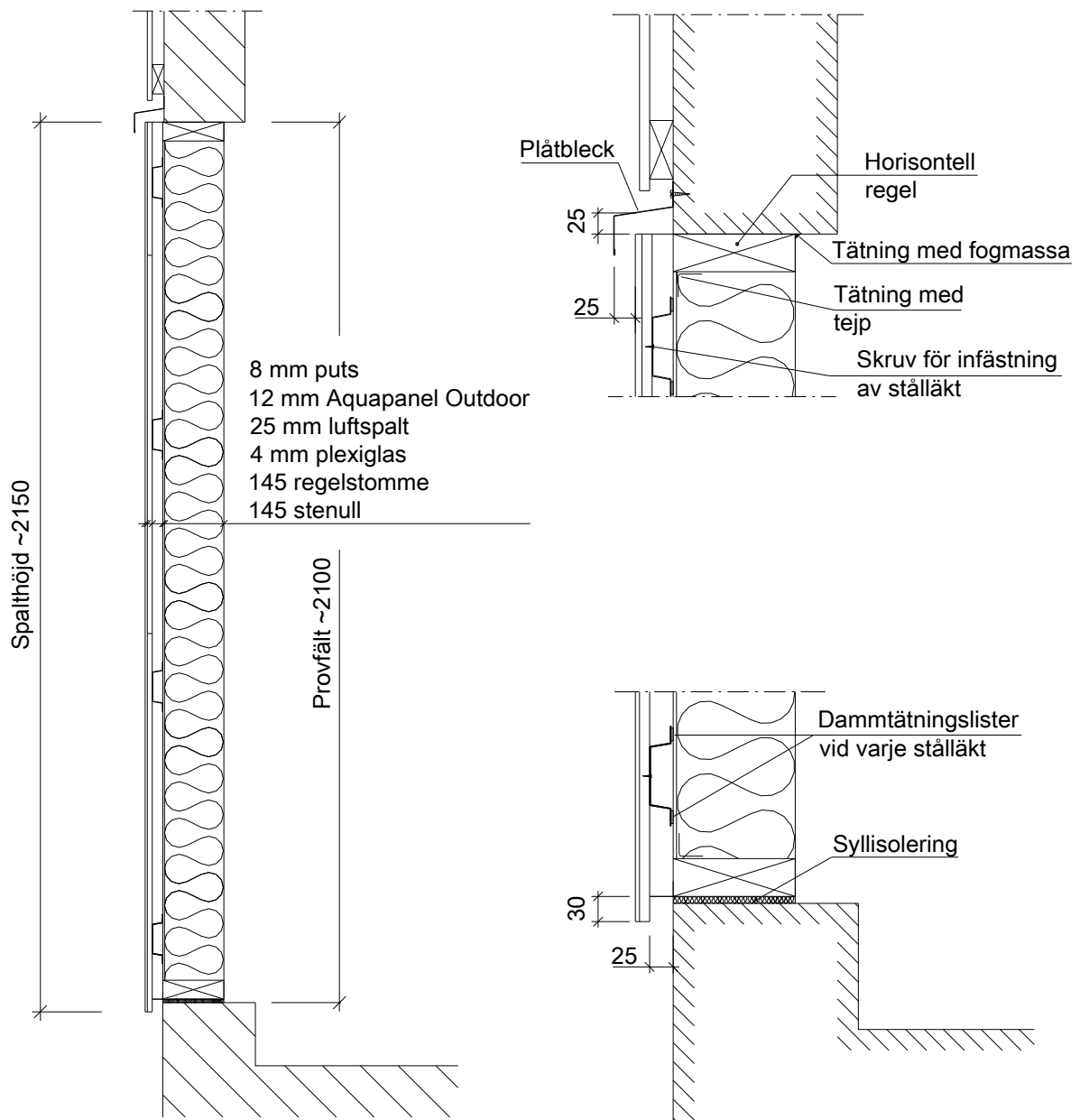


BILAGA 4 – Ritningar på experimentväggar

Horisontalsektion och detalj



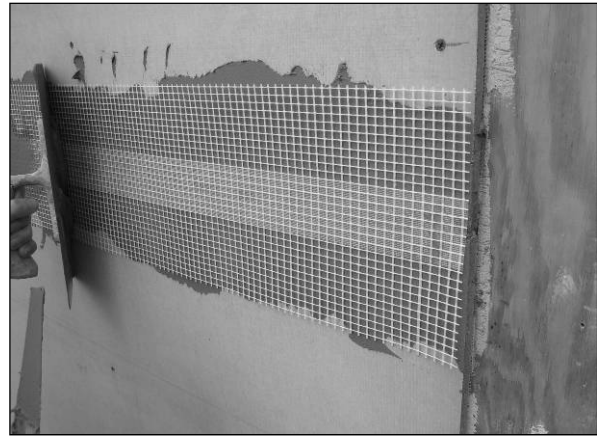
Vertikalsektion och detaljer i överkant och underkant



BILAGA 5 – Maxit putssystem Serposol EF på Aquapanel Outdoor



2008-04-17: Skivor *Aquapanel Outdoor* har monterats mot bakomliggande 25 mm tjocka träläkt. Skarv mellan skivorna cirka 3-5 mm spacklas ut med *SERPO 610 Multi Flex*.



2008-04-17: En 200 mm bred nätarmering av glasfiber *SERPO 411* arbetas in i det våta bruket över skivskarvarna.



2008-04-17: Det första skiktet puts *SERPO 261 EF-bruk* appliceras i tjocklek cirka 5-7 mm.



2008-04-17: Ett heltäckande glasfibernät *SERPO 397 EF-nät* arbetas in i det våta bruket.



2008-04-22: Andra skiktet puts *SERPO 261 EF-bruk* appliceras i tjocklek cirka 1-2 mm.



2008-05-30: Målning med *Maxit Silikatfärg A* i kulör NCS S 6030-Y80R.

BILAGA 6 - Observationer med rök i fack 1, vertikala läkt

Tid	$T_{spalt} - T_{ute}$ [°C] Δp_{termik} [Pa]	$u_{m,spalt}$ [m/s] $u_{max,spalt}$ [m/s]	Yttre förutsättningar	Observation
30/6-08 ca 16.20	ca +9 0.73 Pa	0.37 m/s 0.58 m/s	Växlande sol Nordlig till sydvästlig vind 2-5 m/s	Huvudsakligen rör sig luften uppåt med lufthastighet mellan 0.38-0.80 m/s. Tillfälligtvis ingen bestämd rörelseriktning utan luften rör sig växlande upp och ner.
3/7-08 ca 06.30	ca -2		Sol Väggyta i skugga Ostlig till nordostlig vind 2-4 m/s	Uppåtgående luftrörelse med varierande hastighet. Ibland stannar luften till och rör sig nedåt för att sedan vända uppåt igen.
3/7-08 ca 08.30	± 0		Sol Väggyta i skugga Nordostlig till sydostlig vind 3-6 m/s	Huvudsakligen uppåtgående luftrörelse ca 0.3-0.6 m/s. Ibland rör sig luften neråt. Röken blir inte stående i spalten. Försvinner ut däruppe och ibland där nere.
3/7-08 ca 11.00	ca +8 0.69 Pa	0.36 m/s 0.56 m/s	Sol Ostlig vind 4-7 m/s	Konstant uppåtgående luftrörelse som varierar mellan 0.5 m/s till > 1 m/s.
4/7-08 ca 08.30	± 0		Sol Väggyta i skugga Nordlig till nordostlig vind 1-3 m/s	Ingen tydlig riktning på luftrörelsen. Ibland uppåt och ibland neråt. Vissa stunder tvekar luften åt vilket håll den skall gå. Hastigheter upp till 0.3 m/s
4/7-08 ca 11.00	ca +7 0.58 Pa	0.32 m/s 0.50 m/s	Sol Nordostlig vind 1-2 m/s	Konstant uppåtgående rörelse 0.6-0.9 m/s. Korta stunder lägre hastighet, ca 0.4 m/s.
19/9-08 ca 15.15	ca +3 0.27 Pa	0.19 m/s 0.31 m/s	Nordlig till nordvästlig vind 1-2 m/s	Konstant uppåtgående rörelse 0.35-0.6 m/s.
19/1-09 ca 18.00	ca +3 0.23 Pa	0.17 m/s 0.28 m/s	Nordlig till nordvästlig vind 1-2 m/s	Konstant uppåtgående rörelse 0.3-0.4 m/s.
19/1-09 ca 23.00	± 0		Nordlig vind 1 m/s Nära vindstilla	Verklig rörelseriktning svår att bestämma. Temperatur i spalt stiger när isolering demonteras och efter några minuter uppstår en tydlig uppåtgående rörelse.

BILAGA 7 - Observationer med rök i fack 3, läkt Lindab

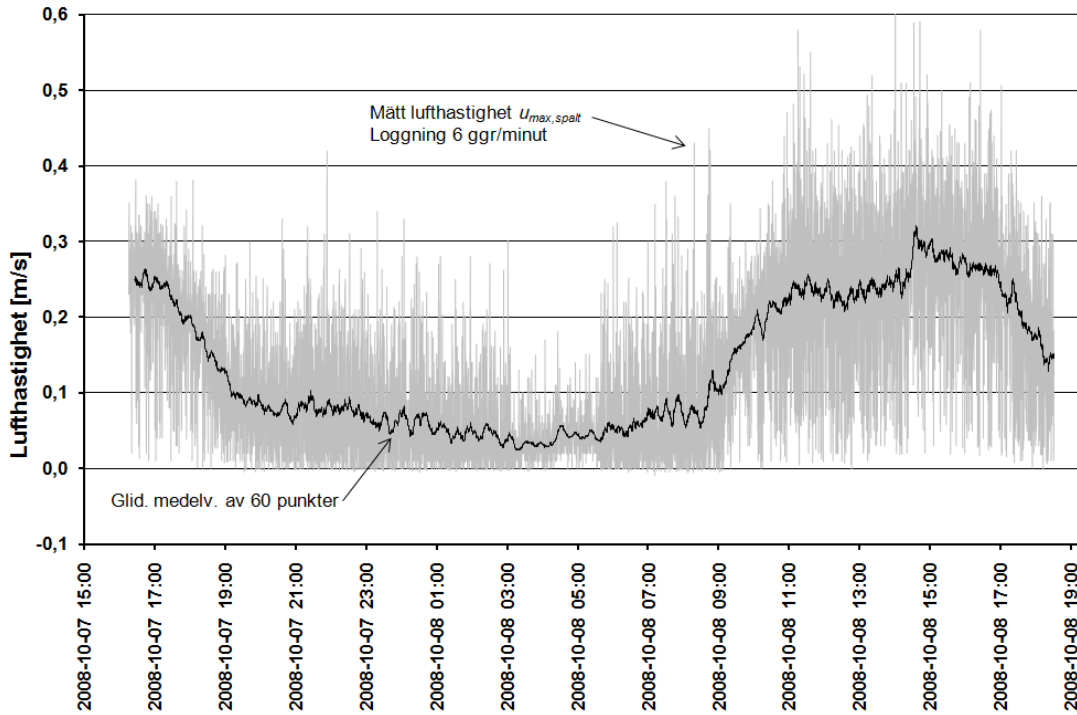
Tid	$T_{spalt} - T_{ute}$ [°C] Δp_{termik} [Pa]	$u_{m,spalt}$ [m/s] $u_{max,spalt}$ [m/s]	Yttre förutsättningar	Observation
30/6-08 ca 14.15	ca +18 1.48 Pa	0.15 m/s 0.20 m/s	Sol Västlig till nordvästlig vind 2-6 m/s	Konstant uppåtgående rörelse ca 0.17-0.24 m/s
2/7-08 ca 14.15	ca +21 1.63 Pa	0.16 m/s 0.22 m/s	Sol Sydlig till sydvästlig vind 2-4 m/s	Uppåtgående rörelse 0.18- 0.40 m/s. Enstaka tillfälle med tendens till instabilitet där luften rör sig neråt en bit, stannar och sedan vänder uppåt igen.
3/7-08 ca 07.15	± 0		Ostlig till sydostlig vind 2-4 m/s	Ingen tydlig rörelseriktning. Luften vaggas upp och ner i spalten några decimeter åt gången.
3/7-08 ca 09.00	± 0		Ostlig vind 2-4 m/s	Ingen tydlig rörelseriktning. Luften vaggas upp och ner i spalten några decimeter åt gången.
19/9-08 ca 15.00	ca +4 0.40 Pa	0.07 m/s 0.10 m/s	Nordlig till nordvästlig vind 1-2 m/s	Konstant uppåtgående rörelse ca 0.1 m/s.
19/1-09 ca 17.30	ca +5 0.43 Pa	0.08 m/s 0.11 m/s	Nordlig till nordvästlig vind 1-2 m/s	Konstant uppåtgående rörelse ca 0.1 m/s.
19/1-09 ca 23.00	± 0		Nordlig vind 1 m/s Nära vindstilla	Mycket svag luftrörelse. Svårt att bedöma med hjälp av rök. Luftrörelse max någon cm/s.

BILAGA 8 - Observationer med rök i fack4, läkt Europrofil

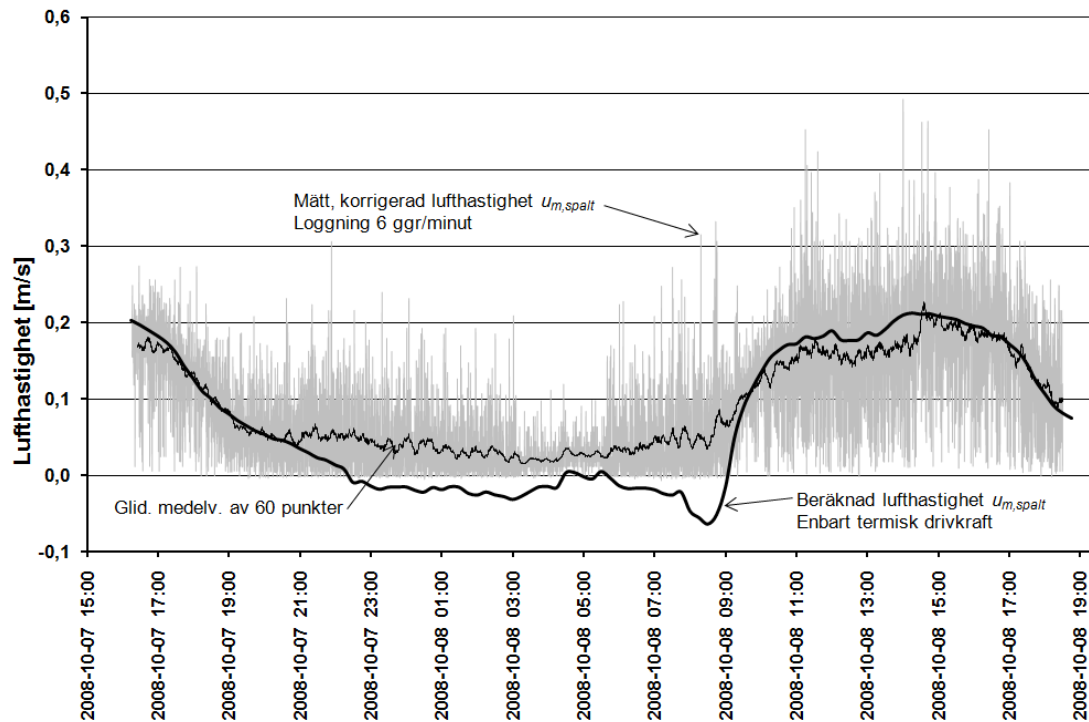
Tid	$T_{spalt} - T_{ute}$ [°C] Δp_{termik} [Pa]	$u_{m,spalt}$ [m/s] $u_{max,spalt}$ [m/s]	Yttre förutsättningar	Observation
30/6-08 ca 10.30	ca +9 0.73 Pa	0.12 m/s 0.18 m/s	Växlande sol Nordlig till sydvästlig vind 1-4 m/s	Konstant uppåtgående rörelse ca 0.14-0.20 m/s.
30/6-08 ca 14.00	ca +16 1.27 Pa	0.16 m/s 0.24 m/s	Sol Nordlig till västlig vind 3-4 m/s, någon by upp till 7 m/s	Konstant uppåtgående rörelse ca 0.20-0.33 m/s.
2/7-08 ca 14.00	ca +21 1.63 Pa	0.19 m/s 0.28 m/s	Sol Ostlig till sydlig vind 1- 4 m/s	Konstant uppåtgående rörelse ca 0.26-0.33 m/s.
3/7-08 ca 07.00	± 0		Ostlig vind 2-3 m/s	Röken hänger i luften. Ingen tydlig riktning på luftrörelsen. Rör sig lite åt det ena hållet och sedan åt det andra.
3/7-08 ca 08.45	± 0		Ostlig vind 2-3 m/s	Instabilt. Luftrörelse uppåt en bit sedan neråt en bit. Står och hoppar.
3/7-08 ca 11.15	ca +14 1.14 Pa	0.16 m/s 0.23 m/s	Ostlig till nordostlig vind 2-5 m/s	Huvudsakligen uppåtgående luftrörelse 0.15-0.30 m/s. Ibland kortvarig nedåtgående rörelse.
4/7-08 ca 09.15	ca +4 0.31 Pa	0.07 m/s 0.11 m/s	Ostlig vind 2-4 m/s	Luften strävar i huvudsak uppåt med hastighet 0.1- 0.15 m/s. Riktningen vänder under korta stunder.
4/7-08 ca 11.15	ca +16 1.30 Pa	0.17 m/s 0.25 m/s	Ostlig till nordostlig vind 2-4 m/s	Konstant uppåtgående luftrörelse 0.25-0.35 m/s.
19/9-08 ca 14.45	ca +4 0.39 Pa	0.08 m/s 0.13 m/s	Nordlig till nordvästlig vind 1-2 m/s	Konstant uppåtgående rörelse 0.07-0.09 m/s.
19/1-09 ca 17.15	ca +5 0.44 Pa	0.09 m/s 0.13 m/s	Nordlig till nordvästlig vind 1-2 m/s	Konstant uppåtgående rörelse 0.08-0.10 m/s.
19/1-09 ca 22.45	± 0		Nordlig vind 1 m/s Nära vindstill	Mycket liten luftrörelse som är svår att uppskatta. Max någon cm/s uppåtgående.

BILAGA 9 - Mätperiod 081007-081008 fack 4, läkt Europrofil

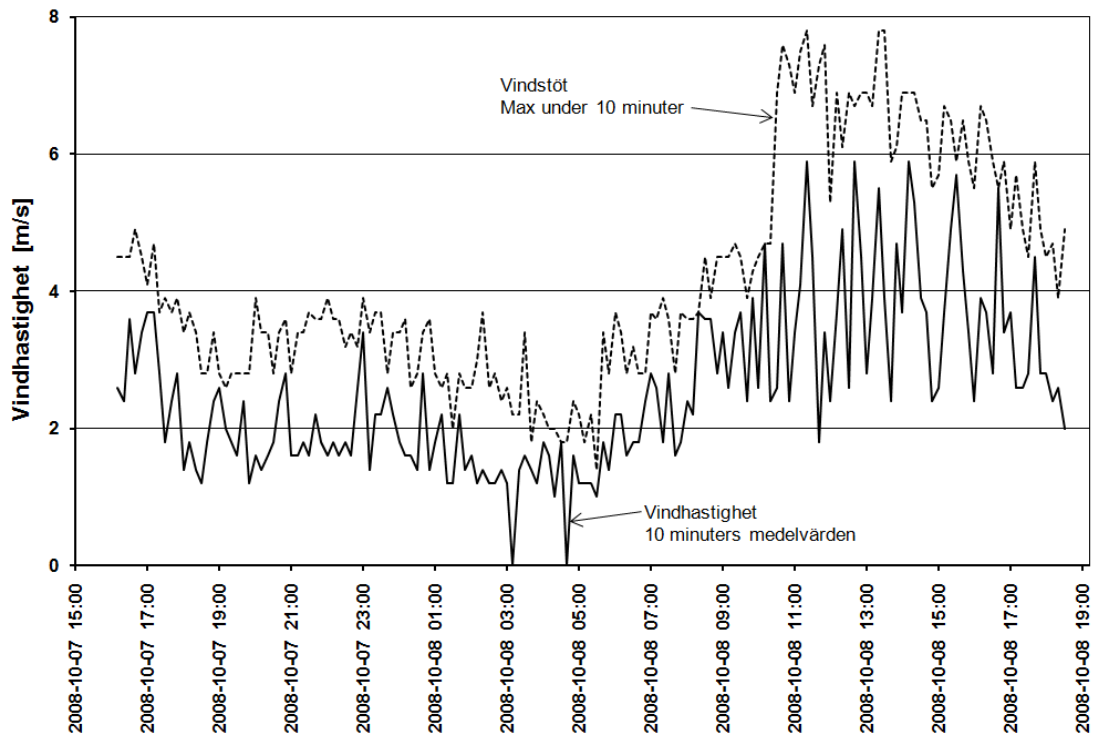
D1. Mätt lufthastighet – topphastighet $u_{max,spalt}$



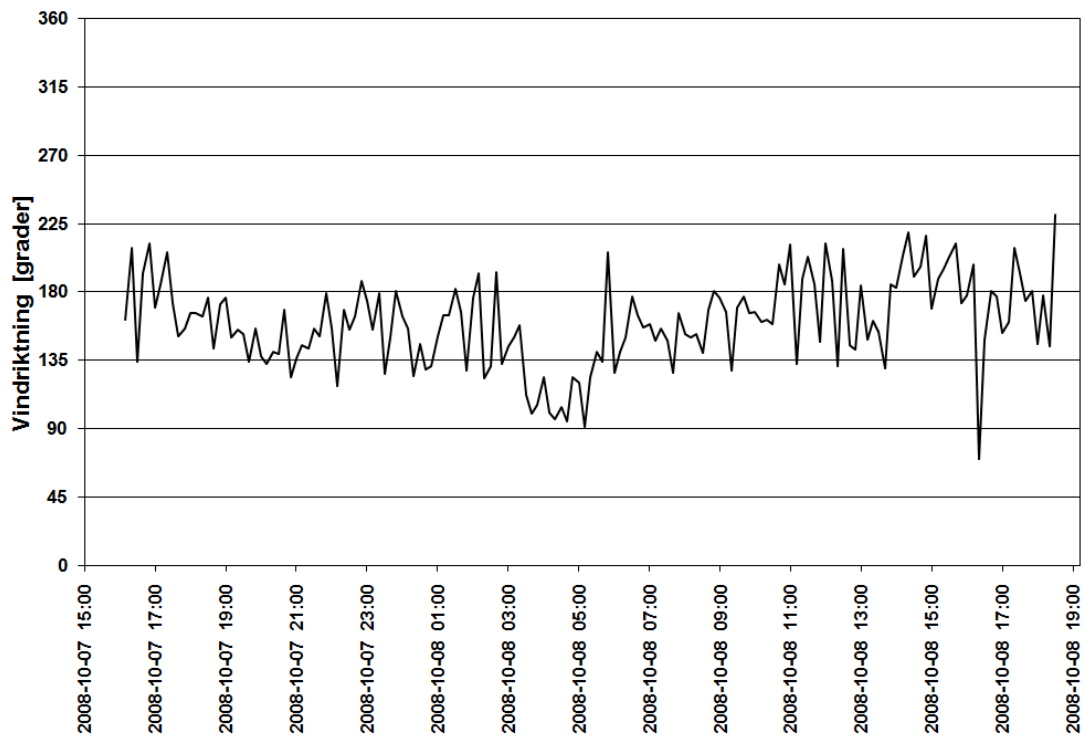
D2. Mätt, korrigerad lufthastighet $u_{m,spalt}$ Beräknad lufthastighet $u_{m,spalt}$ av termik



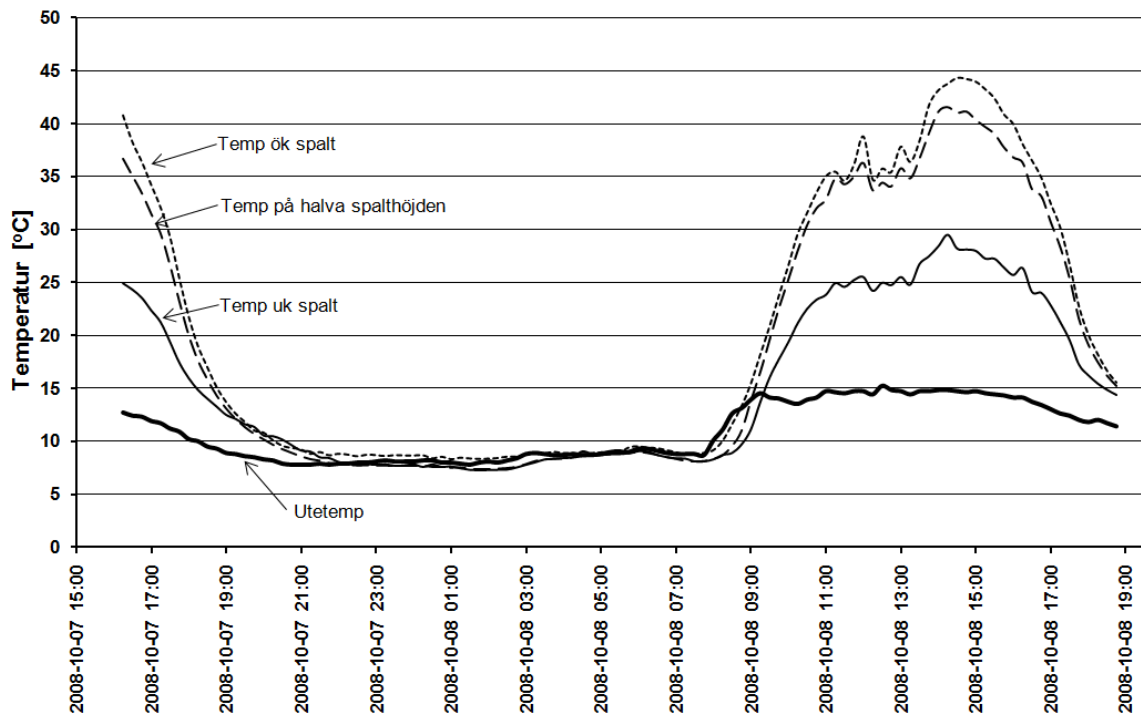
D3. Vindhastighet



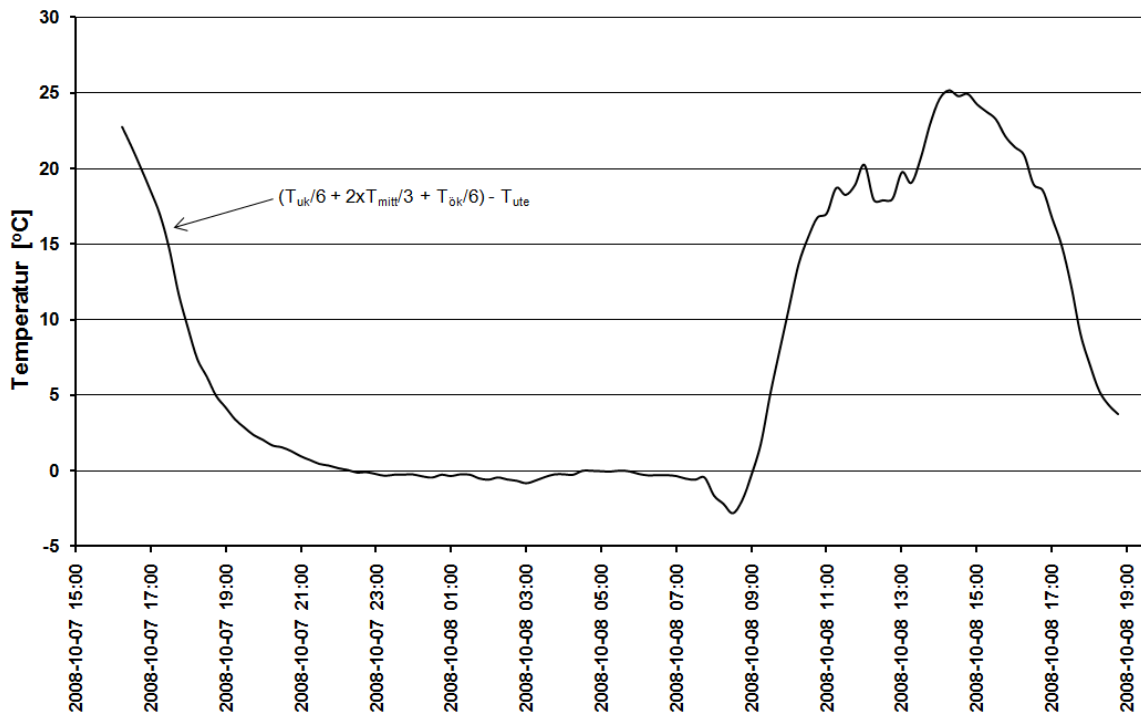
D4. Vindriktning



D5. Temperaturer i spalten och utomhus

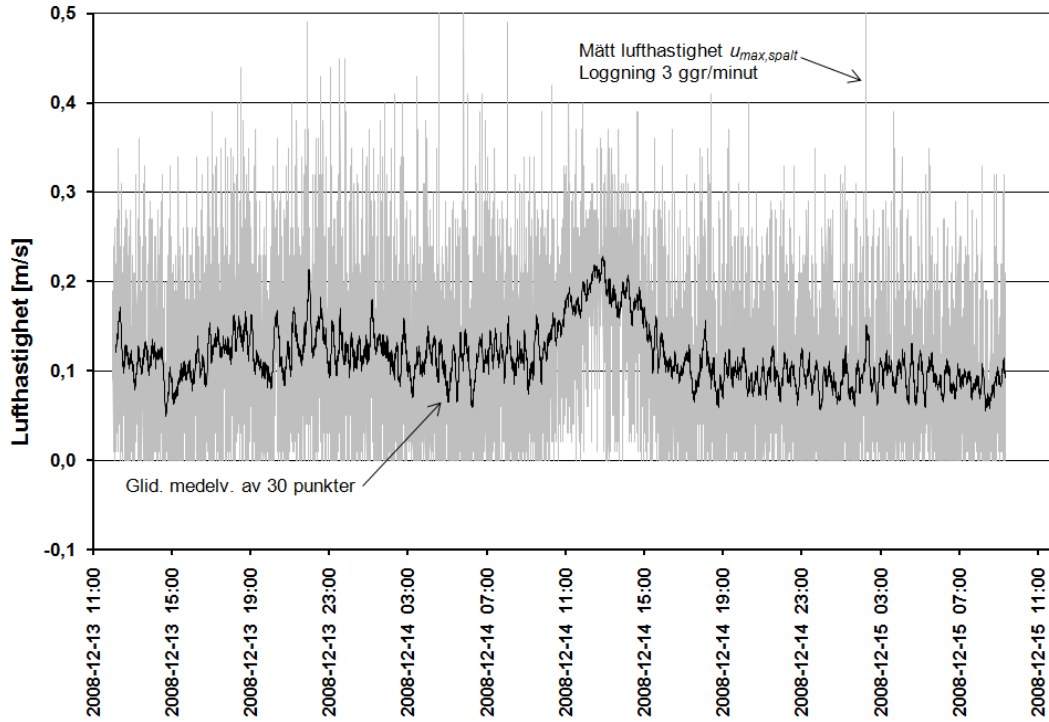


D6. Övertemperatur i spalten

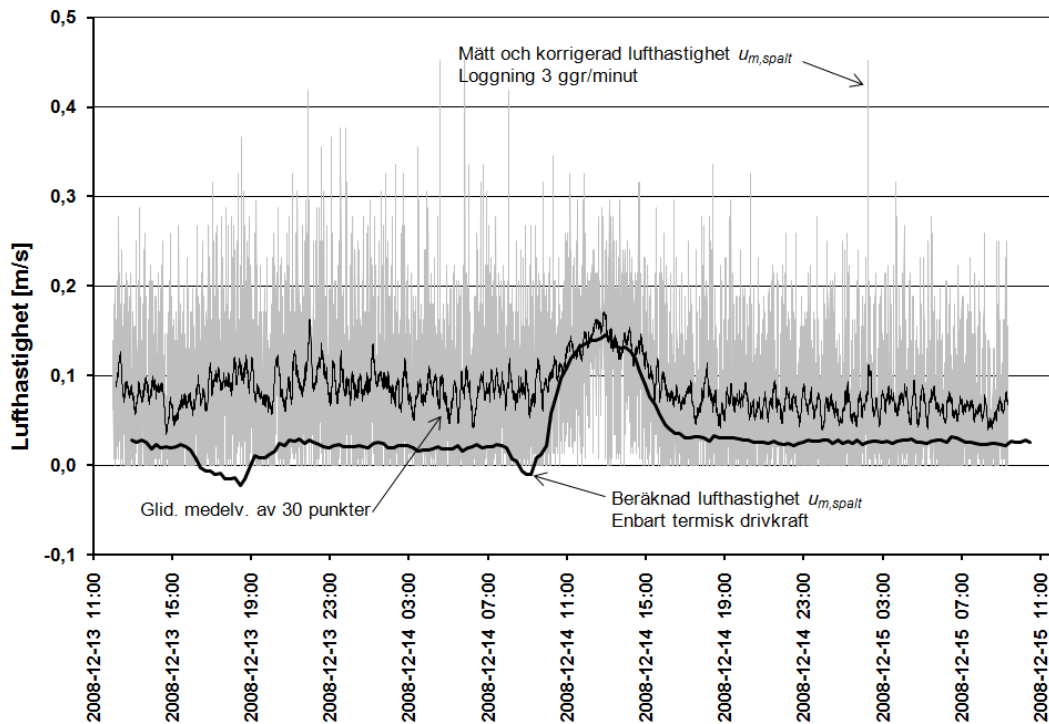


BILAGA 10 - Mätperiod 081213-081215 fack 3, läkt Lindab

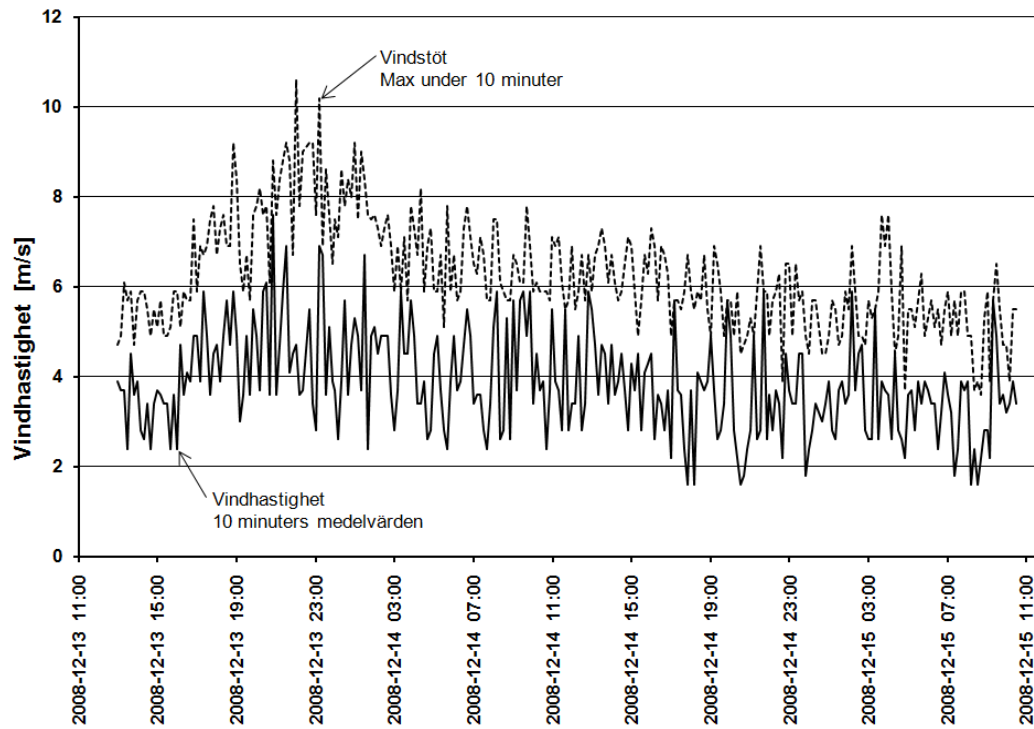
D1. Mätt lufthastighet – topphastighet $u_{max,spalt}$



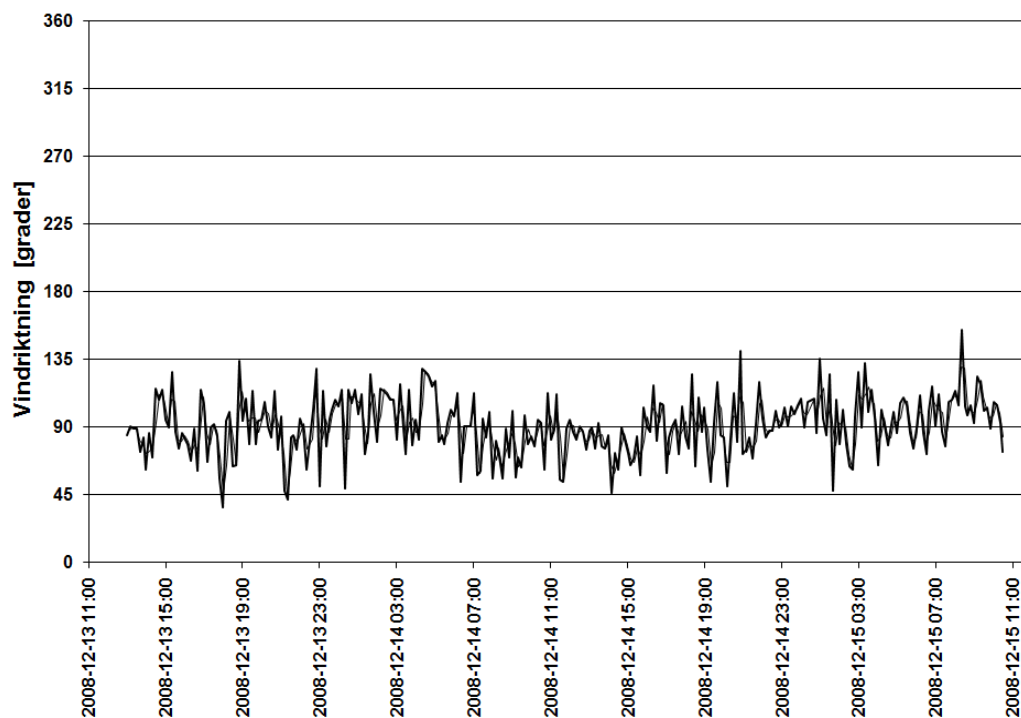
D2. Mätt, korrigerad lufthastighet $u_{m,spalt}$ Beräknad lufthastighet $u_{m,spalt}$ av termik



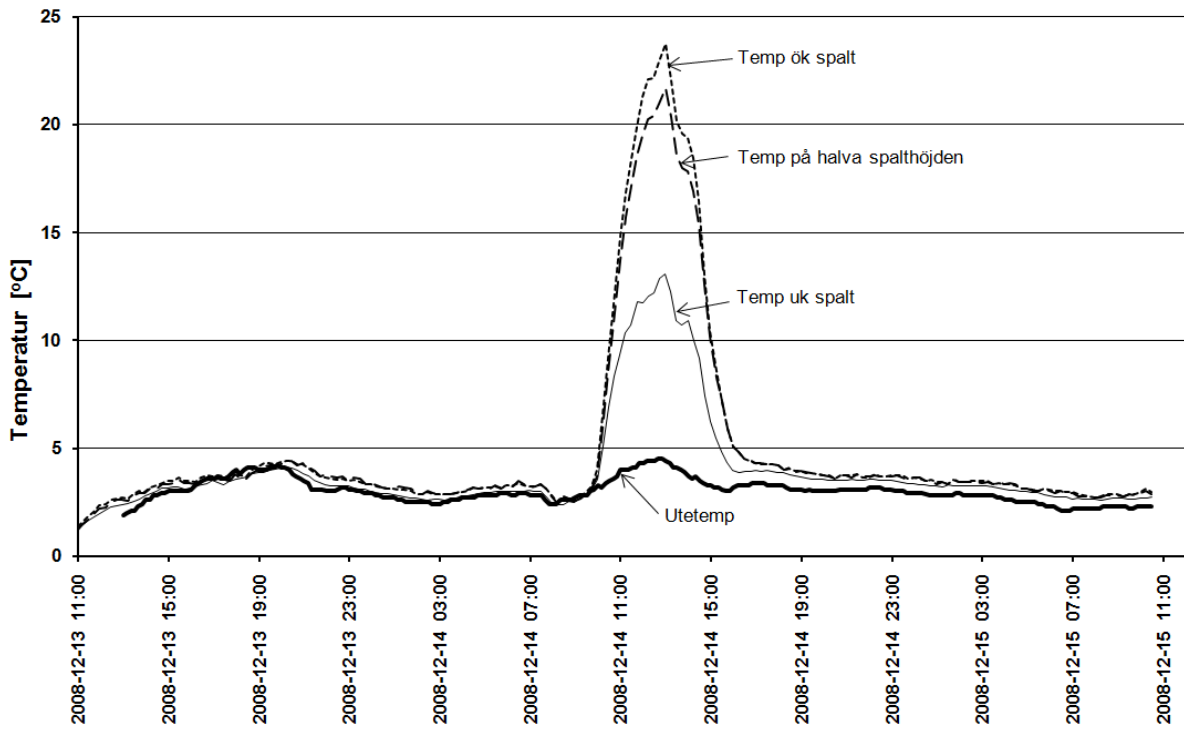
D3. Vindhastighet



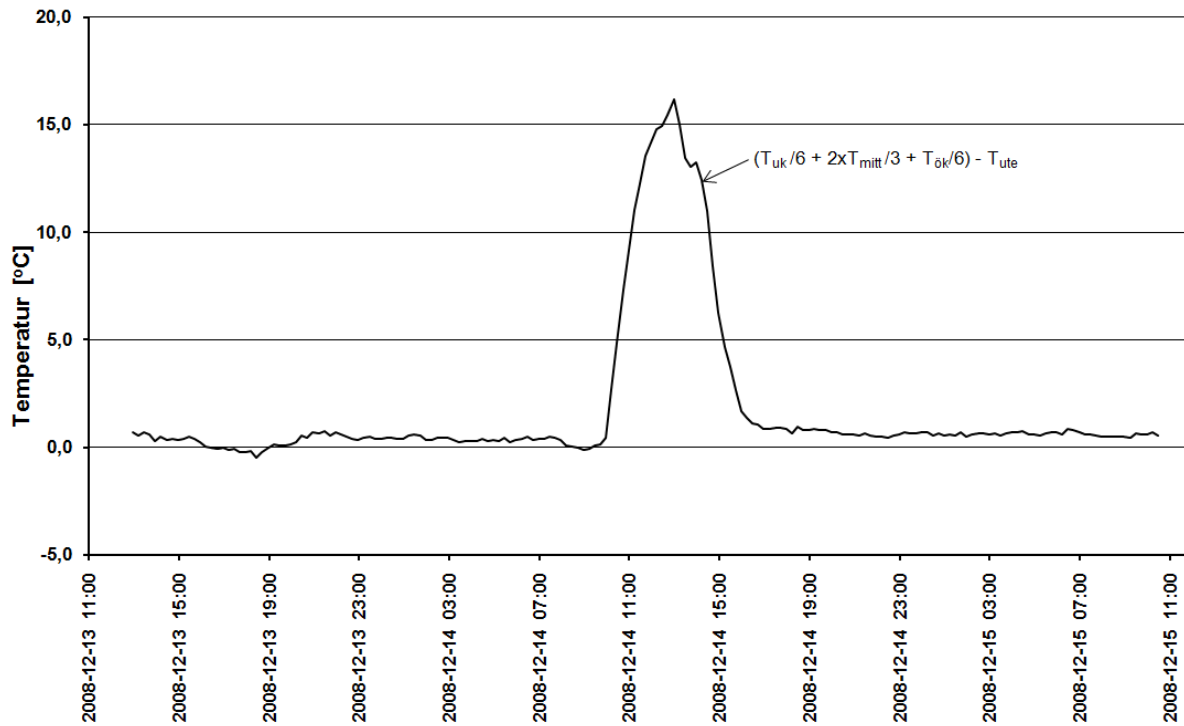
D4. Vindriktning



D5. Temperaturer i spalten och utomhus

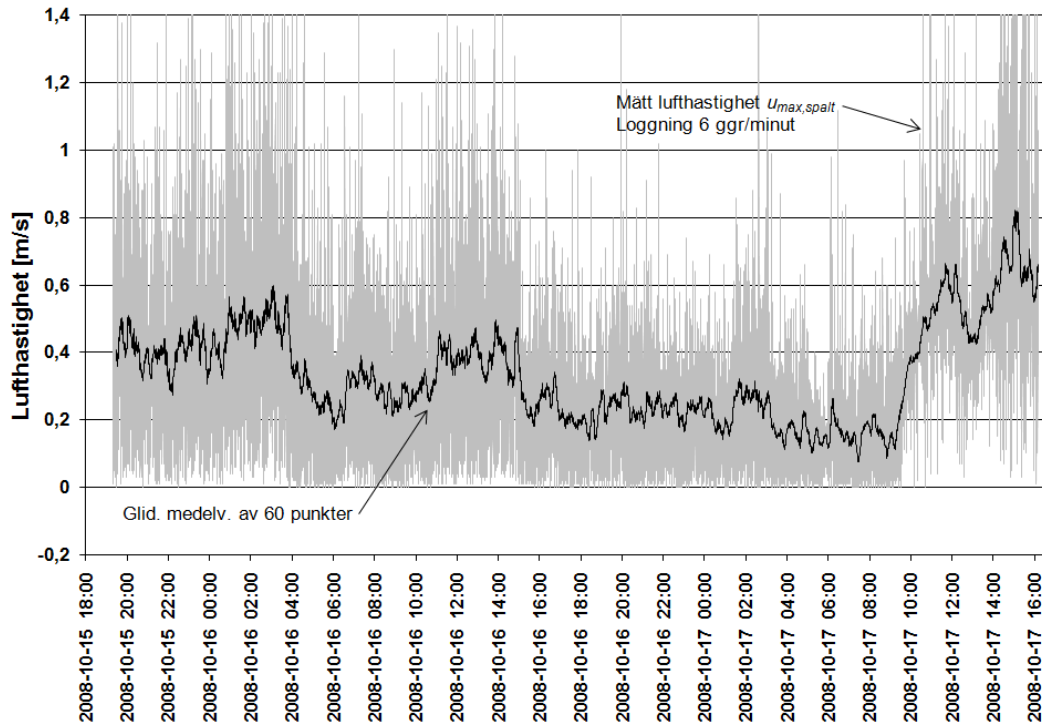


D6. Övertemperatur i spalten

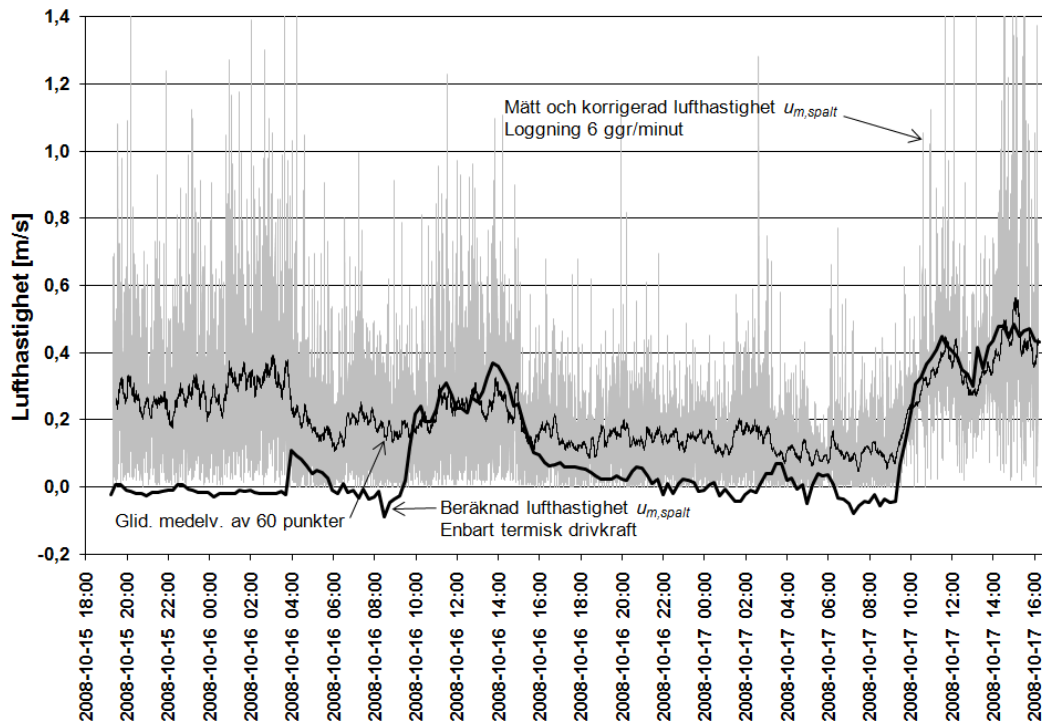


BILAGA 11 - Mätperiod 081015-081017 fack 1, vertikala läkt

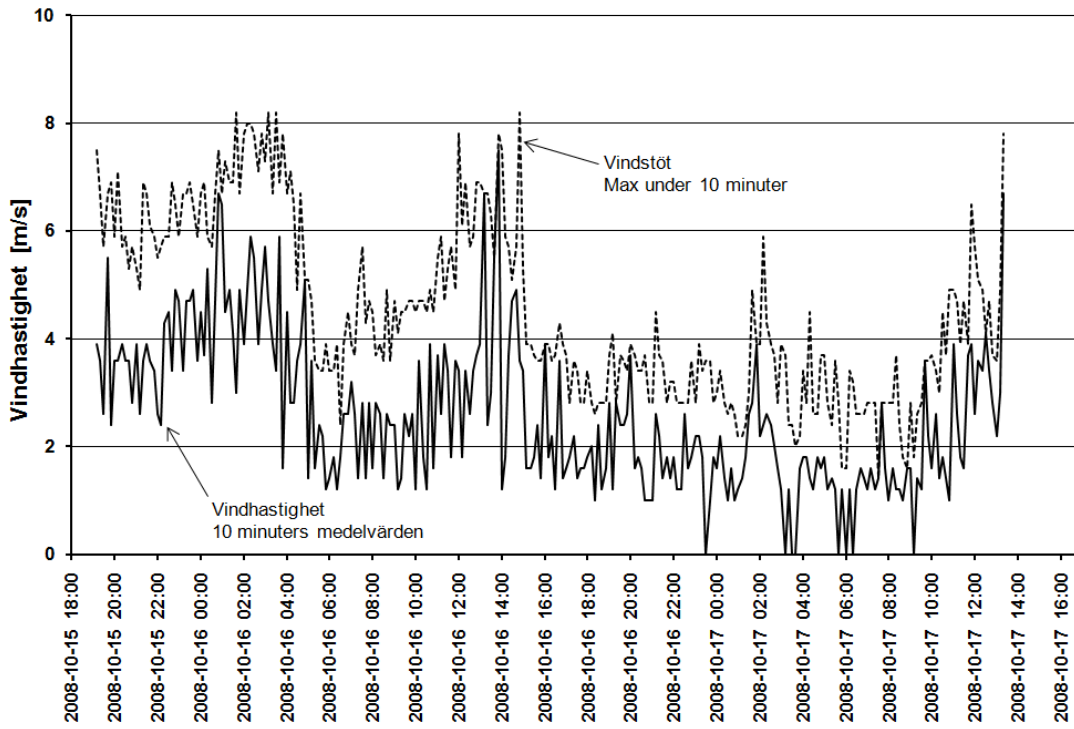
D1. Mätt lufthastighet – topphastighet $u_{max,spalt}$



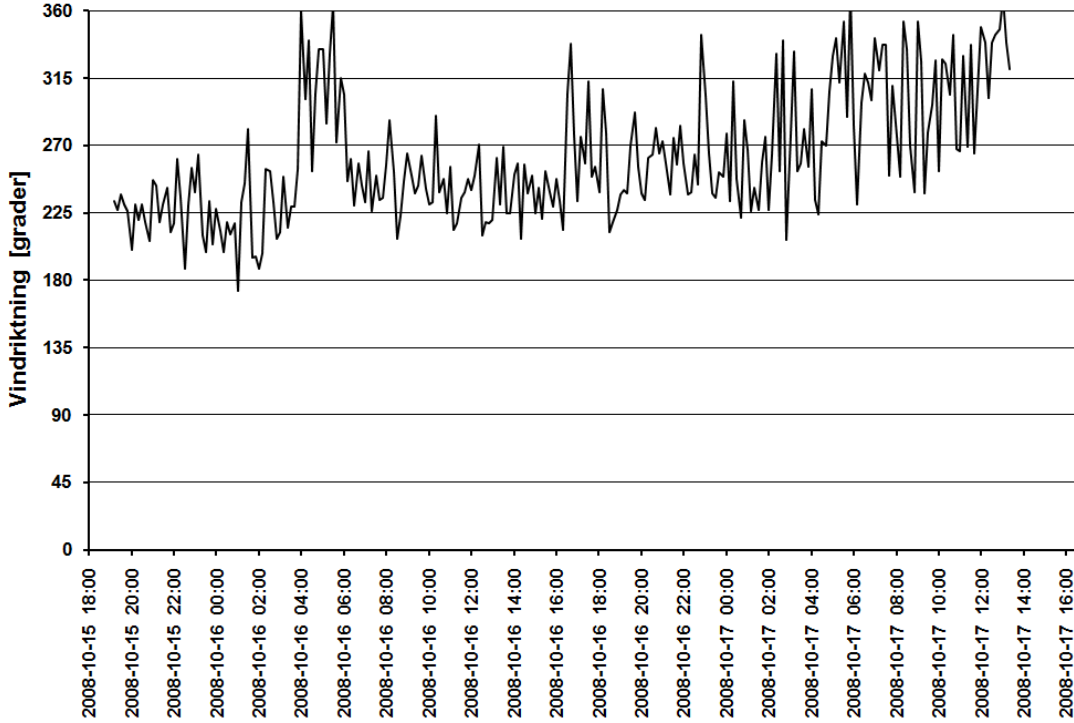
D2. Mätt, korrigerad lufthastighet $u_{m,spalt}$ Beräknad lufthastighet $u_{m,spalt}$ av termik



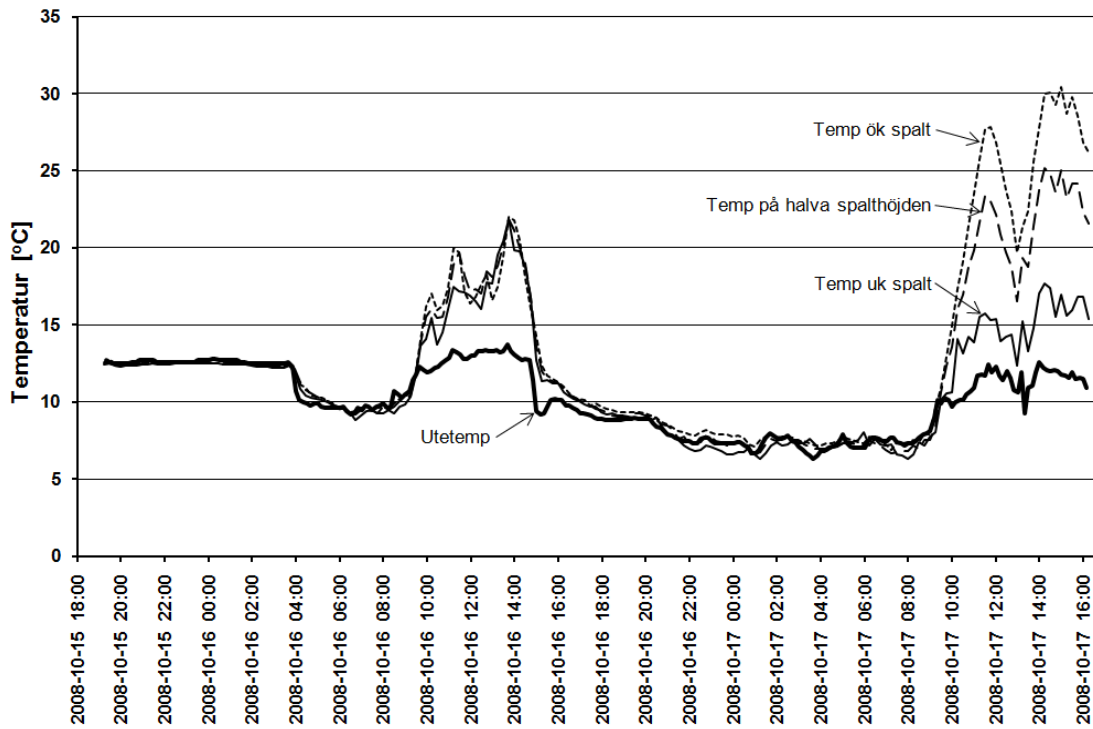
D3. Vindhastighet



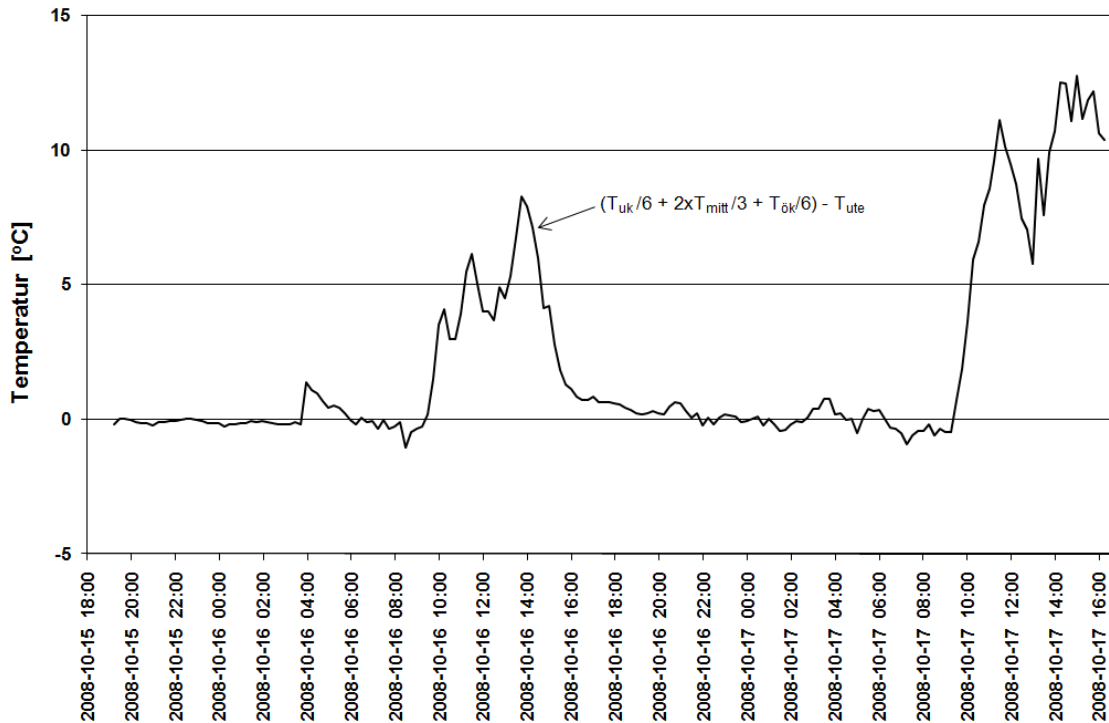
D4. Vindriktning



D5. Temperaturer i spalten och utomhus



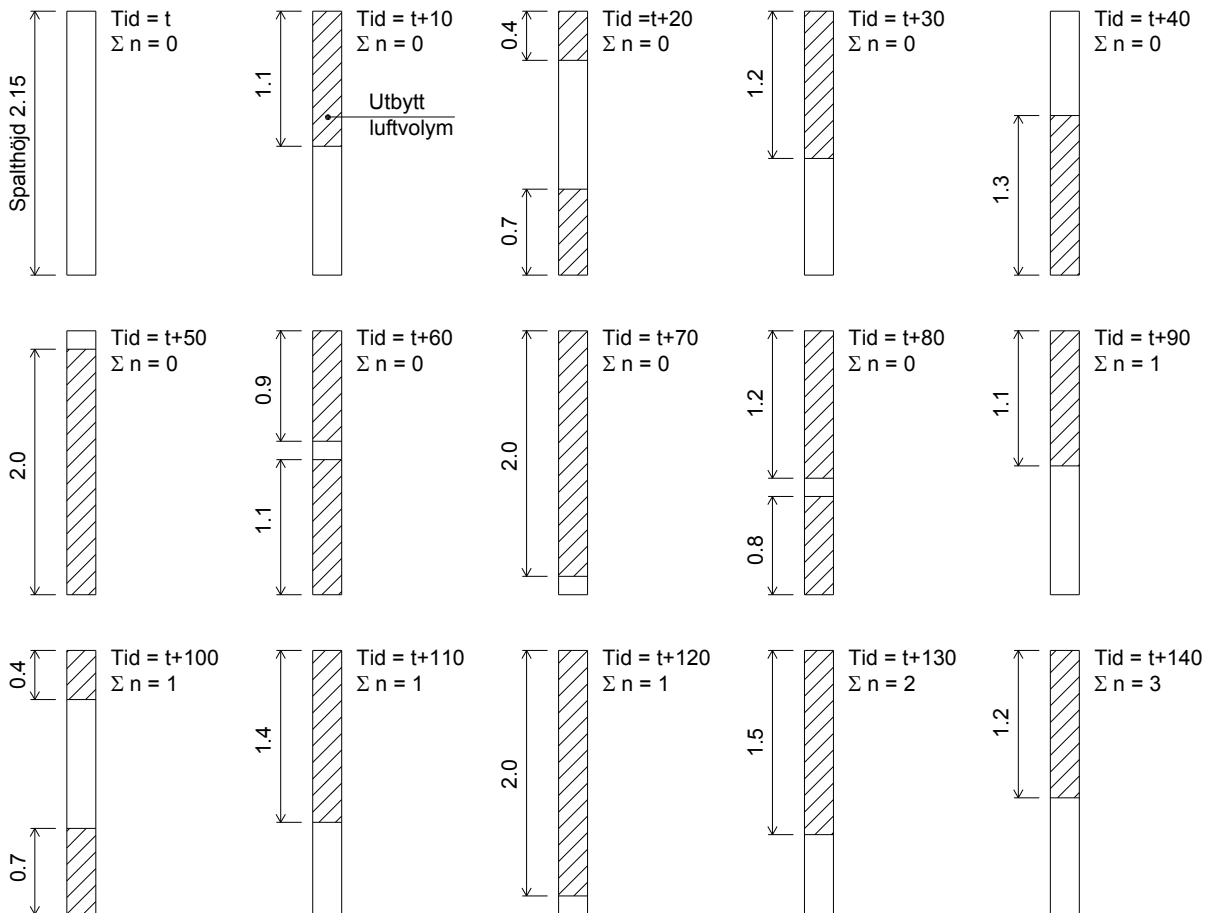
D6. Övertemperatur i spalten



BILAGA 12 – Metodik för beräkning av antal luftomsättningar

Tabell och figurer i bilagan exemplifierar med en fiktiv mätserie den principiella metodiken att beräkna antal luftomsättningar i en spalt när strömningsriktningen växlar.

Tid [s]	Δt [s]	$u_{m,spalt}$ [m/s]	$u_{m,spalt} \cdot \Delta t$ [m]	Σ Luftomsättningar n
t	0	0	0	0
t+10	10	-0.11	-1.1	0
t+20	10	0.07	0.7	0
t+30	10	-0.08	-0.8	0
t+40	10	0.13	1.3	0
t+50	10	0.07	0.7	0
t+60	10	-0.09	-0.9	0
t+70	10	-0.11	-1.1	0
t+80	10	0.08	0.8	0
t+90	10	-0.11	-1.1	1
t+100	10	0.07	0.7	1
t+110	10	-0.10	-1.0	1
t+120	10	-0.06	-0.6	1
t+130	10	-0.15	-1.5	2
t+140	10	-0.12	-1.2	3



BILAGA 13 – Data för uppskattning av nedåtriktad strömning

Tidsperiod 2008-10-08 Fack 4	$U_{m,5}$ [m/s]	U_{vindby} [m/s]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$\Delta p_{vind,max}$ [Pa]	Max drivkraft för nedåtriktad strömning [Pa]	Max lufthastighet vid nedåtriktad strömning [m/s]
10:00-10:10	4,7	4,7	1,06	1,33	-0,27	0,065
10:10-10:20	2,4	4,7	1,18	0,78	0	
10:20-10:30	2,6	6,9	1,25	0,91	0	
10:30-10:40	4,7	7,6	1,38	2,98	-1,60	0,183
10:40-10:50	2,4	7,3	1,43	0,78	0	
10:50-11:00	3,4	6,9	1,44	1,56	-0,12	0,041
11:00-11:10	4,1	7,5	1,51	2,27	-0,76	0,120
11:10-11:20	5,9	7,8	1,58	3,65	-2,07	0,213
11:20-11:30	4,5	6,7	1,56	2,69	-1,13	0,150
11:30-11:40	1,8	7,3	1,57	0,44	0	
11:40-11:50	3,4	7,6	1,59	1,56	0	
11:50-12:00	2,4	5,3	1,65	0,78	0	
12:00-12:10	3,7	6,9	1,61	1,85	-0,24	0,062
12:10-12:20	4,9	6,1	1,52	2,23	-0,71	0,115
12:20-12:30	2,6	6,9	1,52	0,91	0	
12:30-12:40	5,9	6,7	1,52	2,69	-1,17	0,153
12:40-12:50	4,5	6,9	1,52	2,73	-1,21	0,156
12:50-13:00	2,8	6,9	1,59	1,06	0	
13:00-13:10	3,9	6,7	1,64	2,05	-0,41	0,084
13:10-13:20	5,5	7,8	1,61	3,65	-2,04	0,211
13:20-13:30	3,9	7,8	1,67	2,05	-0,38	0,081
13:30-13:40	2,4	5,9	1,82	0,78	0	
13:40-13:50	4,7	6,1	1,91	2,23	-0,32	0,073
13:50-14:00	3,7	6,9	1,97	1,85	0	
14:00-14:10	5,9	6,9	2,05	2,86	-0,81	0,123
14:10-14:20	5,3	6,9	2,08	2,86	-0,78	0,121
14:20-14:30	3,9	6,5	2,07	2,05	0	
14:30-14:40	3,7	6,5	2,05	1,85	0	
14:40-14:50	2,4	5,5	2,06	0,78	0	
14:50-15:00	2,6	5,7	2,04	0,91	0	
15:00-15:10	3,7	6,7	1,99	1,85	0	
15:10-15:20	4,9	6,5	1,97	2,54	-0,57	0,101
15:20-15:30	5,7	5,9	1,96	2,09	-0,13	0,043
15:30-15:40	4,3	6,5	1,90	2,50	-0,60	0,107
15:40-15:50	3,4	5,9	1,85	1,56	0	
15:50-16:00	2,4	5,5	1,82	0,78	0	
16:00-16:10	3,9	6,7	1,78	2,05	-0,27	0,066
16:10-16:20	3,7	6,5	1,76	1,85	~ 0	
16:20-16:30	2,8	5,9	1,69	1,06	0	
16:30-16:40	5,5	5,5	1,58	1,82	-0,24	0,062
16:40-16:50	3,4	5,9	1,51	1,56	~ 0	
16:50-17:00	3,7	4,9	1,50	1,44	0	
17:00-17:10	2,6	5,7	1,36	0,91	0	
17:10-17:20	2,6	4,9	1,29	0,91	0	
17:20-17:30	2,8	4,5	1,18	1,06	0	
17:30-17:40	4,5	5,9	0,94	2,09	-1,15	0,150
17:40-17:50	2,8	4,9	0,80	1,06	-0,26	0,064
17:50-18:00	2,8	4,5	0,72	1,06	-0,34	0,076
18:00-18:10	2,4	4,7	0,56	0,78	-0,22	0,060
18:10-18:20	2,6	3,9	0,48	0,91	-0,43	0,087
18:20-18:30	2,0	4,9	0,44	0,54	-0,1	0,037

BILAGA 14 – Data för uppskattning av nedåtriktad strömning

Tidsperiod 2008-12-14 Fack 3	$U_{m,5}$ [m/s]	U_{vindby} [m/s]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$\Delta p_{vind,max}$ [Pa]	Max drivkraft för nedåtriktad strömning [Pa]	Max lufthastighet vid nedåtriktad strömning [m/s]
11:00-11:10	3,9	6,9	0,94	2,05	-1,11	0,127
11:10-11:20	3,7	7,1	1,03	1,85	-0,82	0,108
11:20-11:30	2,8	6,1	1,08	1,06	0	
11:30-11:40	5,5	5,5	1,20	1,82	-0,62	0,093
11:40-11:50	2,8	5,7	1,25	1,06	0	
11:50-12:00	3,4	6,9	1,28	1,56	-0,28	0,061
12:00-12:10	3,4	5,5	1,33	1,56	-0,23	0,054
12:10-12:20	4,9	5,9	1,36	2,09	-0,73	0,102
12:20-12:30	2,8	6,7	1,36	1,06	0	
12:30-12:40	3,4	5,7	1,39	1,56	-0,17	0,046
12:40-12:50	5,9	6,7	1,41	2,69	-1,28	0,137
12:50-13:00	5,5	5,9	1,45	2,09	-0,64	0,095
13:00-13:10	4,7	6,7	1,43	2,69	-1,26	0,135
13:10-13:20	3,6	6,9	1,37	1,75	-0,38	0,072
13:20-13:30	4,7	7,3	1,30	2,98	-1,68	0,157
13:30-13:40	4,5	6,9	1,23	2,73	-1,50	0,148
13:40-13:50	3,4	6,1	1,21	1,56	-0,35	0,069
13:50-14:00	4,7	6,7	1,22	2,69	-1,47	0,146

BILAGA 15 – Data för uppskattning av nedåtriktad strömning

Tidsperiod 2008-12-14 Fack 1	$U_{m,5}$ [m/s]	U_{vindby} [m/s]	$\Delta p_{term.}$ [Pa]	$\Delta p_{vind,max}$ [Pa]	Max drivkraft för nedåtriktad strömning [Pa]	Max lufthastighet vid nedåtriktad strömning [m/s]
11:00-11:10	2,6	4,7	0,81	0,91	-0,10	0,092
11:10-11:20	1,8	3,9	0,85	0,19	0	
11:20-11:30	1,6	4,7	0,92	0,15	0	
11:30-11:40	3,7	3,9	0,94	0,91	0	
11:40-11:50	3,9	6,5	0,89	2,05	-1,16	0,495
11:50-12:00	2,6	5,7	0,85	0,91	-0,06	0,061
12:00-12:10	3,6	5,1	0,81	1,56	-0,75	0,378
12:10-12:20	3,4	4,9	0,78	1,44	-0,66	0,348
12:20-12:30	4,1	4,1	0,72	1,01	-0,29	0,203
12:30-12:40	3,4	4,7	0,63	1,33	-0,70	0,361
12:40-12:50	2,8	3,7	0,63	0,82	-0,19	0,150
12:50-13:00	2,2	3,6	0,58	0,65	-0,07	0,07

BILAGA 16 – Klimatdata för perioden april-augusti

Tabellen nedan redovisar klimatdata som använts för beräkning av spalttemperatur under perioden april-augusti.

Parameter	Apr	Maj	Juni	Juli	Aug	Referens
Medeltemperatur utomhus T_u [°C] mellan kl 08-18	8.2	13.3	17.1	19.0	19.0	Taesler, 1972
Ljusa timmar/dygn [%]	60	68	72	70	62	www.prognosen.se
Mörka timmar/dygn [%]	40	32	28	30	38	www.prognosen.se
Klara dagar/månad	5±3	8±5	6±4	5±3	5±4	Taesler, 1972
Mulna dagar/månad	12±4	8±3	8±3	9±3	10±4	Taesler, 1972
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ /dygn [W/m ²] (Figur 8-1, kurva S)	145	140	130	130	140	Nevander och Elmarsson, 1994
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ klar dag [W/m ²]	242	206	181	186	226	
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ halvklar dag [W/m ²]	157	134	118	121	147	
Solstrålning $I_0 \cdot \cos(\varphi)$ mulen dag [W/m ²]	61	52	45	47	57	