

Rapport

R86:1982

Energibesparande vid användande av luftrida

Kurt Belin
Axel Bigélius
Gunnar Åhlander
Roger Taesler

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plac	<i>See</i>

R
Åhlander

BYGGDOK

Institutet för byggdokumentation
Hälsingegatan 49
113 31 Stockholm, Sweden
08-34 01 70 Telex 125 63

Byggtforskningsrådet

R86:1982

ENERGIBESPARANDE VID ANVÄNDANDE AV LUFTRIDÅ

Kurt Belin
Axel Bigélius
Gunnar Åhlander
Roger Taesler

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
780886-9 från Statens råd för byggnadsforskning
till Bahco Ventilation Entreprenad AB, Enköping.

I Byggeforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R86:1982

ISBN 91-540-3750-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1982

INNEHÅLL

	FÖRORD	5
	SAMMANFATTNING	6
1	INLEDNING	7
1.1	Transporter och öppna portar	7
1.2	Teorier	10
1.3	Ridåutföranden	17
1.3.1	Utomhusridå	19
1.3.2	Neutralluftsridå	20
1.3.3	Återstyrningsridå	20
1.4	Projektet	21
2	MODELLFÖRSÖK	23
2.1	Modellagarna	23
2.1.1	Begränsningar för lufthastigheten i skalmodell	26
2.1.2	Krav på vindtunnelns tvärsnittsarea	27
2.1.3	Exempel på modellstorlek	27
2.1.4	Faktorer som påverkar valet av skala	28
2.2	Värmetransport genom luftridåer	28
2.2.1	En modell för värmetransport	31
2.2.2	Ridåer med icke-symmetrisk strömning	34
2.3	Modellstorlek	36
2.4	Försöksanordning	36
2.5	Mätmetodik	42
2.5.1	Temperaturmätning	42
2.5.2	Hastighetsmätning	42
2.5.3	Mätning av radiatoreffekt	43
2.6	Beräkningsmetodik	43
2.6.1	Beräkning av värmeförlust genom uppmätning av hastighet och temperaturprofil	43
2.6.2	Beräkning av värmeförlust genom uppställande av effektbalans	50
2.6.3	Beräkning av fiktivt k-värde för en öppen, oskyddad port	52
2.7	Mätresultat	54
2.7.1	Modellförsök med och utan öppen sluss med ridååterstyrning	57
2.7.2	Modellförsök med otät byggnad	76
2.7.3	Undersökning av olika slussutföranden	82
2.7.4	Uppmätning av strålbågar	82
3	FULLSKALEFÖRSÖK	85
3.1	Försöksuppläggning	85
3.2	Försöksanläggning	85
3.3	Mätutrustning	89
3.4	Mätning	91
3.5	Mätresultat med kommentarer	92
3.5.1	Ridåhastighet och utbredning	92
3.5.2	Luftridåns avböjning	98
3.5.3	Värmetransporten i luftridån	108
3.5.4	Vind- och ridåfunktion	112
3.5.5	Luftridå med och utan öppen sluss med återstyrning	124
3.5.6	Luftridåns dynamik	130

4	ENERGIBESPARING	135
4.1	Energiförlust genom en öppen port	135
4.2	Meteorologiska "basdata" för relativa energibelastningar på referensport	135
4.3	Effektörlust genom öppen port, baserad på "basdata"	140
4.4	Effektörlust genom port utan och med olika luftridåer	141
5	DISKUSSION	144

FÖRORD

För att ett projekt av denna storleksordning skall kunna genomföras krävs medverkan av många. Till alla dessa vill jag här rikta ett varmt tack.

I första hand riktas detta till mina projektmedarbetare Axel Bigelius, Roger Taesler och Gunnar Åhlander för deras insatser med uppläggning, genomförande och slutrapportering av projektet. Axel Bigelius initierade projektet, tog fram ansökningar till Byggforskningsrådet samt gav goda råd under projektets genomförande. Roger Taesler har genomfört den meteorologiska delen av arbetet, där den allmänna delen av den meteorologiska studien utges som separat rapport. Gunnar Åhlander har genomfört litteraturstudier, teoretiska beräkningar angående modellstudierna samt ansvarat för vind-tunnelförsöken.

Kurt Jonsson har varit ekonomiskt ansvarig för projektet och ett förtroendefullt stöd för mig. Professor Folke Peterson vid Institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik vid KTH har ansvarat för den teoretiska delen av projektet. Genom institutionen har också modellförsöken blivit genomförda.

Lars-Eric Thor har ansvarat för vindtunnelns uppbyggnad. Bengt Eckebring har tagit fram utrustning till modell- och Bill Eriksson till fullskaleförsöken, där Hans Fischer medverkat.

Gyula Agardi, Sonja Ander och Anne-Marie Appelfeldt har svarat för resultatbearbetning och dokumentation.

Utveckling av produkter och systemlösningar har initierats ur kombination av tidigare och vid aktuella projekt erhållna kunskaper. Detta projektarbete är en länk i den utvecklingskedja inom luftridaområdet som jag tidigare har arbetat med. Min förhoppning är att detta projekts satsning på en idé skall initiera nya idé-satsningar som resulterar i nya, effektivare och energisnålare systemlösningar.

Slutligen, för att vi fick disponera en port för försöken, tackas Linköpings Motorcentrum, samtidigt som jag beklagar att den "öppna slussen", som bl a Häll och Hallberg hjälpte oss bygga, måste rivras för att få belyst hur återstyrningsridån spar energi och skapar på samma gång en bra arbetsmiljö innanför porten.

Kurt Belin

SAMMANFATTNING

I öppna portar och dörrars nedre del strömmar i varma lokaler kall luft in vid låg utetemperatur. Den kalla luftens hastighet orsakar då besvär. Samtidigt erhålls också energiförluster som medför energikostnader. Inströmmad kall luft måste värmas till lokaltemperaturen.

Motsvarande gäller även principiellt för lokaler med lägre temperatur än omgivningen, t ex i fryshus. Där strömmar kall luft ut i portens nedre del och varm luft in i portens övre del. Denna varma luft måste där sänkas till fryshustemperatur.

Vid vindanfall mot byggnaden eller när ventilations-systemets till- och frånluftsfloeden är olika uppstår också ett luftutbyte genom en öppen port.

Med en luftstråle kan direkt inströmming av luft hindras i portar och dörrar. Genom strålens ejection av omgivande luft och omblandning förs dock lokal- och uteluft tvärs den därmed formade luftridån. För luftridån, som går helt utanför porten, ersätts ejectionerad lokalluft med ny uppvärmd luft genom otätheter på annat ställe i byggnaden. En utomhusridå ökar luftomsättningen i byggnaden.

En vertikalt uppåtriktad luftridå som i portöverkant delas i två lika delar för ut viss volym lokalluft genom omblandningen. Motsvarande volym kall uteluft blir då samtidigt tillförd lokalen genom ridån. Denna genomströmning kan minskas om ridån har ett ställbart tilluftsdon och den ejectionerade luften återstyrs på motstående portsida med en skärm som sitter i framkanten på en kort sluss utan ytterport.

Utförda försök visar att återstyrning av ridån höjer dess temperatur. Till lokalen förd ridådel blir därför inte tyngre än lokalluften. Någon ridådel kan då inte heller strömma ner i vistelsezonen. Minskad genomströmning av fuktig luft till fryshus ska också kunna reducera nedisningen där.

En luftridå med återstyrning ger enligt mätningar en effektförlust på $0,15 \text{ kW/K} \cdot \text{m}^2$ portyta. Denna förlust är 35-40 % av neutralluftsriddans, som delas på mitten av motstående portkant. I förhållande till en oskyddad öppen port, för vilken säkra uppgifter saknas på luftinströmningen, är reduceringen 85-90 %.

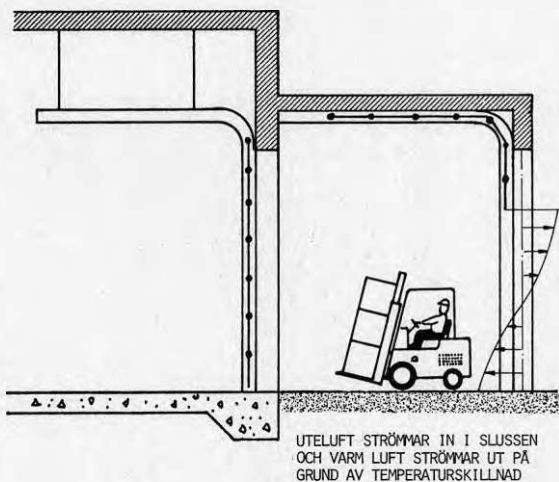
Utomhusridåns effektförlust är ca 20 ggr större än den som luftridån med återstyrning har.

1 INLEDNING

1.1 Transporter och öppna portar

Många av industrisamhällets produkter består av delar som förädlas på olika platser och i olika byggnader. Innan produkterna kommer till användning måste därför transporter ske genom portar och dörrar. Vid denna transport - genom det klimathölje som väggar och tak utgör - erhålles energiförluster på grund av det samtidiga luftflödet. Inströmmande kall uteluft skapar då även luftrörelse, som kan ge upphov till besvär för människor som vistas i lokalerna.

En sluss med dubbla portar, där den ena öppnas först sedan den andra stängts, minskar luftinströmningen men ökar också transporttiden, figur 1.1. Skydd för direkt luftinströmning ger även "snurrdörrar" i varuhusentréer, men varje slussektion tar dock med sig uteluft in, när dörren roterar.



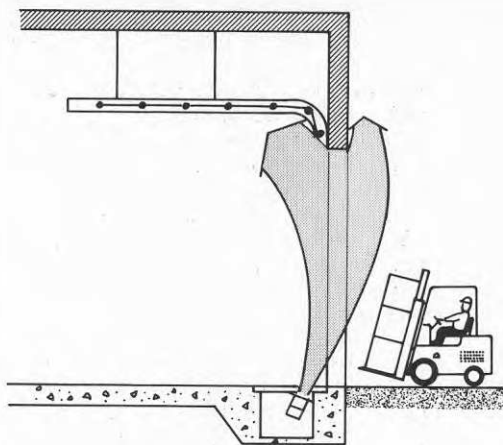
Figur 1.1 Dörrsluss

Ett annat sätt att delvis hindra kall uteluft att strömma in i en lokal, är med nedhängande smala överlappande plastremсор. Detta tillåter påkörning varvid plastremсорna viker undan. De formar därvid en öppning lika stor som transporten.

Vid lastning direkt i en dörr/portöppning kan man använda sig av rörliga och delvis formbara draperier, som sluter an mot övertäckta lastutrymmen.

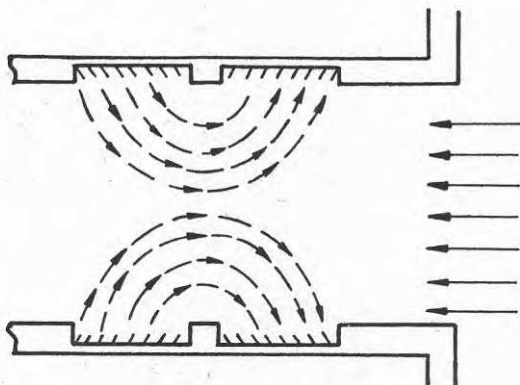
Med en horisontellt eller vertikalt riktad luftridå, figur 1.2, kan man dock både eliminera drag och kalluftsinstömning och förhindra förlängning av

transporttiden.



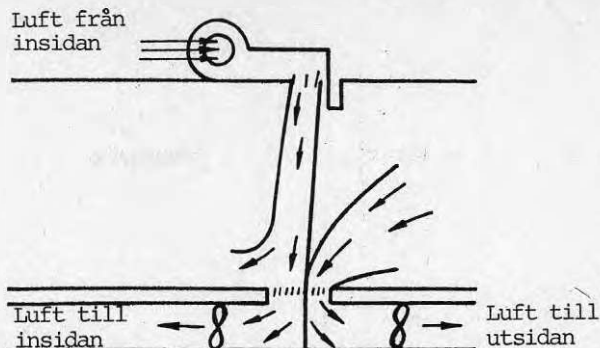
Figur 1.2 Vertikalt riktad luftridå

Idéerna om luftridåer är inte nya. Redan år 1904 patenterade Theophilus van Kennel från USA en luftridå. Denna konstruktion har två breda luftstrålar som delvis är vända mot entrériktningen, figur 1.3. Principen för denna ridå är således att med en motriktad luftström motverka vinnanfall och minska flödet av inströmmad kall uteluft. Van Kennels konstruktion stannade dock huvudsakligen på ritbordet.



Figur 1.3 Van Kennels förslag till luftdörr

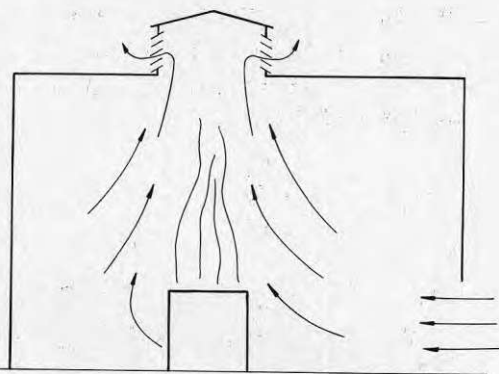
Först tolv år senare konstruerade Caldwell från USA en luftridå, som liknar de konstruktioner som används idag. Principen för denna ridå framgår av figur 1.4.



Figur 1.4 Caldwell's luftridå

Användning av luftridåer i större omfattning började dock först under 1940-talet. Detta skedde främst i Schweiz där man även utvecklade beräkningsmetoder för dess användning under olika betingelser. Ett par av dessa är förekomst av termiska stigkrafter och uppfångning av luftföroreningar.

Termiska stigkrafter uppstår omkring varma, industriella processinstallationer. Vid byggnader med lanterniner - öppningar i tak - medför dessa stigkrafter att varm luft transporteras genom öppningarna, vilket kräver lufttillförsel genom andra delar av byggnaden, figur 1.5.



Figur 1.5 Luftströmning omkring värmekälla

En annan relativt tidig industriell miljöteknisk tillämpning av luftbehandlingstekniken är att fånga upp föroreningar med hjälp av en frånluftsfläkt, figur 1.6. Även denna tillämpning fordrar lufttillförsel utifrån.

Den kraft som motverkar luftinströmningen är impulsvektorn I_C . Impulsen utnyttjas två gånger (beviset för detta lämnas i avsnitt 2.7). Därför blir

$$I_C = I_0 \cdot 2 \cdot \sin \alpha \quad 1.2$$

Vinden som blåser mot porten har också en impuls eller kraft. Rörelseenergin i vinden omvandlas när den böjer av vid ridån till ett tryck som "skjuter på" ridån så att denna i sin tur böjs av på det sätt som figur 1.7 visar. Detta tryck, som kallas dynamiskt, bestäms med formeln:

$$\Delta p_w = \frac{\rho \cdot u_w^2}{2} \quad 1.3$$

där Δp_w = vindens dynamiska tryck N/m^2
 ρ = luftens densitet kg/m^3
 u_w = vindhastighet m/s

Över en port med bredden B och höjden H blir då impulsen från vinden:

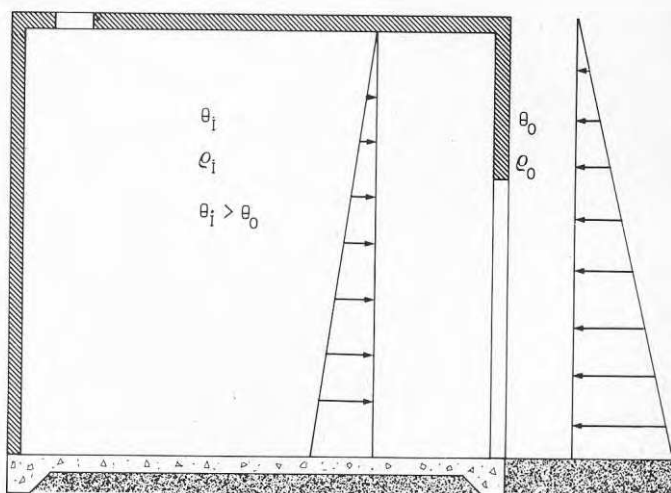
$$I_w = \Delta p_w \cdot B \cdot H \quad 1.4$$

där I_w = vindens impuls N
 B = portens bredd m
 H = portens höjd m

Som bl a Baturin /1/ visar ejekterar en luftstråle med omgivande luft. Ridåns impuls förändras idealt inte av denna inblandning, men hastigheten avtar med det ökade ridåflödet. Med en från början bred luftstråle blir förhållandet mellan ejekterad luft och primärstråle mindre.

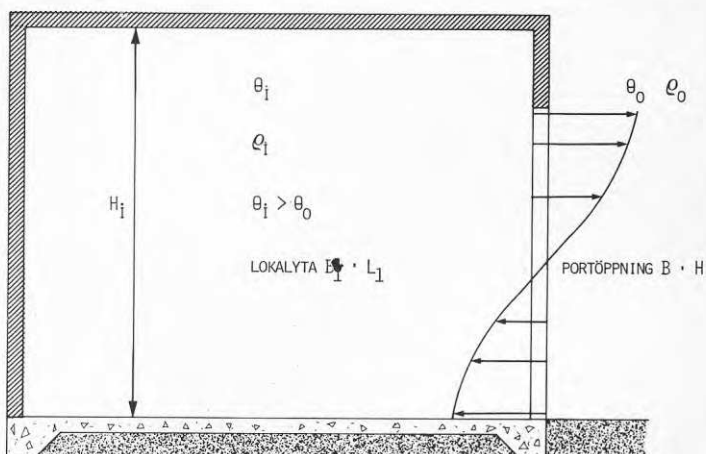
En luftridå framför en öppen port hindrar inte bara vinden att blåsa in. Tryckskillnader över väggar och tak, som orsakas av temperaturskillnader ute inne och mindre tilluftsflöde än frånluftsflöde i ventilationssystemet kan också upprätthållas med en luftridå. Detta innebär, att på andra ställen inströmmat luftflöde, inte blir större än när porten är stängd. Detta luftflöde bestäms i sin tur av det motstånd som både in- och utströmningen ur lokalen möter i öppningar och kanaler samt springor/otät-heter i väggar och tak.

Temperaturskillnader mellan ute- och inneluften orsakar luftströmning genom en port på grund av den densitetsskillnad som olika varm luft har. Trycket av de ovanpå varandra lagrade luftmolekylerna blir lägre i varmare luft. Tryckskillnaden blir därför störst vid marken enligt figur 1.8.



Figur 1.8 Principiell tryckfördelning i luftpelare med olika temperatur

Den luftströmning som tryckskillnaden skapar i en portöppning till en tät lokal visar figur 1.9.



Figur 1.9 Luftströmning i port till helt tät lokal

Eftersom den upptill strömmande luften är varmare måste dess volym vara större för att uppfylla kontinuitetsvillkoret, dvs att massflödet ut och in i den täta lokalen måste vara lika. Neutrallinjen där varken in- eller utströmning sker genom porten kommer därför att ligga något lägre än halva porthöjden. Den tryckskillnad som erhålls blir därför:

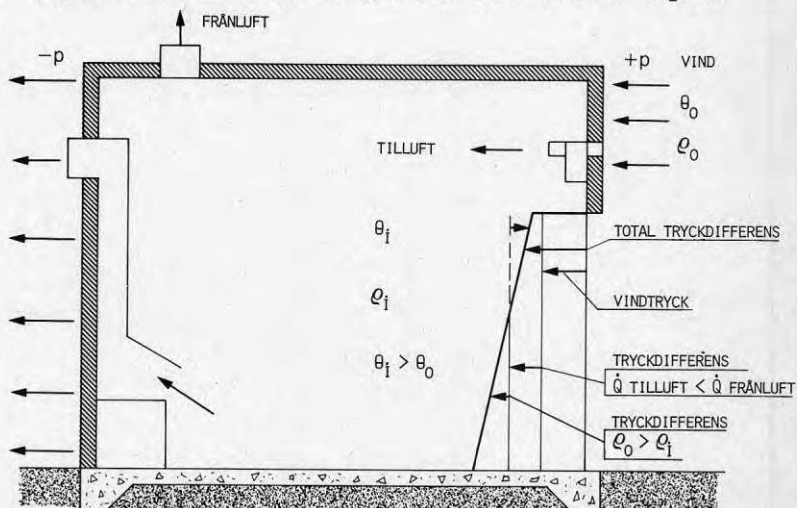
$$\Delta P_{\theta} = a \cdot H \cdot g (\rho_o - \rho_i) \quad 1.5$$

där	ΔP_{θ}	= tryckskillnad orsakad av temperaturskillnad	N/m^2
	a	= konstant ≈ 0.45	-
	H	= porthöjd	m
	g	= jordaccelerationen	m/s^2
	ρ_o	= densiteten för uteluften	kg/m^3
	ρ_i	= densiteten för inneluften	kg/m^3

Med tiden ändras tryckskillnad och därmed massflödet för en oskyddad öppen port eftersom inneluftens täthet ökar med inströmmande kallare uteluft. Om lokalen är försedd med ett så överdimensionerat uppvärmningssystem att lokaltemperaturen kan upprätthållas även vid en öppen port sker givetvis inte denna förändring. Vanligtvis är så inte fallet.

En ojämn temperaturfördelning i lokalen och en otät lokal påverkar tryckfördelningen över vägg och port och då även luftinströmningen. Är lokalen mycket otät sker inströmning över hela portens höjd liksom när frånluftsflödet är större än tilluftsflödet.

Den totala tryckfördelning som erhålls vid en port är sammansatt av de tre påverkande faktorerna; vind, temperaturskillnad ute-inne och mer frånluftsflöde än tilluftsflöde. En förenklad bild, figur 1.10, som bl a ej belyser fördelningen i höjddled, klargör endast att de adderas på något sätt. Vindriktning och profil över mark och byggnadens utformning är bestämmande faktor för den totala tryck-

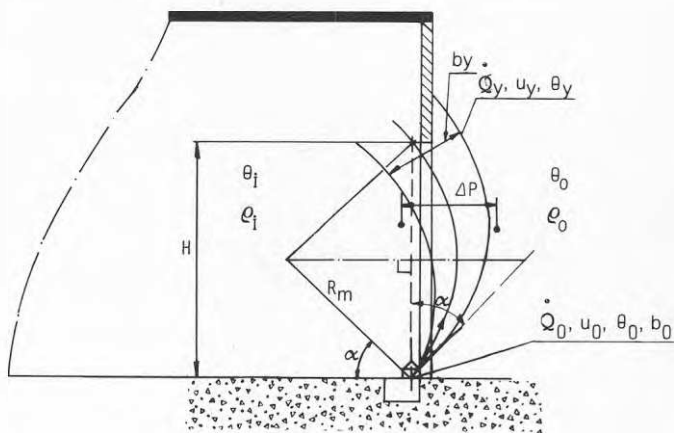


Figur 1.10 Principiell tryckfördelning i port vid vindanfall, mer frånluft än tilluft och densitetsskillnader ute-inne för otät lokal

skillnad som måste upprätthållas med en luftridå för att den i princip skall kunna fungera som en stängd port. Då en luftridå vid portens övre kant delas så att den varken tillför eller bortför luft från en lokal uppfyller nedanstående ekvation villkoret att ridåns impulsvektor motsvaras impulsen för de tre tryckskapande faktorerna i figur 1.10.

$$I_0 \cdot 2 \cdot \sin \alpha = \Delta p \cdot B \cdot H \quad 1.6$$

Lajos & Preszler / 2 / har dessutom bevisat att en cirkulär strålbana uppstår. Utifrån geometrisk likformighet, figur 1.11 och ovanstående ekvation kan man fastställa erforderlig impuls och ridåvinkel α för en given tryckpåkänning. Därvid upprätthålls den tryckdifferens som finns vid stängd port. Att upprätthålla denna tryckdifferens är dock inte ett villkor för att ridån skall kunna fungera tillfredsställande ur drag- och lokaltemperatursynpunkt.



Figur 1.11 Ridåns avböjning, hastighets- och temperaturförändring samt utbredning

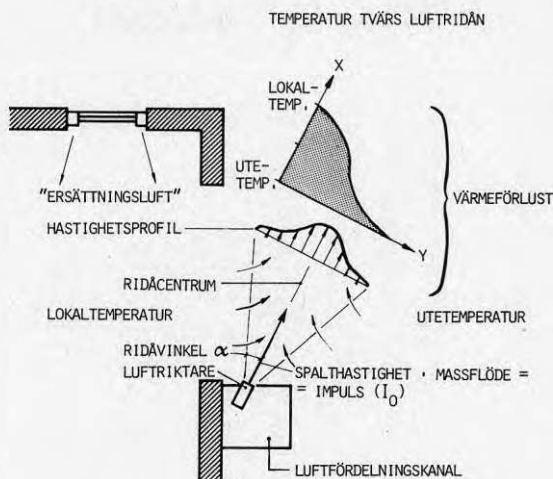
Enligt beviset från Lajos & Preszler blir radien R_m för luftridåns centrum:

$$R_m = \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \quad 1.7$$

De luftflöden \dot{Q} , hastigheter u , temperaturer θ och strålbredder b som erhålls på olika höjd kan också, med i litteraturen angivna formler, bestämmas när luftridåns spaltförhållanden och inne- samt utetemperatur är kända.

Principiell hastighetsfördelning efter y meter tvärs ridån framgår av figur 1.12, som visar ridåbanan när inget tryck verkar över porten. Hastighetsfördelning i strålen presenterades av Reichardt / 3 / och är ofta relaterad i litteraturen. Den är

också utgångspunkt för Hetsroni et.al /4,5,6,7,8/ när de valt att beskriva den temperaturfördelning som visas i figuren.



Figur 1.12 Utvändigt placerad horisontell luft-ridås utbredning, hastighet och temperatur

Luftridån ejetterar luft från lokalen som höjer dess temperatur. Den tidigare uppvärmda lokalluften som går ut orsakar värmeförluster som bestäms av massflöde och temperaturnivå över utetemperatur:

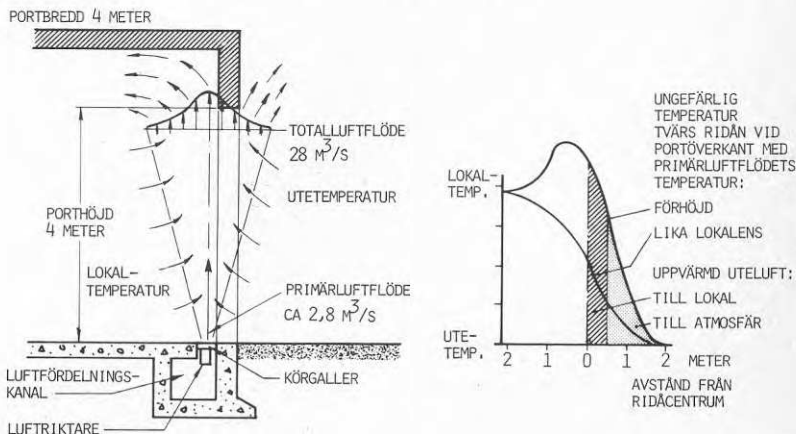
$$P = B \int_i^o \dot{m}_c \cdot c_p \cdot \Delta\theta_{c,o} \cdot dy \quad 1.8$$

- där P = effekt W
 B = portbredd m
 \dot{m}_c = massflöde i en punkt kg/s
 c_p = värmekapacitivet J/kg · K
 $\Delta\theta_{co}$ = temperaturskillnad mellan punkten och utetemperaturen K
 i = insidan av ridån sett från lokalen
 o = utsidan av ridån sett från lokalen

När en impuls från vind eller tryckskillnad verkar på ridån böjer den av in i lokalen som på figur 1.7 och därmed minskar värmeförlusterna. I stället uppstår då luftrörelser i lokalen som kan orsaka besvär. För att undvika sådana kan, för en given vindhastighet och tryckskillnad, ridåns utåtriktning ökas liksom ridåns impuls. Det med-

för dock i sin tur att ersättningsluft förs in på andra ställen i lokalen. Denna kalla uteluft som strömmar in genom andra öppningar och otätheter med hög hastighet kan då skapa luftrörelser i lokalen som ger dragproblem.

Genom att rikta ridån vertikalt så att den delas vid portens överkant, minskar riskerna för luftrörelser i lokalen innanför porten. Energiförlusten finns dock kvar eftersom den del av ridån som går utanför väggen, enligt diagrammet i figur 1.13, har högre temperatur än uteluften.

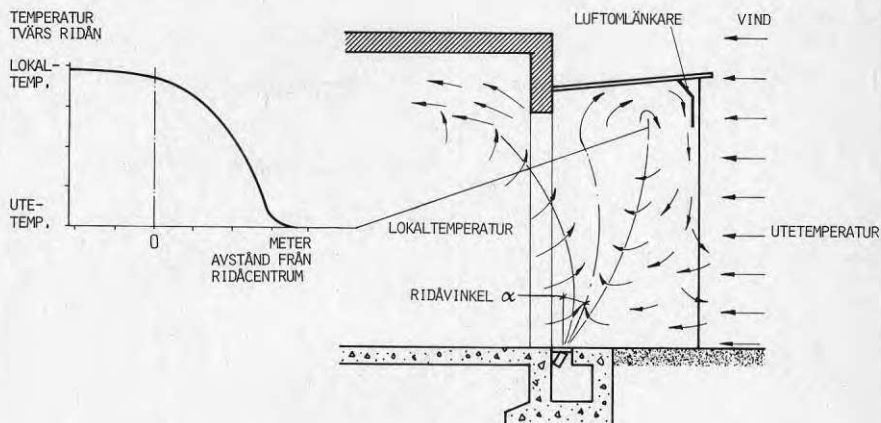


Figur 1.13 Invändigt placerad, vertikalt riktad luftridå

Om temperaturskillnaden mellan ridåns insida och lokalen är för stor kan densitetsskillnaden medföra att kallare luft än lokalens strömmar ner i lokalen och orsakar luftrörelser och sänkt lokaltemperatur där. Takbalkar kan styra ner sådan luft vid mindre densitetsskillnad. Genom att sätta glidbanor under takbalkarna eller/och höja temperaturen på ridåns tilluftstemperatur kan dessa besvär undvikas. En förhöjd tilluftstemperatur ökar dock givetvis värmeförlusterna som figur 1.13 visar.

Utifrån dessa kunskaper om hur en luftridå formas, blir därför en intressant uppgift att finna den lösning som höjer ridåtemperaturen utan extra energitillskott och minskar den in- och uttransport av ute- respektive inneluft som ridåns ejektering orsakar. En lösning visas i figur 1.14.

Med en luftridå enligt figur 1.14 uppnås en temperaturhöjning tvärs hela ridån som beror på att den uteluftmängd som tillförs ridån och delvis även lokalen blir liten. Vid starten ejekterad uteluft återförs och ersätts endast genom virvelrörelser i slussens yttre öppning.



Figur 1.14 Ställbar luftridå med tak och väggar (öppen sluss) samt luftomlänkare

Luftridåflödet från donet är genom den ejektering som sker längs ridåbanan lågt i förhållande till ridåflödet vid portens andra sida - motsatt sida från donet räknat. Luftflödesexemplet i figur 1.13 visar därför att betydelsen är liten om primärstrålen tas från lokalen eller utifrån. Placeringen av tilluftsspalten utanför eller innanför porten påverkar därför också funktionen marginellt speciellt med "öppen sluss" och ridååterstyrning.

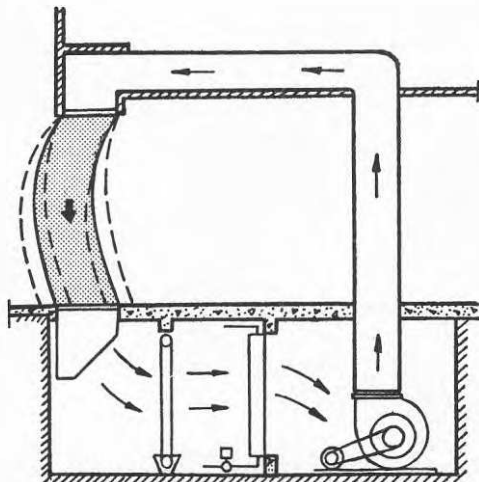
Utifrån preliminära fullskaleförsök vid en port med dimensionen 6 x 6 m bekräftades i stort temperaturförloppet enligt figur 1.14. Aktuell projekt har därför genomförts för att finna de samband som beskriver påverkan under olika belastningsbetingelser på en luftridå.

1.3 Ridåutföranden

Som redan nämnts kan en luftridå riktas horisontellt eller vertikalt. Vid användning av denna för att skilja två utrymmen med olika temperatur, fuktighet eller föroreningsnivåer från varandra är det helt avgörande att känna till att luft ejekteras med ridån från båda sidorna. Den virvelrörelse - turbulens, som ridåstrålen har, ejekterar dock inte bara med luft utan för den även tvärs ridån genom s k tvärturbulens.

Om stora luftflöden används, kan en låg hastighet användas i tilluftsspalten och därmed ejekteringen minskas. Detta kan vara nödvändigt i t ex varuhusentréer, figur 1.15, med hög persontrafik och där också vertikalt uppåtriktad primärstråle inte

är lämplig. En installation med stora luftflöden och recirkulering kräver dock stora, dyra fläktar och därmed utrymmen som är kostsamma och i varje fall svåra att finna vid installationer i befintliga anläggningar.

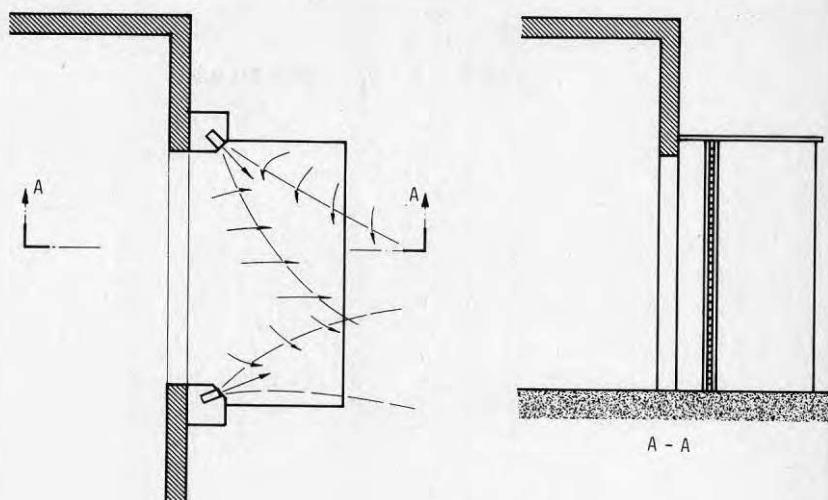


Figur 1.15 Vertikal luftridå med recirkulerande ridå

Antalet varianter av luftridåer är mycket stort. Av denna anledning är det önskvärt med en indelning av ridåerna i olika typer.

Ur rent funktionell synvinkel bör en indelning av luftridåtillämpningarna inte göras utifrån hur dessa riktas, recirkuleras eller utformas med avseende på var primärluften tas ifrån. Den tillämpning som måste användas för breda portar, figur 1.16, är t ex i princip endast en variant av den tekniktillämpning som kan kallas utomhusridå.

En grundindelning av luftridåer bör i stället göras utifrån hur lokalens energi- och klimatförhållanden påverkas. En sammanfattande beskrivning av grundtyper utifrån funktionssätt blir därför utomhusridån, neutralluftsridån och återstyrningsridån som beskrivs i följande avsnitt.



Figur 1.16 Utvändigt placerad dubbelsidigt horisontellt blåsande luftridå med skyddande väggar och tak

1.3.1 Utomhusridå

Med en utomhusridå, enligt figur 1.12, avses en tillämpning, där hela luftflödet i ridån - horisontellt eller vertikalt riktad - skall gå utanför porten.

Genom ejektering - meddragning och inblandning av luft - vidgas primärluftstrålen. Detta sker på ett sätt som bestäms av dess sk turbulensgrad. Hastigheten tvärs ridån får det ungefärliga förlopp, som pilarna markerar. I samma tvärsnitt blir temperaturen bestämd av omgivande randvillkor och det massutbyte som sker tvärs luftridån på grund av tvärturbulens.

I diagrammet ovanför hastighetsprofilen visas ett tänkbart temperaturförlopp vid portens motsatta sida, från primärluftstrålen räknat. Nära luftriktaren bestäms förloppet av om luften till primärluftstrålen tas från lokalen eller utifrån. Temperaturen i ridåns rand blir dock alltid lika med lokal- respektive utetemperaturen.

När den utåtriktade luftridån påverkas av tryckskillnader och/eller ett mot ridåplanet riktat vindanfall, böjer ridån av in mot lokalen enligt figur 1.7. För en horisontellt riktad luftridå innebär detta att ridåns insida går in i lokalen och kan orsaka luftrörelser och sänkt lokaltemperatur speciellt innanför porten. Lokalens täthet

och ridåns impuls bestämmer hur stor del av ridån som går in i lokalen.

Vindanfall verkar dock inte bara mot ridåns plan framför porten. Mot en byggnad styrs också vinden upp längs fasaderna. Detta sker både ovanför och vid sidorna av en portöppning. Den svagaste inre och bortre, mot porten vända, sidan av ridån kan då inte helt hindra att uteluftströmningen efter fasaden går in i lokalen. Detta beror på att endast en liten del av ridåns impuls verkar närmast väggen.

Om ovansidan på en horisontell luftridå skyddas av ett tak och ridån ges tillräcklig impuls och utåtriktning kan dessa risker minskas. Därvid förloras dock luftridåns hela värmeinhåll. Det luftflöde som varmt ridån kommer från lokalen, till vilken det förts in ouppvämt genom otätheter vid främst dörrar och fönster. Vid dessa erhålls då luftrörelser och lokalt låg temperatur.

1.3.2 Neutralluftsrådå

Genom att rikta luftstrålen vertikalt, figur 1.13, och dela den flödesmässigt lika i portöverkanten kan primärluftstrålen och ejekterad lokalluft föras delvis tillbaka. Luftinblandningen sänker dock temperaturen, som figuren visar. Ridåns täthet innanför väggen blir därför högre än lokalluftens, när primärstrålen inte värms. De termiska krafterna kan vid låg utetemperatur föra ner denna luft längre in i lokalen och där orsaka luftrörelser och lägre lokaltemperatur.

En luftridå med förhöjd temperatur på primärluftstrålen kan eliminera denna risk men ökar också, som framgår av figuren, samtidigt energiförlusten med den ridådel, som går utanför porten. Kall uteluft, som strömmar till ridån, värms och förs bort liksom genom tvärturbulens till utsidan överförd lokalluft. Värmd uteluft transporteras också in med ridån och ökar ventilationen.

1.3.3 Återstyrningsridå

Det luftflöde, som går utanför porten, är således den faktor, som främst ger en energiförlust och därmed en energikostnad. Denna energikostnad kan minskas med en primärluftstråle, som har låg turbulensgrad. Om uteluft hindras att strömma till genom att en del av luftridån riktas tillbaka mot primärluftstrålen med ett tak och en återstyrningsskärm, figur 1.14, kan energiförlusten reduceras påtagligt. Tillförd värme förs då tillbaka med den ridåluft, som på nytt ejekteras in i primärluftstrålen.

Den bortförda energin kommer då att enbart bero

på det turbulenta yttre luftskiktet som finns mellan återstyrningsskärmens tak och mark, om man skyddar ridåns kortsidor så att av fasaden uppstyrt eller snett mot ridån verkande luftanfall hindras att komma in i lokalen.

Ur energisynpunkt gäller även att ridån skall delas så att från det utrymme, där man tar primärluftflöde och ejakterat luftflöde, samma luftflöde skall föras tillbaka.

Luftfördelningskanalen och luftriktare kan med detta funktionssätt placeras valfritt inom portområdet. Temperaturen i figur 1.14 påverkas därvid ej märkbart, eftersom primärluftstrålens flöde är litet i förhållande till totalflödet i ridån vid portens motsatta sida från primärluftstrålen räknat - se figur 1.13. Samma sak gäller då också den värmeförlust, som erhålles genom luftutbytet i den återstyrda luftridåns yttre del.

För denna typ av luftridå bildar vägg- och takpartier en "öppen sluss" omkring ridån.

Återstyrningsridån ger således en låg energiförlust samt en god funktion mot oönskade luftrörelser och låg lokaltemperatur. Dess djup behöver därvid endast anpassas till ridåns utbredning och icke till transportfordonens längd.

1.4 Projektet

Utförd litteraturstudie gav inte uppgifter om återstyrningsridåns funktionssätt och då främst ur energitransportsynpunkt. Detta medförde behov av att skapa en modell från tillgängliga principiella uppgifter och försök baserade på dessa. För att kunna variera och kontrollera de faktorer som bestämmer energitransporten i luftridåttillämpningarna fordrades modellförsök.

Eftersom en horisontellt blåsande neutralluftstridå ger kraftiga luftrörelser i vistelsezonen på motsatt sida från donet räknat, har, för de jämförande fullskaleförsöken, valts en vertikalt riktad luftridå.

En riktig dimensionering av en luftridå kräver kunskaper om de meteorologiska förhållandena omkring porten, liksom om dess väderstreckorientering, eftersom belastningen på en luftridå varierar för olika väderstreck.

Hela projektets syfte har därför varit att:

1. Söka en teori för värmetransporten genom en nedifrån vertikalt riktad luftridå under påverkan av vind.

2. Undersöka hur en till luftridån, enligt föregående punkt, anbringad sluss med återstyrningsskärm inverkar på värmetransporten genom ridån.
3. Skissa en modell för att relatera vind och temperaturförhållanden i fritt läge till det som gäller vid en luftridå.
4. Ta fram vind- och temperaturstatistik i fritt läge för olika orter i Sverige.

Projektet har som primärt mål haft att minimera värmetransporten genom luftridåer samt ge ett ändamålsenligt underlag för beräkning av energibesparingen vid användandet av luftridåer för olika orter i Sverige.

Den meteorologiska delen av projektet redovisas på grund av sin speciella karaktär i en separat rapport.

2. MODELLFÖRSÖK

2.1 Modellagarna

Det är inte möjligt att teoretiskt bygga upp en komplett modell och därför krävs experiment för att bestämma en modell och ingående variabler. Detta experimentella arbete kan naturligtvis göras på den apparat för vilken resultaten önskas. Stora framsteg gentemot en ren beräkning kan t ex vid studiet av luftströmningar göras i skalmodeller. Användningen av sådana har stora ekonomiska fördelar, och förutom de ekonomiska vinsterna, sparas också tid och utrymme.

Vid användningen av skalmodeller erhålls resultat under vissa förhållanden och appliceras på andra. Detta kan göras och rättfärdigas om vissa likformighetslagar innehålls. Lagarna tillåter att beteendet hos en fluid under vissa omständigheter relateras till samma eller en annan fluid under andra omständigheter.

För att jämförelsen mellan fullskala och modell ska vara giltig krävs fysikalisk likformighet mellan de fysiska kvantiteter, för vilka likformigheten gäller. Fysikalisk likformighet är alltså ett uttryck som täcker ett antal olika typer av likformighet. Dessa är geometrisk, kinematisk, dynamisk och termisk likformighet.

Geometrisk likformighet innebär likformighet i form, dvs förhållandet mellan en längd i det ena systemet och motsvarande längd i det andra systemet är detsamma för alla längder.

Kinematisk likformighet innebär likformighet i rörelse, dvs hastigheterna hos korresponderande delar av fluiderna står i ett fast förhållande till varandra vid varje tidpunkt. Dessutom är accelerationen för korresponderande fluiddelar likformig.

Dynamisk likformighet innebär likformighet mellan krafter, dvs krafterna i en punkt i det ena systemet står i ett fast förhållande till krafterna i motsvarande punkt i det andra systemet. För fullständig dynamisk likformighet ska många krav uppfyllas, och det är oftast omöjligt att uppfylla dem alla samtidigt. Som tur är, förekommer sällan alla krafter samtidigt, och dessutom har en del försumbar effekt. Detta gör det möjligt att koncentrera sig på de mest väsentliga storheterna.

Termisk likformighet innebär att temperaturdifferenserna står i ett fast förhållande mellan fullskala och modell.

För att bestämma de likformighetskriterier som är tillämpliga för icke-isotermisk turbulent strömning, kan man använda sig av de differentialekvationer vilka tillsammans med gränsvillkoren anger flödes- och temperaturfördelningen. De aktuella differentialekvationerna är kontinuitets-, rörelse- och energiekvationerna.

Kontinuitetsekvationen:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad 2.1$$

Rörelseekvationen:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial \tau} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u}{\partial x_k} \right) + \rho g_i \quad 2.2$$

Inom det temperaturområde man i praktiken arbetar kan ρ och η anses som konstanta utom för lyftkraften ρg_i , vilken beror på densitetsskillnader. Enligt Boussinesqapproximationen kan ρ i lyftkraftstermen skrivas som $\rho = \rho_c (1 - \alpha \Delta \theta)$ där ρ_c = densiteten vid en referenstemperatur, $\Delta \theta$ avvikelser från denna temperatur samt α värmeutvidgningskoefficienten. Med denna approximation fås rörelseekvationerna till:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial \tau} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho_c g_i \alpha \Delta \theta \quad 2.3$$

där $P = p + \rho_c g_i h$ och h en höjd.

Energiekvationen:

Om flödet kan anses som inkompressibelt och om friktionsenergin kan försummas fås den s k energiekvationen:

$$\rho_c c_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u_k \frac{\partial \theta}{\partial x_k} \right) = \lambda \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x_k} \right) \quad 2.4$$

Med dynamisk respektive termisk likformighet menas att kraft- respektive temperaturfälten i fullskala och modell är identiska, då de uttrycks i normaliserade längder, hastigheter och temperaturer. Skriver man om differentialekvationerna med hjälp av de normaliserade variablerna:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i}{l_c}, \quad \hat{u}_i = \frac{u_i}{u_c}, \quad \hat{P} = \frac{P}{\rho_c u_c^2 l_c}, \quad \hat{\tau} = \frac{u_c \tau}{l_c}$$

$$\text{och } \hat{\theta} = \frac{\theta - \theta_c}{\Delta\theta_c}$$

får man:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial \hat{x}_i} = 0 \quad 2.5$$

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial \hat{\tau}_i} + \hat{u}_k \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial \hat{x}_k} = \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{x}_i} + \frac{\eta_c}{\rho_c u_c l_c} \frac{\partial}{\partial \hat{x}_k} \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial \hat{x}_k} \right) - \frac{g_i l_c \Delta\theta_c}{u_c^2} \hat{\theta} \quad 2.6$$

$$\frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \hat{\tau}} + \hat{u}_k \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \hat{x}_k} = \frac{\lambda}{\rho_c c_p u_c l_c} \frac{\partial}{\partial \hat{x}_k} \left(\frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \hat{x}_k} \right) \quad 2.7$$

där l_c , u_c samt $\Delta\theta_c$ är karakteristisk längd, hastighet samt temperaturdifferens hos strömningen.

Genom att utelämna index c får man:

$$\frac{\eta}{\rho u l} = \frac{1}{Re} = \frac{\text{viskositetskraften}}{\text{tröghetskraften}} \quad 2.8$$

Re = Reynolds tal

$$\frac{g l \alpha \Delta\theta}{u^2} = Ar = \frac{\text{lyftkraften}}{\text{tröghetskraften}} \quad 2.9$$

Ar = Arkimedes tal

$$\frac{\lambda}{\rho c_p u l} = \frac{1}{Re Pr} = \frac{\text{värmtransporten genom ledning}}{\text{värmtransporten genom konvektionen}} \quad 2.10$$

Pr = Prandtls tal

Om de dimensionslösa talen Re, Ar och Pr nu är lika, samtidigt som de dimensionslösa gränsvillkoren är identiska, innebär det att strömnings- och temperaturfälten i fullskala och modell är

lika. Detta gäller vare sig strömningen är laminär eller turbulent, eftersom de ursprungliga ekvationerna beskriver båda. En svårighet är emellertid att både Re och Ar aldrig kan vara lika mellan modell och fullskala vid samma tillfälle, så länge luft används i båda systemen. Om modellen t ex är i skala 1:5 så skulle, om Ar ska vara lika samtidigt som Re , temperaturdifferensen i modellen behöva vara 125 ggr den i fullskala, vilket naturligtvis är omöjligt. Möjligheten att använda andra fluider föreligger naturligtvis. Eftersom kinematiska viskositeten för vatten är ca 15 ggr mindre än den för luft vid 20°C, skulle modellförsök i vatten kunna vara en möjlighet, vid t ex undersökning av strömningen i en luftrida. Denna möjlighet har emellertid inte funnit någon större spridning, eftersom vattenförsök har andra nackdelar; kvantitativa resultat är svåra att nå och vattnets absorption av värmestrålning gör att ytterligare en term adderas till energiekvationen. Vill man nå samtidig likhet för Re , Ar - och Pr -talen är det ytterligt svårt att finna en lämplig fluid för modellförsök, speciellt om längdskalan ska vara väsentligt olika.

Lyckligtvis har det från experiment visat sig att för icke-isotermisk turbulent strömning är likheten för Arkimedes tal mycket väsentligare än likheten för Reynolds tal. När Reynolds tal har överstigit ett visst värde blir strömningen oberoende av storleken på Re . Enligt /1/ blir strömningen vid försök med luft Re -oberoende vid Re större än 5 000-8 000. Enligt Rolloos /9/ kan man emellertid ej ge ett fixt värde över vilket strömningen är Re -oberoende på grund av variationerna i lufttillförsel och geometrier. Detta värde måste därför bestämmas experimentellt för varje modellförsök, men torde ändå ligga i den ovannämnda storleksordningen.

2.1.1 Begränsningar för lufthastigheten i skalmodell

En nedre begränsning av utloppshastigheten i luft-ridåmodellen fås av att hastigheten ej får bli så låg att den blir omätbar. Om hastigheten i strålens mitt vid ridåns övre del sjunkit till mindre än ca 0.3 m/s, blir den svår att särskilja från rummets normala luftrörelser som ligger kring 0.15-0.2 m/s. En övre begränsning av ridåns utloppshastighet ges av den hastighet man kan få i vindtunneln. Om vi antar att ridåhastigheter respektive intressanta vindhastigheter i verkligheten ligger kring 30 m/s respektive 6 m/s, får vi ridåmodellens utloppshastighet till maximalt 5 ggr vindtunnelhastigheten.

2.1.2 Krav på vindtunnelns tvärsnittsarea

I en vindtunnel gäller att förhållandet mellan modellens frontarea och vindtunnelns tvärsnittsarea ej får vara för stort. Om modellen befinner sig för nära tunnelns väggar, får man en s k blockeringsseffekt, vilken kraftigt påverkar mätresultatet. För att undvika denna effekt bör, enligt Jensen et al /10/ modellens frontarea ej vara större än 5 % av vindtunnelns tvärsnittsarea.

2.1.3 Exempel på modellstorlek

Låt oss utgå från en luftrida som i full skala har en bredd på 5 m och en höjd på 3 m. Spaltbredden är 2 cm och utloppshastigheten 40 m/s. Temperaturdifferensen över ridån är 30°C. Som karakteristisk längd lämpar sig spaltbredden, som karakteristisk hastighet utloppshastigheten och som karakteristisk temperaturdifferens temperaturdifferensen över ridån. För fullskaleridån får vi då Reynolds tal till $40 \cdot 0.02 / 16 \cdot 10^{-6} = 50\ 000$, och Arkimedes tal till $9.81 \cdot 0.02 \cdot 30/273 \cdot 1\ 600 = 13.4 \cdot 10^{-6}$.

Skala 1:5

Väljer vi en skala på 1:5 får vi en bredd på 1 m, en höjd på 0.6 m och en spaltbredd på 4 mm. För att överskrida det värde för Re-oberoende som Baturin givit, får vi utloppshastigheten till minst $5\ 000 \cdot 16 \cdot 10^{-6} / 0.004 = 20$ m/s. Denna utloppshastighet ger, enligt Elrod /11/, vid ridåns övre del en hastighet i strålens mitt på ca 4.5 m/s, dvs klart över 0.3 m/s. Eftersom ridån ej bör uppta mer än 5 % av vindtunnelns tvärsnittsarea, blir vindtunnelarean 12 m². En vindtunnelhastighet på 0.2 · 20 m/s = 4 m/s ger ett flöde i vindtunneln på 48 m³/s. Likheten för Arkimedes tal ger slutligen temperaturdifferensen över modellridån till 38°C.

Skala 1:10

Enligt samma resonemang som ovan får vi ridåmodellens mått till 0.5 m ggr 0.3 m. Övriga data blir:

Spaltbredd	2 mm
Utloppshastighet	40 m/s
Vindtunnelarea	3 m ²
Vindtunnelhastighet	8 m/s
Luftflöde i vindtunneln	24 m ³ /s
Temperaturdifferens	300°C

Skala 1:3

Ridåbredd	1.6 m
Ridåhöjd	1 m
Spaltbredd	7 mm

Utloppshastighet	11.5 m/s
Vindtunnelarea	32 m ²
Vindtunnelhastighet	2.3 m/s
Luftflöde i vindtunneln	73 m ³ /s
Temperaturdifferens	7.5°C

2.1.4 Faktorer som påverkar valet av skala

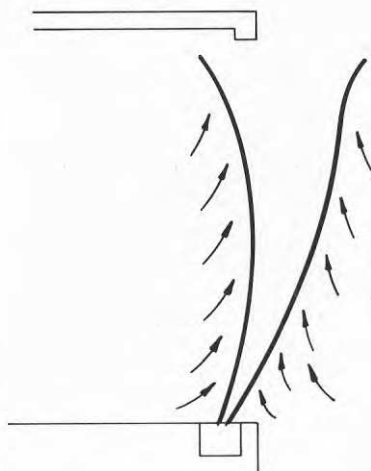
Liten skala:

Fördelar	Små utrymmeskrav Små luftflöden i vindtunneln
Nackdelar	Finmekanik krävs för att tillverka små spalter. Mätningar i ridån försvåras genom den lilla storleken. Höga temperaturdifferenser över ridån.

För den större skalan gäller att den har den lilla skalans nackdelar som fördelar och tvärtom.

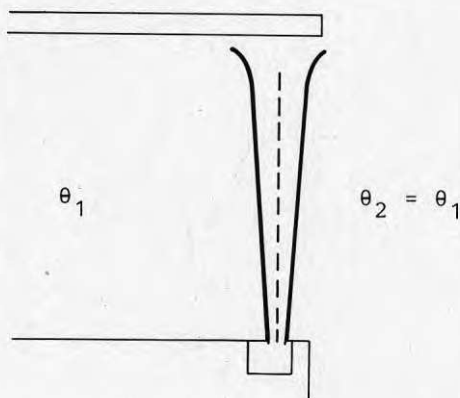
2.2 Värmetransport genom luftridåer

Större delen av den värmetransport som sker genom en luftridå beror på massutbyte i ridån. Detta massutbyte orsakas i sin tur av turbulensen i ridåstrålen. Under ridåns utbredning medrycks luft från både den varma och den kalla sidan, se figur 2.1.

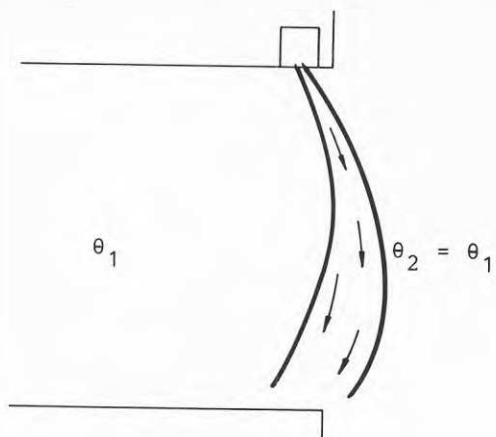


Figur 2.1 Luftinblandning i ridåstråle

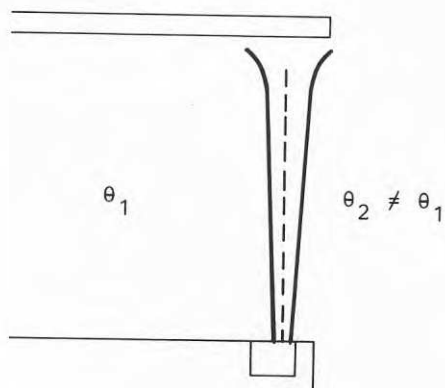
Genom massutbytet i ridån uppvärms den kalla luften och har vid ridåns övre del (vid inblåsning nedifrån) högre temperatur än då den ryckts in i ridån. Temperaturändringen hos den medryckta varma luften beror på ridåluftens temperatur. Om ridåtemperaturen är lika med medelvärdet av den varma och den kalla sidans temperaturer, dvs ridån är av recirkulerande typ, kyls den medryckta varma luften ned under ridåns utbredning. Värmetransporten genom en luftridå bestäms alltså av strömings- och temperaturförhållanden under vilka ridån arbetar. Man kan lämpligen indela de olika förhållandena i termisk symmetri eller asymmetri för ridån, respektive om strömningen i ridån är symmetrisk eller asymmetrisk. Se figur 2.2-2.5. Med termisk symmetri avses att båda sidorna av ridån har samma temperatur, dvs temperaturdifferensen över ridån är noll. Detta fall kan vara intressant t ex vid studiet av masstransport, men är givetvis ointressant då det gäller värmetransport. Med symmetrisk strömning avses att strålens hastighetsprofil under hela strålens utbredning är symmetrisk kring en vertikal linje genom inblåsningsspalten.



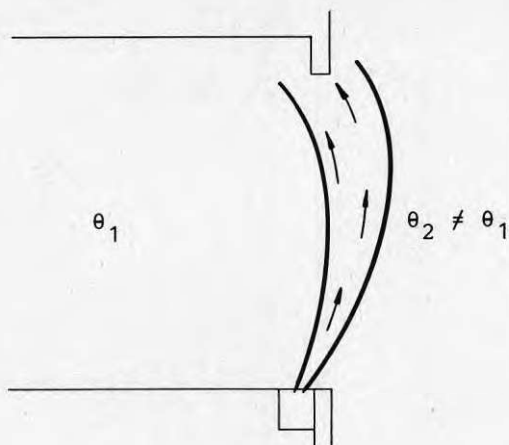
Figur 2.2 Termisk symmetri, symmetrisk strömning



Figur 2.3 Termisk symmetri, asymmetrisk strömning



Figur 2.4 Termisk asymmetri, symmetrisk strömning

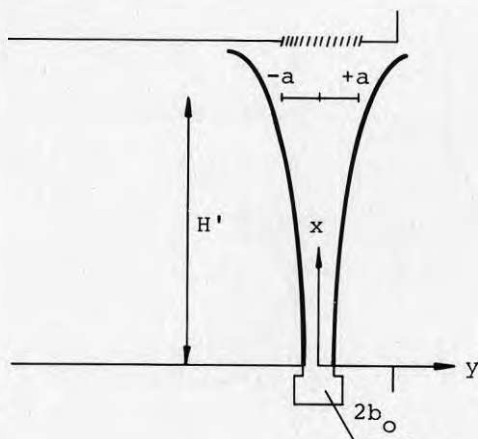


Figur 2.5 ~~Termisk~~
ning

im-

2.2.1 En modell för värmetransport

För att få en enkel modell för värmetransporten genom en ridå kan man undersöka värmetransporten för en termiskt asymmetrisk luftridå med symmetrisk strömning. Denna ridå antas också vara av recirkulerande typ. Samma luftflöde som blåsts in i ridån sugas alltså ut genom ett galler. Ingen uppvärmning av ridåluften antas ske, dvs strålens temperatur blir lika med medeltemperaturen av den kalla och den varma sidans temperaturer. Figur 2.6 visar den undersökta ridån och de storheter som är viktiga i sammanhanget.



Figur 2.6 Luftridå av recirkulerande typ

Eftersom luft rycks in i ridån under dess utbredning, ökar luftmängden i ridån. Vid en höjd H kan man definiera "-a" och "a" sådana att den genom inblåsningsspalten inblåsta luftflödet:

$$\dot{q}_0 = \int_{-a}^{+a} \rho u_c dy \quad 2.11$$

Då samma mängd \dot{q}_0 som blåsts in genom inblåsningsspalten sugts ut genom gallret, måste samma volym luft som ryckts in i ridån från den kalla sidan, exfiltreras ur strålen tillbaka till den kalla sidan vid ridåns övre del. Den värmetransport som sker genom luftridån kan då uttryckas som den värmeeffekt som avges med luften till den kalla sidan. Denna värmeeffekt kan skrivas som:

$$P = \int_{+a}^{\infty} \rho c_p u_c \Delta\theta_{c,o} dy \quad 2.12$$

Hastigheten u_c ges av Reichardt /3/:

$$u_c = u_0 \sqrt{\frac{2 b_0}{\sqrt{\pi} C_m x}} \exp \left(- \left(\frac{y}{2 C_m x} \right)^2 \right) \quad 2.13$$

Temperaturen ges av Hetsroni /5/:

$$\Delta\theta_{c,o} = \frac{\Delta\theta_{tot}}{2} (1 + \operatorname{erf}(\beta)) \quad 2.14$$

$$\text{där } \beta = \frac{y}{\sqrt{2} C_m x}$$

$\operatorname{erf}(x)$ är en felfunktion given av ekvationen:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \quad 2.15$$

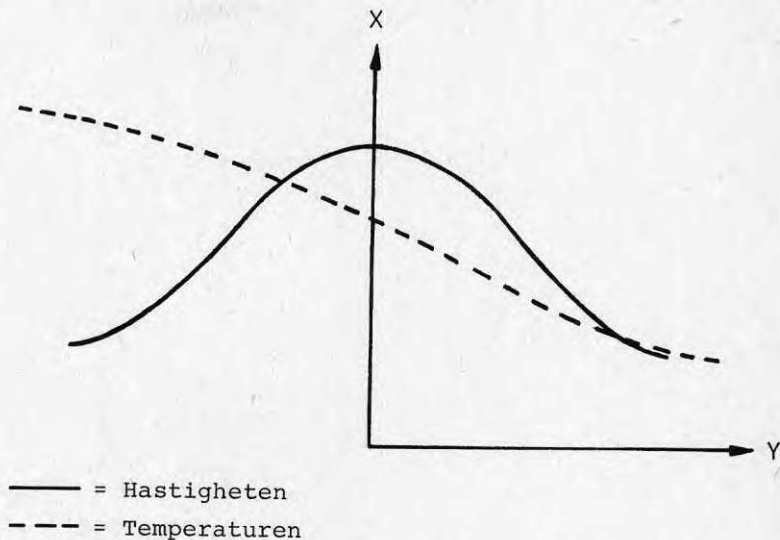
Värden för denna funktion finns tabellerade av bl a Carslaw & Jaeger /12/. Typiska hastighets- och temperaturfördelningar för en ouppvärmad stråle med symmetrisk strömning ges i figur 2.7.

Sätter man in uttrycken för u_c och $\Delta\theta_{c,o}$ i ekvationen för P och samtidigt sätter $x = H$ får man:

$$P = \rho c_p u_0 \Delta\theta_{tot} \sqrt{\frac{b_0}{2 \sqrt{\pi} C_m H}} \int_{+a}^{\infty} \exp \left(- \left(\frac{y}{\sqrt{2} C_m H} \right)^2 \right) dy$$

$$\left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{y}{\sqrt{2} C_T H'} \right) \right) dy$$

2.16



Figur 2.7 Hastighets- och temperaturfördelning för en uppvärmd luftstråle

Genom uppmätningar av hastighets- och temperaturfördelningen i en provridå, kan man bestämma konstanterna C_m och C_T samt värdena för a och H' . Eftersom integralen i ekvationen ovan inte är direkt lösbar, måste den integreras numeriskt. Detta görs lättast med hjälp av en dator. Med ekvationen ovan kan man alltså få fram värmetransporten vid olika värden på u_0 och b_0^2 för en icke uppvärmd, termiskt asymmetrisk, recirkulerande ridå med symmetrisk strömning.

Integralen ovan är också möjlig att lösa för hand om man använder sig av Simpson's formel, vilken lyder:

$$\int_{x_{n-1}}^{x_{n+1}} f(x) dx = \frac{1}{3} h (f_{n-1} + 4 f_n + f_{n+1})$$

2.17

Genom användandet av denna formel kan värmetransporten genom en ridå av den typ som definierades i förra stycket beräknas. Antar vi att $H = 6$ m, $\Delta\theta_{tot} = 30^\circ\text{C}$, $2b_0 = 0.036$ m och konstanterna C_m och C_T är 0.109 respektive 0.154 får vi värmetransporten p vid olika värden på a .

a (m)	p (kW/m)
∞	0
1.0	34
0.9	45
0.8	59
0.7	75
0.6	94
0.5	114
0.4	136
0.3	159
0.2	182
0.1	204
0	226

Som framgår av figur 2.6 är a ett mått på hur stor del av luftmängden i strålen som sugts ut genom gallret. Då a är noll, tas ingen luft ut genom gallret utan hälften av luftflödet i strålen går över till den kalla sidan vid ridåns övre del (den andra hälften går över till den varma sidan). Då $a = \infty$ sugts all luft i strålen ut genom gallret.

2.2.2 Ridåer med icke-symmetrisk strömning

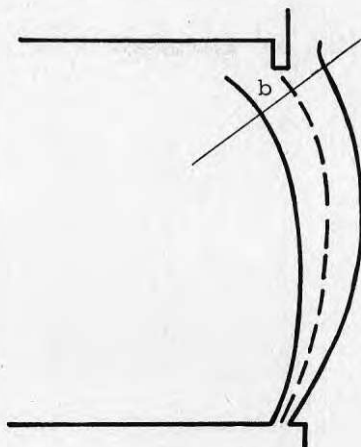
I ovanstående modell har utgått från en icke uppvärmd luftridå med symmetrisk strömning och recirkulation. En utvidgning av modellen kan göras den tillämpbar även för en uppvärmd, icke-recirkulerande ridå med asymmetrisk strömning.

Då ridån är uppvärmd och strömningen är asymmetrisk gäller inte de hastighets- och temperaturfördelningar som givits av Reichard och Hetsroni. Här måste i stället fördelningarna mätas upp. Eftersom det är hastighets- och temperaturfördelningen i plan vinkelräta mot strålxaxeln som är intressanta, får man börja med att bestämma strålxaxelns läge. Detta görs genom uppsökandet av högsta hastigheten för olika höjder i ridån.

Då strålxaxelns läge fastslagits, bestämmer man det plan vinkelrätt mot strålxaxeln som ligger alldeles innan ridån delar sig vid portens övre del. I detta plan, som framgår av figur 2.8, mäter man upp hastighets- och temperaturfördelningen.

Punkterna "+a" och "-a" som definierades för ridå med utsugningsgaller, motsvaras i den icke-recirkulerande ridån med asymmetrisk strömning av punkten "b". Punkten "b" är den punkt kring vilken

ridån delar sig åt olika håll vid ridåns övre del.



Figur 2.8 Icke-recirkulerande luftridå med osymmetrisk strömning

Eftersom ridån är uppvärmd, blir inte den värmeeffekt som tas från den varma sidan lika med den värmeeffekt som avges till den kalla sidan. Effekten som tas från den varma sidan blir:

$$P = - \int_{-\infty}^b \rho c_p u_c \cdot \Delta\theta_{c,i} \cdot dy \quad 2.18$$

där $\Delta\theta_{c,i}$ är skillnaden mellan temperaturen i en punkt (x,y) och temperaturen på den varma sidan av ridån.

För att få den totala värmeförlusten genom porten bör man till detta värmefflöde addera den värme som tillförts ridåluften:

$$P_0 = \dot{m} c_p \Delta\theta_{0,i} \quad 2.19$$

där $\Delta\theta_{0,i}$ är den temperaturhöjning ridåluften får vid uppvärmningen. Totala värmeeffekten genom porten blir då per meter portbredd:

$$P_{\text{tot}} = - \int_{-\infty}^b \rho c_p u_c \Delta\theta_{c,i} dy + 2 b_0 u_0 \rho c_p \Delta\theta_{0,i} \quad 2.20$$

Efter uppmätningar av hastighets- och temperaturfördelningen kan man alltså bestämma värmetransporten genom ridån enligt ekvationen, med hjälp av

Simpson's formel för att lösa integralen.

2.3 Modellstorlek

För att beräkningar av värmetransporten genom en luftridå under påverkan av vind ska kunna göras, bör, med hänsyn till kostnader och försöksnoggrannhet, en luftridå i modell med tillhörande vindtunnel byggas. Luftridån, med demonterbar sluss, placeras i öppningen till en modellbyggnad. Framför denna byggnad placeras vindtunneln, vars uppgift är att ge en luftströmning som efterliknar vind. Med utgångspunkt från vad som tidigare skrivits om modeller kan man bestämma mått och lufthastigheter för modellridån och vindtunneln. Då en vanlig ridåstorlek är 6 m x 6 m, är det lämpligt att modellridån har en sådan ridå som fullskaleförebild. Med de värden som gäller för en sådan ridå blir skalan 1:7 lämplig för modellen, se avsnittet om modeller. Denna skala och de värden som gäller för en fullskaleridå i ovan nämnda storlek ger följande för ridåmodellen:

Ridåstorlek	0.86 m x 0.86 m
Spaltbredd	5 mm
Utloppshastighet ur spalten	19 m/s
Temperaturdifferens över ridån vid en verklig temperaturdifferens på 30°C	37°C

Då påverkan av temperatur och lufthastighet är märkbar ca 20 m bakom en fullskaleridå, bör modellbyggnaden vara ca 4 m djup. Lämplig bredd och höjd är 4 m respektive 2 m.

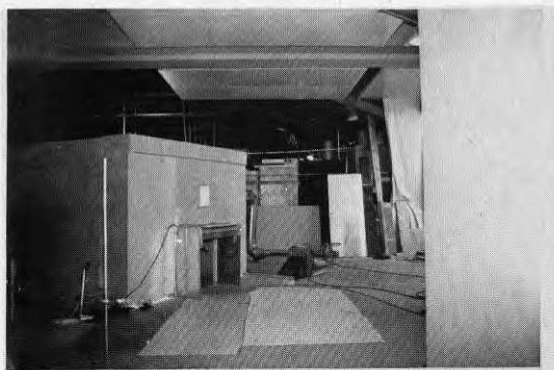
Vindtunnelns tvärsnittsarea bör vara ca 14.7 m², vilket ger dimensionerna 3.8 m x 3.8 m. För att efterlikna en vindhastighet på 6 m/s ska hastigheten i vindtunneln vara 2.5 m/s.

2.4 Försöksanordning

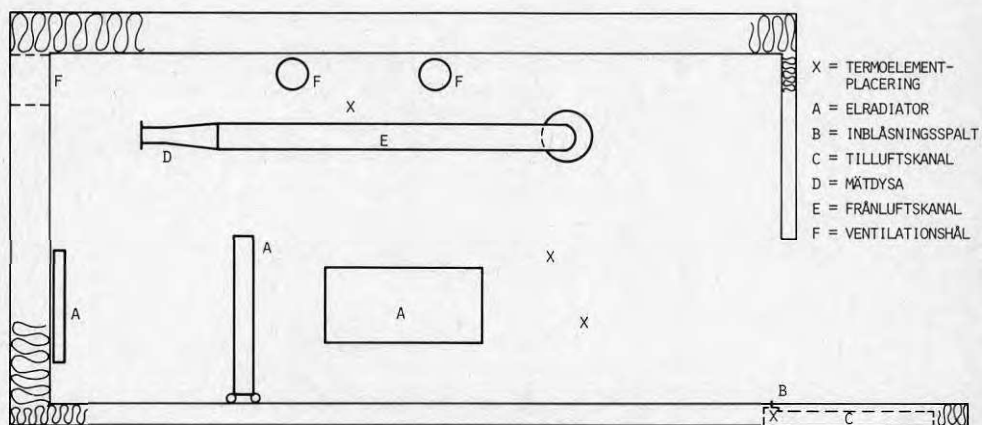
Modellbyggnaden som blir vald efter studium av modellagarna i skala 1:7 av en tänkt fullskalebyggnad, figur 2.9, har längden 4 m, bredden 2.5 m och höjden 2 m och visas i snitt och planvy på figurerna 2.10 och 2.11. Den öppna porten på ena kortsidan är kvadratisk med sidan 0.86 m.

40 mm innanför porten är en luftridåspalt nedsänkt i golvet. Denna spalt är 885 mm lång och 5 mm bred. Inblåsningvinkeln kan varieras mellan -30° och +30°. Byggnaden är isolerad med 9.5 cm mineralull i golv, 5 cm i framväggen samt 19 cm i övriga väggar och i tak. Luften genom ridåspalten tillförs via en rektangulär, vinklad

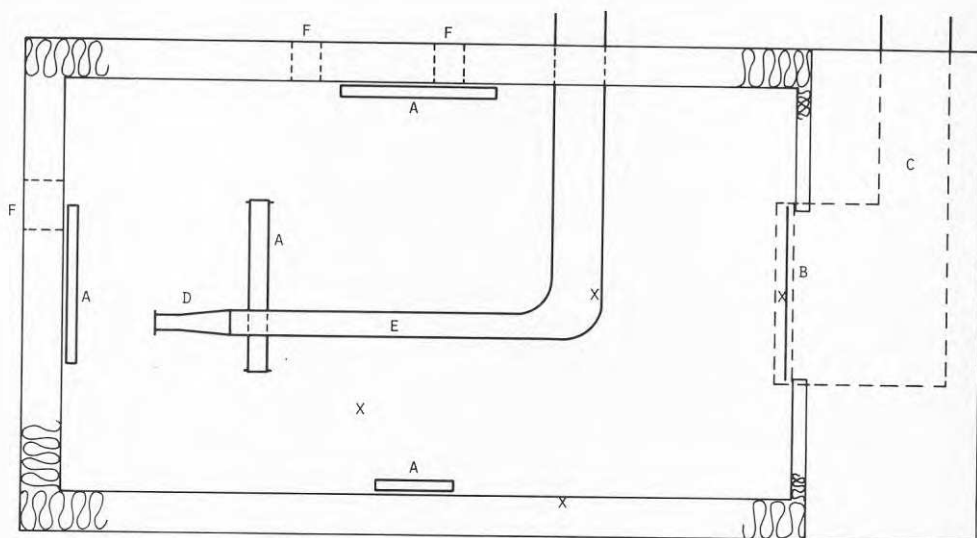
kanal, placerad i den bottenplatta som skjuter ut framför byggnaden.



Figur 2.9 Vy mot modellbyggnadens portsida

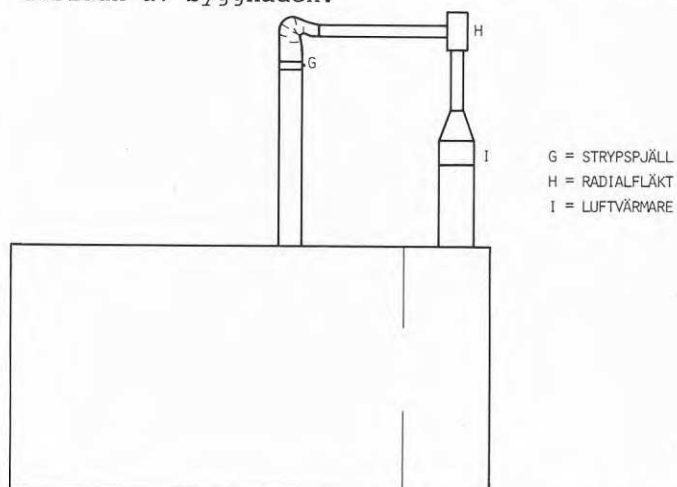


Figur 2.10 Skiss i tvärsnitt över modellbyggnaden



Figur 2.11 Planiskiss över provutrustning i modellbyggnaden

I normalfallet, under vilket de flesta mätningarna är gjorda, tas ridåluften inifrån byggnaden. Med en fläkt transporteras ridåluften i ett kanalsystem och värms i en luftvärmare före inblåsningen genom spalten, figur 2.12. För några mätfall har luften tagits direkt till fläkten från utsidan av byggnaden.

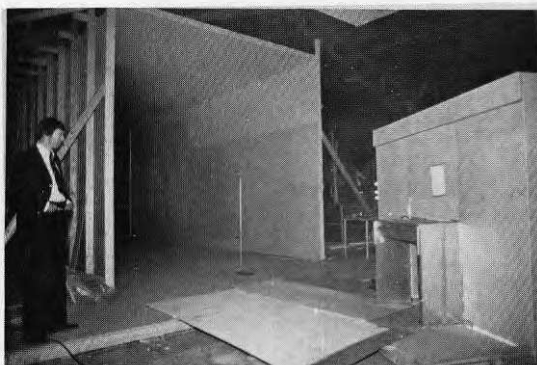


Figur 2.12 Planiskiss över tilluftssystem för luft-ridån

Normalt är byggnaden tät förutom portöppningen, men några mätningar har gjorts med ventilationshål upptagna enligt figur 2.10 och 2.11.

Den luftvärmare som använts för uppvärmning av ridåluften har en inställbar effekt på 0, 5 eller 10 kW. För uppvärmning av modellbyggnaden finns 4 elradiatorer med en sammanlagd effekt på ca 2.8 kW.

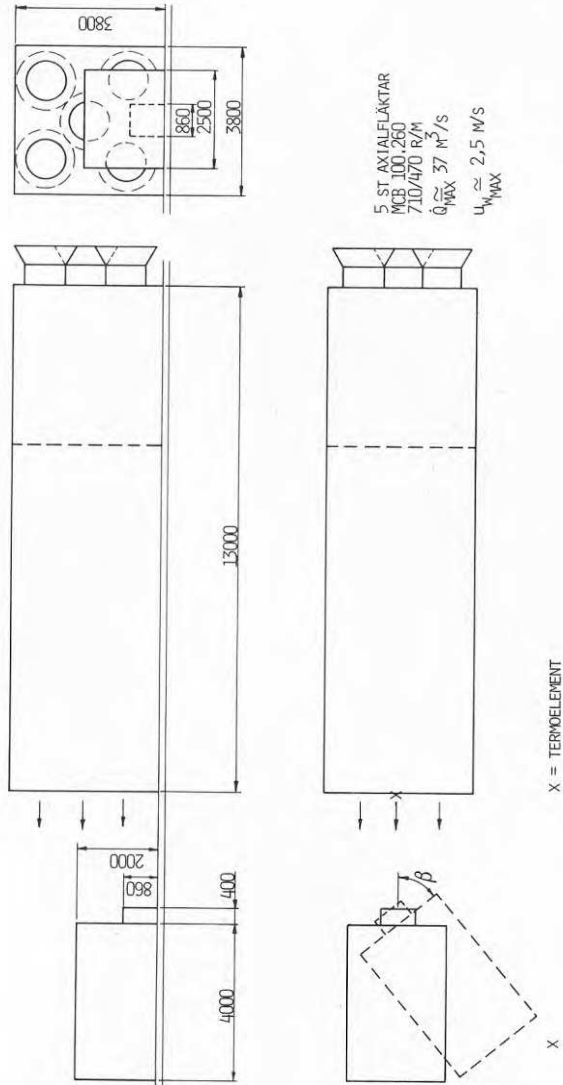
Inverkan av vindanfall mot portöppningen har kunnat prövas genom att modellbyggnaden placerats framför en vindtunnel, figur 2.13 och 2.14. Vindtunneln har en längd på 13 m och ett tvärsnitt på 3.8 x 3.8 m. Den är försedd med 5 axialfläktar utrustade med tvåhastighetsmotorer. 4 m framför fläktarna sitter en perforerad plåt med 42 % genomsläppsarea för att utjämna lufthastigheten. Med högsta hastigheten hos fläktarna fås en lufthastighet vid vindtunnelns slut som är 1.95 m/s.



Figur 2.13 Vindtunnelöppning och modellhusets fasad och portplan i 30° mot vindriktning

För att det ska vara möjligt att variera vindriktningen mot modellbyggnaden, har denna försatts med 6 st hjul. Därigenom är det möjligt att vrida hela byggnaden i förhållande till vindtunneln.

Registrering av temperaturer har skett med termoelement koppar-konstantan. Sammanlagt har 46 termoelement använts. 40 av dessa har använts för uppmätning av temperaturprofiler i ridåstrålen. Dessa termoelement har med 10 mm inbördes avstånd suttit monterade på en rörlig arm som syns innanför porten på figur 2.15. Med hjälp av denna arm har temperaturprofiler kunnat uppmätas för varje tänkbart snitt genom luftridåstrålen. Övriga 6 termoelement har placerats i och utanför modell-

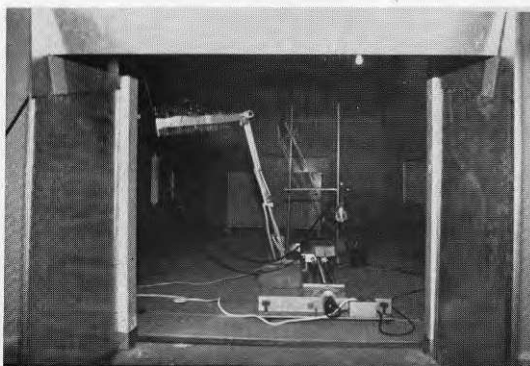


Figur 2.14 Skiss över försöksanordning

byggnaden, enligt figur 2.14, ett på baksidan av byggnaden, 650 mm över golvet. Övriga termoelements placering framgår av figur 2.10 och 2.11.

Tilluftstemperaturen i luftridån har uppmätts med ett termoelement placerat i luftkanalen direkt före inblåsningsspalten. Lufttemperaturen inne i byggnaden har uppmätts i två punkter, en 1 m innanför den öppna portens mitt, den andra 2.25 m in i byggnaden på höjden 1.5 m. Det sistnämnda termoelementet har därmed registrerat temperaturen hos den luft som sugits ut från byggnaden. Slutligen har ett termoelement suttit placerat i byggnadens innervägg för att kunna ge besked om eventuell värmeackumulering i väggen.

De 46 termoelementen har varit anslutna till en 48-punkters millivoltmeter av typ Honeywell-Brown. Som referenstemperatur har isbad använts.



Figur 2.15 Mätvagn med termistoranemometer typ TSI 1610 och "termoelementkratta"

För uppmätning av hastigheter har en anemometer av typ TSI 1610 använts. Denna anemometer, som placerats på skruvtravers, visas tillsammans med "termoelementkratta" på figur 2.15. Traverseringshastigheten har varit 5 mm/s. Anemometersondens vertikala läge vid traverseringen har kunnat varieras för uppmätning av hastighetsprofiler i ridån på olika höjd. Den linjariserade utsignalen från anemometern har registrerats på en linjeskripare typ Philips PM 8252. Den av vindtunneln genererade lufthastigheten har med anemometern uppmätts i ett vertikalt plan 1.5 m framför modellbyggnadens port. Vid de fall då byggnaden gjorts otät genom att ventilationshål tagits upp, har lufthastigheten genom dessa uppmätts med en anemometer av typ Alnor.

Den till elradiatorerna tillförda effekten har uppmätts med en på modellbyggnadens utsida placerad kWh-mätare.

Det luftflöde som sugits ut från modellbyggnaden har kunnat bestämmas genom att luftkanalen inne i lokalen varit försedd med en inströmningsdysa. Tryckfallet i dysan har uppmätts med en mikro-manometer och omräknats till luftflöde med konstanter fastställda vid kalibrering mot normenlig strypfläns.

För att få vetskap om det luftflöde som tillförts ridån har det varit nödvändigt att bestämma läckaget från kanalsystemet. Detta har gjorts på följande sätt:

Med luftridån i drift har samtidigt luftflödet från byggnaden uppmätts med inströmningsdysan, och trycket i kanalen före inblåsningsspalten bestämts. Sedan inblåsningsspalten tejpats igen har flöde och tryck åter uppmätts. Det senare uppmätta luftflödet motsvarar då läckaget vid det samtidigt uppmätta trycket i kanalen. Efter-som läckaget från en kanal kan sättas proportionellt mot trycket upphöjt till $2/3$, kan läckaget vid normalfallet med öppen spalt bestämmas.

2.5 Mätmetodik

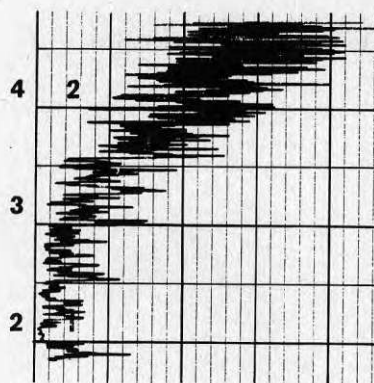
2.5.1 Temperaturmätning

Uppmätningen av temperaturprofiler genom ridåstrålen har skett med 40 termoelement kopplade till en 48-punkters millivoltmeter av fabrikat Honeywell-Brown. Då millivoltmetern ej kan registrera alla punkter samtidigt, har mätpunkterna fått registreras efter varandra. En genomgång av samtliga mätpunkter har tagit ca 2 min, dvs ca 3 sek per mätpunkt. Temperaturerna i och utanför byggnaden har inte heller de kunnat registreras samtidigt.

2.5.2 Hastighetsmätning

Den använda anemometersonden har traverserats genom ridåstrålen parallellt med byggnadens golv och ej vinkelrätt mot strålexeln. Detta har varit möjligt genom att sonden är relativt riktningso känslig. Den maximala avvikelser vid de aktuella vinkelfelen är 5 %.

Från linjeskrivaren fås utskrifter enligt figur 2.16. Från dessa utskrifter har en grafisk bestämning av hastighetsmedelvärdet gjorts.



Figur 2.16 Registrering av hastighetsprofil i ridå

2.5.3 Mätning av radiator effekt

Den till radiatorerna tillförda radiator effekten har bestämts genom uppmätning av tiden för 20 varv (motsvarande 1/60 kWh) på kWh-mätaren. Tidmätningen har gjorts med kronograf.

2.6 Beräkningsmetodik

2.6.1 Beräkning av värmeförlust genom uppmätning av hastighet och temperaturprofiler

Om en luftridå befinner sig mellan två utrymmen med olika temperaturer fås en temperaturprofil genom strålen som kan överlagras på hastighetsprofilen enligt figur 2.7. Beroende på temperaturen hos ridåns primärluft (den luft som tillförts genom inblåsningsspalten) kan temperaturprofilens form variera, men ytterlighetspunkterna är hela tiden givna av temperaturerna på den varma sidan och den kalla sidan.

Då ridåstrålen från den tidigare beskrivna neutralluftridån når portens övre del, delar den sig så att en större eller mindre del av strålen går in i byggnaden. Delning bestäms av "tryckbelastningen" och inställd ridåvinkel.

På grund av turbulent massutbyte i ridån sker, som även tidigare berörts, en värmetransport inom ridån från den varma till den kalla sidan och vice versa.

En undersökning av effektbalansen för den isolerade ridån ger enligt figur 2.17:

$$P_0 + P_{i,e} + P_{o,e} = P_{i,b} + P_{o,b} \quad 2.21$$

där:

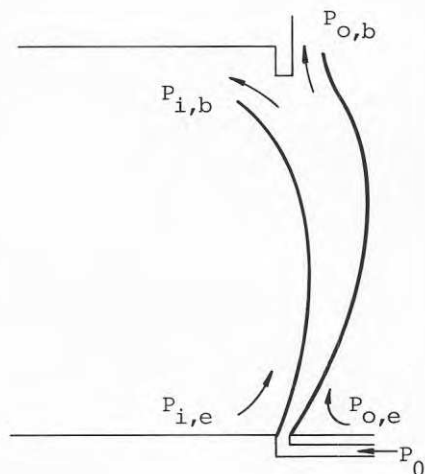
P_0 = den genom luftridåns spalt tillförda effekten

$P_{i,e}$ = effekten hos det från insidan ejekterade luftflödet

$P_{o,e}$ = effekten hos det från utsidan ejekterade luftflödet

$P_{i,b}$ = effekten hos den del av ridån som går till byggnadens insida

$P_{o,b}$ = effekten hos den del av ridån som går till byggnadens utsida



Figur 2.17 Värmebalans i en neutralluftstridå

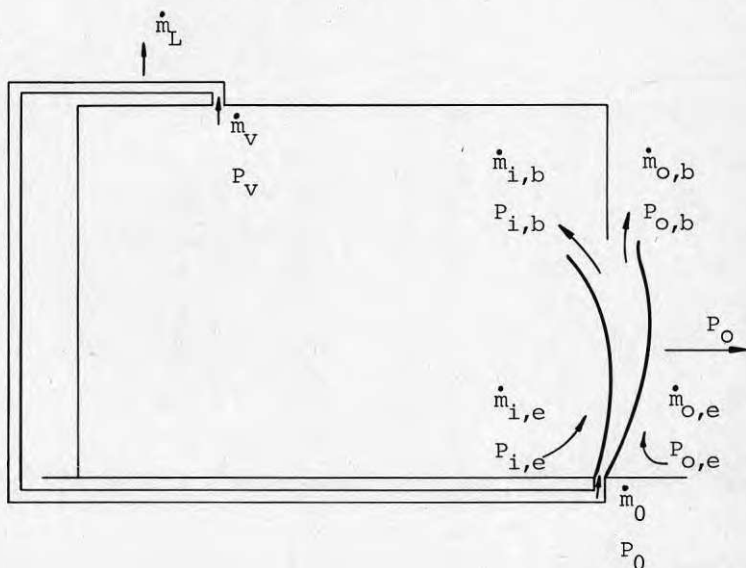
Den värmeförlust man får från insidan till utsidan genom porten är lika med tillskottet till utsidan $P_{o,b} - P_{o,e}$. Om den effekt som luftflödet från utsidan har sätts lika med noll blir effekten genom porten lika med $P_{o,b}$.

En massbalans i lokalen ger enligt figur 2.18:

$$\dot{m}_{i,b} = \dot{m}_{i,e} + \dot{m}_v \quad 2.22$$

där

- $\dot{m}_{i,e}$ = det luftflöde som medejekterats från insidan
 $\dot{m}_{i,b}$ = den del av ridån som går till insidan
 \dot{m}_v = från byggnaden utsugen ventilationsluft
 \dot{m}_0 = den till luftridåspalten tillförda primärluften $\dot{m}_0 = \dot{m}_v - \dot{m}_L$ där \dot{m}_L är läckaget från luftkanalen.



Figur 2.18 Massbalansbeskrivning för försöksanordningen

Effektförlusten genom porten P_{tot} är enligt ovan lika med:

$$P_{o,b} \Rightarrow$$

$$P_{tot} = P_0 + P_{i,e} - P_{i,b} \Rightarrow$$

$$P_{tot} = \dot{m}_0 \cdot c_p (\theta_0 - \theta_o) + \dot{m}_{i,e} \cdot c_p (\theta_i - \theta_o) - \dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_{i,b} - \theta_o)$$

$$P_{tot} = \dot{m}_0 \cdot c_p (\theta_0 - \theta_o) + (\dot{m}_{i,b} - \dot{m}_v) \cdot c_p (\theta_i - \theta_o) - \dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_{i,b} - \theta_o) \Rightarrow$$

$$P_{tot} = \dot{m}_0 \cdot c_p (\theta_0 - \theta_o) - \dot{m}_v \cdot c_p (\theta_i - \theta_o) + \dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b}) \Rightarrow$$

$$P_{tot} = P_0 - P_v + \dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b})$$

I tabell 2.1 har det på detta sätt beräknade k-värdet fått beteckningen k_1 . För vissa fall har ej hastighets- och temperaturprofiler uppmätts och därmed ej heller något k-värde beräknats.

Beräkningsexempel:

Fall 3 För detta fall gäller följande:

$$\alpha = 15^\circ \text{ ingen vind}$$

$$u_o = 17.4 \text{ m/s} \quad \dot{Q}_v = 0.090 \text{ m}^3/\text{s} \quad \dot{Q}_0 = 0.077 \text{ m}^3/\text{s}$$

Innetemperaturen vid utsugningsstället 39.2°C

Utetemperaturen 15.9°C

Detta innebär att värmeeffekten som försvinner med den utsugna ventilationsluften =

$$P_v = \dot{m}_v \cdot c_p (\theta_i - \theta_o) = 0.090 \cdot 1.11 \cdot 1007 (39.2 - 15.9) \text{ W} = 2344 \text{ W}$$

Den tillförda ridåluftens temperatur är 72.9°C , vilket innebär att den värmeeffekt som tillförts med ridåluften är:

$$P_o = \dot{m}_o \cdot c_p (\theta_o - \theta_i) = 0.077 \cdot 1.0 \cdot 1.009 (72.9 - 15.9) \text{ W} = 4429 \text{ W}$$

Hastighets- och temperaturprofilen hos den del av strålen som går in i byggnaden framgår av figur 2.19.

Mättet y anger distansen från portens mitt, räknat positivt i riktning inåt byggnaden. Som framgår är temperaturen i strålen lägre än innetemperaturen θ_i , vilket innebär att integralen

$$\int_0^\infty u_c \cdot \rho \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b}) dy \text{ blir positiv.}$$

Genom att interpolera temperaturprofilen inåt byggnaden tills $\theta_i - \theta_{i,b} = 0$ fås det värde på y som utgör övre gränsen för integralen. Numerisk integration av ovanstående integral, med värden på u och $\theta_i - \theta_{i,b}$ ur figur 2.19 ger:

$$B \int_0^\infty u_c \cdot \rho \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b}) dy = 2158 \text{ W}$$

Sålunda blir värmeförlusten genom porten P_{tot}

$$P_{\text{tot}} = P_o - P_v + B \int_0^\infty u_c \cdot \rho \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b}) dy =$$

$$4429 - 2344 + 2158 = 4243 \text{ W}$$

där:

P_V = effekten hos den från byggnaden utsugna ventilationsluften

c_p = värmekapacitivet i $J/kg.K$

θ = temperatur med index som för P och \dot{m}

P_V och P_0 kan bestämmas genom mätning av massflödena \dot{m}_V och \dot{m}_0 samt temperaturerna hos dessa.

$\dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b})$ kan bestämmas genom uppmätning av hastighets- och temperaturprofilen hos den del av luftridån som går in i byggnaden. Eftersom både hastigheten och undertemperaturen i strålen gentemot innetemperaturen varierar genom strålen integreras uttrycket enligt:

$$\dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b}) = B \int_0^{\infty} u_c \cdot \rho \cdot c_p (\Delta\theta_{i,b}) dy$$

2.24

där:

B = portens bredd

u_c = hastigheten i en punkt i strålen vid portens övre del

$\Delta\theta_{i,b}$ = skillnaden mellan byggnadens innetemperatur och temperaturen hos en punkt i strålen vid portens övre del

y = avståndet från portmitt där strålen delas. y räknas positivt inåt byggnaden

Efter uppmätning av hastighets- och temperaturprofiler kan integralen beräknas numeriskt med hjälp av t ex trapetsregeln. Då $\dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b})$ på detta bestämts fås alltså effekten genom porten till:

$$P_{tot} = P_0 - P_V + \dot{m}_{i,b} \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b})$$

2.25

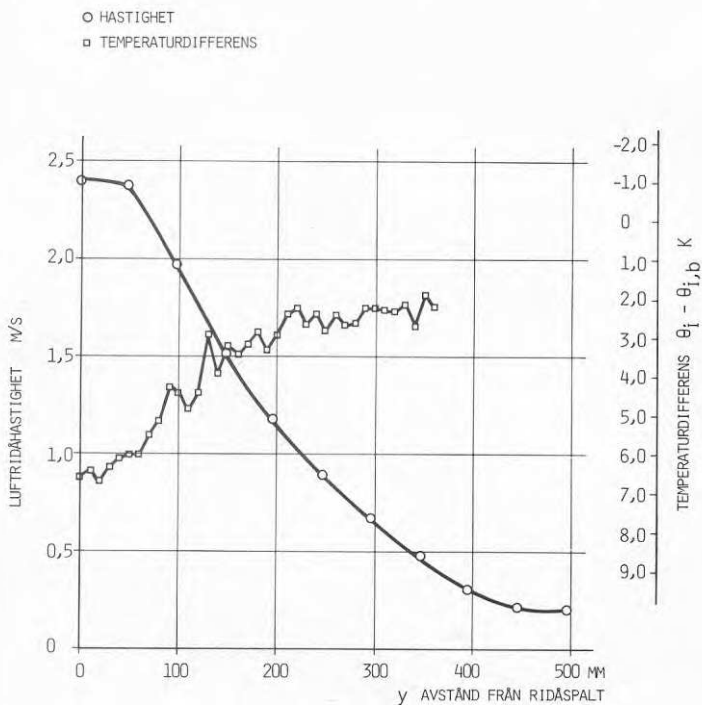
För att underlätta jämförelsen mellan olika luftridåer och med en portdörr kan ett fiktivt k-värde definieras som:

$$k = \frac{P_{tot}}{H \cdot B (\theta_i - \theta_0)}$$

2.26

där H = portens höjd

$\theta_i - \theta_0$ = temperaturdifferensen över porten



Figur 2.19 Hastighets- och temperaturprofil för fall 3

Då temperaturdifferensen över porten är 22.6°C samt portarean $0.86 \times 0.86 \text{ m}^2$, blir det fiktiva k-värdet:

$$k_1 = \frac{4243}{22.6 \cdot 0.86^2} \quad \text{W/m}^2\text{k} = 253 \text{ W/m}^2\text{k}$$

Beskrivning av den numeriska integrationen:

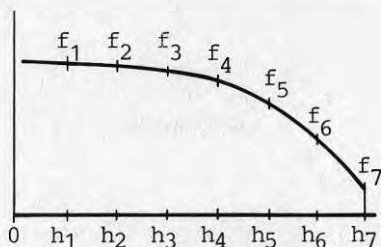
$$B \int_0^{\infty} u_c \cdot \rho \cdot c_p (\theta_i - \theta_{i,b}) dy = B \cdot \rho \cdot c_p \int_0^{\infty} u_c (\theta_i - \theta_{i,b}) dy$$

Enligt trapetsregeln kan en funktion enligt figur 2.20 integreras numeriskt enligt:

$$\int_0^h f(h) dh = \Delta h \left(\frac{f_1}{2} + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + \frac{f_7}{2} \right)$$

2.27

där $\Delta h = h_2 - h_1$, $h_3 - h_2$ osv



Figur 2.20 Numerisk integration av en funktion

Kurvorna över temperatur och hastighetsfördelning i figur 2.19 kan integreras på detta sätt med $\Delta h = 25$ mm. Eftersom vi är intresserade av integralen av en produkt av två funktioner f och g får vi:

$$\int f(h) \cdot g(h) dh = \Delta h \left(\frac{f_1 \cdot g_1}{2} + f_2 \cdot g_2 + f_{n-1} \cdot g_{n-1} + \frac{f_n \cdot g_n}{2} \right)$$

2.28

där t ex f är hastighetsfunktionen och g temperaturfunktionen.

Genom att först extrapolera temperaturkurvan inåt rummet, får vi värden på u och $\theta_i - \theta_{i,b}$ för olika avstånd h från spalten, enligt nedanstående:

y (m)	u_c (m/s)	$\theta_i - \theta_{i,b}$ (K)	$u_c (\theta_i - \theta_{i,b})$ (m/s·K)
0	2.4	6.5	15.6
0.025	2.4	6.4	15.36
0.050	2.4	5.9	14.16
0.075	2.2	5.2	11.44
0.100	1.9	4.3	8.17
0.125	1.7	3.6	6.12
0.150	1.5	3.1	4.65
0.175	1.3	2.9	3.77
0.200	1.2	2.9	3.48
0.225	1.0	2.5	2.5
0.250	0.9	2.7	2.43
0.275	0.8	2.7	2.16
0.300	0.6	2.2	1.32
0.325	0.6	2.2	1.32
0.350	0.5	1.9	0.95
0.375	0.4	2.0	0.8
0.400	0.3	1.8	0.54
0.425	0.3	1.7	0.51
0.450	0.2	1.6	0.32
0.475	0.2	1.5	0.3
0.500	0.2	1.3	0.26

Integralen

$$\int_0^{\infty} u_c (\theta_i - \theta_{i,b}) dy \text{ kan därmed skrivas som:}$$

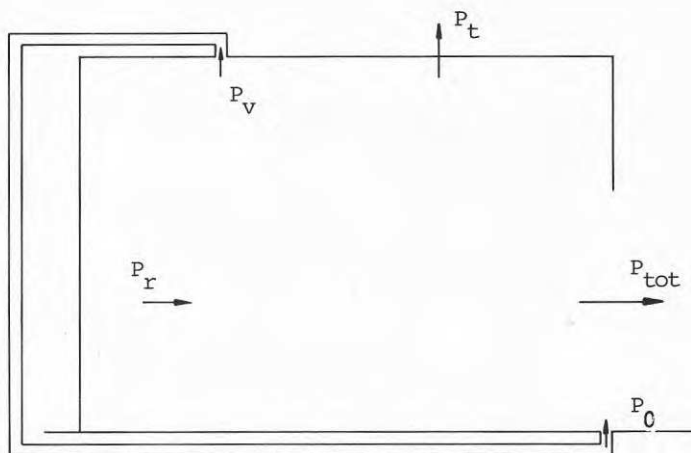
$$0.25 \left(\frac{15.6}{2} + 15.36 + 14.6 + \dots + 0.32 + 0.3 + \frac{0.26}{2} \right) = 2.205 \text{ km}^2/\text{s}$$

Eftersom $B = 0.86 \text{ m}$, $\rho = 1.13 \text{ kg/m}^3$ och $c_p = 1007 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ blir:

$$B \cdot \rho \cdot c_p \int_0^{\infty} u_c (\theta_i - \theta_{i,b}) dy = 0.86 \cdot 1.13 \cdot 1007 \cdot 2205 = 2158 \text{ W}$$

2.6.2 Beräkning av effektförlust genom uppställande av effektbalans

Den beräkningsmetodik som redovisats under 2.6.1 har den stora nackdelen att den tar tid att genomföra. En enklare bestämning av effektförlusten P_{tot} kan göras genom uppställandet av en effektbalans för byggnaden. I detta fall kan man helt bortse från vad som händer inom själva ridån och enbart bestämma vilka värmetilskott till respektive effektförluster från byggnaden man har enligt sambandet i figur 2.21.



Figur 2.21 Effektbalans för försöksanordningen

P_v , P_0 samt P_{tot} har definierats i förra avsnittet.

P_t är de transmissionsförluster som fås från byggnaden genom golv, väggar och tak.

P_r är den effekt som tillförs byggnaden genom elradiatorerna.

En effektbalans för byggnaden ger:

Tillförd effekt = bortförd effekt =>

$$P_r + P_0 = P_v + P_t + P_{tot} \Rightarrow \text{effekt förlusten } P_{tot}$$

$$P_{tot} = P_r + P_0 - P_v - P_t$$

Bestämningen av P_0 samt P_v framgår av förra avsnittet. P_r fås genom mätning av den till elradiatorerna tillförda eleffekten.

P_t beräknas som $k \cdot A(\theta_i - \theta_o)$ där $(\theta_i - \theta_o)$ är temperaturdifferensen över byggnadens väggar.

kA har innan försökens början beräknats genom att byggnadens port hållits stängd med en väl isolerad dörr. Vid stationärt förhållande uppmättes temperaturdifferensen över väggen samt den tillförda radiatoreffekten. kA kunde därvid bestämmas, eftersom $P_t = P_r$ då P_0 , P_v och $P_{tot} = 0$

Storleken på kA bestämdes till 31.3 W/K

En korrektion av uttrycket $P_{tot} = P_r + P_0 - P_v - P_t$ krävs i de fall man har en avvikelse från stationärt tillstånd. Uttrycket kan då skrivas som $P_{tot} = P_r + P_0 - P_v - P_t - P_a$, där P_a är den ackumulerade effekten i byggnadens innerväggar. Är temperaturändringen i väggarna per tidsenhet:

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\tau}\right)_{\text{vägg}} \text{ blir } P_a$$

$$P_a = m_{\text{vägg}} \cdot c_{p\text{vägg}} \cdot \left(\frac{\Delta\theta}{\tau}\right)_{\text{vägg}}$$

där $m_{\text{vägg}}$ = massan av innerväggarna + ca 2 % isoleringen, vilken kan beräknas delta i värmeupplagringen, totalt 180 kg.

$$c_{p\text{vägg}} = \text{värmekapacivitet för väggmaterialet} \\ 2500 \text{ J/kg K}$$

τ = tiden i timmar

För de olika fallen varierar $\left(\frac{\Delta\theta}{\tau}\right)_{\text{vägg}}$ mellan 0 och 1.4 K/h.

Ett fiktivt k -värde kan på samma sätt som i det föregående avsnittet beräknas med det här fram-

tagna värde på P_{tot} . I tabell 2.1 har fiktiva k-värden beräknade med effektbalans betecknats med k_2 .

Beräkningsexempel:

För fall 3 gäller

$$P_r = 2787 \text{ W}$$

$$P_0 = 4429 \text{ W}$$

$$P_v = 2344 \text{ W}$$

$$P_t = 31.3 (38.7 - 15.9) = 714 \text{ W}$$

$$P_a = -\frac{0.09}{3600} \cdot 180 \cdot 2500 = -11 \text{ W}$$

$$P_{tot} = 2787 + 4429 - 2344 - 714 + 11 = 4169 \text{ W}$$

$$\left(\frac{\Delta\theta}{T}\right)_{\text{vägg}} = -0.09^\circ\text{C/h}$$

$$k_2 = \frac{4169}{0.862 \cdot 22.6} = 249 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

2.6.3 Beräkning av fiktivt k-värde för öppen oskyddad port

För att kunna göra det möjligt att jämföra k-värden för olika prövade luftridåer, har för varje fall ett teoretiskt fiktivt k-värde för oskyddad port beräknats. Med detta avses det fiktiva k-värde en öppen oskyddad port skulle ha vid den aktuella temperaturdifferensen och ventilationsförhållandet.

Över en öppen oskyddad port till en otät byggnad fås ett av temperaturdifferensen orsakat tryckförhållande enligt vad som redovisats i figur 1.8.

Genom porten till en tät byggnad strömmar luft från den kalla till den varma sidan i portens underkant. Eftersom det kontinuitetsvillkor, som tidigare berörts, måste gälla, ersätts denna luft med varm luft som strömmar till den kalla sidan i portens överkant. Vi får en strömning enligt figur 1.9.

Denna maximala tryckdifferens, enligt ekvation 1.5, ger upphov till en maximal hastighet:

$$u_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_{\max}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot g \frac{H}{2} \cdot \Delta \rho} = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot g \cdot H} =$$

$$\sqrt{\frac{\Delta\theta_{\text{tot}}}{T} \cdot g \cdot H}$$

där ρ = medelvärdet av den kalla och varma sidans densiteter

T = medelvärdet av den kalla och varma sidans absoluttemperaturer

$\Delta\theta_{\text{tot}}$ = temperaturdifferensen över porten

Medelhastigheten hos den inströmmande luften blir:

$$U_m = \frac{2}{3} U_{\text{max}} \quad 2.31$$

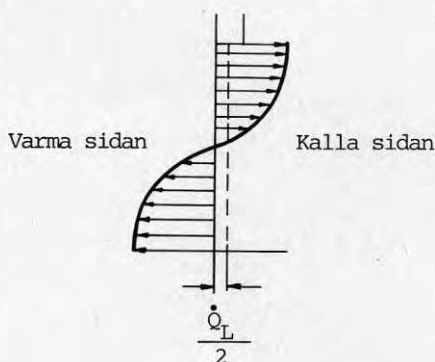
Den luftmängd som strömmar från den kalla till den varma sidan i portens underkant blir härmed vid en tät byggnad:

$$\dot{Q} = \frac{2}{3} \cdot \mu \sqrt{\frac{\Delta\theta_{\text{tot}}}{T}} \cdot g \cdot H \cdot \frac{H}{2} \cdot B \quad 2.32$$

där B = portbredden

μ = en kontraktionskoefficient som vid de aktuella värdena på $\Delta\theta$ kan sättas till 1.

Förutom denna luftinströmning och luftutströmning, orsakad av en temperaturdifferens över porten, påverkas inströmningen av obalans i den mekaniska ventilationen. I de flesta här redovisade modellförsöken har luft till ridån tagits inifrån modellbyggnaden, och via ett kanalsystem förts till ridåns inblåsningsspalt. Genom läckage i kanalsystemet har den utsugna luftmängden från byggnaden varit större än den som tillförts byggnaden genom ridån. Byggnaden har på detta sätt vid användandet av ridån fått ett nettounderskott på luft som kan liknas vid ett underskott i den mekaniska ventilationen. Utsätts en öppen oskyddad port för ett liknande luftunderskott, innebär det att hastighetskurvan i figur 1.9 flyttas inåt byggnaden enligt figur 2.22.



Figur 2.22 Luftströmning genom port med luftunderskott

där \dot{Q}_L = läckageflödet från lokalen

Det totala inströmmande luftflödet kall luft som ska värmas till rumstemperatur blir därmed:

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\Delta\theta_{\text{tot}}}{T}} \cdot g \cdot H \cdot \frac{H}{2} \cdot B + \frac{\dot{Q}_L}{2} \quad 2.33$$

Den effekt som åtgår för att värma denna luftmängd från θ_u till θ_i blir:

$$P = \left(\frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{\Delta\theta_{\text{tot}}}{T}} \cdot g \cdot H \cdot \frac{H}{2} \cdot B + \frac{\dot{Q}_L}{2} \right) \rho \cdot c_p (\theta_i - \theta_o) \quad 2.34$$

Sätts denna effektförlust genom porten i förhållande till temperaturdifferensen över porten ($\theta_i - \theta_o$) och portarean $H \cdot B$ fås ett fiktivt k-värde för den öppna oskyddade porten:

$$k = \left(\frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{\Delta\theta_{\text{tot}}}{T}} \cdot g \cdot H + \frac{\dot{Q}_L}{2 \cdot H \cdot B} \right) \cdot \rho \cdot c_p \quad 2.35$$

Detta teoretiska k-värde har beräknats för varje fall med de temperaturdifferenser och kanalläckage som erhållits med ridån igång. I tabell 2.1 finns dessa k-värden betecknade som k_0 .

Beräkningsexempel:

Fall 3

$$\Delta\theta_{\text{tot}} = 22.6^\circ\text{C}$$

$$T = 300 \text{ K } (\theta_i = 38.7^\circ\text{C}, \theta_o = 15.9^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_L = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$k_0 = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{22.6}{300}} \cdot 9.81 \cdot 0.86 + \frac{0.013}{2 \cdot 0.86^2}$$

$$1.16 \cdot 1007 = 321 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$$

2.7 Mätresultat

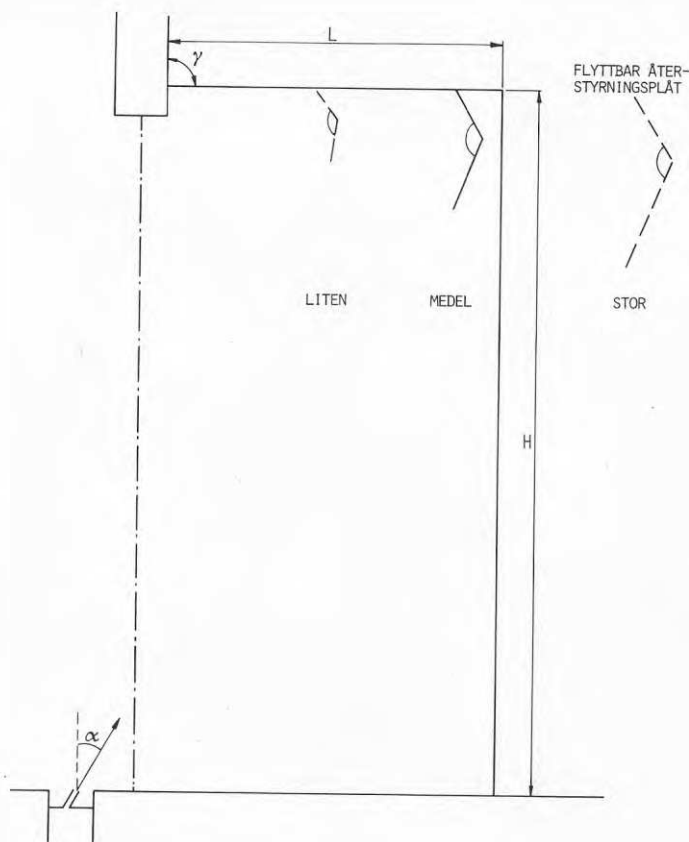
I tabell 2.1 och följande figurer finns resultat för 53 undersökta fall angivna. För samtliga dessa fall gäller att modellbyggnaden har varit tät och att luft till ridån tagits inifrån byggnaden. Den öppna sluss med återstyrning, som använts i 27 av fallen, är en justerbar konstruktion, enligt figur 2.23. Ridåspaltens öppning, som varit i plan med golvet, har varit placerad 30-50 mm innanför inre väggplanet.

Ridå- och vindvinkeln α respektive β definieras enligt figurerna 1.11 och 2.14. För övriga nedan använda beteckningar hänvisas till bilderna 1.7

FALL	ÅTERSTYRNING	RIDÅVINKEL α°	VINDVINKEL β°	RIDÅHASTIGHET u_0 M/S	VINDHASTIGHET u_w M/S	I_w/I_c	$\Delta\theta_{0-0}$	$\Delta\theta_{0-i}$	k_1 WATT/K	k_2 WATT/K	k_0 WATT/K	ANM
1	NEJ	1,5	-	18,1	0	0	13,6	1,0	200	164	249	
2	JA	1,5	-	18,1	0	0	16,2	-1,0	48	57	270	
3	NEJ	15	-	17,4	0	0	22,6	34,7	253	249	321	
4	NEJ	15	30	17,4	1,2	0,46	24,0	30,9	190	201	329	
5	JA	15	30	17,4	1,2	0,46	25,6	28,0	79	41	340	
6	NEJ	15	30	17,4	1,8	1,00	12,7	33,8	299	441	247	INSTABIL
7	JA	15	30	17,4	1,8	1,00	19,3	28,6	126	95	299	
8	NEJ	16	-	18,1	0	0	20,6	37,9	270	278	299	
9	NEJ	16	90	18,1	1,2	0,79	20,3	32,5	232	263	297	
10	NEJ	16	90	26,0	1,2	0,37	14,9	19,5		256	295	
11	JA	16	90	26,0	1,2	0,38	27,9	15,8	73	84	378	
12	NEJ	16	90	26,0	1,8	0,80	15,1	18,6		238	293	
13	JA	16	90	26,0	1,8	0,82	24,5	15,7		109	358	
14	NEJ	21	-	26,0	0	0	15,6	21,1	349	260	301	
15	JA	21	-	26,0	0	0	35,3	16,5	37	38	418	
16	NEJ	21	-	18,1	0	0	21,4	38,9	254	274	305	
17	NEJ	21	-	17,4	0	0	23,5	34,8	252	244	330	
18	JA	21	-	17,4	0	0	31,3	30,9	48	24	374	
19	NEJ	21	-	17,4	0	0	14,7	1,8	190	176	266	
20	JA	21	-	17,4	0	0	19,9	-2,3	30	44	306	
21	NEJ	21	90	26,0	1,2	0,28	14,9	19,5	283	252	294	
22	JA	21	90	26,0	1,2	0,29	29,3	16,3	82	75	385	
23	NEJ	21	90	18,1	1,2	0,54	12,1	0	144	178	236	
24	JA	21	90	18,1	1,2	0,54	10,7	-0,5	60	81	224	
25	NEJ	21	90	26,0	1,8	0,62	14,6	18,8	293	252	293	
26	JA	21	90	26,0	1,8	0,64	25,1	15,9	108	103	362	
27	JA	21	90	18,1	1,8	1,37	34,7	22,2		111	374	
28	JA	21	90	18,1	1,8	1,34	19,5	27,9		89	298	
29	JA	21	90	18,1	1,8	1,38	35,2	23,1	100	111	380	
30	JA	21	90	18,1	1,8	1,21	19,5	-5,2		112	296	
31	NEJ	21	60	18,1	1,8	1,16	19,6	30,2	270	273	293	
32	JA	21	60	18,1	1,8	1,16	21,5	28,3	109	81	307	
33	NEJ	21	30	17,4	1,2	0,33	22,7	31,3	176	205	319	
34	JA	21	30	17,4	1,2	0,33	23,9	28,9	78	54	326	
35	NEJ	21	30	17,4	1,2	0,29	12,8	0,4		158	250	INSTABIL ¹⁾
36	JA	21	30	17,4	1,2	0,30	15,1	-1,7	49	67	268	
37	NEJ	21	30	17,4	1,8	0,72	13,7	32,5		408	255	INSTABIL
38	JA	21	30	17,4	1,8	0,73	19,3	29,0	128	95	297	
39	JA	21	30	17,4	1,8	0,72	18,9	28,7		95	297	
40	JA	21	30	17,4	1,8	0,64	9,0	0,5	36	101	209	
41	NEJ	26	30	17,4	1,2	0,27	10,5	37,6		533	227	INSTABIL
42	JA	26	30	17,4	1,2	0,27	24,8	28,7	87	55	337	
43	NEJ	26	30	17,4	1,8	0,59	12,6	32,4		453	247	INSTABIL
44	JA	26	30	17,4	1,8	0,59	17,9	29,1	138	115	289	
45	NEJ	29	-	26,0	0	0	17,6	18,8	252	226	317	
46	NEJ	29	90	26,0	1,2	0,21	9,6	21,8		516	248	INSTABIL
47	JA	29	90	26,0	1,2	0,22	27,8	16,4	98	92	379	
48	NEJ	29	90	26,0	1,8							INSTABIL
49	JA	29	90	26,0	1,8	0,47	26,0	16,0	134	103	367	

1) RIDÅNS UPPSTRÖMSIDA FUNGERAR EJ OCH DÄRFÖR VRIDS RIDÅN ELLER GÅR NER MOT MARKEN HELT, DÄRFÖR ATT DEN TÄTA LOKALEN INNEBÄR ATT INSTRÖMMAD UTELUFVÄT MÅSTE UT PÅ NYTT.

Tabell 2.1 Sammanställning över försöksbetingelser och beräknade k-värden



Figur 2.23 Skiss över öppen sluss med ridååterstyrning

och 1.11. Ridåhastigheten u_0 i modellförsöken är den utloppshastighet, som dels mätts i utloppspalten och dels beräknats utifrån uppmätta tillluftsflöden och fastställd spaltarea. Vindhastigheten u_w är lufthastigheten mätt i ett plan ca 1.7 m framför modellbyggnadens port i vindriktningen. Vindkraften mot porten blir med ledning av ekvation 1.3 och 1.4 vid vindvinkeln β :

$$I_w = \rho \frac{u_w^2}{2} \cdot \sin \beta \cdot H \cdot B \quad 2.40$$

Primärluftens impuls I_0 i horisontalled blir, om ridåvinkeln är α och ridåhastigheten är u_0 utifrån ekvation 1.1 och 1.2:

$$I_0 = \dot{m}_0 \cdot u_0 \cdot \sin \alpha = \rho_0 u_0 \cdot 2b_0 \cdot B \cdot u_0 \cdot \sin \alpha \quad 2.41$$

där:

ρ_0 = densiteten hos ridåluften

$2b_0$ = spaltbredden

B = portbredden (spaltlängden)

m_0 = massflödet från spalten

Om ridåstrålen under inverkan av yttre krafter böjer av inåt byggnaden efter en cirkelbana enligt figur 1.11, innebär detta att strålens impuls i horisontalled ändras från:

$$\rho_0 \cdot u_0 \cdot 2b_0 \cdot B \cdot u_0 \cdot \sin\alpha \quad \text{till} \quad -\rho_0 u_0 \cdot 2b_0 \cdot B \cdot u_0 \cdot \sin\alpha$$

Detta under förutsättning att strålens impuls är konstant under strålens utbredning.

Den kraft i horisontalled, som strålen kan motstå under sin utbredning, motsvaras av ändringen i strålens impuls. Denna ändring blir enligt ovan:

$$I_C = 2 \cdot \rho_0 \cdot 2b_0 \cdot B \cdot u_0^2 \sin\alpha = 2I_0$$

Sätts vindkraften mot porten i relation till denna möjliga impulsändring fås ett uttryck för vindstyrkan i förhållande till kraften i ridåstrålen:

$$\frac{I_w}{I_C} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_0} \cdot \frac{H}{2b_0} \cdot \frac{u_w^2}{u_0^2} \cdot \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} \quad 2.42$$

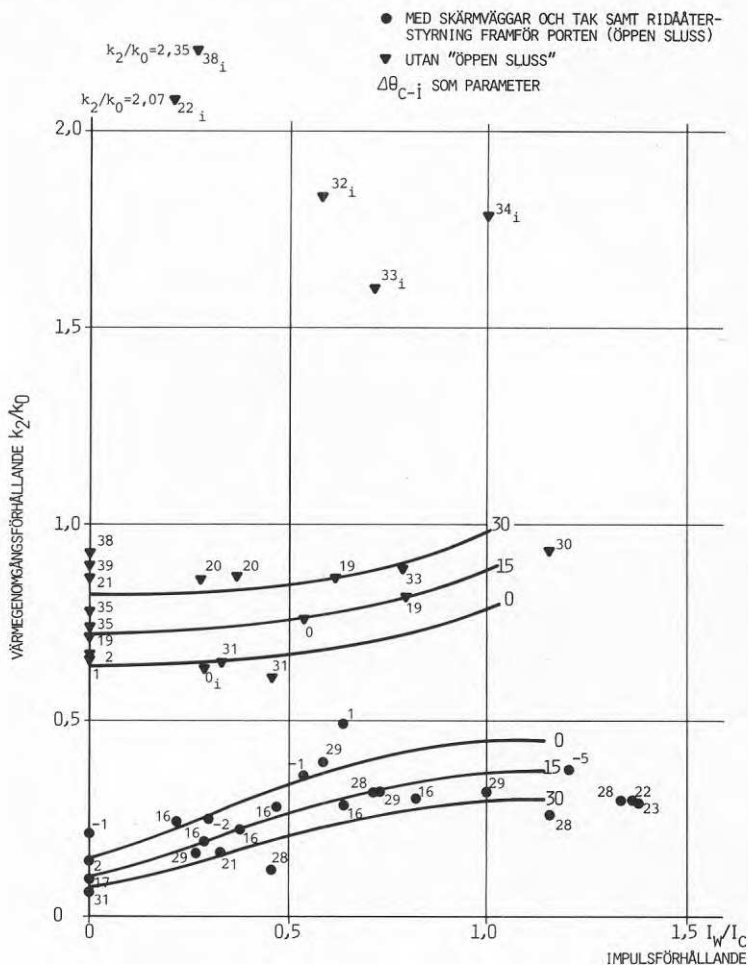
I tabellen anges dessutom $\Delta\theta_{i-o}$ som temperaturdifferensen mellan en punkt 1 m innanför porten och utetemperaturen, och $\Delta\theta_{C-i}$ som temperaturdifferensen mellan ridåns inblåsningstemperatur och temperaturen i en punkt 1 m innanför porten.

Fiktiva k_1 , k_2 och k_0 -värden är enligt definitioner i avsnittet "Beräkningsmetodik".

2.7.1 Modellförsök med och utan öppen sluss med ridååterstyrning

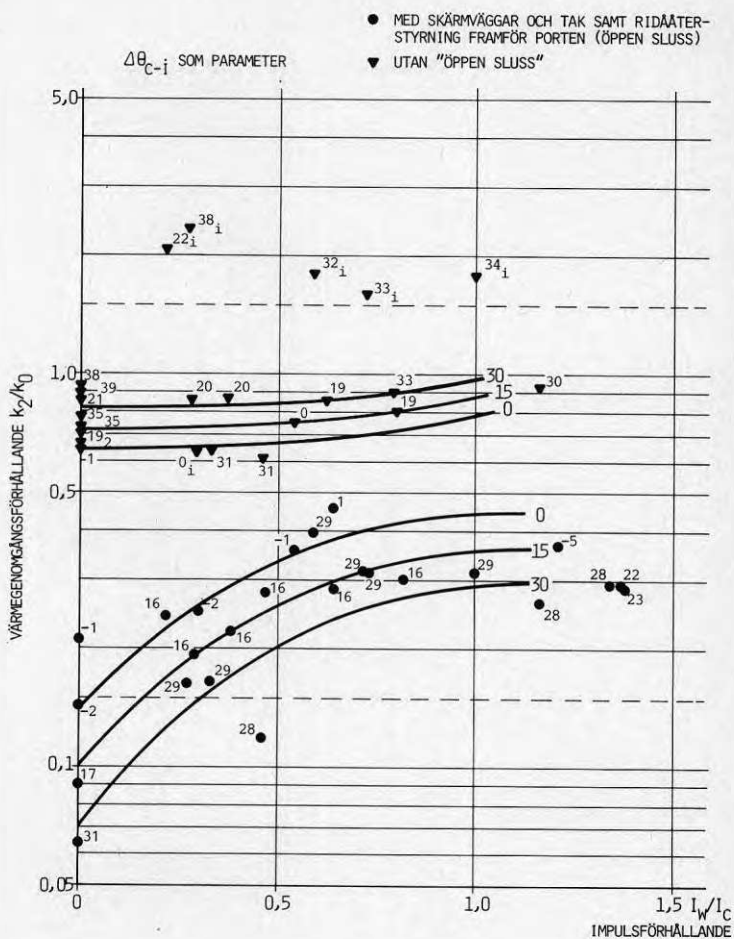
Figurerna 2.24 och 2.25 visar den beräknade kvoten k_2/k_0 som funktion av vindtrycket I_w/I_C . Kvoten k_2/k_0 har använts för att göra det möjligt att jämföra mätningar, gjorda vid olika temperaturdifferenser över porten. k_2/k_0 bör inte ses som ett mått på hur bra den aktuella ridån är jämfört med en öppen port. k_0 är ett beräknat värde, som enbart tar hänsyn till luftströmningen genom en port, orsakad av termiska krafter och underskott i ventilationen. För en oskyddad port tillkommer inströmning också genom vindpåverkan. Energi-

transporten genom en verklig öppen port blir därmed större än vad det för modellporten framräknade k_0 -värdet anger.



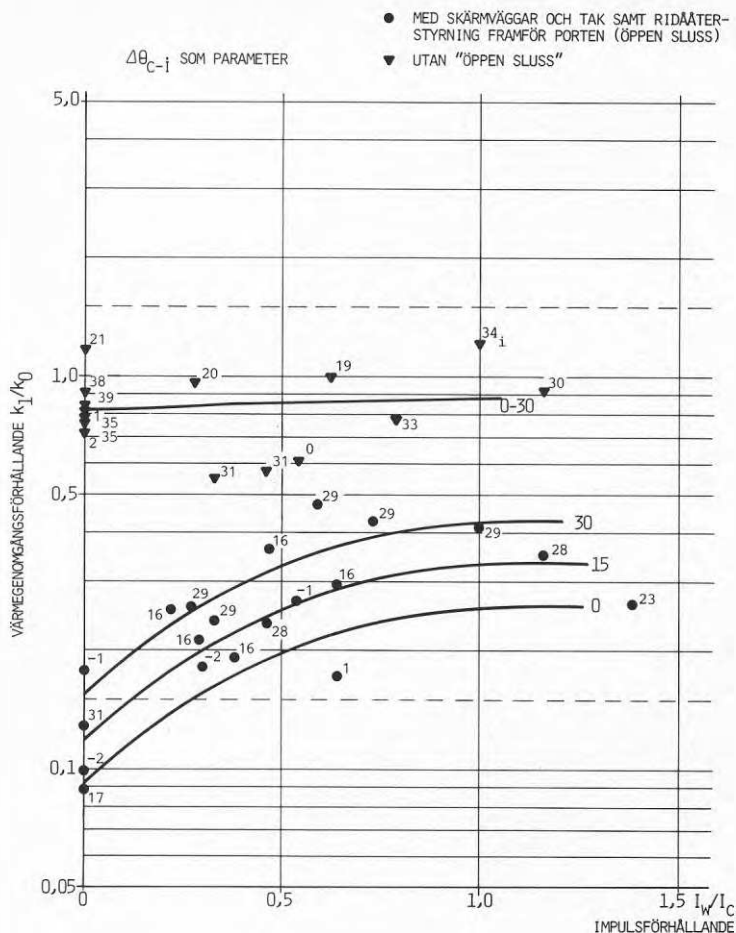
Figur 2.24 Energitransport vid modellförsök med luftridå vid olika impulsförhållanden och temperaturdifferenser

Figur 2.24 visar förhållandet mellan k_2/k_0 och I_w/I_c i ett diagram med linjära axlar, medan logaritmisk skala använts för k_2/k_0 i figur 2.25 och följande figurer, detta för att öka tydligheten. Av figur 2.24 framgår, till skillnad mot figur 2.25 och följande, att k_2/k_0 ökar med I_w/I_c i ungefär samma takt för både ridån med och ridån utan återstyrning. Den procentuella påverkan är dock större för ridån med återstyrning.



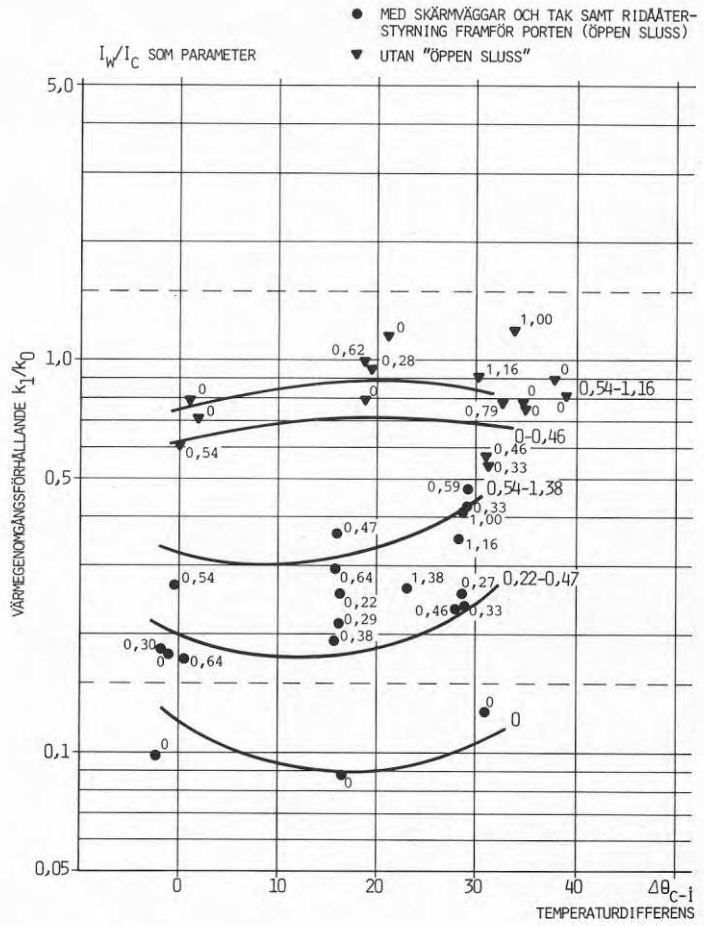
Figur 2.25 Energitransport vid modellförsök med luftridå vid olika impulsförhållanden och temperaturdifferenser

De i figurerna med "i" märkta mätpunkterna är fall, då vindpåverkan på ridån har varit sådan, att ridån ej fungerat tillfredsställande. Denna kraftiga påverkan har dels förekommit vid stora värden på utblåsningsvinkeln α och vind rakt framifrån, varvid ridån böjt utåt mot vinden och följt bottenplattan, dels vid kraftig snedanblåsning mot ridån, varvid ridåstrålen vridits utåt och åt sidan. Vid ritandet av kurvorna, baserade på mätpunkterna, har dessa instabila mätvärden ej beaktats. Figur 2.26 motsvarar figur 2.25, dock med den skillnaden att k -värden beräknade med metod 1, dvs k_1 använts. k_1/k_0 som funktion av I_w/I_c är dock ungefär densamma för båda beräkningsmetoderna.

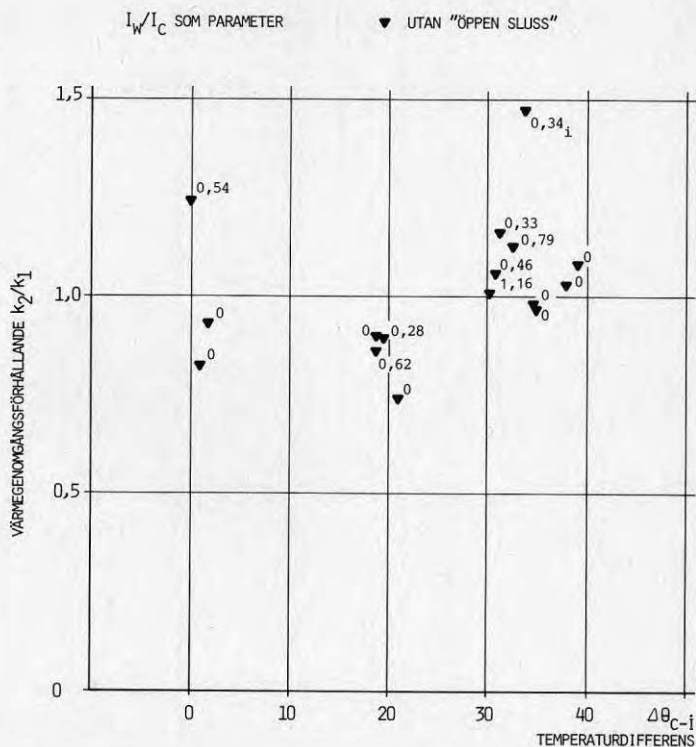


Figur 2.26 Energitransport vid modellförsök med luftridå vid olika impulsförhållanden och temperaturdifferenser

Figurerna 2.27 och 2.28 visar k_2/k_0 respektive k_1/k_0 som funktion av ridåns övertemperatur $\Delta\theta_{C-i}$. Här ger de två olika beräkningsmetoderna helt olika resultat. Medan k_2/k_0 för ridån med återstyrning tydligt minskar med ökad övertemperatur hos ridåstrålen, är k_1/k_0 högst vid låga respektive höga värden på $\Delta\theta_{C-i}$. För ridån utan återstyrning ger de båda metoderna i stort sett samma resultat.



Figur 2.28 Energitransport vid modellförsök med luftridå vid olika impulsförhållanden och temperaturdifferenser

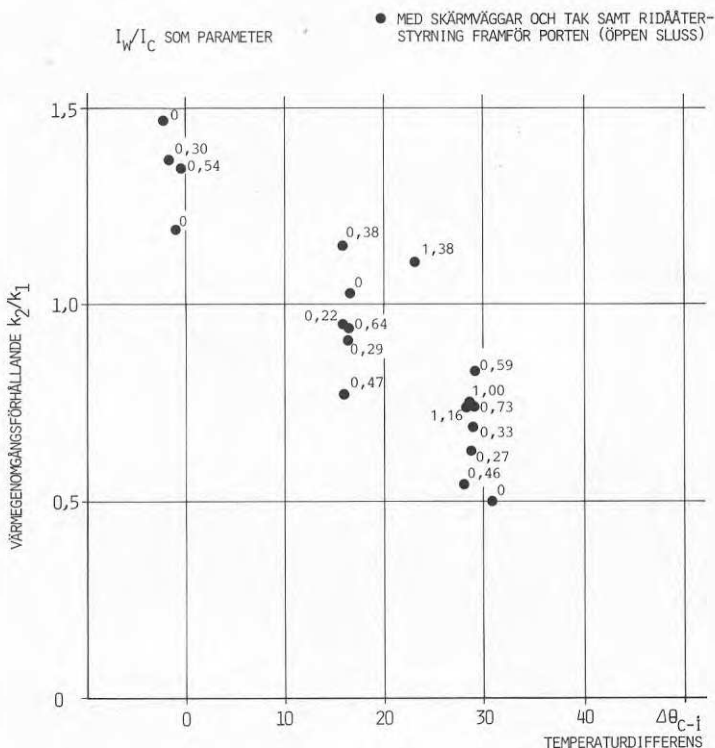


Figur 2.29 Jämförelse mellan energitransportmätmetoder. Ridå utan återstyrning

Om vi, som i figurerna 2.29 och 2.30 plottar k_2/k_1 som funktion av ridåns övertemperatur $\Delta\theta_{C-i}$, framgår skillnaden i resultat mellan de bägge beräkningsmetoderna ännu tydligare. Värdena för den enkla ridån utan återstyrning ligger slumpmässigt spridda kring 1, utan någon påverkan av vare sig I_w/I_c eller $\Delta\theta_{C-i}$. För ridån med återstyrning finns dock ett klart samband mellan k_2/k_1 och övertemperaturen hos ridån. I de fall med återstyrning, där $\Delta\theta_{C-i}$ ligger upp mot 30°C fås ett närmare 50 % lägre k -värde enligt metod 2 (effektbalans för byggnaden) än enligt metod 1 (uppmätning av hastighets- och temperaturprofiler). Kännetecknande för dessa fall är att den luft, som ridån för in i lokalen, har högre temperatur än lokalluftens temperatur. En förklaring till det höga k -värdet enligt metod 1 är att, vid uppmätningen av hastighetsprofilen genom ridån, ett lägre flöde än det verkliga registrerats.

I de fall där $\Delta\theta_{C-i}$ är låg, ned mot 0°C, fås ett k_2 -värde, som ligger upp mot 50 % högre än k_1 .

I dessa fall är temperaturen hos ridåluften lägre än lokalluftens temperatur. Skillnaden mellan de beräknade k -värdena kan även här förklaras av att den använda mätmetoden inte registrerat hela luftflödet in i lokalen.

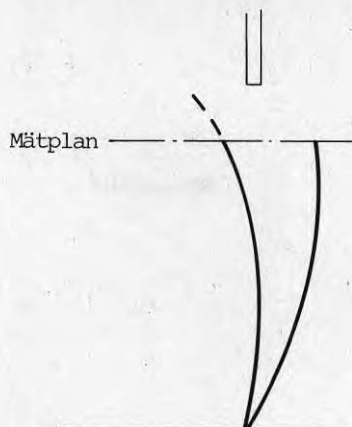


Figur 2.30 Jämförelse mellan energitransportmätmetoder. Ridå med återstyrning

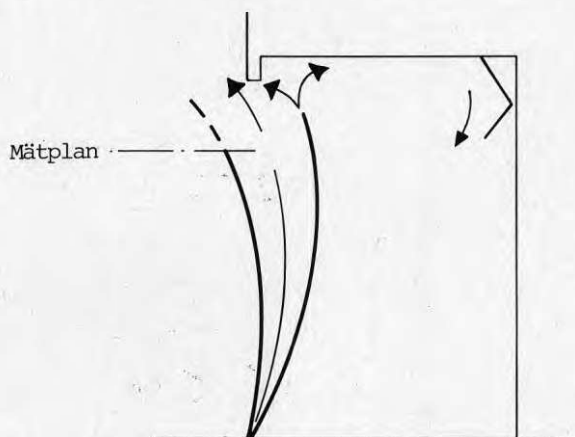
Ett studium av hur ridåluften delar sig vid portens övre kant kan ge en förklaring till varför inte hela flödet in i lokalen kunnat registrerats. Då man talar om en ideal luftrida, brukar man bortse från väggens tjocklek vid portens övre del. Ridåstrålen kan här lätt dela sig i två delar utan att störas av väggen, se figur 2.31.

I ett sådant fall fungerar beräkningsmetoden l bra. Det använda mätplanet ligger ca 0.1 m under portens övre del och genom det passerar hela det flöde, som går in i lokalen.

Även i de fall, där vi mätt på den enkla ridån, har ridåstrålen kunnat dela sig relativt ostört. Modellbyggnadens vägg tjocklek (ca 0.05 m) har inte nämnvärt försvårat för strålen att kunna dela sig. Vid användandet av en sluss framför porten blir emellertid förhållandena annorlunda, figur 2.32.



Figur 2.31 Mätplan och ridådelning utan ridååterstyrning



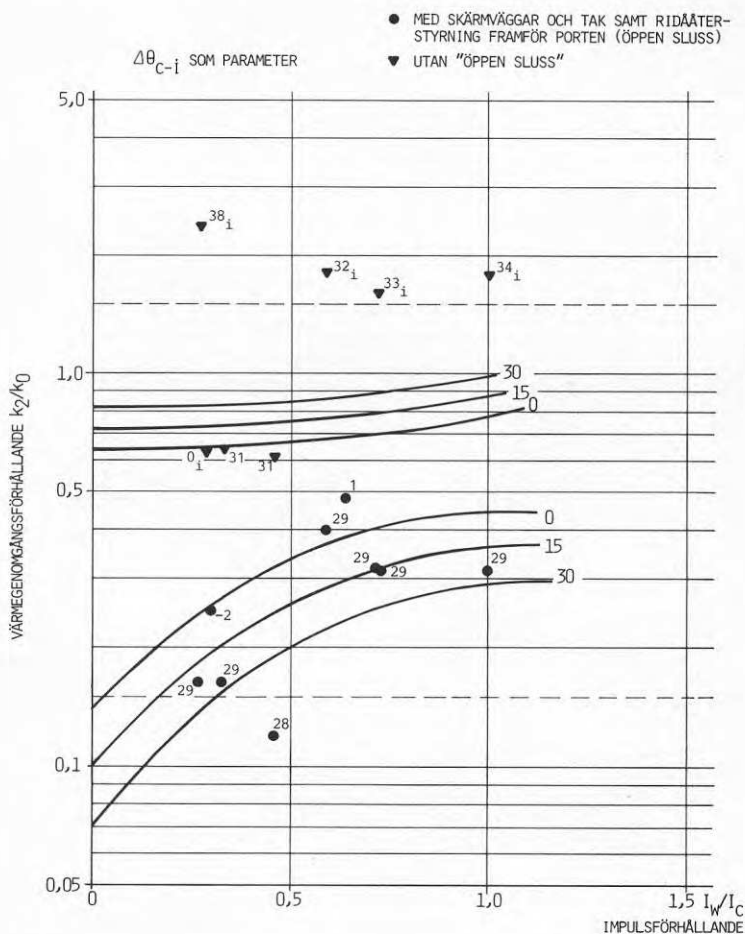
Figur 2.32 Mätplan och ridådelning med yttre ridååterstyrning

Slusstaket tvingar en del av ridåluftflödet att följa taket in mot lokalen. Eftersom luft tillföres lokalen denna väg och kontinuitetsvillkoret måste gälla, kan strålen gå något längre ut från porten än vad den skulle ha gjort, om inte slussen funnits. Uppmätta hastighetsprofiler har visat att, vid i övrigt lika förhållanden, luftflödet genom mätplanet varit mindre i de

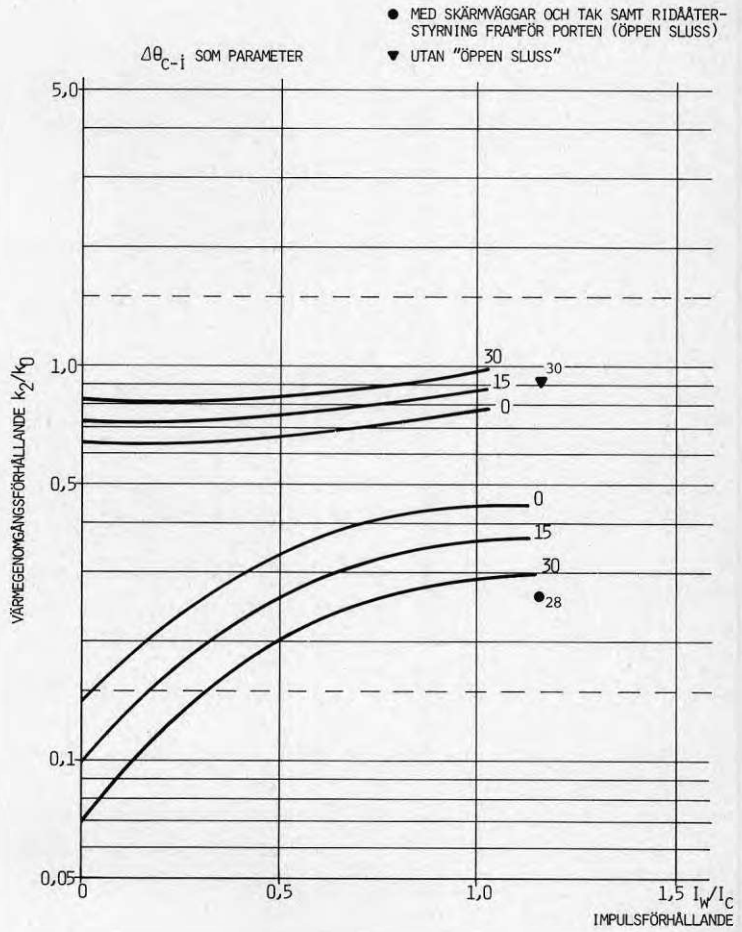
fall, där sluss använts jämfört med de fall, där sluss ej använts.

Denna horisontella komponent av till lokalen inströmmande luft gör att beräkningsmetod 1 ej fungerar tillfredsställande, då porten är försedd med sluss. Av denna anledning har, vid presentation av resultaten, i fortsättningen enbart k -värden, beräknade enligt metod 2, använts.

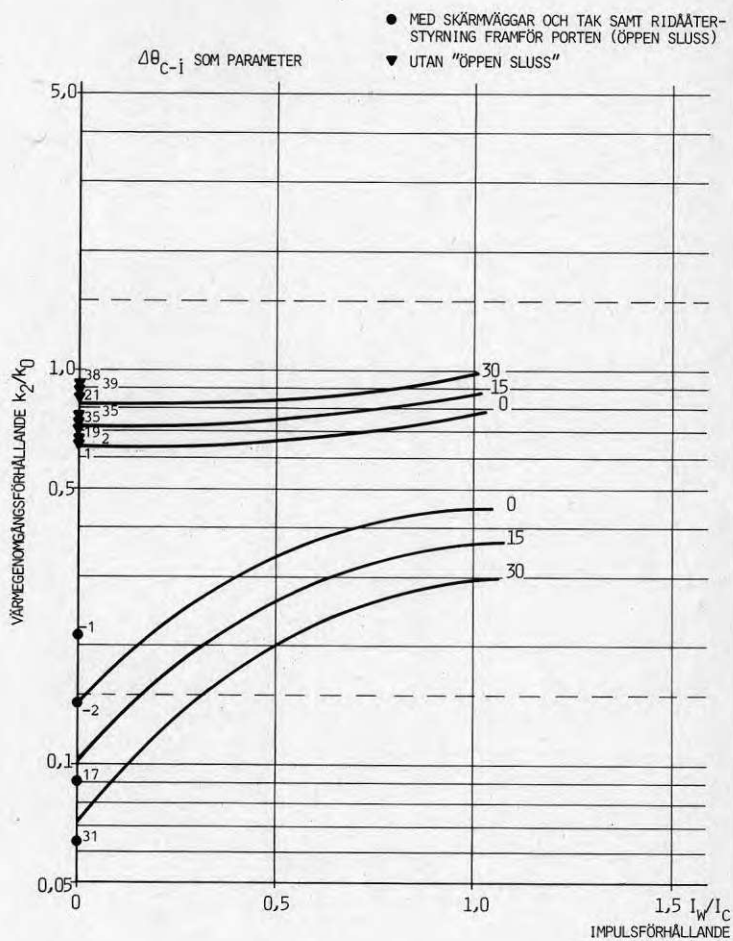
Figurerna 2.33-2.36 respektive 2.37-2.40 visar de beräknade kurvorna för k_2/k_0 som funktion av I_w/I_c respektive $\Delta\theta_{c-i}$. I dessa bilder har mätvärden för olika "vindriktningar" β lagts in. Som framgår av bilderna avviker inte mätvärdena i någon större grad från kurvorna med olika värde på β .



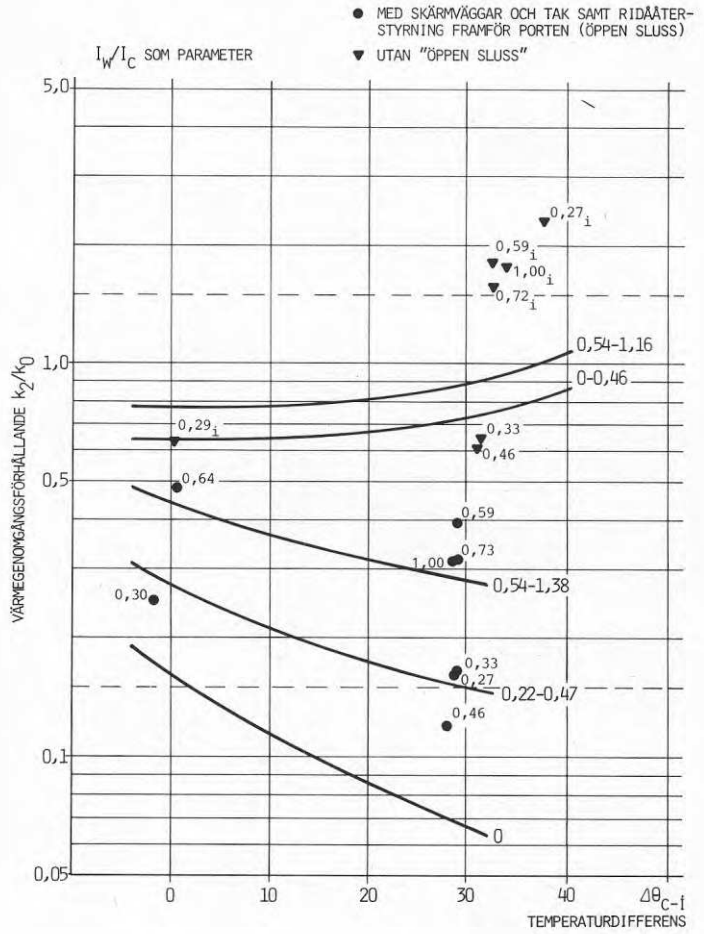
Figur 2.33 Energitransport vid modellförsök med luftrida. Vindriktning $\beta = 30^\circ$



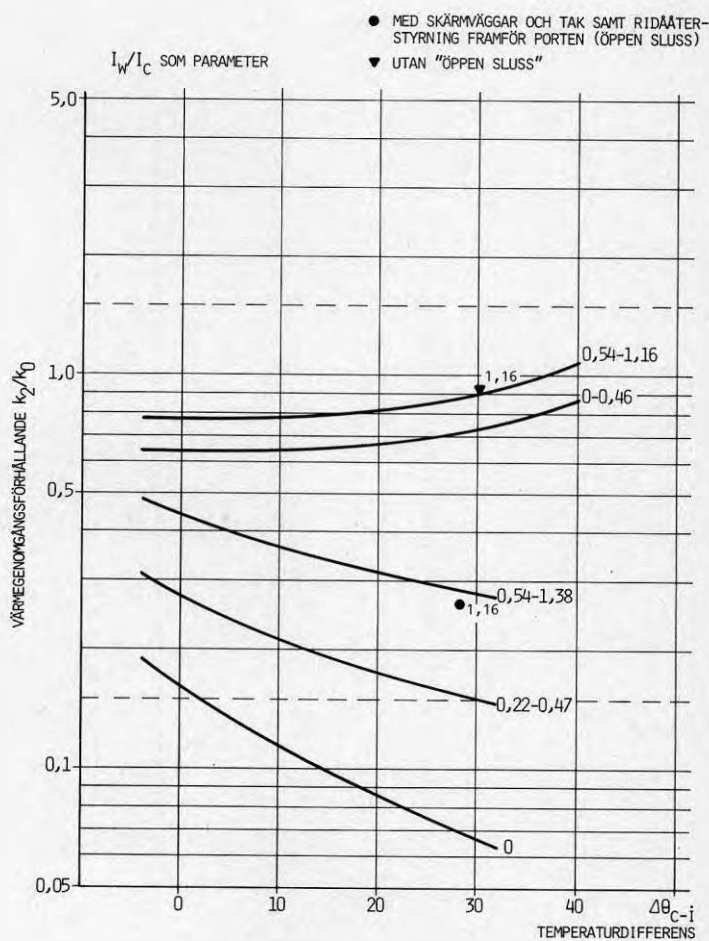
Figur 2.34 Energitransport vid modellförsök med luftridå. Vindriktning $\beta = 60^\circ$



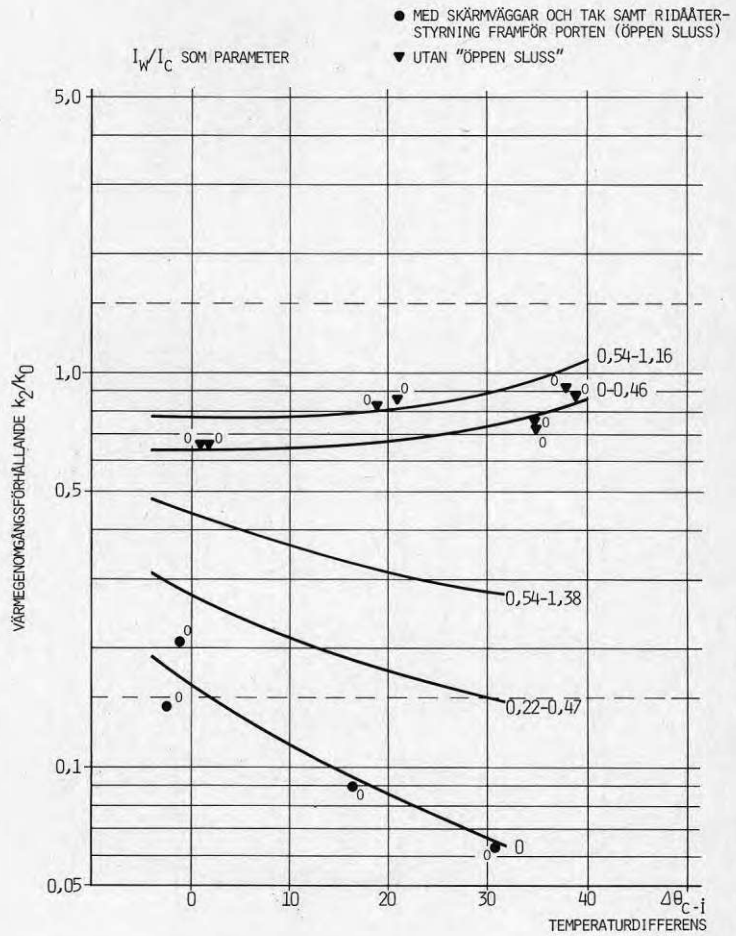
Figur 2.36 Energitransport vid modellförsök med luftridå utan vind. $I_w/I_c = 0$



Figur 2.37 Energitransport vid modellförsök med luftridå. Vindriktning $\beta = 30^\circ$



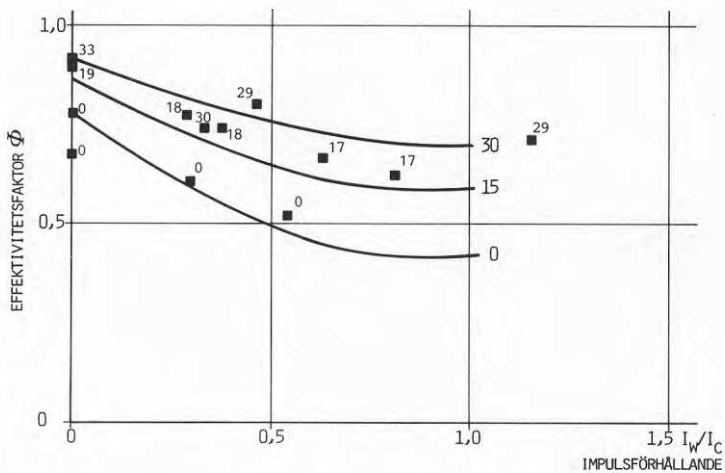
Figur 2.38 Energitransport vid modellförsök med luftridå. Vindriktning $\beta = 60^\circ$



Figur 2.40 Energitransport vid modellförsök med luftridå utan vind. $I_w/I_c = 0$

$$\text{EFFEKTIVITETSFAKTORN } \Phi = 1 - \frac{k_{\text{MED}}}{k_{\text{UTAN}}}$$

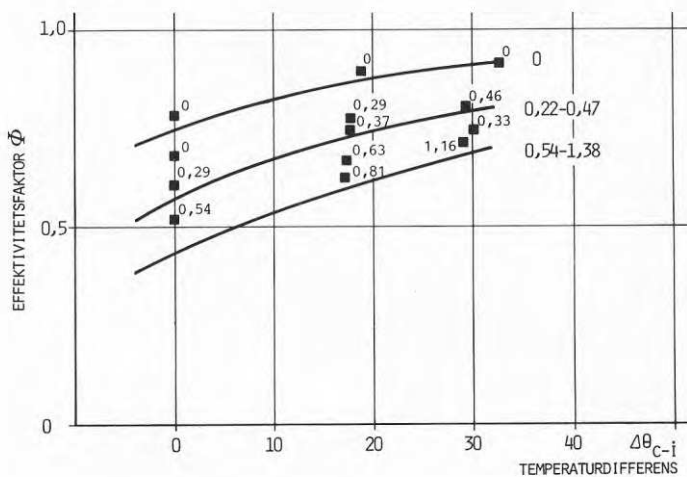
$\Delta\theta_{C-i}$ SOM PARAMETER



Figur 2.41 Energitransportförhållande för luft-ridå med och utan "öppen sluss"

$$\text{EFFEKTIVITETSFAKTORN } \Phi = 1 - \frac{k_{\text{MED}}}{k_{\text{UTAN}}}$$

I_W/I_C SOM PARAMETER



Figur 2.42 Energitransportförhållande för luft-ridå med och utan "öppen sluss"

Figurerna 2.41 och 2.42 visar den beräknade effektivitetsfaktorn ϕ som funktion av I_W/I_C och $\Delta\theta_{C-i}$. Effektivitetsfaktorn ϕ kan ses som ett enkelt mått på hur stor värmetransporten genom ridån med återstyrning är i förhållande till den enkla ridån. ϕ definieras som:

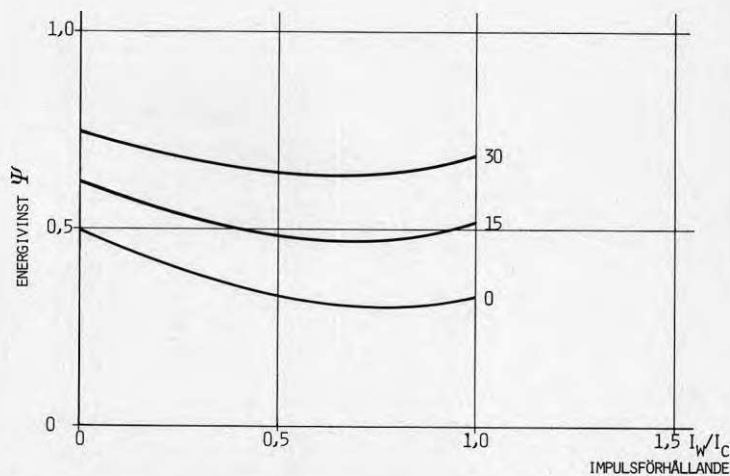
$$\phi = 1 - \frac{(k_2/k_0)_{\text{med}}}{(k_2/k_0)_{\text{utan}}}$$

där indexen "med" respektive "utan" avser luftridån med respektive utan återstyrning.

Då man har samma energitransport genom porten vid båda ridåutförandena blir $\phi = 0$. Fungerar ridån med återstyrning däremot som ett fullständigt skydd mot all energitransport genom porten blir $\phi = 1$. För värden på I_W/I_C mellan 0 och 1.1 samt värden på $\Delta\theta_{C-i}$ mellan 0°C och 30°C varierar ϕ mellan 0.4 och 0.9.

$$\Psi = \left(\frac{k_2}{k_0}\right)_{\text{UTAN}} - \left(\frac{k_2}{k_0}\right)_{\text{MED}}$$

$\Delta\theta_{C-i}$ SOM PARAMETER



Figur 2.43 Energivinst för luftridå med återstyrning

Figur 2.43 slutligen visar energivinsten för ridån med återstyrning i förhållande till den enkla ridån som funktion av I_W/I_C . Denna energivinst ψ definieras som:

$$\psi = \left(\frac{k_2}{k_0}\right)_{\text{utan}} - \left(\frac{k_2}{k_0}\right)_{\text{med}}$$

Som framgår av figurerna 2.41 och 2.42 minskar effektivitetsfaktorn ϕ med I_W/I_C och ökar med $\Delta\theta_{C-i}$, medan energivinsten ψ först minskar något för att sedan åter stiga med ökande I_W/I_C . Att effektivitetsfaktorn ϕ minskar med ökande I_W/I_C beror på att ridån med återstyrning vid vindstilla har mycket litet utbyte med den omgivande luften. Ökningen av vinden ger dock en större inblandning av kall luft i ridån, vilket ger en kraftig procentuell ökning av energitransporten. Den enkla ridån har redan vid vindstilla ett större utbyte med den omgivande luften och vind mot ridån ökar inte inblandningen i samma grad, procentuellt sett. Vid kraftig vind och snedanblåsning påverkas dock ridån så märkbart att den inte längre fungerar som ridå.

Vid beräkningen av ϕ har inte någon hänsyn tagits till dessa fall, vilket skulle ha givit en ökning av ϕ vid högre I_W/I_C . Energivinsten ψ påverkas enbart av den absoluta ändringen av energitransporten genom porten. ψ blir också i stort sett konstant för olika vindpåverkan, vilket också kan förstås av att kurvorna i figur 2.24 är i det närmaste parallella.

Ökningen av effektivitetsfaktorn med ökad övertemperatur hos ridåstrålen har sin grund i det ringa luftutbyte med omgivningen, som ridån med återstyrning har. Ökar ridåtemperaturen hos den enkla ridån, innebär detta enbart att temperaturen hos det luftflöde, som går till utsidan ökar. Därmed ökar energiförlusten genom porten. Ökar ridåtemperaturen hos ridån med återstyrning, kan däremot den största delen av den därmed tillförda värmen tillföras lokalen och bidra till dess uppvärmning.

2.7.2 Modellförsök med otät byggnad

I alla de fall, som hittills redovisats, har luft-ridån skyddat en port till en tät byggnad. Då en luftridå till en tät byggnad förses med luft inifrån byggnaden måste luftstrålen alltid böja av in mot byggnaden om den riktas snett utåt. Kontinuitetsvillkoret ger att både det luftflöde, som sugits ut från byggnaden samt det som medejekterats i ridån, måste ersättas.

Om ridåstrålen ej skulle böja tillbaka in mot byggnaden, skulle luftvolymen inne i byggnaden hela tiden minska. Lufttrycket inne i byggnaden skulle därmed sjunka och ridåstrålen skulle på grund av tryckdifferensen tvingas böja av in mot byggnaden. En luftridå till en tät byggnad kan därför anses som självstabiliserande. För ett givet över- eller underskott i den mekaniska ventilationen, antar strålbanan ett läge som endast i liten grad påverkas av vindtryck mot porten.

Ett vindtryck mot porten får ridåstrålen att böja av något mera inåt byggnaden. Lufttrycket i byggnaden ökar då och strålen kan bara böjas inåt så mycket så att trycket inne i byggnaden motsvarar vindtrycket. Den täta byggnaden fungerar som en buffert. Om ridån ej är försedd med någon öppen sluss, påverkas dock strålen av vindanfall från sidan eller vindanfall rakt framifrån om ridåvinkeln är för stor.

Normala industrilokaler är aldrig helt täta. Därför har några ytterligare mätningar gjorts med otät byggnad. Otätheterna har skapats genom att cirkulära hål tagits upp i byggnadens väggar enligt figur 2.10 och 2.11. De olika försökens resultat finns i tabell 2.2.

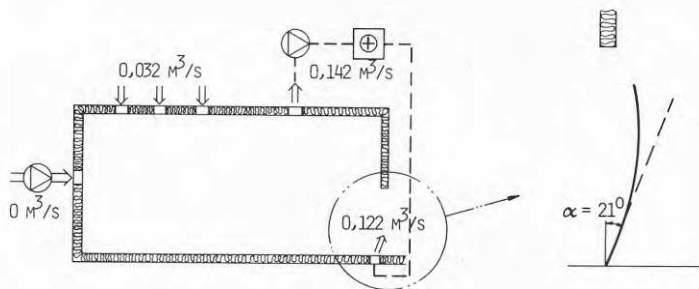
FALL	ÅTER-STYRNING	RIDA-VINKEL α°	VIND-VINKEL β°	RIDA-HASTIGHET M/S	VIND-HASTIGHET M/S	I_w/I_c	$\Delta\theta_{i-0}$ $^{\circ}C$	$\Delta\theta_{c-i}$ $^{\circ}C$	\dot{Q}_r W	MEKANISK VENTILATION		GENOM OTÄTHETER		k_2 W/m ² K
										TILLUFT M ³ /S	FRÄNLUFT M ³ /S	IN M ³ /S	UT M ³ /S	
63	NEJ	21	-	27,6	0	0	18,0	27,6	2819	-	0,142	0,032	-	380
64	NEJ	21	-	27,6	0	0	11,3	1,0	2838	-	0,142	0,034	-	266
65	JA	21	-	27,6	0	0	22,8	- 2,4	2808	-	0,142	0,018	-	64
66	NEJ	21	-	21,6	0	0	16,4	-13,9	2807	0,028	-	0,039	-	
67	JA	21	-	21,6	0	0	15,8	-12,8	2811	0,036	-	-	0,048	
68	JA	21	30	21,6	1,8	0,42	16,5	-13,0	2815	0,032	-	-	0,052	
69	NEJ	21	-	25,8	0	0	14,8	-11,3	2799	0,282	-	0,025	-	
70	JA	21	-	25,8	0	0	15,7	-12,8	2825	0,282	-	-	0,050	

Tabell 2.2 Försök med olika "läckageflöden"

Fall 63

I detta fall har ridåluften liksom tidigare tagits inifrån byggnaden och uppvärmts i luftvärmaren. De hål som tagits upp i byggnadens väggar har haft en sammanlagd area på 0.035 m², motsvarande 4.8 % av portarean. Genom att luft tillförts byggnaden genom dessa hål, har ridåstrålen inte behövt böja av riktigt lika mycket som om byggnaden varit tät. Det insugna luftflödet var 0.032 m³/s. Det k_2 -värde som beräknats för detta fall, 380 W/m²k, kan jämföras med k_2 -värdet för fall 14. 260 W/m²k. Eftersom ridåstrålen inte böjt av lika mycket som i fall 14, har en större del av den varma ridåluften gått förlorad till utsidan och förlusten genom porten har ökat.

FALL 63

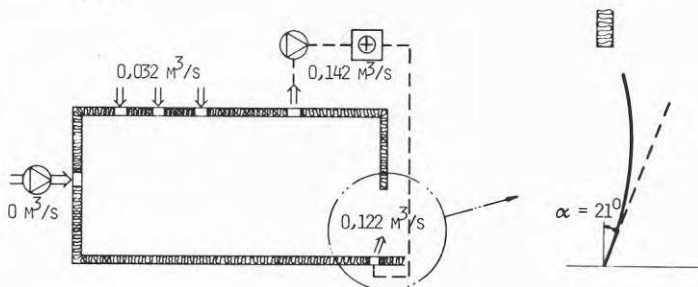


Figur 2.44 Luftridans avböjning vid "otät-
het 4.8 ‰"

Fall 64

Samma förutsättningar som i fall 63, förutom att ridåluften ej uppvärmts. Därigenom har förlusten genom porten minskat jämfört med fall 63. Strålbanan har blivit ungefär densamma och $0.034 \text{ m}^3/\text{s}$ har sugits in genom hålen.

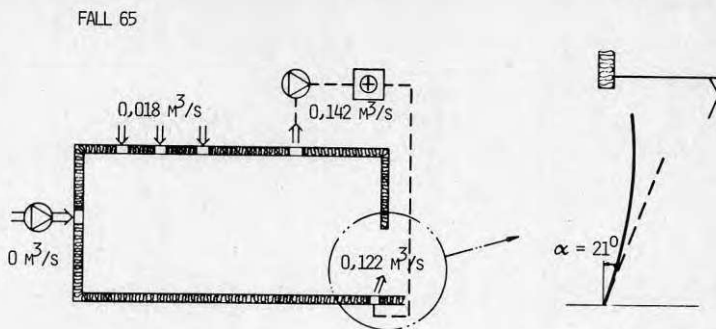
FALL 64



Figur 2.45 Luftridans avböjning vid "otät-
het 4.8 ‰" utan ridåuppvärmning

Fall 65

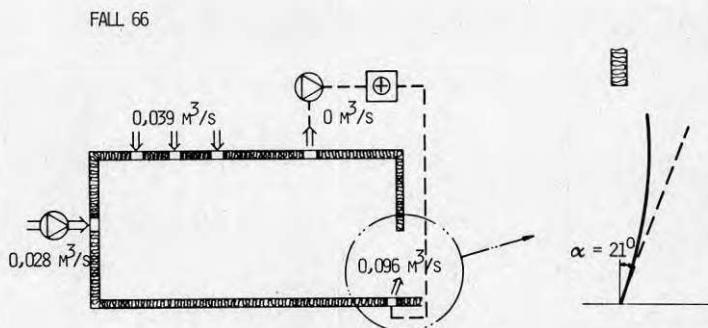
Samma förutsättningar som i föregående fall, men här har ridåluften återstyrts med hjälp av en öppen sluss och styrskena enligt figur 2.23. Slussens tak och styrskenan har hindrat ridån från att föra ut lika mycket luft som i fall 64, vilket innebär att endast $0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ strömmat in genom hålen.



Figur 2.46 Luftridåns avböjning vid "otäthet 4.8 %" med ridååterstyrning

Fall 66

I detta och följande fall har ridåluften tagits direkt från utsidan, vilket motsvarar konstruktionen hos en normal utomhusridå. För att ytterligare minska avböjningen hos ridåstrålen har dessutom ett luftflöde på $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ blåsts in genom ett hål i byggnadens vägg. Ytterligare tre hål med en sammanlagd area på 0.084 m^2 , motsvarande 11.4 % av portarean, finns upptagna i väggarna. Ridån har i detta fall fört ut så mycket luft ur byggnaden, så att det förutom det inblåsta luftflödet sugits in ytterligare $0.039 \text{ m}^3/\text{s}$ genom de tre öppna hålen.



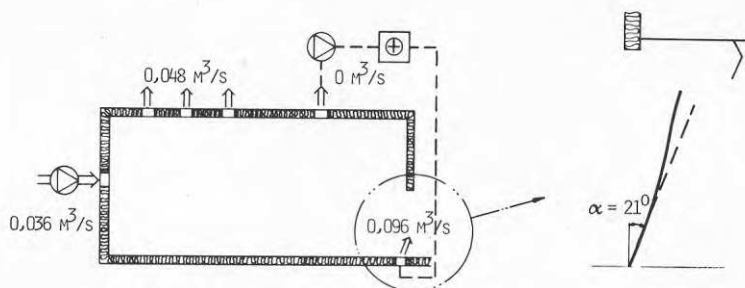
Figur 2.47 Luftridåns avböjning vid "otäthet 16.2 %" och extra tilluft

Fall 67

Samma förutsättningar som i fall 66 fast med öppen sluss och återstyrningsskena. Liksom i fall 65 hindrar slusstaket och återstyrningsskenan ridån från att föra ut lika mycket luft som i fall

66. Trots att strålbanan nästan följer en rät linje förs luften tillbaka in i byggnaden. Inne i byggnaden fås på detta sätt övertryck som både bidrar till att trycka ut strålbanan och att pressa ut $0.048 \text{ m}^3/\text{s}$ genom de tre öppna hålen.

FALL 67

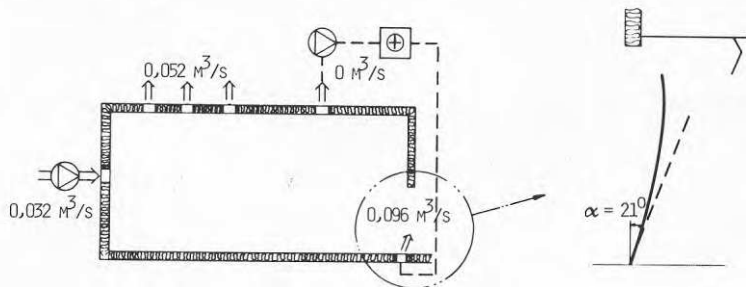


Figur 2.48 Luftridåns avböjning vid "otäthet 16.2 %", extra tilluft och med "öppen sluss"

Fall 68

Samma förutsättningar som i fall 67 fast med vindanfall mot ridån. Vinden tvingar strålen att böja av en aning inåt, vilket ökar utströmningen genom de tre öppna hålen till $0.052 \text{ m}^3/\text{s}$.

FALL 68



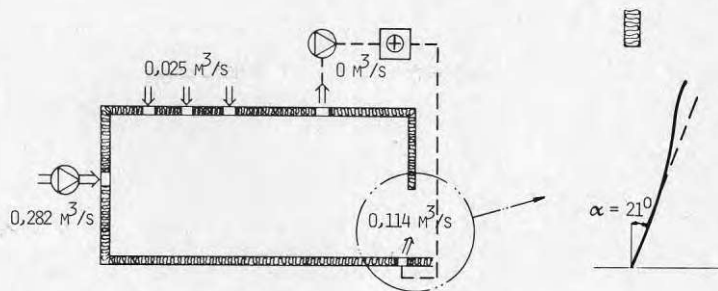
Figur 2.49 Luftridåns avböjning vid "otäthet 16.2 %", extra tilluft och med "öppen sluss" samt vindanfall

Fall 69

Till skillnad mot fall 66-68 har ridåflödet ökat något, samtidigt som ett betydligt större luftflöde, $0.282 \text{ m}^3/\text{s}$, blåses in i byggnaden. Strålbanan följer nu en nästan rät linje. Liksom i fall 66 suger ridån ut så mycket luft att det, trots det inblåsta luftflödet, blir undertryck i byggnaden.

Genom de öppna hålen sugas därmed $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ in.

FALL 69

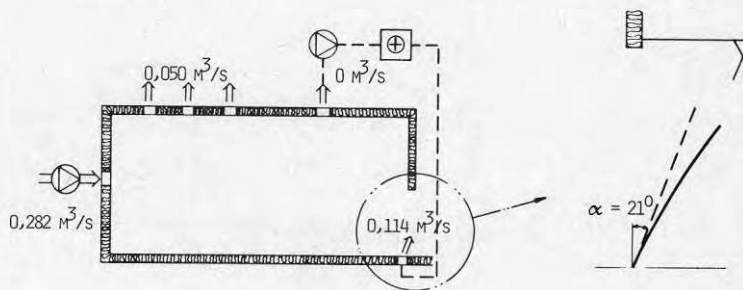


Figur 2.50 Luftridåns avböjning vid "otäthet 16.2 ‰", ytterligare extra tilluft och högre ridåluftflöde

Fall 70

Samma förutsättningar som i fall 69 fast med öppen sluss och återstyrning. Liksom tidigare hindrar slusstaket och återstyrningsskenan ridån från att suga ut luft genom porten. Eftersom ett stort luftflöde samtidigt blåses in i byggnaden fås övertryck inne i byggnaden. Detta får $0.050 \text{ m}^3/\text{s}$ att tryckas ut genom de öppna hålen och strålbanan hos ridån att böja av utåt.

FALL 70



Figur 2.51 Luftridåns avböjning vid "otäthet 16.2 ‰", ytterligare extra tilluft och högre ridåluftflöde samt "öppen sluss"

2.7.3 Undersökning av olika slussutföranden

Den i tidigare redovisade fall använda öppna slussen med återstyrningsskena har haft den form som visas i figur 2.23. För att utröna om utseendet hos slussen med återstyrningsskena har någon inverkan på ridåns skyddande verkan, har 9 fall med olika slusskonstruktioner undersökts. Djupet hos slussen har varierats liksom slusstaketets vinkel mot byggnadens framsida samt styrskenans form. Som framgår av värdena i tabell 2.3 ger en uppåtledning hos slusstaket sämre skydd hos ridån. Detta har sin troliga förklaring i att avståndet mellan styrskena och inblåsningsspalt ökar, vilket ökar genombrottsrisken för den återcirkulerade luften. En ökning av slussdjupet ger en minskad energiförbrukning trots att avståndet mellan styrskena och inblåsningsspalt ökar. Detta förklaras av att försöken är gjorda med sned anblåsning hos vinden ($\beta=30^\circ$). En fördjupad sluss ger då ett större skydd för porten.

För samtliga fall gäller:

$$\alpha = 21^\circ$$

$$\beta = 30^\circ$$

$$u_0 = 17.4 \text{ m/s}$$

$$u_w = 1.8 \text{ m/s}$$

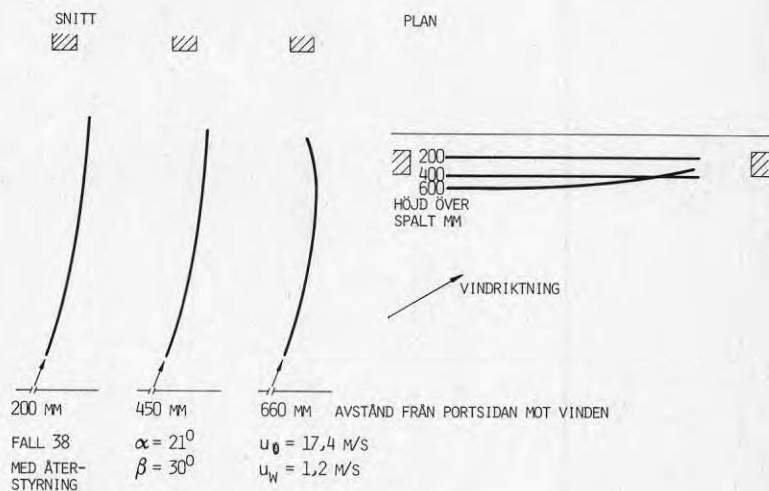
FALL	STYRSKENANS STORLEK	I_w/I_c	γ	L MM	$\Delta\theta_{i-0}$ K	$\Delta\theta_{c-i}$ K	k_2 W/m ² K	k_0 W/m ² K
54	LITEN	0,74	90 ⁰	415	15,6	30,4	141	270
55	MEDEL	0,72	90 ⁰	423	18,9	28,7	92	257
56	MEDEL	0,74	75 ⁰	415	13,4	30,6	185	251
57	MEDEL	0,74	75 ⁰	415	12,7	30,6	198	244
58	STOR	0,75	90 ⁰	415	19,3	29,4	92	300
59	STOR	0,75	75 ⁰	415	17,4	30,5	118	285
60	STOR	0,76	90 ⁰	608	24,0	28,0	54	333
61	MEDEL	0,75	90 ⁰	765	22,4	27,4	63	322
62	STOR	0,76	90 ⁰	765	23,7	27,8	55	331

Tabell 2.3 Försök med olika återstyrningsutföranden

2.7.4 Uppmätning av strålbånanor

Vid samtliga försök har läget hos strålens hastighetsmaximum vid olika höjder över spalten bestämts för ett snitt mitt i portöppningen. I några fall har denna bestämning gjorts för tre olika snitt i porten. Genom att föra anemometersonden genom ridå-

strålen på en viss höjd fås en hastighetsprofil av strålen för denna höjd. För en viss höjd har strålen sitt centrum i den punkt, där hastigheten har sitt maximum. Ur hastighetsprofilen kan denna punkts läge avläsas. Genom att bestämma strålcentrums läge på olika höjder över spalten fås strålens bana. I figur 2.52 och 2.53 ges strålbanan för två fall i tre olika snitt i ridån längs porten. Med hjälp av de tre vertikala snitten kan tre horisontella snitt genom porten göras. Dessa snitt för höjderna 200, 400 respektive 600 mm över spalt är sammanlagrade till samma figur. Av dessa framgår att vinden vid snedanfall vid portens övre del får strålen att gå mer utåt närmast vinden och mer inåt byggnaden vid den port-sida, som är längst från vinden.



Figur 2.52 Luftridåbanan i olika lägen längs porten och på olika höjd vid snett vindanfall och ridååterstyrning

3 FULLSKALEFÖRSÖK

3.1 Försöksuppläggning

Vid redovisade modellskaleförsök ändrades inte luftridåstrålens bana av vindens styrka. När en byggnad är tät självstabiliserar nämligen ridåbanan av att från insidan ejakterat luftflöde måste föras tillbaka till lokalen. Ingen ersättningsluft kan komma in genom väggar och tak.

Försöken kom därför att klarlägga vindens betydelse för inblandning av uteluft i ridån. För att få mera utförliga beskrivningar av hur en luftridå i byggnader med olika täthet påverkas av pulserande vind skulle nya omfattande mätningar utanför det ursprungliga projektets ramar ha krävts.

Den för energistudien i modellen användbara mätmetoden måste för fullskaleförsöken ersättas med ett samplingsförfarande. Med ett sådant ges möjlighet att även tidsrelatera luftridåstrålens avböjning och vindens impuls. Meteorologiska mätningar runt byggnaden och mätningar i luftridån sammanfördes och anslöts därför till en gemensam datalogger. Vindhastighet och riktning samt temperatur direkt utanför porten och i fritt fält på olika höjd krävde dock en separat studie.

3.2 Försöksanläggning

Att finna en luftridåinstallation, lämplig för både luftridåstudier och med en omgivning, som ger möjlighet att studera vindens direkta påverkan utan störningar från omgivande bebyggelse var en målsättning för ett av de två planerade fullskaleförsöken. Vid SAAB:s motorcentrum i Linköping skulle erhållas en sådan anläggning i början av 1980, figur 3.1. En gles industri- och handelsbebyggelse i hörnet mellan länsvägen mot Motala och E4 och öppning norrut mot östgötaslätten nedanför sjön Roxen blev meteorologiskt godtagbart.

Den öppna bebyggelsestrukturen i riktning norrut framgår av figur 3.2, på vilken också de två meteorologiska mätmasterna för studium av vindens förändring fram till porten återges. På den i nästan ostlig riktning belägna fasaden syns den provisoriska - utan ytterport - benämnda "öppna slussen" framför den 3.6 x 3.6 stora porten.



Figur 3.1 SAAB:s Motorcentrum, Linköping och närmast omgivande bebyggelse vid länsvägen mot Motala

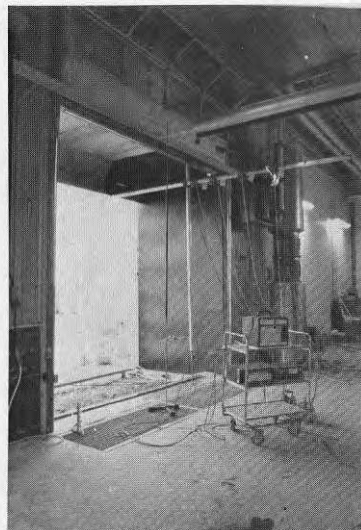


Figur 3.2 Omgivning framför den byggnadssida, där port och de två mätmasterna var uppsatta. (Masten i "fritt läge" syns något otydligt tecknad vid sidan av transformatorbyggnaden.)

Figur 3.3 visar byggnadsfasaden med den utskjutande, öppna slussen och i dess överkant synliga återstyrningsskärmen. Hela mastlängden med mätsonder på olika höjd framgår även. På figur 3.4 med den öppna slussen sedd inifrån finns även själva fläktenheten med ljuddämpare till höger om porten.

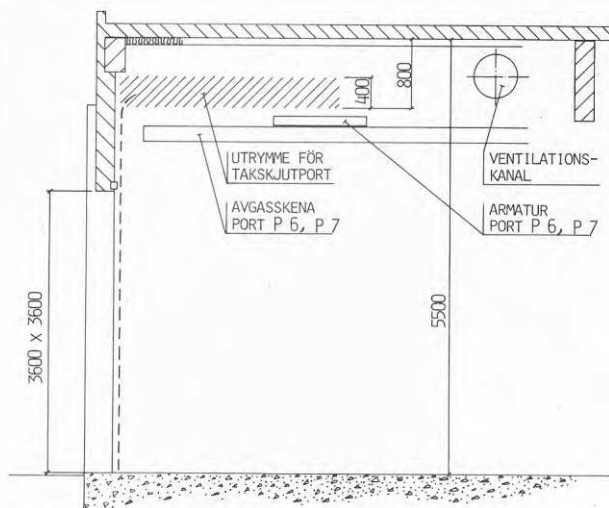


Figur 3.3 Mätmast framför port med monterad öppen sluss med återstyrningsskärm



Figur 3.4 Den öppna slussen med återstyrningsskärm sedd inifrån. På bilden visas också hela den mätutrustning, som användes frånsett datorenheten

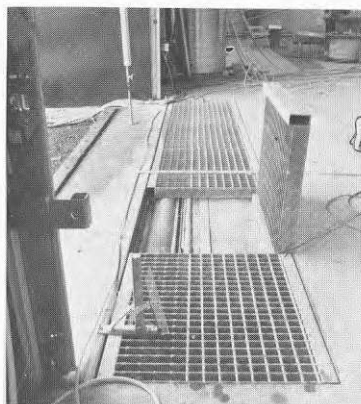
Portdimension och utrymme under tak fram till första takbalken framgår av figur 3.5.



Figur 3.5 Sektion av lokaldel vid port

Bredvid det uppfällda körgallret syns den ställbara tilluftsspalten, figur 3.6.

Vid Bahcos Enaverkstäder i Enköping, där kompletterande mätningar gjorts och den öppna slussen med återstyrningsskärm först provades, är den yttre återstyrda ridådelen visualiserad med rök, figur 3.7.



Figur 3.6 visar den ställbara luffridåspalten och den gradskiva med vilken spaltvinkeln mäts



Figur 3.7 Port vid Bahco Industri med rökvisualisering av luft-ridååterstyrningen

3.3 Mätutrustning

Den mätutrustning, som användes vid ridåmätningen framgick av figur 3.4. Det flyttbara mätstativet i portöppningen med de fyra temperatur- och hastighetsmätsonderna möjliggör studier av ridåstrålen på olika höjd och olika punkter tvärs ridå.

Luftridåspaltens utblåsningvinkel har bestämts med den anordning som syns placerad på körgallret men som visats mer i detalj på figur 3.6.

Luftridåmätningen med termistor-termometer med 3 sekunders svarstid i skyddade rör och de i stort riktningsokänsliga hastighetsmätarna av fabrikat/typ TSI 1610 visas på figur 3.8. Den i den yttre spetsen placerade givaren är givetvis temperaturkompenserad och erhålls med separat kalibreringskurva samt har en svarstid på 0.1 sek. Sondernas placering i förhållande till ridåspalten framgår av figur 3.14.

För kompletterande och kontrollerande mätning har använts den på vagnen, på figur 3.4, överst placerade 12-punktskrivaren, tryckmätaren och linjeskrivaren samt på stativet placerade prandtlröret.

Kompletterande temperaturmätning har gjorts med termoelement koppar-konstantan, kopplade till 12-punktskrivaren på grund av termistor-termometerns tröghet. Med prandtlrör har ridåhastigheten registrerats över elektronisk tryckgivare (fabrikat Furness) på linjeskrivaren. På samma sätt har tryckskillnaden över väggen vid porten registrerats. Trycken har dessutom mätts med vätskepelare.



Figur 3.8 Mätstånd med termistor-termometer placerade i ett skyddande rör samt de riktningsoberoende hastighetsmätsonderna fabrikat TSI 1610

Vid aktuell mätning är riktningsokänsligheten både en för- och en nackdel. Det mätplan, för vilket hastigheten skall bestämmas för att få energiflödet, måste fastställas med rök. Tidsmässigt vinnas dock åtskilligt eftersom mätning med olika vinkelinställning behövs med riktningsokänsliga sonder.

Dator, datalogger med anpassningsenhet och plotter har varit placerade strax innanför porten i ett blivande rekonditioneringsutrymme, figur 3.9. Förutom temperatur-, vindriktnings- och vindhastighetsmätning på 10 meters höjd i den "fritt" placerade masten har de mätningar gjorts som anges i tabell 3.1 sid 101.

Den 20-kanalers datalogger som använts har en total samplings-tid på 10 sekunder. För att få kort tidsavstånd mellan hastighetsmätningarna i ridån och rådande vindförhållanden utanför porten har dessa lagts efter varandra. Därmed kan samband sökas om hur vinden påverkar luftridåns bana.



Figur 3.9 Datalogger med signalomvandlingsenheter, dator och ansluten plotter för kontroll av aktuell hastighetsfördelning i ridån

Den meteorologiska mätutrustningen på marken framför porten framgår närmare på figur 3.10. Längst ner 1.05 m över mark och på 3.25 m över mark syns de med skålkors försedda vindhastighetsmätarna. Mellan dessa givare sitter den speciella typ av temperaturmätare som används. Motståndstermometern skyddas av ett rör och ett speciellt "paraply", som utgör även den enhet, från vilken luft sugts genom det rör, i vars andra ände fläkten är placerad. Bakom masten på 3.25 m över mark syns den vindflöjel, som indikerar vindriktning.

Med den använda vindflöjeln erhålls endast den horisontella vindriktningen. Som provet med en rökpatrik visar, är den i aktuella fall även riktad snett uppåt. Detta beror på att en virvel ligger framför porten, som initierats av den vind, som blåser över tak och från väggen.



Figur 3.10 visar mätsonderna för vindhastighet på 1.05 och 3.25 samt temperaturmätsond på 2.35 m över mark. Vindriktningsflöjel på 3.25 m över mark syns snett bakom masten

3.4 Mätning

De parametrar, som bestämmer hur en luftridå fungerar både ur drag- och energisynpunkt, har tidigare klarlagts i teoridelen och modellförsöksdelen. En orimlig arbetsinsats skulle krävas vid fullskaleförsök för att klarlägga energibalansen för hela byggnaden. Mätning i ridån som kan göras längs porten och på olika höjd kan därför endast bli kvalitativ. Den kvantitativa beräkningen ger dock indikationer om nivåer, som är tillräckliga för praktisk tillämpning. Motorcentrumanläggningen, som var under färdigställande vid försöken i mitten av april 1980, hade ventilationen i stort balanserad. Varmvattenförsörjningen var dock inte injusterad och därför kunde inte önskad inomhustemperatur erhållas.

Mätning vid olika ridåvinklar, två spalshastigheter (en eller två fläktar inkopplade) på tre olika höjder och i tre snitt längs porten har givetvis inte kombinerats så att alla fall täcks. Vid alla mätningar har inte heller lika lång mätperiod använts. Normalt har 100 st mätvärden tagits på varje kanal.

Genom punkttraversering med prandtlrör på olika höjd har luftridåns hastighetsprofil fastställts så att ridåns utbredning och hastighetsavtagande givit information om turbulensgraden. Den mätningen är också ett nödvändigt komplement till mätning-

en med de fyra sönerna.

Med så störningsfritt som möjligt placerade slangändar har också trycket över väggen vid sidan av portens norra kant mätts. För en fullständig bild av de tryckförhållanden, som påverkar ridån, är givetvis ett sådant förfarande inte tillfredsställande. Speciellt gäller givetvis detta när en öppen sluss skjuter ut från byggnaden.

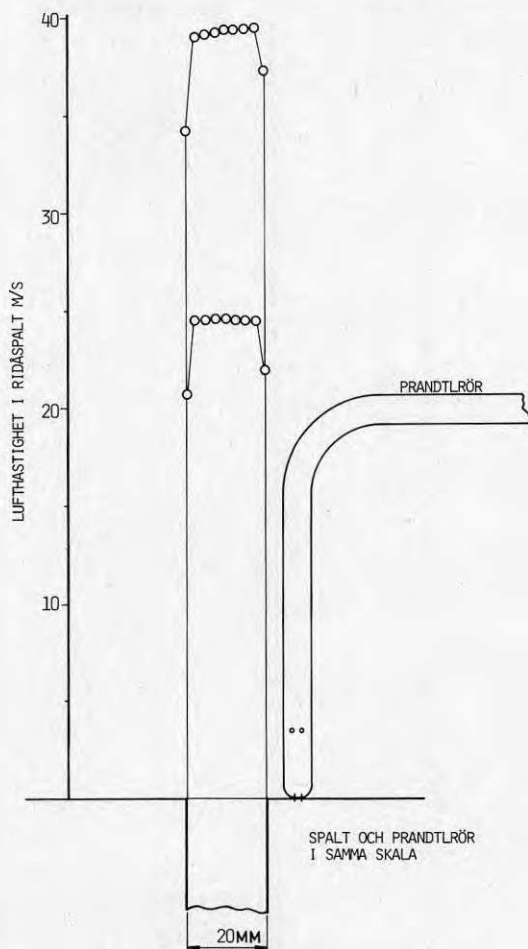
På mätningar, i ett så kraftigt turbulerande tillstånd som luften i en ridå befinner sig, behöver inte noggrannheten vara så hög. Hastighetsmätningen har dock skett med en sondtyp som har kort svarstid. Därmed kan även dess noggrannhet på 0.1 m/s användas för att fastställa var besvärande luftrörelser uppstår nära ridån. Med termoelement med svarstider under 1 sekund kan dessutom den miljömässiga konsekvensen av snabba temperaturvariationer i luften också fastställas.

3.5 Mätresultat med kommentarer

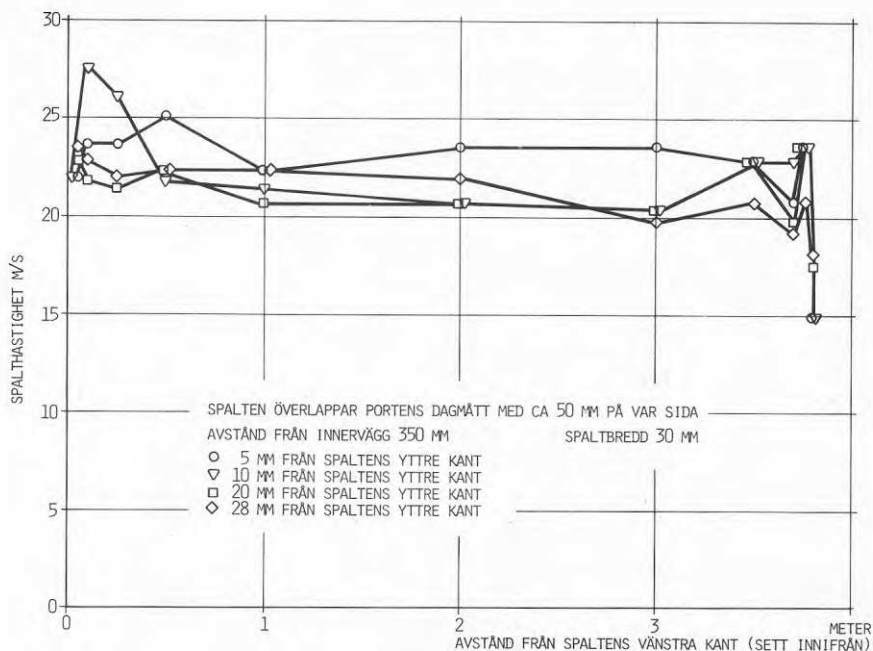
3.5.1 Ridåhastighet och utbredning

Eftersom ridåns impuls bestämmer dess funktion har hastighetsprofilen i luftridån på olika höjd bestämts innan de egentliga energimätningarna påbörjats. Av figur 3.11 framgår att spalthis hastigheten med en och två fläktar inkopplade är ca 24 respektive 39 m/sek i ett snitt, som ligger 1.0 m från tilluftskanalens vänstra, längst bort från fläktarna belägna kanalände.

Mätningar längs luftkanalens spalt har skett med prandtlröret nedstuckt genom körgallret så att dess öppning kommit endast några mm från spaltens utloppsplan. Den hastighet, som då uppmätts i fyra punkter tvärs spalter visar, enligt figur 3.12, på en del skillnader. Tvärställda ledplåtar i den 250 mm djupa spalten och genomgående ställskruvar har givetvis bidragit, även om mätpunkterna placerats så att minsta möjliga störning skall erhållas. Trots dessa skönhetsfel så framgår att hastigheten längs spalten är jämn och ca 21.5 m/sek med en spalthis bredd på 30 mm.



Figur 3.11 Hastighet i luftridåspalt med en respektive två fläktar mätt med prandtlrör



Figur 3.12 Luftridåns hastighetsfördelning längs spalten med 1 fläkt och 30 mm spalt

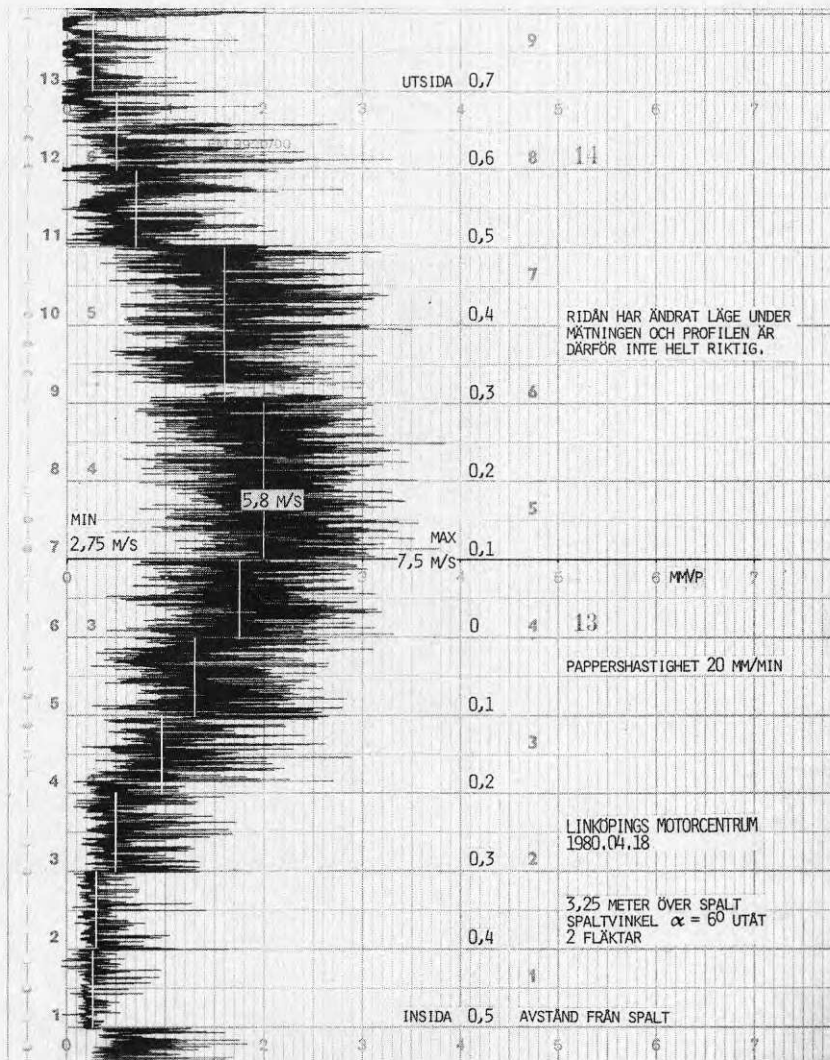
Luftridåns funktion är till viss del beroende av hur hastigheten avtar dvs hur mycket luft som ejjekteras till sidorna. Från energisynpunkt och komfortsynpunkt skall de luftvolymen, som sätts i rörelse hållas så små som möjligt. Hastigheten tvärs ridån har därför mätts på olika höjd för att fastställa dess turbulensgrad dvs utbredning och hastighetsavtagande.

Dessa mätningar som gjorts med prandtlrör och elektronisk tryckgivare har registrerats på linjeskripare, figur 3.13, och sammanfattats i figur 3.14.

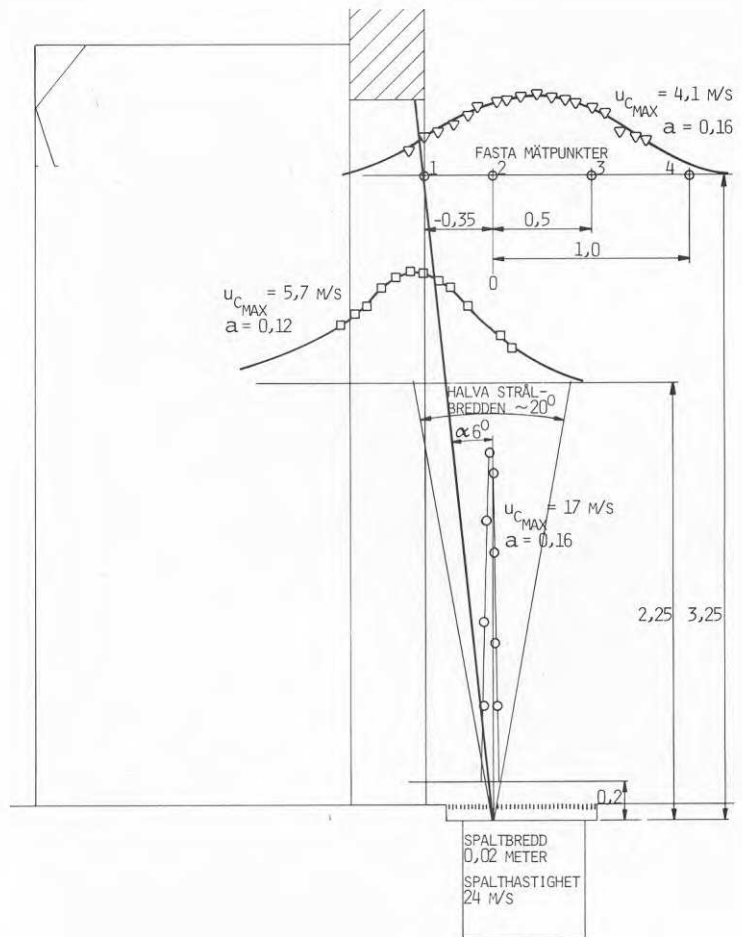
Att de två hastighetsprofilernas läge inte överensstämmer med spaltvinkeln, som redovisas vid mätningen, beror på att tidpunkterna skiljer.

Utifrån den uppmätta axiella hastigheten och utbredningsvinkeln har koefficienten a beräknats med den i Baturin / 1 / angivna formeln:

$$\frac{u_y}{u_0} = \frac{1.2}{\sqrt{\frac{a \cdot y}{b_0}}} + 0.41 \quad 3.1$$



Figur 3.13 Lufthastighet tvärs ridån

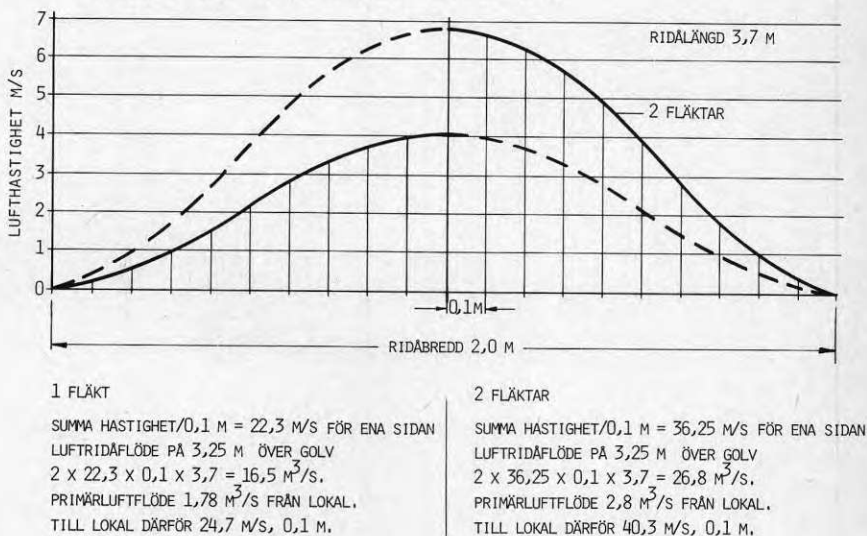


Figur 3.14 Luftridåhastighet tvärs luftridån på olika höjd

där u_y	= luftridåhastigheten i centrum och på avståndet y m från spaltöppning	m/sek
u_0	= lufthastighet i spaltutloppet	m/sek
y	= avstånd från spalt	m
b_0	= halva spaltbredden	m
a	= koefficient	-

Flertalet mätningar har gjorts, utöver redovisade med 39 m/sek i spalthisastighet, med resultatet $a = 0.16$. Detta värde ligger under $a = 0.2$, som anges i / 1 / för tilluftsöppningar som har ledplåtar men något över $a = 0.10-0.15$, som anges för långsmala spalter med tvärsnittsreducering - "strykning".

Den hastighetsprofil som fastställts med prandtl-rörsmätning utgör utgångspunkt för bestämning av uppmätta luftflöden med de fyra på 3.5 m över golv fast placerade mätpunkterna, figur 3.14. Genom att använda tidigare redovisad trapetsmetod på de med sondersna uppmätta hastigheterna och temperaturerna och subtrahera dessa från den ideala enligt figur 3.15 och lokaltemperaturen, har det effektunderskott, som ridån har i förhållande till lokalen, fastställts. Är luftflödet till lokalen lägre än angivna, innebär detta att ett flöde går ut ur lokalen, som måste ersättas genom otätheter och värmas upp till lokaltemperatur.



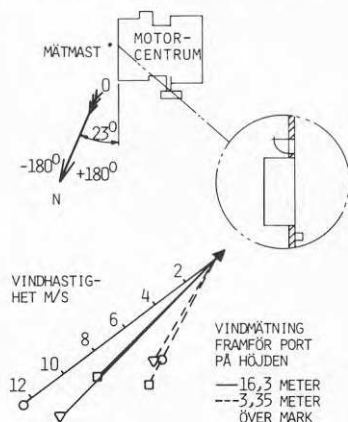
Figur 3.15 Luftridåns hastighetsprofil på 3.25 m över golv och summa hastighet på ridåns ena sida och totalt till lokal vid flödesneutral ridådelning i portöverkant

3.5.2 Luftridåns avböjning

Hastighet under överkanten på porten berättar om luftridåns avböjning, som är beroende av tryckpåverkan från vind, täthetsskillnader mellan ute- och inneluften samt eventuellt underskott på till- eller frånluft i ventilationssystemet.

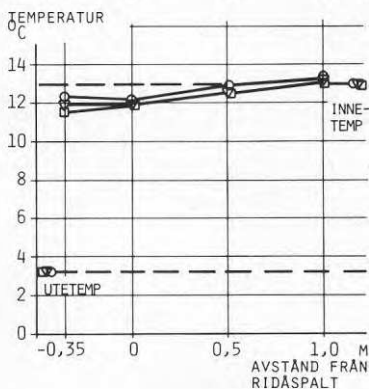
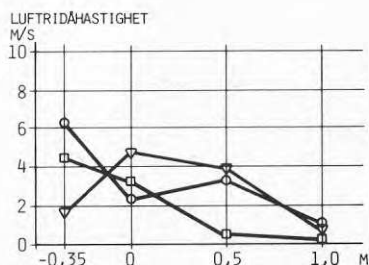
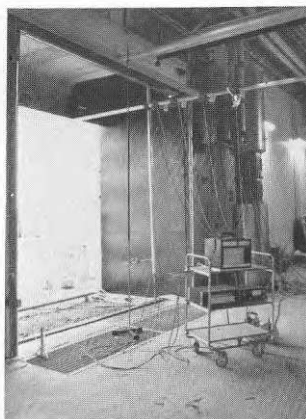
Om temperaturen i lokal och utomhus är konstant och ventilationssystemet inte ändras blir förändringar i luftridåns strålbana en funktion av vindförhållandena. I figur 3.16 visas främst hur hastigheten i ridån förändras på tre efter varandra med 10 sek intervall uppmätta värden. Samtidigt åskådliggörs hur vindriktning och hastighet förändrats vid mätmasten utanför porten. Riktning till portplan och dess väderstreckorientering framgår på skissen ovanför det foto, som visar de mätpunkter på stängen som använts för mätning av temperatur och lufthastighet. För datorbearbetning har vindriktningen delats in enligt pilen i 0° - $+180^\circ$ och -180° - 0° .

Figur 3.16
Luftridåshastighet och temperatur med ridååterstyrning vid tre efter varandra, med 10 sekunders mellanrum, gjorda mätserier och vid vindhastigheter och riktningar som framgår av skissen

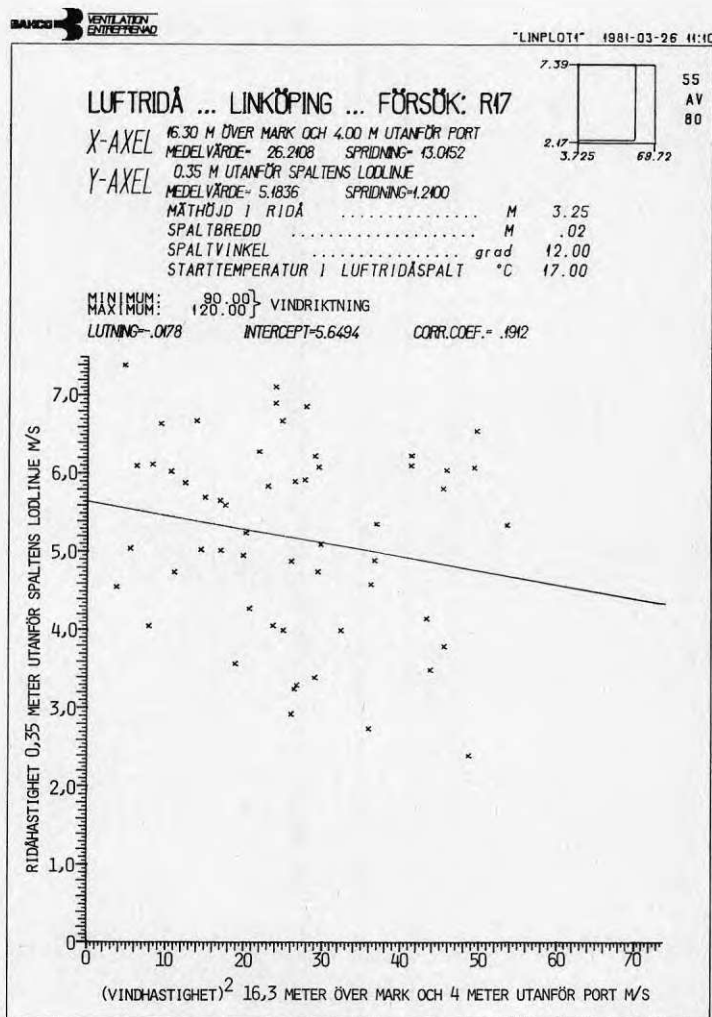


FULLSKALEFÖRSÖK: MOTORCENTRUM LINKÖPING

DATA: FÖRSÖK R27 MED ÖPPEN SLUSS
SPALTHASTIGHET 39 M/S
SPALT 0,02 METER
SPALTVINKEL 6° UTÅT
MÄTHÖJD 3,25 METER ÖVER GÖLV
AVSTÅND FRÅN SÖDRA PORTSIDAN 0,8 M



Som temperaturdiagrammet i figur 3.16 visar förändras inte ute- och innetemperaturerna och i ridån mäts inga påtagliga temperatur- men kraftiga luft-hastighetsförändringar med sonderna. För att eventuellt kunna finna samband mellan vind och luftridå-hastighet har därför en datorbaserad plottning gjorts för dessa på det sätt som figur 3.17 visar för försök R 17.



Figur 3.17 Luftridåhastighet i mätpunkt 1 som funktion av vindhastighet i kvadrat på 16.3 m över mark

Figur 3.17 visar ett typexempel på den bild som erhålls när ridåhastigheten 0.35 m utanför spaltens lodlinje på 3.25 m över golv avsätts som funktion av det "dynamiska trycket" - kvadraten på vindhastigheten 16.3 m över mark och 4 m utanför porten. Genom att begränsa vindriktningen mellan 90° och 120° har 55 av de 80 samhörande mätvärdena vid försöket kommit med. Den mot portplanet vinkelräta hastighetskomponenten blir därmed för minsta vinkeln max ca 4 % för liten.

Korrelationskoefficienten 0.19 anger dock att det inte finns något säkerställt samband mellan ridå- och vindhastighet.

Vindens dynamiska tryck har för aktuellt fall en spridning som är ungefär en tiopotens. Ridåbanans radie ska då, enligt ekvation 3.2, ändras lika mycket om inte samtidigt tryckskillnaden mellan ute och inne förändras av att ridån för till eller ifrån lokalen luft.

$$R_m = \frac{I_o}{\Delta p \cdot B} \quad (\text{härledd ur ekvation 1.6 och 1.7}) \quad 3.2$$

Av hastighetsprofilens form följer dock att hastigheten heller inte ändras proportionellt mot en given förflyttning av ridåns läge. Dessutom framgår av tabell 3.1, som visar en av tio efter varandra följande mätserier, att vinden till övervägande del är vänd mot väggen på 3.35 m över mark. När vinden blåser från väggen skapas nämligen en s k lävirvel framför den, som dock vid marken alltid har en riktning mot väggen.

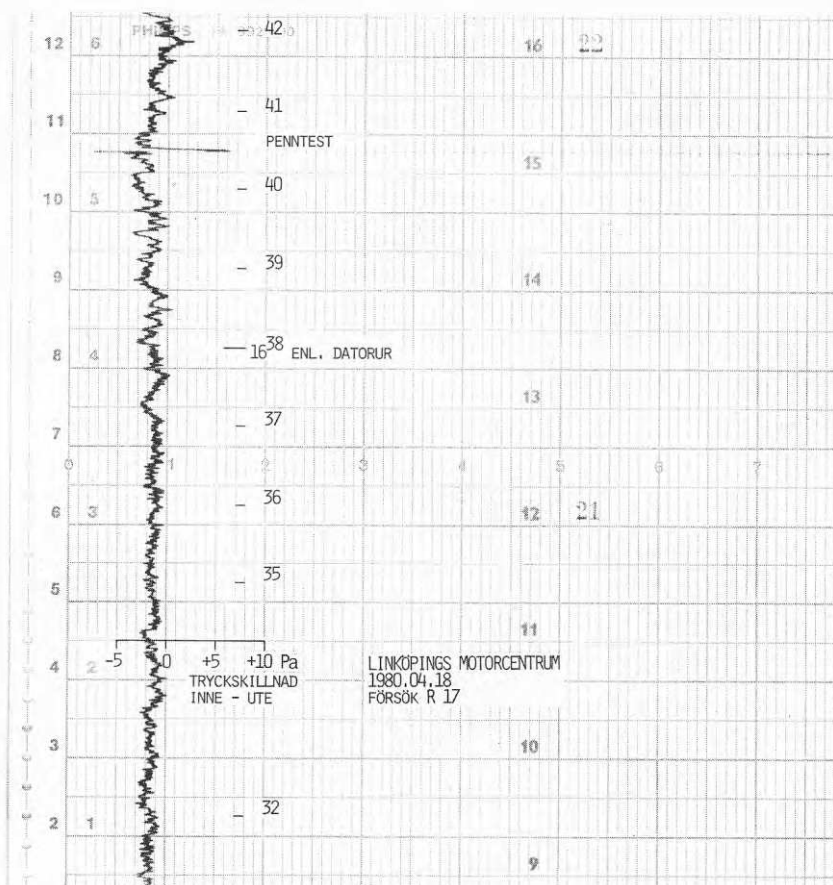
Att med hänsyn till spridningsbilden och ovanstående faktorer söka en icke linjär regressionsfunktion är därför inte meningsfullt.

Den faktiska tryckskillnaden mellan ute och inne ska, som ekvationen visar, dock påverka ridåns bana direkt. Men trycket påverkas också av ovan beskrivna förhållanden och dessutom av byggnadens täthet.

Enligt Handa /13/ ska, om ridån fungerar i princip som en vägg, ett undertryck erhållas på läsidan, dvs övertryck i lokalen. Mätning av tryckdifferensen över väggen vid porten vid försök R 17 visar, enligt figur 3.18, att det erhålls ett undertryck inne.

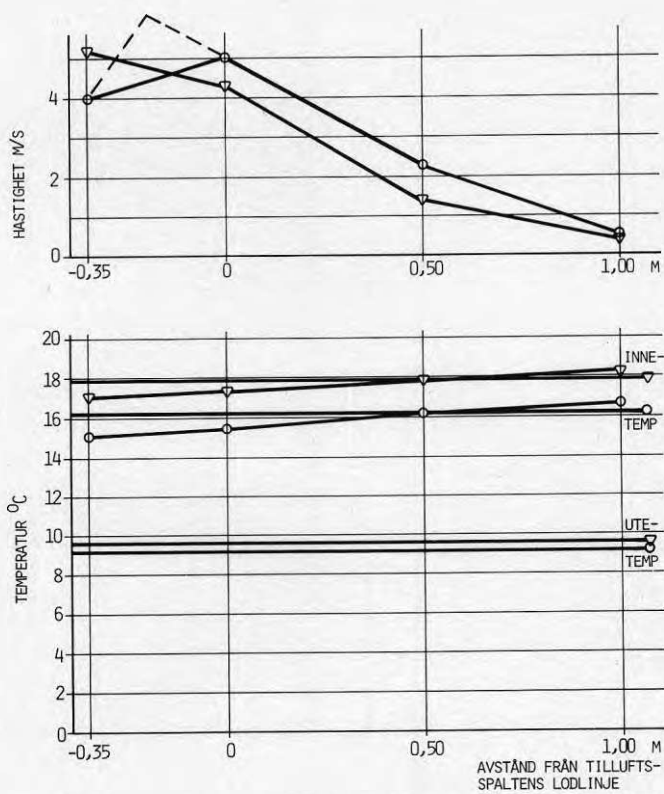
TEMPERATUR °C								VINDRIKTNING °		RIDA- OCH VINDHASTIGHET M/S					
METER UT/IN OVANFÖR TILLUFTSSPALTENS LÖDLINJE				I LOKAL	4 METER UTAN- FÖR PORTEN PÅ HÖJDEN		I FRITT LÄGE PÅ HÖJDEN	4 METER FRAM- FÖR PORTEN PÅ HÖJDEN		METER UT/IN OVANFÖR TILLUFTSSPALTENS LÖDLINJE				4 METER UTAN- FÖR PORTEN PÅ HÖJDEN	
UT 0,35 METER	0	IN 0,5 METER	IN 1,0 METER		14,8 METER	2,35 METER	10,0 METER	3,35 METER	16,3 METER	UT 0,35 METER	0	IN 0,5 METER	IN 1,0 METER	16,3 METER	3,35 METER
16,85	17,18	17,56	17,92	17,75	9,42	10,81	9,73	-135,08	74,85	6,50	4,06	0,59	0,12	4,13	0,20
16,89	17,13	17,63	18,03	17,75	9,41	10,80	9,69	69,53	61,05	5,77	6,63	2,70	0,31	3,04	0,56
16,95	17,10	17,51	18,03	17,76	9,47	10,74	9,68	140,17	62,76	3,92	4,44	1,86	0,52	3,90	0,50
16,76	17,02	17,50	17,98	17,77	9,51	10,91	9,72	157,11	78,67	6,96	6,82	2,65	0,26	4,85	0,29
16,99	17,22	17,72	18,07	17,78	9,45	10,93	9,75	-127,86	71,00	5,23	5,84	2,19	0,06	4,53	0,79
16,97	17,07	17,55	18,06	17,77	9,38	10,86	9,71	-65,24	80,04	4,31	6,54	1,76	0,40	5,27	0,64
16,91	17,09	17,56	17,92	17,79	9,33	10,82	9,73	37,23	82,06	5,76	4,90	3,64	0,51	5,61	0,54
16,80	17,08	17,68	18,04	17,81	9,31	10,80	9,73	-62,79	91,60	3,99	4,23	1,64	1,99	5,00	1,69
17,17	17,20	17,60	18,04	17,82	9,33	10,76	9,70	-66,02	97,41	6,68	5,36	2,96	0,44	3,73	0,98
16,98	17,15	17,66	18,09	17,84	9,37	10,71	9,75	-28,60	100,02	5,01	2,24	0,57	0,30	4,13	0,75
17,38	17,45	17,80	18,12	17,85	9,42	10,67	9,84	-108,11	84,79	2,89	3,67	0,55	0,36	3,59	1,01
17,20	17,45	17,92	18,14	17,85	9,49	10,67	9,87	64,92	82,95	5,25	3,06	0,42	0,35	3,46	0,26
17,09	17,36	17,87	18,07	17,87	9,52	10,68	9,94	50,31	112,30	7,39	4,40	0,72	0,61	2,17	0,38
17,07	17,45	17,82	18,14	17,88	9,64	10,72	9,90	-69,98	103,93	4,55	4,07	0,76	0,13	1,93	0,72
17,29	17,37	17,78	18,15	17,87	9,78	10,73	9,85	-77,14	114,77	6,11	3,40	0,50	0,15	2,88	1,06
17,17	17,35	17,82	18,21	17,86	9,88	10,73	9,84	-128,46	114,99	6,02	6,37	1,79	0,51	3,26	0,83
17,00	17,31	17,63	18,07	17,85	9,85	10,71	9,86	-157,61	118,26	5,03	3,63	4,24	0,47	2,33	0,26
17,24	17,50	17,91	18,17	17,83	9,81	10,71	9,87	-50,67	102,71	4,04	6,55	1,69	0,51	2,80	0,39
17,15	17,28	17,69	18,15	17,85	9,82	10,81	9,93	-17,71	103,83	6,64	5,28	1,55	0,57	3,06	0,41
16,97	17,26	17,74	18,12	17,87	9,85	10,87	9,89	27,22	115,77	5,61	4,68	2,01	0,13	4,20	0,42

Tabell 3.1 Exempel på försöksdata från försök R17



Figur 3.18 Tryckskillnad över vägg vid porten

Att det uppmätta trycket är representativt framgår av att centrum på ridåns strålbana med spaltvinkeln 12° träffar portöverkanten och delar ridån ungefär så att ejetterat luftflöde och primärluftflöde går in i lokalen, figur 3.19. Om nämligen den maximalt uppmätta tryckdifferensen 3 Pa sätts in i formeln 3.2 får luftridåns strålbana en radie på 12.2 m och därmed träffar centrumlinjen något innanför mätpunkt 1, enligt figur 3.20. Ridåstrålen med spaltvinkeln 12° vid tryckdifferensen 0 Pa ($R_m = \infty$) kommer att gå med centrum ca 0.4 m utanför mätpunkt 1. Enligt figur 3.15 skall för den ridå som går genom mätpunkt 1 hastigheten då bli ca 5 m/sek. Lägre hastighet förekommer som tabell 3.1 visar. Detta måste bero på att hastighetsvariationer inom ridån är överlagrade.



FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α °	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ °	SPALT-HAST M/S	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP °C
○ 14	MED	6	5,6	116 ±14	39	3,25	0,84	17,0
▽ 17	MED	12	4,9	98 ±14	39	3,25	0,84	17,0

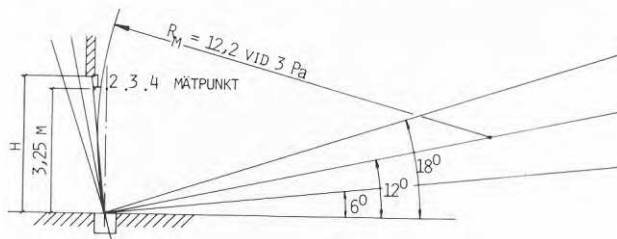
Figur 3.19 Lufthastighet i ingående ridådel

LUFTRIDANS AVBÖJNING

$$\text{EKV.: } R_M = \frac{\rho \times u_0 \times 2b_0 \times B \times u_0}{\Delta p \times B} = \frac{I_0}{\Delta p \times B}$$

FÖR AKTUELL RIDÅ ÄR

- $u_0 = 39 \text{ M/S MED TVÅ FLÄKTAR}$
- $u_0 = 24 \text{ M/S MED EN FLÄKT}$
- $2b_0 = 0,02 \text{ M}$
- $B = 3,6 \text{ M}$
- $I_0 = 132 \text{ N MED TVÅ FLÄKTAR}$
- $I_0 = 52 \text{ N MED EN FLÄKT}$

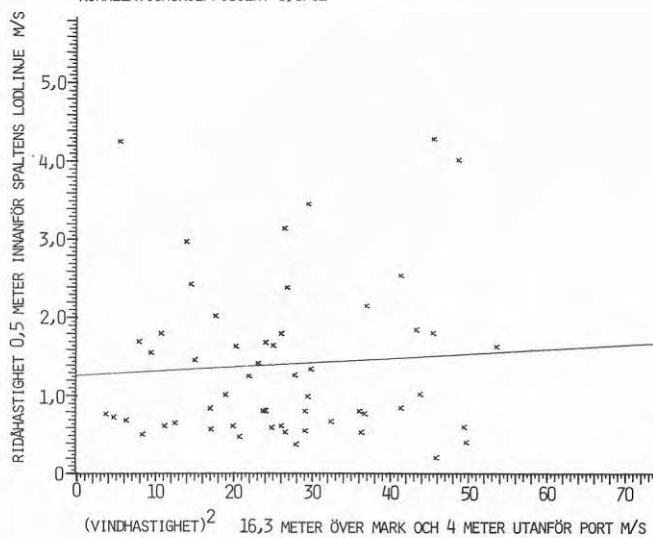


Figur 3.20 Hjälppfigur för grafisk bestämning av luftridans centrum i förhållande till mätpunkterna

FÖRSÖK R 17

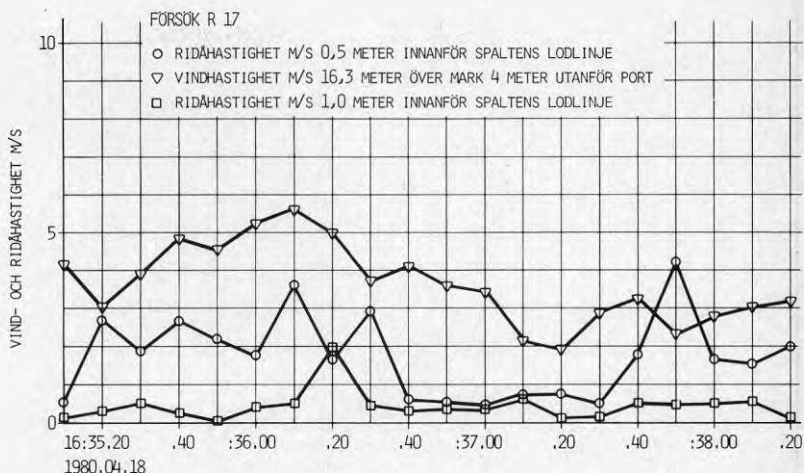
VINDRIKTNING $+90^\circ - +120^\circ$, SE FIG. 3.16

KORRELATIONSKOEFFICIENT 0,0762



Figur 3.21 Luftridåhastighet i mätpunkt 3 som funktion av vindhastighet i kvadrat på 16.3 m över mark

Som figur 3.21 visar ligger ridåhastigheten 0.85 m längre in, huvudsakligen under 1.0 m/s och skall så göra med ledning av figur 3.15.

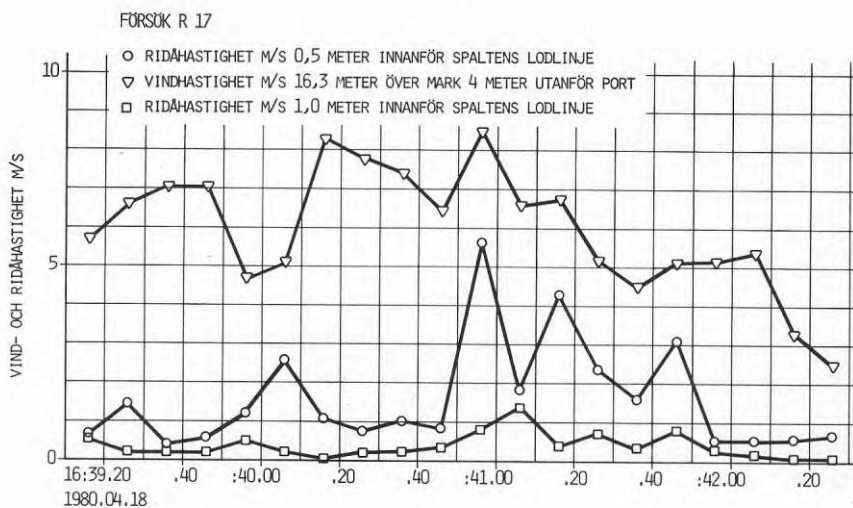


Figur 3.22 Vind- och ridåhastighetens variation med tiden

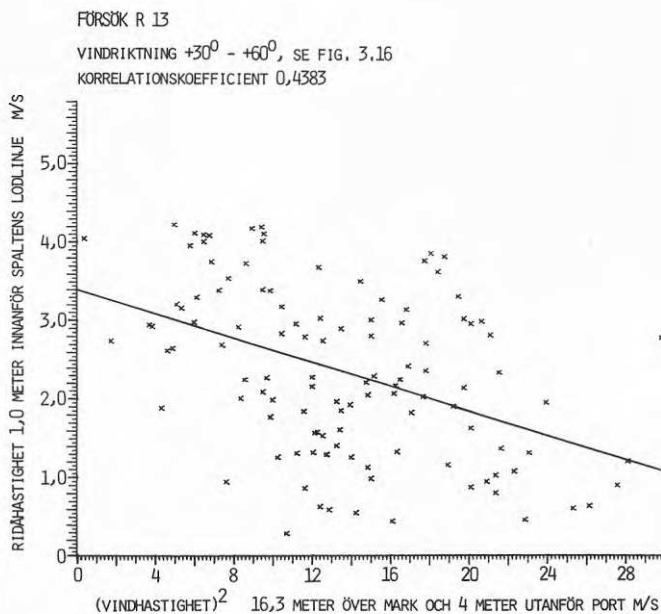
Utifrån figur 3.22 kan konstateras att den höga vindhastigheten omkring 16:36 inte givit motsvarande tryckhöjning över väggen, figur 3.18. Den ökning av undertrycket i lokalen som sker ca 16:37 när vinden avtar får dock ridån att böja av mera utåt eftersom hastigheten 0.5 m innanför spaltens lodlinje blir lägre.

När vindhastigheten minskar efter 16:37 erhålls således en inåtriktad tryckökning, som böjt ridån utåt! Detta förhållande måste hänföras till de fasförskjutningar som orsakas av det svängningssystem vind, ventilationssystem och luftrida bygger upp med byggnaden och strömningsmotstånden för luften i öppningar och otätheter som krets-element. Som exempel på sådant är också figur 3.23, där t ex kraftiga tryckökningar mellan 16:39 och 16:41, figur 3.18, får följder på ridåhastigheten efter 16:41, när vindhastigheten avtar. Då minskar undertrycket i lokalen och ridån böjer av inåt!

Under lugna och stabila vindförhållanden och tryck kan, som figur 3.24 visar, en relativt god korrelation erhållas mellan vindhastighetens dynamiska tryck och ridåhastigheten. Detta gäller främst när vindsektorn begränsas. Förutsättningen är också att ridåns rörelse sker på endast ena sidan av dess maximala hastighet eftersom annars ett maximalvärde skulle passeras.

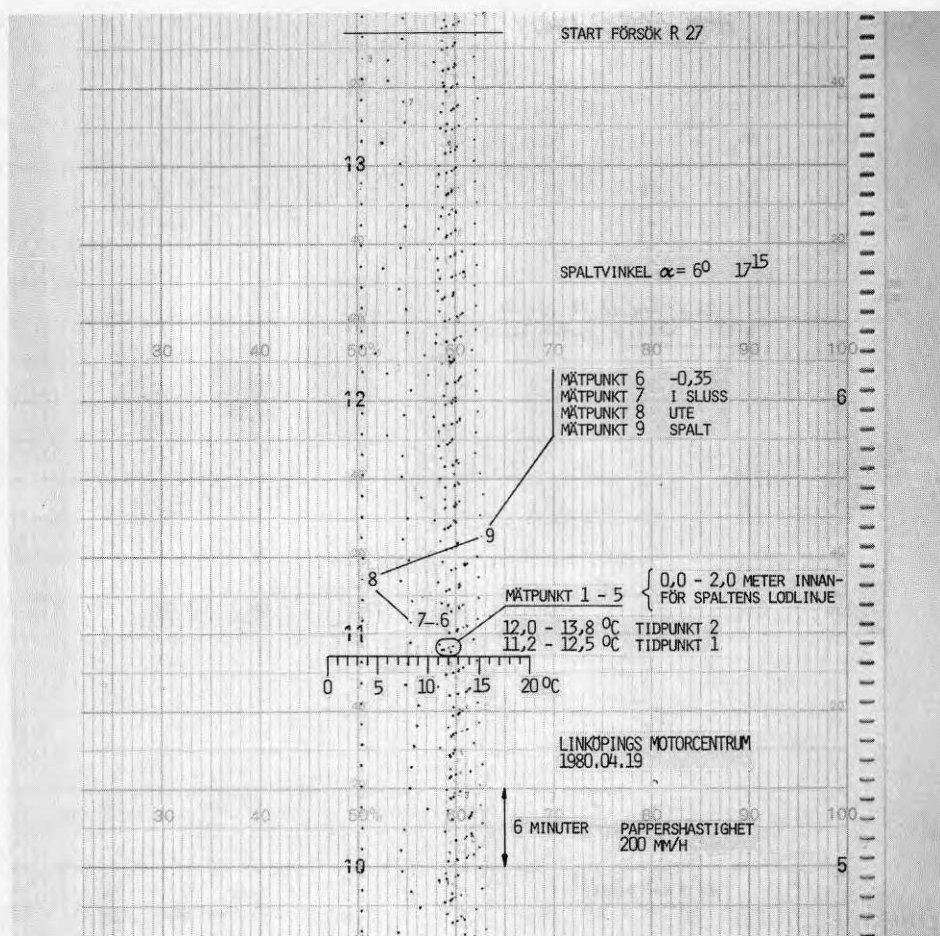


Figur 3:23 Vind- och ridåhastighetens variation med tiden

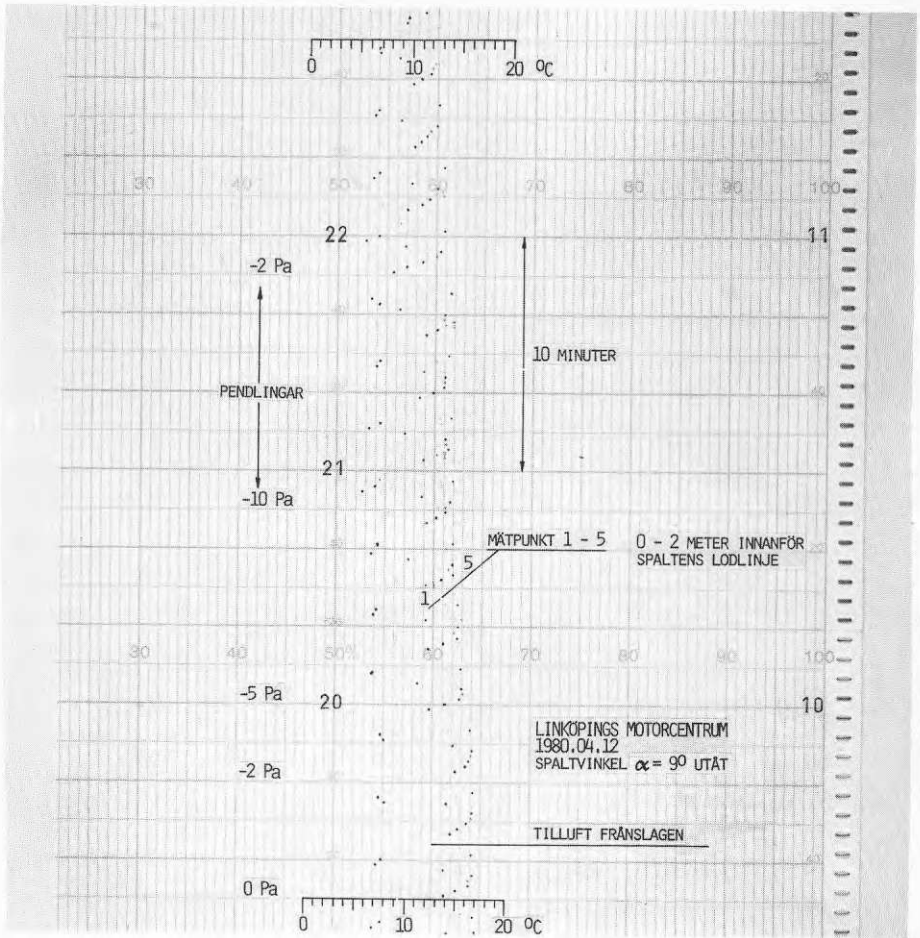


Figur 3:24 Luftridåhastighet i mätpunkt 4 som funktion av vindhastigheten i kvadrat på 16.3 m över mark

De variationer i ridåhastighet som redovisas har inte kunnat erhållas, tabell 3.1, för temperaturen på grund av de tröga givarna. Den maximala skillnaden som kunnat registreras är den på 11,2-13,8°C som redovisas i figur 3.25 vid mätning med termoelement. Figur 3.26 visar den temperatursänkning i ridån som erhålls när tillluftsfläkten med flödet ca 4,5 m³/s slås ifrån och undertrycket i genomsnitt blir ca 5 Pa. Av denna framgår klart den tröghet som erhålls med den öppna slussen vad avser temperaturen. Ridån kan böja av inåt, men återstyrningen både fördröjer och hindrar en snabb kraftig temperatursänkning.



Figur 3.25 Temperaturmätning som visar variationer när termoelement används



Figur 3.26 Temperatur- och tryckförändring i lokalen när tilluftsaggregaten slås ifrån

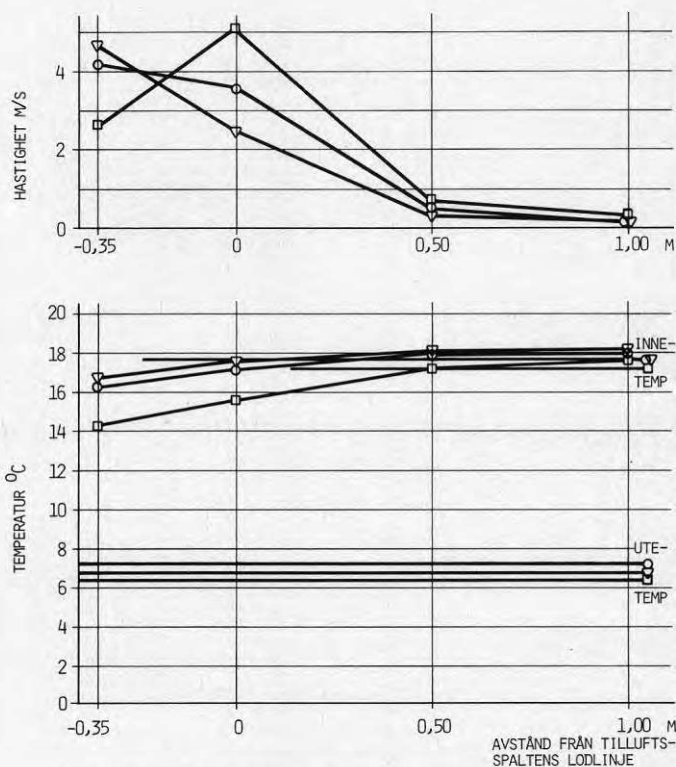
3.5.3 Värmetransporten i luftridån

Som redovisats i modellförsöken kan värmetransporten i luftridån beräknas med trapetsregeln på uppmätta lufthastigheter och temperaturer, kapitel 2.6.1. Utifrån en med spalthastighet $U_0 = 24$ m/s uppmätt hastighetsprofil, figur 3.15, har det totala flödet i luftridån på 3.25 m över golv beräknats för spalthastigheten 39 m/s till $26.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Alla mätningarna utom två har skett med två fläktar i drift.

De hastighetsmätningar som gjorts vid försöken pekar på att impulsen är konstant på olika höjd och lika den i spaltutloppet. Uppmätta avvikelser beror på fäsförskjutningar för strålbanan under

mätningen. Figur 3.13 indikerar att så är fallet genom att två närliggande mätpunkter i två fall är lika. En punktmätning med prandtlrör, trots att registreringen skett under 1 min per punkt, kan under fältförhållanden få dessa konsekvenser, eftersom flyttningen till de olika mätpunkterna tar en viss tid. De uppmätta hastigheterna under försöken har också visat på att topphastigheten ligger vid ca 9 m/s mot i figur 3.13 indikerade ca 7.5 m/s.

Svårigheten att med fyra mätpunkter bestämma hastighetsprofilen framgår av figur 3.27. De olika

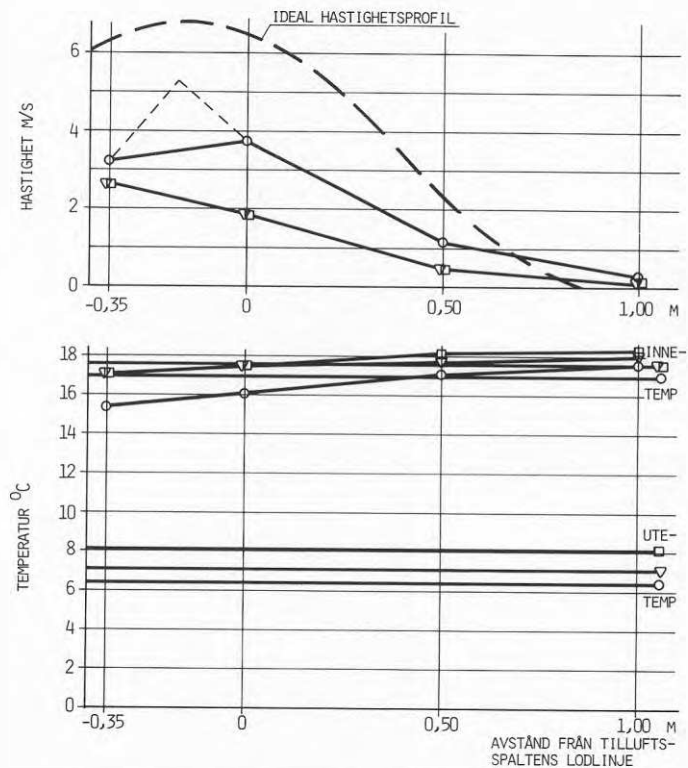


FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α^0	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ^0	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP 0C
○ 8	MED	12	1,8	30-90	16,3	2,25	1,8	17,0
▽ 9	MED	18	1,7	30-90	16,3	2,25	1,8	17,2
□ 10	MED	6	1,7	30-90	16,3	2,25	1,8	17,1

Figur 3.27 Lufthastighet och temperatur i ridån med olika spaltvinkel

tilluftsvinklarna ska med ledning av figur 3.20 innebära att strålcentrums genomsnittliga läge för vinkeln 6° bör ligga mellan mätpunkterna $-0.35-0$. Inom samma intervall, fast närmare -0.35 , bör läget vara för spaltvinkeln 12° . Den maximala genomsnittliga hastigheten på 6.7 m/s , figur 3.15, uppnås givetvis inte på grund av att pendlingarna glättar ut och höjer nivån på närliggande mätpunkter.

Den ideala hastighetsprofilen är den som streckats i figur 3.28. För alternativ 11 skall, med ett aktuellt tryck på 1.5 Pa , den strålbana som erhålls ligga med centrum mitt emellan mätpunkt -0.35 och den som ligger i lodlinjen ovanför spalten.



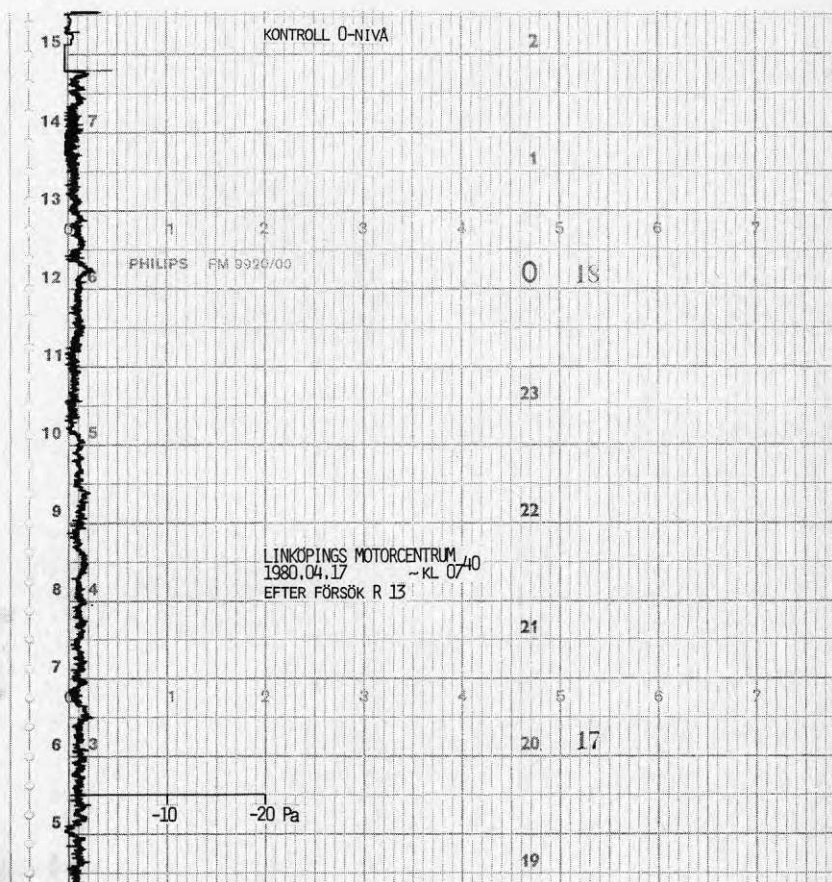
FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α°	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ°	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP $^\circ\text{C}$
○ 11	MED	6	2,2	30 - 90	16,3	3,25	1,8	16,5
▽ 12	MED	12	3,75	30 - 90	16,3	3,25	1,8	17,2
□ 13	MED	18	2,9	60 - 120	16,3	3,25	1,8	17,2

Figur 3.28 Lufthastighet och temperatur i ridån med olika spaltvinkel

Utifrån denna utgångspunkt har för ett antal försök, som representerar både normala och icke önskvärda ridåbetingelser, beräknats det effektunderskott den ridådel har, som går in i lokalen. Lokalttemperaturen har därvid utgjort referensnivå.

Eftersom strålbredden varierar och inte heller dess ytterändar kan fastställas ska därför gjorda beräkningar endast ses som indikationer på inom vilka storleksordningar effekten ligger.

Den del av luftridåflödet, som skall gå in i lokalen, är medejekterad lokalluft samt hela primärflödet, vilket är ca 10 % av totala flödet $26.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Förs därför inte mer än halva ridåbredden in i lokalen, erhålls en förlust, som är proportionell mot skillnaden mellan inne- och utetemperatur samt inifrån utgående luftflöde.



Figur 3.29 Tryckskillnader över vägg vid port

Trots att maximal hastighet i försök 11, figur 3.28, ligger en bit innanför väggen, så ger en grafisk integration av hastighetsprofilen ett underskott på luftflöde till lokalen. Skillnaden är 7.3 av totalt 40.3 m³/s. Vid vinklarna 12° och 18° är konsekvenserna påtagliga. Detta får till följd att effektförlusten för försök 12 och 13, enligt kolumn "Ridå", tabell 3.2 (sid 113) ökar från ca 350 till ca 800 W/K·m² portarea. Ridåvinkeln 0° borde därför ha valts vid aktuell vind och obetydliga undertryck i lokalen, figur 3.29.

Effektförlusten blir därför, enligt kolumn "Summa" vid aktuell läsituation, mindre för en oskyddad öppen port.

Vid aktuell vindriktning β° erhålls enligt Handa /13/ ett tryckförhållande som ger luftutströmning genom en port utan ridå. Utan ridå orsakar temperaturskillnaden en luftinströmning, vars beräknade värden baseras på att lokalen är tät.

Denna enkla summering av effektförlusten genom en öppen port utan ridå har gjorts för att belysa storleksordningen. Att lävirveln framför porten och byggnadens täthet ger andra strömningsförhållanden genom porten och därmed effektförluster torde inte förändra bilden nämnvärt. Förhållandet mellan effektförlusten med och utan luftridå har ändock beräknats för endast två typfall med porten i läläge.

3.5.4 Vind och ridåfunktion

Under den mätperiod, som blev disponibel, gavs givetvis inte möjlighet att studera annat än några vindförhållanden. Huvudfallen beskrivs i figur 3.30. Dessa ger dock en sådan bas att utgå ifrån att en närmare genomgång är motiverad.

Försök 14-17 har skett vid vindhastigheter, som skapar luftutströmning i öppna portar, som ligger på läsidan. Uppmätta undertryck var för dessa fall 2-3 Pa och oberoende av spaltvinkel och ridåhastighet går, som figur 3.31 och 3.32 visar, luftridån så att den obetydligt avviker från den ideala delningen vid portöverkant. Effektförlusten reduceras då avsevärt som tabell 3.2 visar. Den blir endast ca 7 % av den som erhålls i en öppen, oskyddad port.

När vinden vrider mot norr och ökar i hastighet är, som figur 3.33 visar, en spaltvinkel på 12° fortfarande lämplig ur tryckbelastningssynpunkt. Däremot ökar tydligen iblandning av uteluft i slussen och temperaturen i luftridån sänks. Detta förhållande kvarstår även när ridån riktas så att ridån går mera ut ur lokalen. En sned lävirvel framför porten rycker troligen ut delar av den i figurerna 3.34 och 3.35 visade roterande luftvirveln i den öppna slussen med återstyrningsskärmen.

FÖRSÖK R	RIDA SPALT α^0	VIND β^0 ¹⁾			UPPM. TRYCK Pa ⁴⁾	TEMP DIFF K	EFFEKT FÖRLUST W/K·m ²			FÖRHÅLL MED/UTAN LUFTRIDA	JÄMFÖRELSE			
		M/s	TRYCK KOEFF ²⁾	TRYCK ³⁾ Pa			RIDA	UTAN RIDA	SUMMA					
11	6	79	2,2			10,7	357					SPALTVINKEL		
12	12	65	3,7			10,3	838							
13	18	91	2,9	0,10	0,5	- 1	9,7	781	-1 094	452	- 642		1,22	
14	6	41	5,6			7,0	142					EN OCH TVÅ FLÄKTAR VID TVÅ SPALTVINK- LAR	TVÅ	
15	6	44	5,5			6,5	151						EN	
16	12	53	5,6			7,5	92						EN	
17	12	60	5,0	0,10	1,3	- 2	8,3	100	-1 842	419	-1 423		0,07	TVÅ
18	12	20	7,5			11,1	313					TVÅ SPALTVINKLAR MITT I PORT		
19	18	15	7,7			10,7	587							
20	18	11	6,1			- 5	13,5	463				LÄGE LÄNGS PORT OCH VINDVRIDNING	MITT	
21	18	-13	4,8				14,8	307					HÖGER	
22	12	-18	4,3	0,15	- 1,6	- 4	15,0	229	2 043	563	2 606		0,09	HÖGER
23	12	-38	5,1	0,20	- 1,9	- 7	14,0	934	2 239	544	2 783		0,34	VÄNSTER
24	12	-61	11,1	0,20	-12,9		12,5	670						MITT
25	12	-59	11,3	0,20	-13,1		11,0	757						HÖGER
26	12	-57	11,0	0,20	-12,2	-10	10,6	645	5 108	473	5 581	0,12	MED OCH UTAN "ÖPPEN SLUSS" VID TVÅ SPALTVINKLAR, LÄGE HÖGER	MED
27	6	-52	10,9	0,20	-11,2	-10	10,5	156	5 458	471	5 929	0,03		MED
28	6	-47	9,8	0,20	- 8,4	-12	7,5	708			5 700	0,12		UTAN
29	12	-43	9,5	0,20	- 7,4	-12	8,0	939	5 358	412	5 770	0,16		UTAN
30	18	-38	9,2	0,20	- 6,3		7,5	745					UTAN "ÖPPEN SLUSS",	HÖGER
31	18	-33	9,1	0,20	- 5,4		7,9	1 046					SPALTVINKEL OCH	MITT
32	12	-33	8,4	0,20	- 4,6		7,9	848					LÄGE LÄNGS PORT	MITT

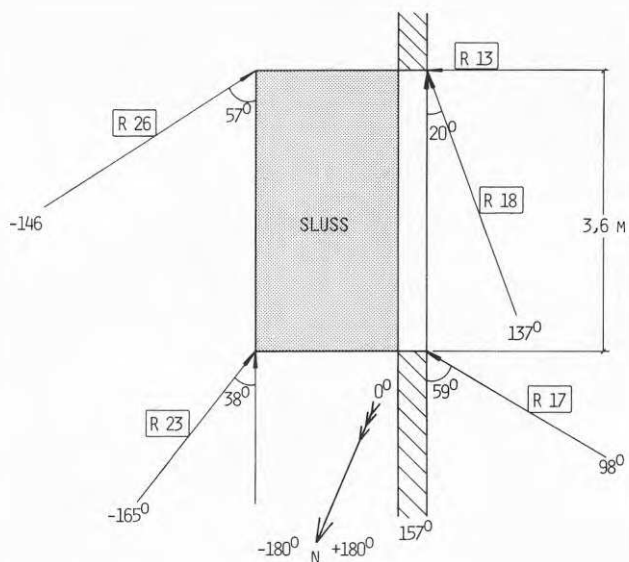
1) VINKEL MOT VÄGG

2) ENL. HANDA (13) KAP. 3,5 $C_{p1} = 0,75 C_{pE}$ VID LÄ PÅ PORTSIDAN

3) ÖVERTRYCK I LOKALEN GER UTSTRÖMNING

4) MED LUFTRIDA I DRIFT

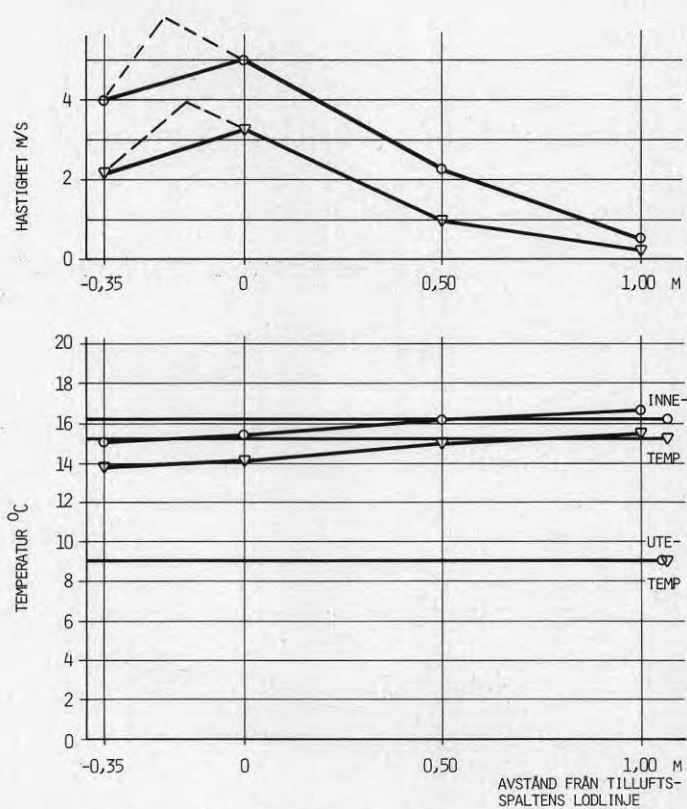
Tabell 3.2 Effektförluster genom försöksporten



FÖRSÖK	VINDHAST M/S	VINKEL β°	VINDHAST MOT PORTPLAN M/S	LOKALTRYCK Pa MÄTT	LOKALTRYCK Pa BERÄKNAT ¹⁾	VINDHAST M/S PARALLELLT	VINDTRYCK Pa BERÄKNAT
R 13	3,0	- 90	3,0	1	2,0		
R 17	5,0	- 59	4,3	2	4,4		
R 18	7,0	- 20	2,4	5	1,4	6,6	1,8
R 23	5,0	38	3,2	7	1,2	4,2	7,4
R 26	11,0	57	9	11	10		

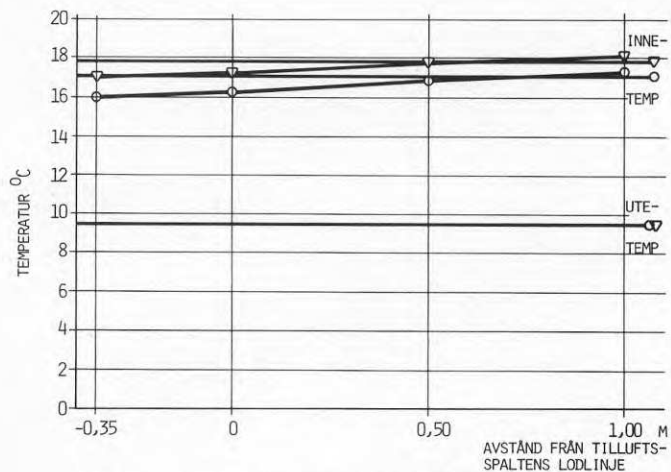
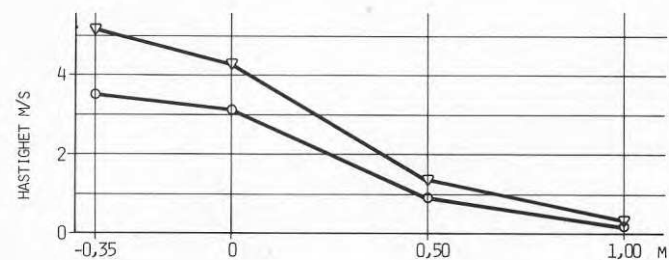
¹⁾ BERÄKNAT MED DE FAKTORER SOM ANGES I [13] MEN KORRIGERADE MED MUNTliga UPPGIFTER BASERADE PÅ EJ PUBLICERADE ENGELSKA UNDERSÖKNINGAR.

Figur 3.30 Försökens huvudriktningar och hastigheter samt beräknade och uppmätta tryck



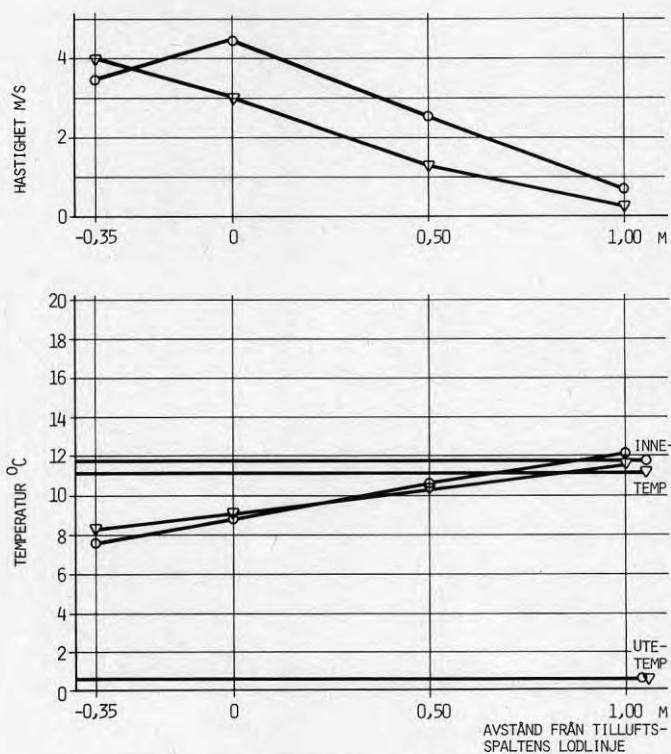
FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α°	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ°	SPALT-HAST M/S	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP °C
14	MED	6	5,6	116 ±14	39	3,25	0,84	17,0
15	MED	6	5,6	113 ±12	24	3,25	0,84	17,0

Figur 3.31 Lufthastighet och temperatur i ridån med olika spalthastighet



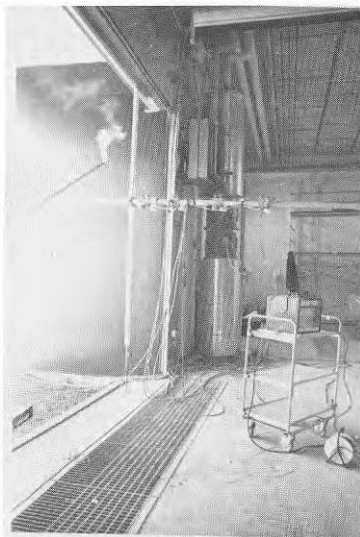
FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α°	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ°	SPALT-HAST M/S	RIDÅ-MÅTN M	STATIV LÄGE M	SPALT \bar{v} °C
○ 16	MED	12	5,6	104 ±16	24	3,25	0,84	17,0
▽ 17	MED	12	4,9	98 ±14	39	3,25	0,84	17,0

Figur 3.32 Lufthastighet och temperatur i ridån med olika spalthastighet

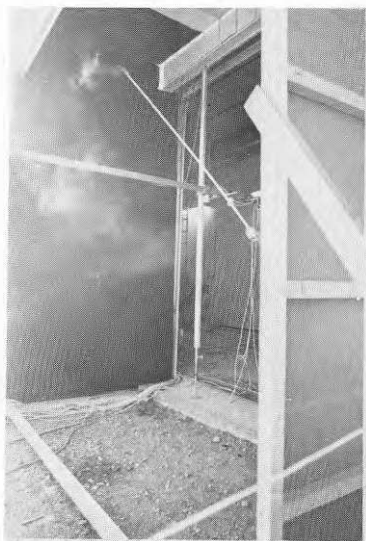


FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α °	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ °	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP °C
○ 18	MED	12	7,5	137 ±8	16,3	3,25	1,8	12,2
▽ 19	MED	18	7,7	142 ±8	16,3	3,25	1,8	12,2

Figur 3.33 Lufthastighet och temperatur i ridån med olika spaltvinkel

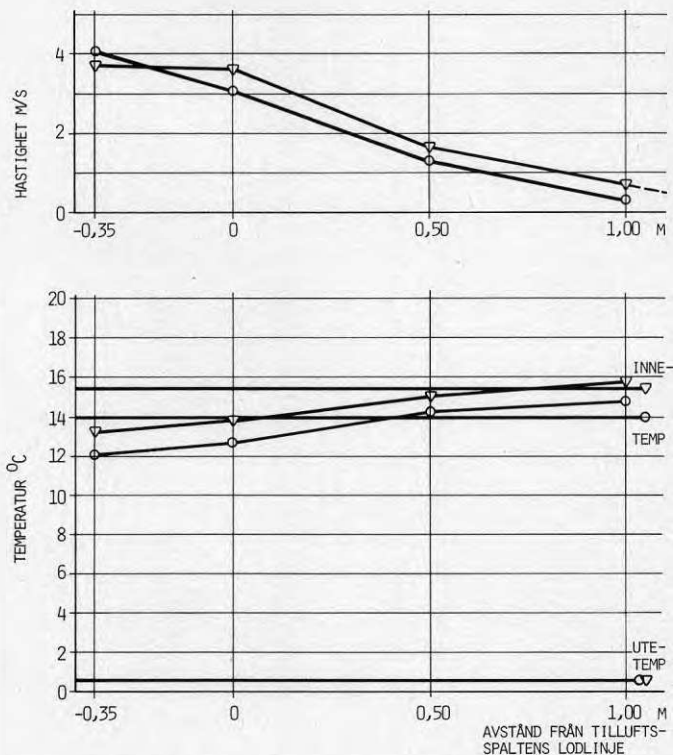


Figur 3.34 Ridårörelse i den öppna slussens övre del



Figur 3.35 Ridååterstyrning och ejection i ridåns nedre del

Figur 3.36 visar också att förhållandena mitt i porten och den södra kanten i stort är lika.

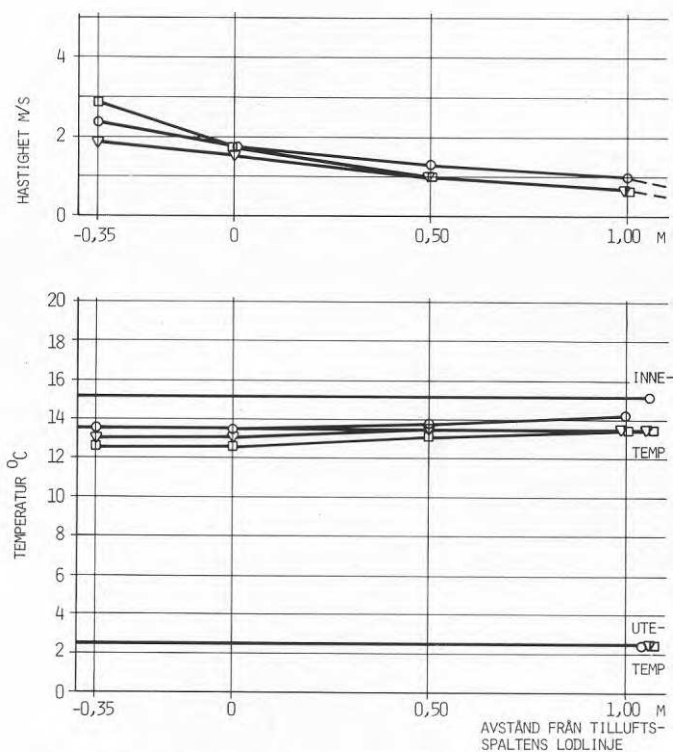


FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α°	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ°	VIND-MÄTN M	RIDA-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP $^{\circ}\text{C}$
○ 20	MED	18	6,1	150 \pm 9	16,3	3,25	1,8	12,2
▽ 21	MED	18	4,8	150 180	16,3	3,25	0,84	13,5

Figur 3.36 Lufthastighet och temperatur i ridån vid olika mätlägen längs porten

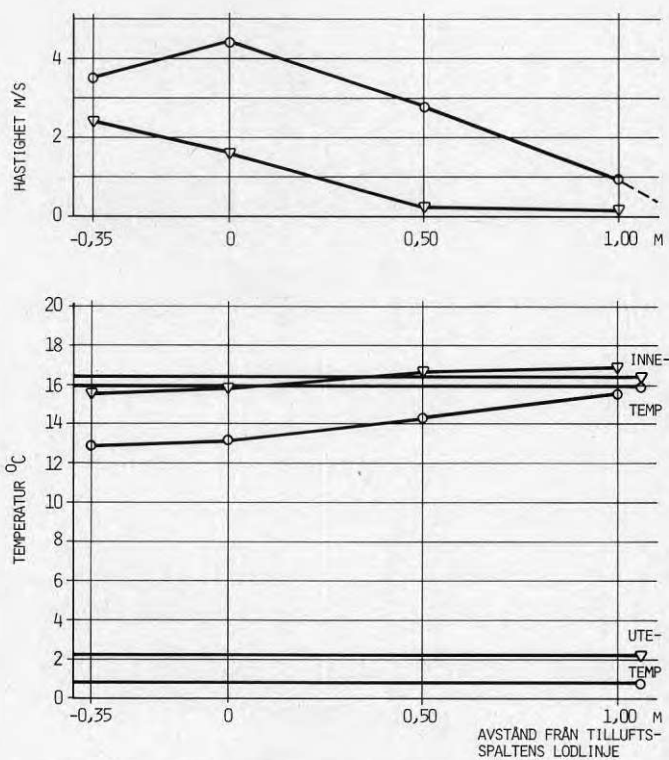
Ridån blir enligt figur 3.37 mera utåtriktad längs hela porten vid högre vindhastighet och en riktning mot portplanet som ökat till ca 60° . Ridån böjs således av mera utåt trots att ridåvinkeln är mindre än för försök 20 och 21. Samtidigt har vindhastigheten blivit högre och riktad så att den vinkelräta vindkomponenten mot portplanet, enligt figur 3.30, skall ge ca 10 Pa tryck mot porten.

Vad som har skett visar figur 3.38. Mellan försök 22 och 23 har en vindvridning skett, som resulterat i en förändring av ridåns läge trots i övrigt konstanta betingelser. Detta har uppstått trots att



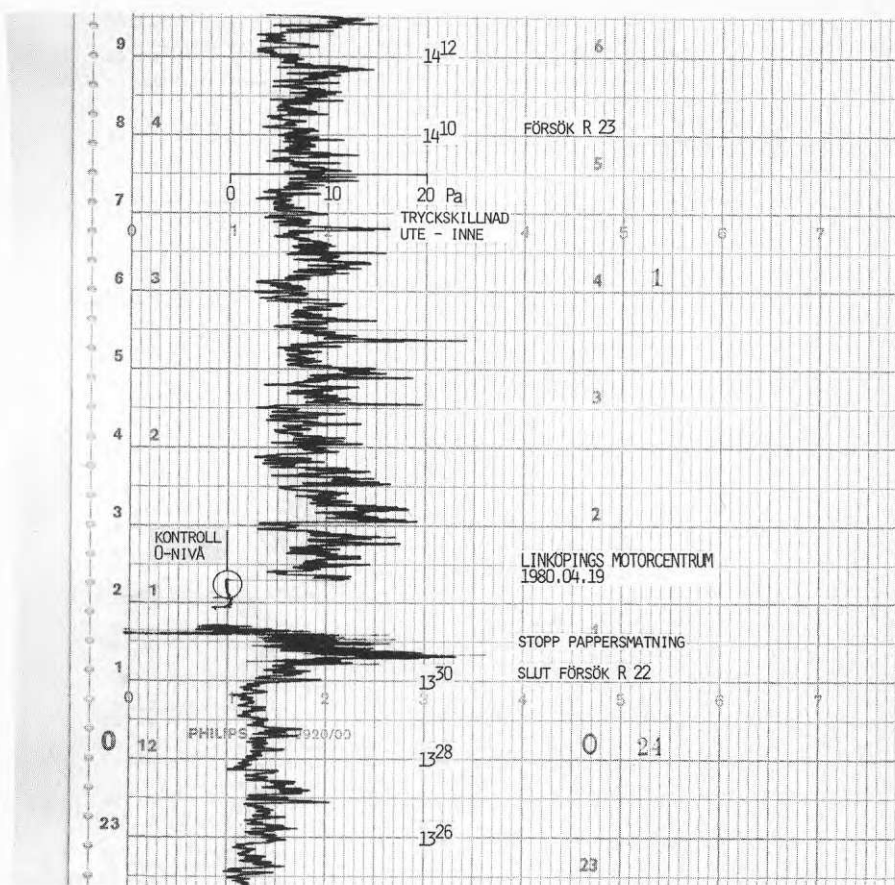
FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINDEL α °	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ °	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP °C
○ 24	MED	12	11,2	-180 -150	16,3	3,25	3,17	15,8
▽ 25	MED	12	11,7	-180 -150	16,3	3,25	1,8	15,8
□ 26	MED	12	11,2	-180 -150	16,3	3,25	0,84	14,8

Figur 3.37 Lufthastighet och temperatur i ridån vid olika mätlägen längs porten



FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α°	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ°	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÅGE M	SPALT-TEMP $^{\circ}\text{C}$
○ 22	MED	12	4,3	+170 -170	16,3	3,25	0,84	15,3
▽ 23	MED	12	5,1	-150 -180	16,3	3,25	3,17	15,8

Figur 3.38 Lufthastighet och temperatur i ridån med olika mätlägen längs porten



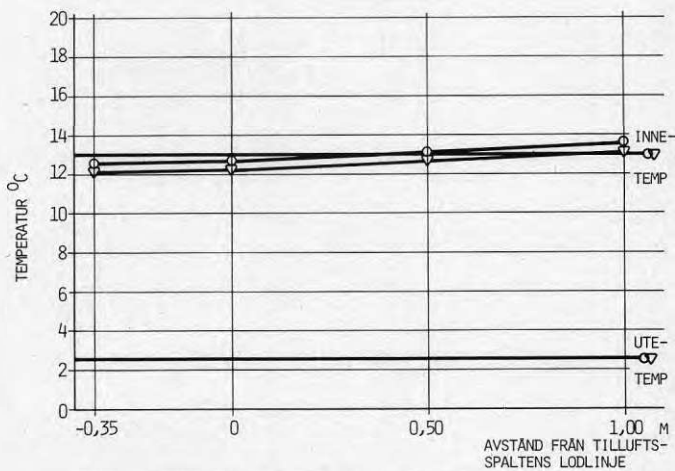
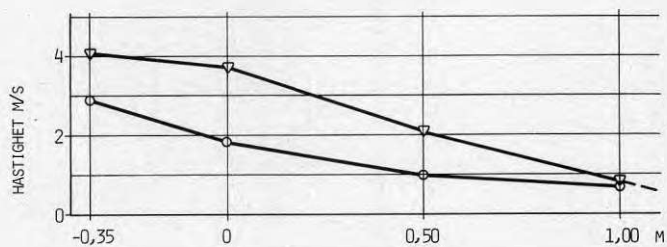
Figur 3.39 Tryckskillnad över vägg vid porten efter vindvridning

tryckskillnaden över porten ökat från ca 4 till 7 Pa, figur 3.39.

Rökvisualisering som inte fotograferats visade under dessa vindbetingelser att vinden, som också vrider upp efter fasaden enligt figur 3.16, studsar mot slussen samtidigt som den rycker med luft ur denna. Effektförlusterna blir därmed också höga, som tabell 3.2 visar.

När ridåvinkeln ändras från 12° till 6° , figur 3.40, intar ridån det läge, som delar den flödesneutralt och effektförlusten minimeras. Effektbelastningsförhållandet 0.03 visar således att verkningsgraden vid aktuell vädersituation är 97 %. Det ridåläge, som överensstämde med tryckskillnaden över porten och ridåns impuls vid försök 22 erhålls

nu med en mindre vinkel trots ökad tryckskillnad!

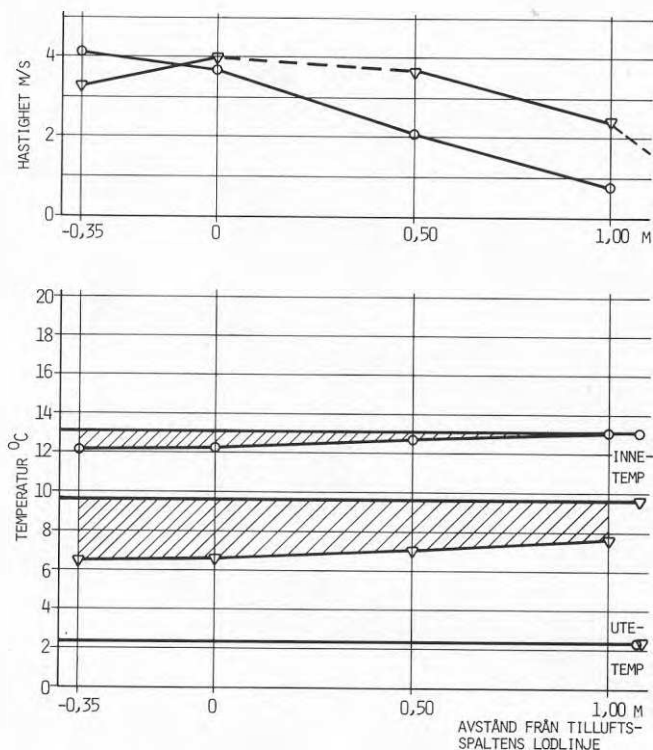


FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α^0	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ^0	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP 0C
○ 26	MED	12	11,2	-180 -150	16,3	3,25	0,84	14,8
▽ 27	MED	6	10,8	-180 -150	16,3	3,25	0,84	14,3

Figur 3.40 Lufthastighet och temperatur i ridån vid olika spaltvinkel

3.5.5 Luftridå med och utan öppen sluss med återstyrning

Att den öppna slussen vid rådande vindbetingelser fungerar så att vinden styrs ut på uppströmssidan och fungerar som en ejektor torde kunna stödjas med den förändring, som sker när slussen tas bort. I figur 3.41 jämförs ridåförhållandena med och utan öppen sluss.



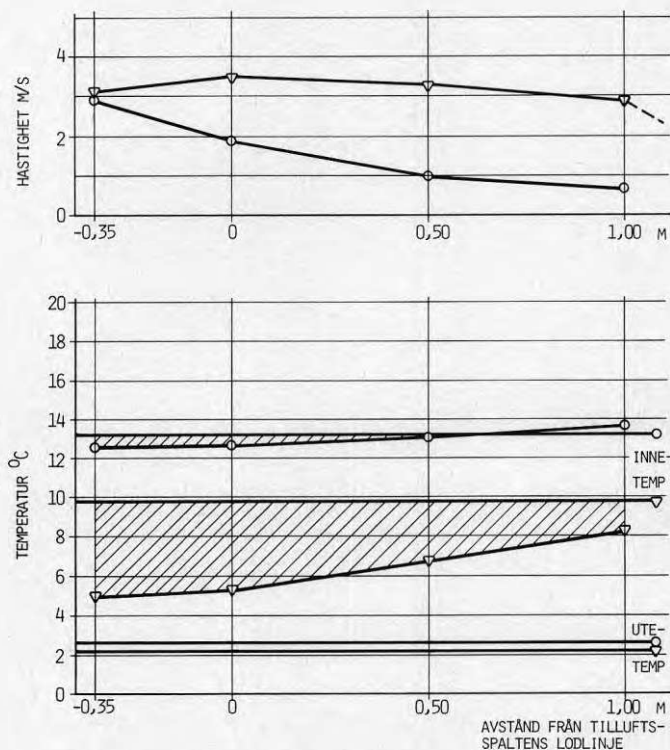
FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α °	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ °	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP °C
○ 27	MED	6	10,6	-180 -150	16,3	3,25	0,84	14,3
▽ 28	UTAN	6	9,9	-180 -150	16,3	3,25	0,84	14,3

Figur 3.41 Lufthastighet och temperatur i ridån med och utan öppen sluss med ridå-återstyrning

Ridån böjer av inåt och det till lokalen förda luftflödet ökar kraftigt samtidigt som temperaturen sänks i ridån liksom även i lokalen. Effektunderskottet ökar ca fyra gånger enligt tabell 3.2 och samtidigt erhålls en ridåtemperatur, som ligger mitt emellan ute- och innetemperaturen.

Ridåluft går ner längre in i lokalen och orsakar där ett oacceptabelt termiskt klimat.

En ökning av spaltvinkeln förbättrar inte situationen som figur 3.42 visar. Ridån böjer av snett inåt på det sätt, som figur 3.43 och 3.44 åskådliggör med rök. Tidvis sker också på mitten av porten så kraftig avböjning inåt att röken går parallellt med marken.



FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α°	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ°	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP $^{\circ}\text{C}$
○ 26	MED	12	11,2	-180 -150	16,3	3,25	0,84	14,8
▽ 29	UTAN	12	9,5	-180 -150	16,3	3,25	0,84	9,1

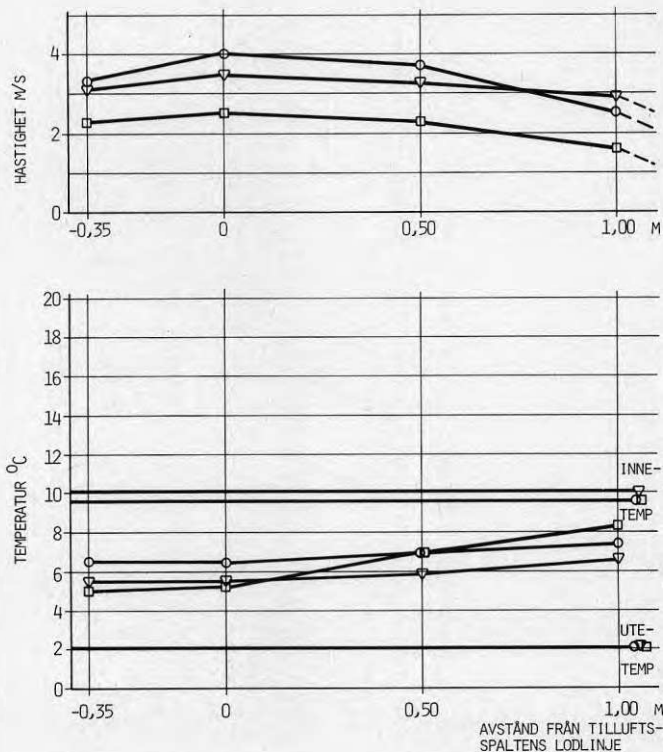
Figur 3.42 Lufthastighet och temperatur i ridån med och utan öppen sluss med ridå-återstyrning



Figur 3.43 Luftridåriktning vid snett vindanfall och hastighet på ca 10 m/s



Figur 3.44 Luftridåriktning tidvis vid snett vindanfall och hastighet på ca 10 m/s

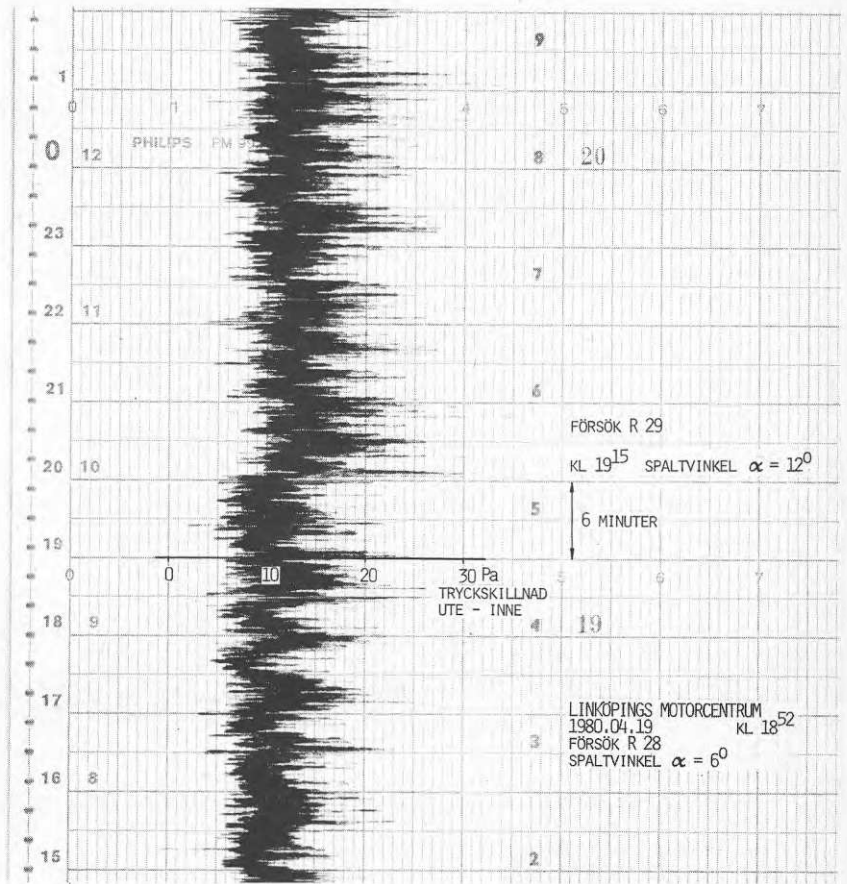


FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α°	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ°	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP $^{\circ}\text{C}$
○ 28	UTAN	6	9,9	-180 -150	16,3	3,25	0,84	~9,5
▽ 29	UTAN	12	9,5	-180 -150	16,3	3,25	0,84	9,1
□ 30	UTAN	18	9,3	-180 -150	16,3	3,25	0,84	9,4

Figur 3.45 Lufthastighet och temperatur i ridån vid olika spaltvinkel

Av figur 3.45 framgår att först vid en spaltvinkel på 18° kan ridån fås att gå utanför porten mera påtagligt. Effektunderskottet på den luft som går in i lokalen ihop med den som går ut förändras dock inte nämnvärt som tabell 3.2 visar.

Enligt figur 3.46 är tryckskillnaden över porten vid försöken ca 10 Pa. Den impuls som tryckskillnaden ger över porten kräver också att ridån riktas utåt mer än 18° eftersom radien på cirkelbanan blir ungefär lika med porthöjden enligt figur 3.20.

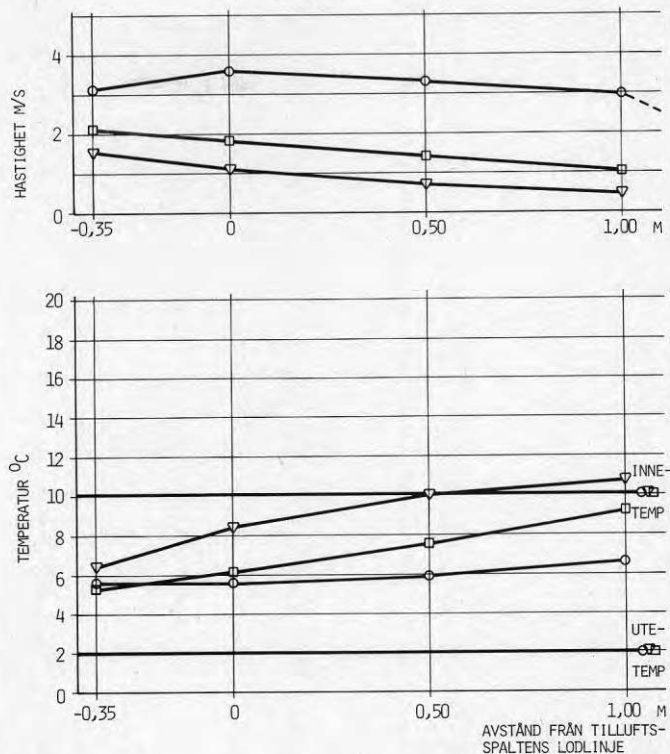


Figur 3.46 Tryckskillnad över vägg vid port för två olika spaltvinklar

Vid snedanblåsning mot porten tycks dock även vinden fungera som en ejektor på uppströmssidan av porten. Med en ridåvinkel på 18° går, som framgår av figur 3.47, större delen av ridån utanför porten på dess mitt. Därmed höjs också temperaturen på den del, som går in i lokalen. Försök 32, som blev det sista, visar att även 12° spaltvinkel får hjälp av en ejekterande vind framför porten så att ridån böjer av utåt. Temperaturen 1 m innanför spaltens lodlinje går mot gränsvillkoret, som är lokaltemperaturen.

Som tabell 3.2 (sid 114) visar finns vissa skillnader i effektunderskottet räknat per K och m^2 portyta mellan de olika alternativen trots att ridån utan sluss gått både utanför och innanför porten. Lägst blir nivån när nästan hela ridån går in i lokalen, försök 28, och högst när större

delen går ut ur lokalen, försök 31.

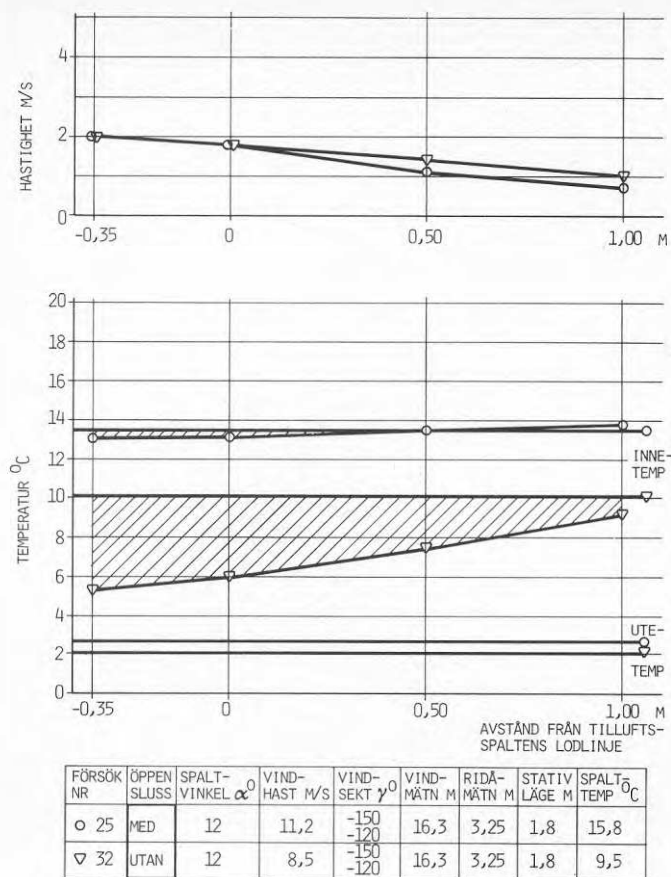


FÖRSÖK NR	ÖPPEN SLUSS	SPALT-VINKEL α °	VIND-HAST M/S	VIND-SEKT γ °	VIND-MÄTN M	RIDÅ-MÄTN M	STATIV LÄGE M	SPALT-TEMP °C
○ 29	UTAN	12	9,5	-180 -150	16,3	3,25	0,84	9,1
▽ 31	UTAN	18	9,1	-180 -150	16,3	3,25	1,8	9,5
□ 32	UTAN	12	8,5	-180 -150	16,3	3,25	1,8	9,5

Figur 3.47 Lufthastighet och temperatur i ridån vid olika mätlägen längs porten samt vinkel

Försök 32 har, som framgår av figur 3.48, ungefär samma ridåflöde till lokalen som försök 25 med öppen sluss och återstyrning. Även om den effektmässiga skillnaden är endast ca 10 % mellan försök 25 och 32, enligt tabell 3.2, så är dock, som figuren visar, ridåns temperatur avsevärt lägre. När hastigheten i ridån närmare tak blivit lägre kommer den tyngre delen av ridån att bryta ner i lokalen och skapa luftrörelser och sänkt lokaltemperatur med åtföljande besvär.

I jämförelse med det effektunderskott, som en helt oskyddad port får vid givna aktuella vädersituationer, visar båda försöken att avsevärda förbättringar erhålls, tabell 3.2.



Figur 3.48 Lufthastighet och temperatur i ridån med och utan öppen sluss med ridååterstyrning

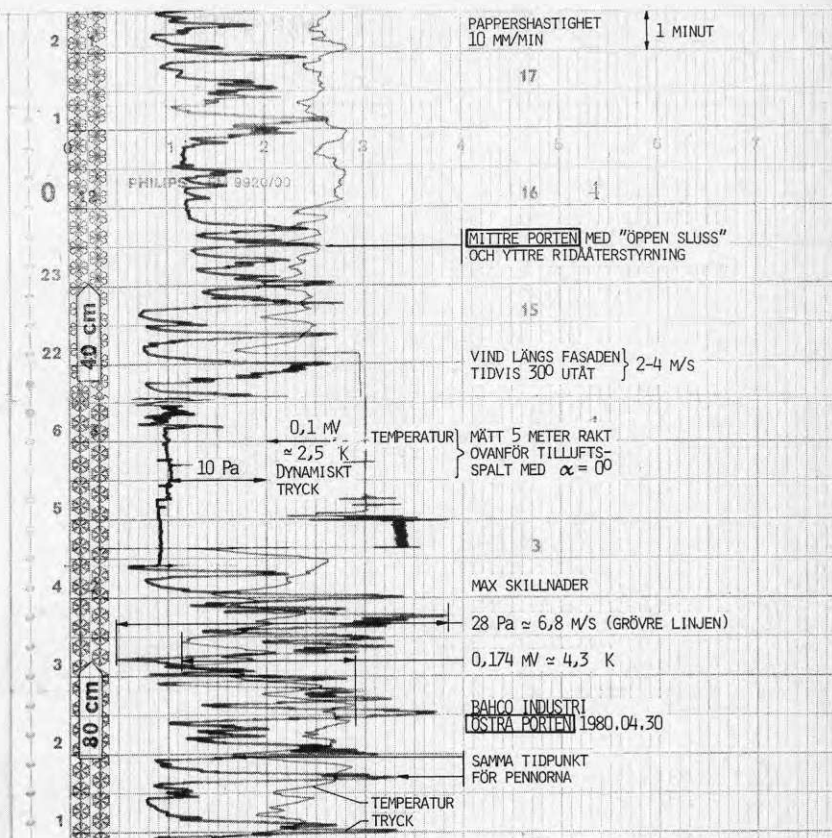
3.5.6 Luftridåns dynamik

Vid Bahcos Enaverkstäder i Enköping, som ligger i ett skyddande skogsparti, finns tre 6 x 6 m stora portar, vilka är placerade i den nordvästliga fasaden. På den mittre, som enligt figur 3.7 har en öppen sluss, och den oskyddade närmast byggnadens nordvästra hörn, har kompletterande mätningar gjorts på ridåörelserna och temperaturen. Ridåerna har haft samma spalthastighet som den i Linköping men 28-30 mm spalt.

I en ridå utan öppen sluss framgår, enligt figur 3.49, att hastighet och temperatur, mätt 5 m rakt ovanför spalten, varierar kraftigare och med högre frekvens (nedre delen av diagrammet) än den mittre porten med öppen sluss. Den västra av tre portar har vid detta tillfälle varit öppen med en luftridåfläkt igång.

När denna stängs, figur 3.50, ökar amplituden och svängningarnas karaktär förändras. Systemet -

luftridå, byggnadsvolym och täthet förändras, med ellärans begrepp systemets kapacitans.

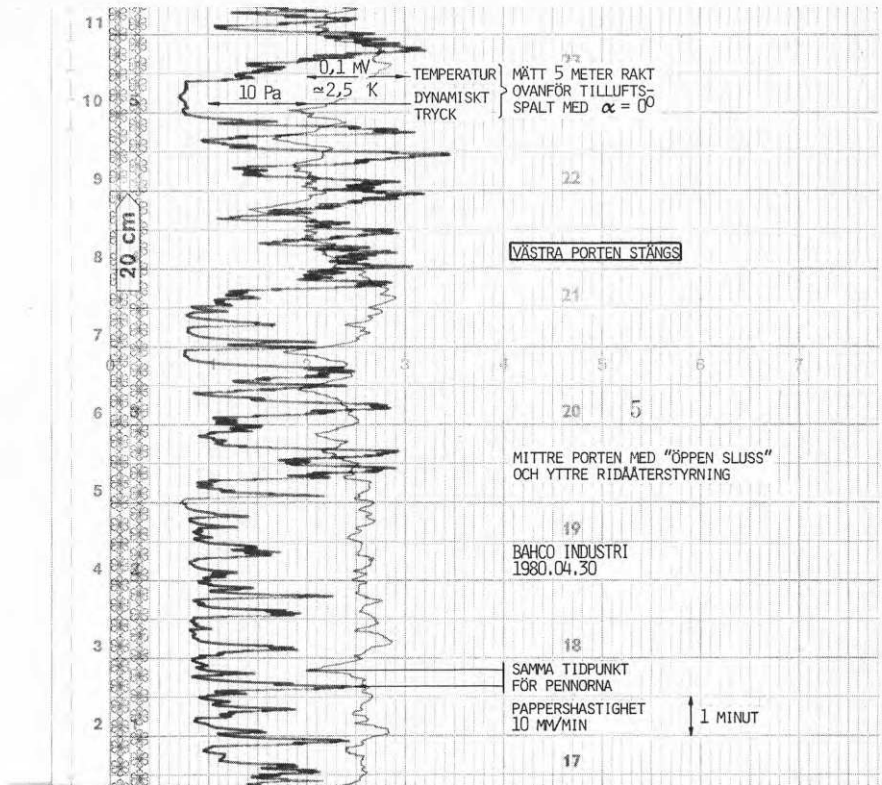


Figur 3.49 Lufthastighets- och temperaturvariationer i ridå 5 m rakt ovanför spalt vid port med och utan "öppen sluss" med yttre ridååterstyrning

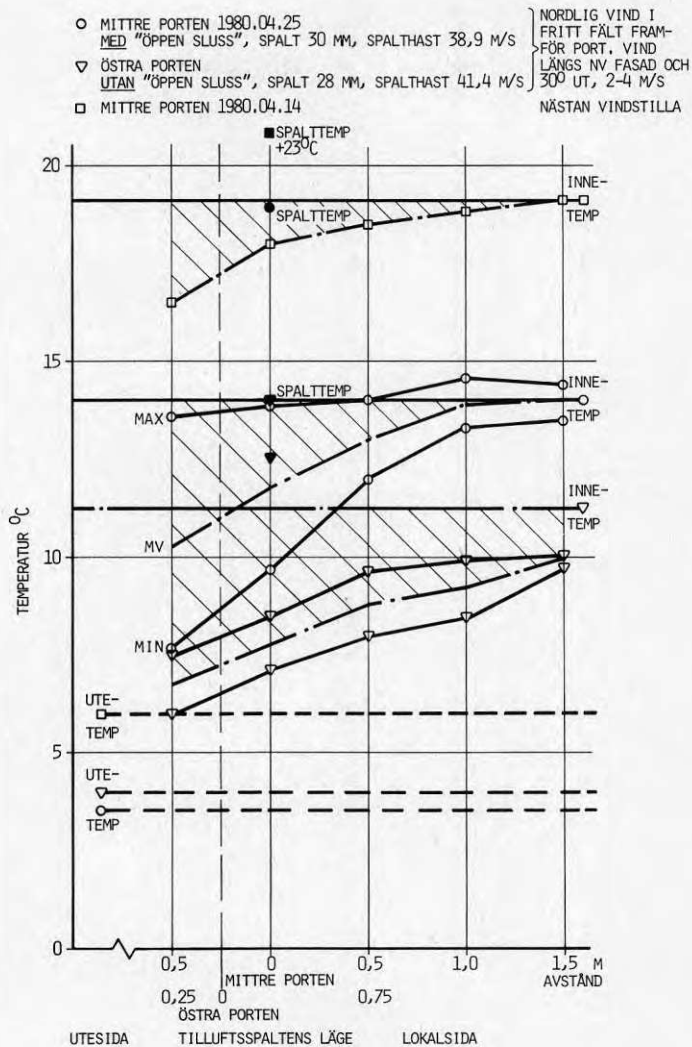
Denna kapacitans hör givetvis också ihop med den vind som rådde och de tryckförhållanden som systemet tillsammans med den yttre belastningen skapade.

Mätomfattning på redovisade studier möjliggör inte närmare analyser av samband och förhållanden. Som figur 3.51 visar är skillnaden med och utan sluss påtaglig ur temperatursynpunkt. Temperaturvariationerna är dock störst för ridå med öppen sluss och återstyrning, men detta beror givetvis på att temperaturen i det andra fallet är konstant låg tvärs hela ridån. Gemensamt för båda ridåerna är att deras ca 50 % högre impuls nivå gentemot Motorcentrums skall betjäna en ca 300 % större port. Den mittre portens kraftiga temperaturvariationer vid tryckvariationer på ca $\pm 2,5$ Pa har därför sin

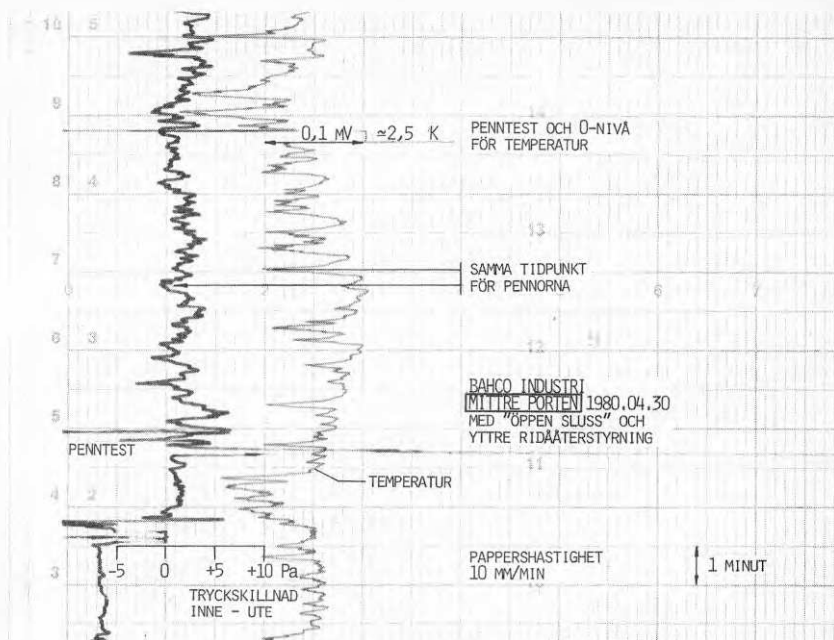
förklaring, figur 3.52.



Figur 3.50 Förändring 5 m rakt ovanför spalt av ridåhastighets- och temperaturvariationer när tidigare öppna västra porten stängs



Figur 3.51 Temperaturfördelning tvärs ridån.
 Tilluftsvinkel $\alpha = 0^\circ$. Mätthöjd ca
 5 m. Port 6x6 m, Bahco Industri-
 verkstad



Figur 3.52 Temperaturvariationer 5 m ovanför spalt som funktion av tryckskillnad över vägg vid port med "öppen sluss" och yttre ridåstyrning

4 ENERGIBESPARING

4.1 Energiförlust genom en öppen port

De resultat, som redovisats i tidigare kapitel, baseras på mätningar för en ridåskyddad port. Värme-flödet genom portöppningarna har därvid angivits per tidsenhet. Energiförlusterna under ett år genom en given portstorlek och med en viss riktning i en bebyggelse i Sverige bestäms av byggnadens täthet och vind samt temperatur på orten och portens öppningstid.

I Ingenjörvetenskapsakademiens (IVA) och Transportforskningskommissionens (TFK) meddelande nr 80, 1975 /14/ finns en beräkningstablå, figur 4.1, med vilken värmeförlusterna kan fastställas för en oskyddad öppen och stängd port. Massflödesdiagram för den temperatur- och vindberoende luftinströmningen genom en öppning finns som underlag i denna porthandbok, liksom givetvis uteluftens dygnsmedelvärden och medelvindhastigheter för olika väderstreck för ett antal orter.

För den vindberoende luftinströmningen görs i porthandboken ingen skillnad mellan lä och lovartsida, utan en generell faktor på 0.4 på vindhastigheten ger massflödet i m^3/m^2 . s. Genom en $30 m^2$ port i Linköping erhålls då, vid en öppningsfrekvens på 5 ggr per timme och öppningstid på 40 sek, en energiförlust på 85 000 kWh under arbetsåret.

4.2 Meteorologiska basdata för relativ energibelastning på referensport

I avsikt att skapa ett basdokument för den totala energibelastning, som en port utsätts för, har tabeller för officiella meteorologiska stationer tagits fram. Dessa tabeller finns dels för hela 360° och dels för 180° , sektorer successivt förskjutna 60° . Temperatur- och samhöriga vindhastighetsintervall anges i 10 000-delar, tabell 4.1 a och b. Dessa värden har summerats både vertikalt och horisontellt. De energiförluster genom en 6 m hög och $30 m^2$ stor port som anges längst ner till höger för dygn och dag baseras sedan på de effektvärden som anges för de olika intervallen i tabell 4.2. Angiven beräkning redovisas närmare i den meteorologiska delrapporten.

Effektvärdena i tabell 4.2 är beräknade utifrån förutsättningen att lokalen är helt tät. Detta val har skett eftersom underlag saknas för att ta fram den beräkningsmodell som tar hänsyn till hur vind med olika riktning bygger upp tryck över väggar och tak-tryck som beror på byggnadstyp och täthet för byggnaden och därmed också sammanhängande luftströmning genom portar. För att en luftströmning ska kunna ske genom porten till en tät

BERÄKNINGSTABLÅ FÖR VÄRMFÖRLUSTKOSTNAD, ENKEL FORTFUNKTION				
I				
Passagefrekvens (passager per timma):	$f =$	<u>5</u>	(pass/tim)	
Antal arbetsskift per dygn (8 timmars skift):	$S =$	<u>1</u>	(st/dag)	
Arbetsdagar per år (vanligen 225 st):	$D =$	<u>225</u>	(driftdagar/år)	
Fortarea (B x H):	$A =$	<u>30</u>	(m ²)	
Energikostnad (öre/kWh):	$KE =$	<u>20</u>	(öre/kWh)	
Eldningsperiodens längd (antal dagar): Om värmeförlustberäkningen sker över hela året sätts $E_T = 360$ Se figur 20, 6	$E_T =$	<u>360</u>	(dagar)	
Temperaturdifferens mellan ute- och inne- luft (°C):	$t =$	<u>15</u>	(°C)	
Massflöde vid öppen port: Se figur 20, 8 och 20, 9	$m =$	<u>1,5</u>	(m ³ /m ² s)	
II				
Hjälpfaktorer:				
$H_1 = 6,2 \times 10^{-6} \times f \times S \times D \times E_T =$	<u>2,5</u>	(pass tim/sek år)		
$H_2 = A \times \Delta t =$	<u>450</u>	(m ² °C)		
$H_3 = 1,26 \times H_2 \times m =$	<u>850</u>	(kW)		
III				
Portsystems-beteckning				
Portens faktiska öppningstid (sek) Se blankett för alternativt portsystem eller avsnitt 7. 4				
Portens faktiska stängningstid (sek) Se blankett för alternativt portsystem eller avsnitt 7. 4				
Portfunktionens relativa öppningstid (sek) Se figur 20, 14				
Portfunktionens relativa stängningstid (sek) Se figur 20, 15				
Portens öppettid per passage (sek/pass) T_{A1} : Vid högst 2 passager per timma alternativt tumregler enligt figur 20, 11 - 20, 13 $T_{\Sigma} =$ summa:	<u>40</u>			
Portens öppettid per år T_{Σ} , tot: $T_{\Sigma} = H_1 \times T_{\Sigma}$ (tim/år):	<u>100</u>			
Värmeförluster vid öppen port Q_{Σ} : $Q_{\Sigma} = H_3 \times T_{\Sigma}$, tot (kWh/år):	<u>85 000</u>			
Värmeförluster vid stängd port Q_S : $Q_S = (24 \times H_2 \times E_T \times KE) \times 10^{-3}$ (kWh/år): KE betecknar resp portblads värmegenom- gångstal (k-värde) uttryckt i enheten W/m ² °C (se för bilaga 3!)				
Portfunktionens totala värmeförlust per år Q_{tot} : $Q_{tot} = Q_{\Sigma} + Q_S$, (kWh/år)				
Värmeförlustkostnad per år: $KV = (Q_{tot} \times KE) \times 10^{-2}$, (kr/år)	<u>17 000</u>			

Figur 4.1 IVA:s och TPK:s beräkningstablå för värmeförluster genom port

TABELLDATA : TEMPERATUR- / VINDHASTIGHETSFREKVENSER FÖR DYGNET (01-24, ÖVRE VÄRDE) OCH DAGTID (07-18, NEDRE VÄRDE)

RAD- OCH KOLUMN-SUMMOR : FREKVENSSUMMOR FÖR TEMPERATUR RESP. VINDHASTIGHET, DYGN RESP. DAGTID
 : BRSENERGIFÖRLUST (W, MWH/ÅR) FÖR LUFTPORT ENLIGT ANGIVNA BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR SIDA 1

STATION: 562 LINKÖPING

VINDSEKTOR: 01 - 18 DEKAGRADER

RRET

PERIOD: 1955 - 1975

FF M/S	TEMPERATURINTERVALL																				SUM		SUM-W						
	<-30	-37	-34	-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	+2	+5	+8	+11	+14	+17	+20	+23		+26	+29	+32	>+32		
LU6NT						1	2	5	13	21	26	34	45	75	87	52	58	66	61	43	18	6	2	1			615	304	
						1	1	3	10	18	20	30	36	48	63	30	30	30	28	28	16	6	3	1			401	118	
01-02							1	2	5	11	26	55	100	149	207	132	116	139	154	128	68	31	14	3			1340	644	
								2	3	9	22	48	89	123	161	98	88	90	110	113	82	44	23	5			1130	285	
03-04								1	3	8	22	47	83	151	227	154	127	129	149	126	85	50	26	6			1404	1034	
									2	7	19	41	77	154	219	147	123	119	150	146	118	78	44	11	1		1456	515	
05-06								1	1	4	12	26	45	36	121	86	68	67	75	60	42	28	16	4			742	806	
									1	3	11	28	46	71	132	99	79	80	96	86	65	46	28	7	1		899	465	
07-08										1	2	3	16	26	33	24	23	21	21	20	10	7	7	2			216	299	
							1			1	2	4	20	29	36	31	27	28	29	32	17	11	13	3			284	188	
09-10											1	1	6	8	6	4	5	4	3	4	2	1	1				45	90	
											1	1	7	7	8	3	7	6	4	6	4	3	1	1			57	53	
11-12													1	2	1	1	1										7	18	
														2	1	1	1				1	1					8	9	
13-14																											1	4	
																											1	1	
15-16																													1
17-18																													
19-20																													
21-22																													
S-DYGN						1	2	9	21	45	90	167	295	507	684	452	397	427	462	381	225	123	65	15	1		4370		
S-DAG						1	1	6	16	39	75	153	275	454	640	409	354	353	417	413	302	188	112	27	2		4237		
W-DYGN						1	5	20	39	80	158	264	430	634	897	374	244	174	112	36	11	25	23	8	1			3200	
W-DAG						1	1	8	17	38	73	133	225	322	368	199	131	91	64	24	8	21	22	8	1			1635	

Tabell 4.1 a

Tabell 4.1 b

TAEELDATA : TEMPERATUR- / VINDHASTIGHETSFREKVENSER FÖR DYGNET (01-24, ÖVRE VARDE) OCH DAGTID (07-18, NEDRE VARDE)

RAD- OCH KOLUMN- : FREKVENSSUMMOR FÖR TEMPERATUR RESP. VINDHASTIGHET, DYGN RESP. DAGTID
 SUMMOR : ÅRSENERGIFÖRLUST (W, MWH/ÅR) FÖR LUFTPORT ENLIGT ANGIVNA BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR SIDA 1

STATION: 562 LINKÖPING

VINDSEKTOR: 19 - 36 DEKAGRADER

ÅRET

PERIOD: 1955 - 1975

FF M/S	TEMPERATURINTERVALL																				SUM	SUM-W						
	<-39	-37	-34	-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	+2	+5	+8	+11	+14	+17			+20	+23	+26	+29	+32	>+32
LUGNT					1	2	5	13	21	26	34	45	75	87	52	58	66	61	43	18	6	2	1				615	304
					1	1	3	10	18	20	30	36	48	63	30	30	30	30	28	28	16	6	3	1			401	118
01-02					1	2	5	12	30	53	70	102	156	207	150	152	180	181	127	75	33	15	4	1		1556	796	
					1	1	5	11	25	44	68	88	123	168	112	92	102	124	120	91	44	21	7	1		1248	341	
03-04							1	3	12	37	67	98	158	263	231	204	248	241	180	100	46	21	7	2	1	1940	1392	
							1	2	9	37	64	100	145	264	217	174	193	221	225	152	74	35	12	3	1	1930	681	
05-06							1	1	4	13	27	48	33	183	198	140	148	164	132	74	29	12	3	1		1262	1228	
							1	1	4	14	26	50	34	178	213	153	153	200	199	123	50	20	6	1	1	1478	681	
07-08									1	3	6	15	27	64	97	77	75	75	70	34	10	4	1			559	658	
									1	3	6	15	28	69	108	93	90	104	114	61	17	7	2			717	398	
09-10									1	1	4	9	23	44	37	30	32	30	13	3	1					228	328	
									1	1	4	10	22	43	41	36	46	50	24	5	1					284	189	
11-12											1	2	5	14	13	10	7	6	3	1						61	108	
											2	5	14	16	12	10	9	5	2							76	64	
13-14															1	4	5	3	2	1	1					18	38	
															1	5	6	5	3	2	1					23	24	
15-16																1	1	1	1							5	10	
																1	1	1	1	1					5	5		
17-18																										1	4	
																										1	2	
19-20																											1	1
																										1	1	
21-22																												
S-DYGN					1	4	12	29	69	134	206	311	510	854	790	688	762	765	589	319	127	54	16	3	1	6245		
S-DAG					1	2	9	24	57	119	195	293	440	769	743	607	624	738	749	474	197	87	28	5	2	6165		
W-DYGN					1	3	10	26	55	122	235	327	448	635	978	845	540	396	242	75	19	27	17	7	2	1	4865	
W-DAG					2	3	11	24	56	116	168	235	313	492	454	289	204	146	58	17	24	16	7	2	1	2504		

lokal blir för den vind- liksom temperaturberoende delen (ekvation 1.5) endast ca halva porthöjden tillgänglig för inströmning, eftersom på den andra halvan motsvarande massflöde måste strömma ut. Hur de olika delarna ska adderas då liksom för "otäta" lokaler saknas underlag.

I basdata för energibelastningen har bl a därför inte beaktats att den inströmningshastighet som beräknas ur temperaturskillnaden ute-inne med ekvation 1.5 är den maximala nere vid golv, figur 1.9. Hänsyn har heller inte tagits till att vind med olika riktning inom 180° intervallet, men med samma hastighet, ger olika luftströmning genom en öppen port när de två faktorernas hastighet valts att adderas med kvadratmetoden. Basdata är nämligen framtagna för att främst ge relativa belastningsförhållanden mellan portar i olika väderstreck på olika orter i Sverige.

Vindens påverkan på luftinströmningen genom en öppen port men också på ridåns belastning styrs, förutom av ovan angivna faktorer, gentemot meteorologisk station, även av omgivande bebyggelse och terräng. Vindens, ihop med temperaturskillnaden, orsakade genomströmning, i en öppen oskyddad port, är därför bestämd av ett antal faktorer som den meteorologiska delen av projektet ska ge del svar på liksom annan pågående forskning.

4.3 Energiförlust genom öppen port baserad på "basdata"

Även om enkla generaliserade genomsnittliga strömningsbilder i en port ger grova uppskattningar på energiförlusten, måste dessa tillgripas i varje fall tills bättre underlag erhålls. För en helt tät och normalstor byggnad kan, för att få en jämförelse med porthandboken, antas att av vind och temperaturskillnad orsakad hastighet därför kan adderas med kvadratmetoden. Ingen luftströmning sker genom väggar och tak och strömningsmotståndet genom porten är så lågt att vindens hastighet reduceras obetydligt. Den portyta som är vinkelrät mot vinden över de 180° som energidata beräknats för måste dock tas hänsyn till liksom den temperaturberoende inströmningens hastighetsprofil.

Enligt ekvation 2.31 är medellufthastigheten, baserad på nämnda hastighetsprofil, $2/3 u_{\max}$. Om vindriktning och frekvens antas vara jämnt fördelad över beräknad 180° sektor blir medelvärdet för vindkomponenten mot portplanet en faktor $1/\sqrt{2} \approx 0.7$.

En "helt tät" lokal, som har neutralaxeln på något mindre än halva porthöjden, utgör undantag. En byggnad, som är så otät att neutralaxeln ligger vid tak är också ett ytterlighetsfall. Antas dock

i ett sådant fall takhöjden vara 1.5 ggr porthöjden H leder ekvation 2.30 och 2.32 till ett inströmmande luftflöde på ca 3.5 ggr större än för en helt tät lokal. Enligt de praktiska mätningar, som redovisats av Lind /15/ torde de flesta industrilokaler ha den täthet så att neutralaxeln ligger inom porthöjden. Utifrån bl a denna utgångspunkt har Lind även överslagsmässigt bestämt energiförlusten genom en port till samma storleksordning som enligt porthandboken, men då för en hälften så stor port!

Med ovanstående beskrivning av förutsättningarna för att beräkna energiförlusten för öppna portar kan därför tills alla korrektionsfaktorer erhålls energidata enligt tabell 4.1 a och b reduceras med faktorn 0.7 för att få medelvindhastighet vinkelrät mot portplan och hastighetsprofilkorrigering för den temperaturberoende luftanströmningen.

Hur läsituation för porten till en tät lokal påverkar den vindberoende luftinströmningen över en 180° sektor saknas också säkra uppgifter på. Lävirlveln, som strömmar mot porten vid marken och ifrån vid byggnadens överkant, bestämmer luftinströmningen. Approximeras så att vind- och temperaturberoende luftinströmning är lika stora, men vindens dynamiska tryckskapande och därmed även lävirlvel bestämmande effekt är hälften vid läsituation för porten, ska framtagna energidata reduceras till 75 %.

Med de i figur 4.1 angivna öppningsförhållandena för vald port omvandlad till årsfrekvensen 0.0114 erhålls för i tabellerna 4.1 a och b, med ovan angivna korrektioner, årsenergiförbrukningen:

Porten i läsituation:

$$P_1 = 0.0114 \cdot 0.7 \cdot 0.75 \cdot 3200$$

$$P_1 = 19.152 \text{ MWh}$$

Porten i lovartsituation:

$$P_2 = 0.0114 \cdot 0.7 \cdot 4865$$

$$P_2 = 38.823 \text{ MWh}$$

$$P_1 + P_2 = 57.975 \text{ kWh}$$

Denna energiförbrukning är lägre än den som erhålls med den överslagsmetod som porthandboken gav, men storleksordningen skiljer inte.

4.4 Effektförlust genom port utan och med olika luftridåer

Modellstudierna, som har skett under förhållanden som självstabiliserar luftridån, ger en flödes-

neutral delning. Det luftflöde, som ejekteras till ridån från insidan, förs då tillbaka till lokalen.

Vid olika vindanfall och temperaturskillnader mellan ridå och lokaltemperatur har under dessa betingelser den specifika effekten genom ridån med återstyrning varierat mellan ca 30 och 120 W/K·m² portyta. Lägsta värdet gäller vid vindstilla. Högsta värdet är erhållet vid en verklig vindhastighet på ca 5 m/s.

Fullskaleförsöken, som utförts vid vindhastigheter uppemot 10 m/s i lovartläge för porten, visar på specifika effektförluster på 100-150 W/K·m² portyta, när ridån går nära flödesneutralt i portöverkant. Med en för stor utåtriktning av ridån för den dock ut lokalluft och den specifika effekten kan då öka till ca 900 W/K·m² portyta.

Ca 1000 W/K·m² portyta erhålls i fullskala för ridå, när återstyrning och öppen sluss tas bort vid samma vindbetingelser i en otät lokal.

En ridå med återstyrning i en öppen sluss kan, enligt fullskaleförsöken, ställas manuellt i 2-3 lägen vid olika vindförhållanden och fås att alltid delas nära flödesneutralt i portöverkant. Vid pendling omkring neutralläge blir också tillfälligt utgående ejekterad lokalluft återförd. För en ridå utan öppen sluss med återstyrning i en icke helt tät lokal finns inte denna återföring. Praktiskt innebär detta att den specifika effekten från modellstudierna inte kan översättas direkt till fullskala för en ridå utan öppen sluss och återstyrning. Den specifika effekten i modellskala på 150-270 W/K·m² portyta, som är minst 2 ggr högre utan än med ridååterstyrning, torde därför vara normalt ca 400 W/K·m² portyta vid medelvindförhållanden på 2-3 m/s.

Med den impuls fullskaleportens ridå hade vid Linköping förs luftflödet 15 m³/s ut ur lokalen om den riktas utåt så att hela ridån går utanför porten. Den specifika effekten genom porten blir då ca 1400 W/K·m² portyta. För den portstorlek på 30 m², som tidigare redovisats, blir, vid en öppningstid under året på 100 timmar och en medeltemperaturskillnad under året på 15°C, det totala energiflödet utan ridåskydd:

$$\frac{1400 \cdot 30 \cdot 100 \cdot 15}{1000} = 63.000 \text{ kWh}$$

Skall en sådan ridå dock kunna gå utanför porten vid dimensionerande vindanfall måste impulsen fördubblas och därmed även medejekterat luftflöde. Energiförlusten dubblas då också till ca 125.000 kWh/år.

Neutralluftsridåns energitransport genom porten

blir under angivna betingelser minst 18.000 kWh.
För återstyrningsridån erhålls vid inte helt idealt inställd spaltvinkel 6.750 kWh.

Med ett energipris på 20 öre blir för de olika ridåtyperna energikostnaderna om porten skall skyddas:

Utomhusridån	ca	25.000 kr/år
Neutralluftsridån	ca	3.600 kr/år
Återstyrningsridån	ca	1.350 kr/år

Dessa värden kan ställas mot ca 12.000 kr/år för samma oskyddade port.

Tas hänsyn till att återstyrningsridån både manuellt och genom t ex ridåhastighetsstyrning i portöverkant kan fås att gå flödesneutralt blir energikostnaden mindre än 1.000 kr/år. Neutralluftsridån, som inte är skyddad av en stabiliserande sluss, torde få högre kostnad än angivet 3.600 kr. Dessutom kommer lokaltemperaturen att sänkas till icke acceptabel nivå redan vid medelutetemperaturen för året.

För att kunna beräkna luftinströmningen och därmed fastställa de ekonomiska och klimat/miljömässiga motiven för portar med olika storlek och orientering krävs kunskaper om byggnaders täthet. Tills sådana erhålls kan för en port som dimensionerats för att klara ca 4 m/s i vindhastighet sättas följande specifikt effektbehov:

Oskyddad port	1.2 kW/K·m ²
Utomhusridå	3 kW/K·m ²
Neutralluftsridå	0.4 kW/K·m ²
Återstyrningsridå	0.15kW/K·m ²

De genomförda mätserierna på luftridåer i modell och fullskala har av praktiska skäl begränsats. Önskvärt hade varit att större tids- och kostnadsramar stått till förfogande. Vi kan dock konstatera att energiförbrukningen i en port minskar radikalt med en luftridå med återstyrning. Detta kan hävdas trots att inströmningsförhållandena utan luftridå vid olika vindriktningar och vindhastigheter bygger på beräknade värden från generella i litteraturen angivna tryckkoefficienter och andra antaganden.

Fastän tryckskillnaden är nära noll över väggen vid porten då porten är öppen utan ridå, så finns givetvis en tryckskillnad över tak och andra väggar som vinden bygger upp. Luftinströmningen kommer då att bestämmas av dessa öppningar och otätigheter.

Lävirvlar påverkar även inströmningen liksom direkt vindanfall mot porten. Hur dessa samverkar med tryckskillnader i aktuellt fall har inte kunnat mätas eftersom möjligheterna att hålla temperaturskillnader ute-inne då eliminerats, i varje fall helt i den sista mätserien. Att kallluftsinströmningen i detta fall skulle understigit de på uppmätt tryckdifferens beräknade ca 4 m/s förefaller dock knappast troligt!

En ridåskyddad port utan återstyrning är, jämfört med en öppen port utan skydd, förbättrande ur energisynpunkt, men klimatskyddet är inte tillräckligt vid höga vindhastigheter. Vid låg utetemperatur utan kraftig vindpåverkan kan temperaturen i ridån, som går innanför porten, accepteras, om ridån riktas så att den går utanför nästan helt. Detta innebär att luft strömmar in på andra ställen i lokalen och orsakar luftrörelser och låga temperaturer där.

Att byggnadsvolym och byggnadsytornas permabilitet påverkar en luftridås funktion har inte minst klarlagts genom modellstudierna. Eftersom dessa gjorts på en nästan helt tät byggnad, har också antagits att vindanfall ej kan orsaka luftinströmning genom en oskyddad port utan att den sker på grund av termiska krafter.

Detta gör en jämförelse mellan modell och fullskala svår. Storleksordningarna på de fiktiva k-värdena för en skyddad port överensstämmer dock väl när fullskaleridån delas flödesneutralt. Vid vindanfall snett mot porten ökar också det fiktiva k-värdet i båda fallen. Hur uteluftsinsblandningen ökar med vinden vid flödesneutral ridådelning i portöverkant har modellstudierna klarlagt.

För primärluftstråle med samma temperatur som lokalen nås inte ens vid vindstilla för modellstudier-na samma verkningsgrad som vid fullskaleförsöken. Om ett antagande görs att vinden kan gå in i en liten, normal, men tät lokal på portens ena hälft och strömma ut på den andra, torde bilden bli anorlunda. Värmeomgångsförhållandet K_2/K_0 blir då t ex lägre än 0.1 för fall 36 vid maximalt vindanfall och därmed överensstämelsen mellan modell och verklighet bättre.

Vid uppmätta tryckskillnader erhålls en luftridåbana, som överensstämmer med teorierna utom i de fall då vinden tycks ha en ejekterande och anorlunda tryckskapande effekt i slussen. Temperaturfördelningen tvärs ridån vid återstyrning visar också att den luft, som förs in i lokalen, ligger så nära lokaltemperaturen att normalt inga besvärande luftrörelser uppstår av nedströmmande luft längre in. När vindriktningen är ungefär parallellt med portväggen tycks dock störningar erhållas i ridååterstyrningen, som blandar in kall uteluft.

För normalförhållandena, som innebär vindstilla, kommer utetemperaturer på -30°C inte att sänka ridåtemperaturen mer än ca 5°C under lokaltemperaturen närmast porten.

Försöken visar att en luftridå med en öppen sluss med återstyrning utgör en lösning på ett idag svårt klimatproblem samtidigt med att stora energimängder kan sparas. Praktiska och ekonomiska gränser för portstorlek och vindhastigheter finns givetvis, men dessa har med utförandet flyttats till högre värden.

Mätningarna pekar dock på att bättre kunskaper behövs om hur en byggnads täthet påverkar ridåns funktionssätt. En minimering av ridåstorlek är bl a beroende av de tryck som styr ridåns bana med och utan öppen sluss. Tryckvariationernas dynamik och ridåtyp bestämmer dessutom möjlighet och nödvändighet av god reglering av motriktad impuls.

Studier som kartlägger byggnaders täthet och därmed sammanhängande energiförluster utan skydd kan dessutom först ge säkra kunskaper om hur stora energibesparingar som är möjliga med en luftridåinstallation.

NOMENKLATUR

u	=	lufthastighet	m/s
\dot{m}	=	massflöde	kg/s
\dot{Q}	=	volymflöde	m ³ /s
\dot{q}	=	volymflöde per meter portbredd	m ³ /s·m
P	=	effekt	W
p	=	effekt per meter portbredd	W/m
B	=	portbredd	m
H	=	porthöjd	m
$2b_o$	=	spaltbredd	m
ρ	=	luftdensitet	kg/m ³
Δp	=	tryckdifferens	N/m ²
I	=	impuls	N
θ	=	temperatur	°C
$\Delta\theta$	=	temperaturdifferens	K
T	=	absolut temperatur	K
g	=	jordaccelerationen	m/s ²
c_p	=	värmekapacitivet	J/kg K
a	=	konstant	
l	=	längd	m
α	=	längdutvidgningskoefficient	K ⁻¹
λ	=	värmeledningskoefficient	W/m·K
k	=	värmegenomgångskoefficient	W/m ² ·K
R_m	=	luftridåstrålens krökningsradie	m
α	=	vinklar	°
x, y	=	koordinataxlar	
τ	=	tid	h
η	=	kinematisk viskositet	
Index:			
i	=	insida	
o	=	utsida, outside	
c	=	luftridån, curtain	
0	=	spaltförhållandet och tillstånd för oskyddad port	
tot	=	totalt	
L	=	läckage	
v	=	ventilation	
a	=	ackumulering	
t	=	transmission	
r	=	radiator	
W	=	wind	

e = ejekterad
b = återförd
w = vind

För avsnittet om modellagarna gäller:

i,k= riktningar
c = karakteristisk

BILAGA 1 ENERGIBESPARING VID ANVÄNDANDE AV LUFT-
RIDÅ

FELBEDÖMNING PÅ MODELLSTUDIERN

En studie av försöksresultaten, figur 2.24 - 2.30, och 2.33 - 2.43, visar att en kraftig spridning av försöksvärdena föreligger. Genom bestämning av möjliga fel i mätresultaten kan denna spridning kartläggas, vilket möjliggör en skärpning av resultatet.

För bestämning av det fiktiva k-värdet k_2 har följande uttryck använts:

$$k_2 = \frac{P_r + \dot{m}_0 \cdot c_p (\theta_0 - \theta_0) - \dot{m}_v \cdot c_p (\theta_v - \theta_0) - kA(\theta_i - \theta_0)}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)}$$

Deriveras detta uttryck för k_2 med avseende på de ingående parametrarna fås:

$$\frac{\partial k_2}{\partial P_r} = \frac{1}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_v} = \frac{c_p (\theta_v - \theta_0)}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_0} = \frac{c_p (\theta_0 - \theta_0)}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_v - \theta_0)} = \frac{\dot{m}_v \cdot c_p}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_0 - \theta_0)} = \frac{\dot{m}_0 \cdot c_p}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial (kA)} = \frac{-1}{H \cdot B}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial c_p} = \frac{\dot{m}_0 (\theta_0 - \theta_0) - \dot{m}_v (\theta_v - \theta_0)}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_i - \theta_0)} = \frac{P_r + \dot{m}_0 \cdot c_p (\theta_0 - \theta_0) - \dot{m}_v \cdot c_p (\theta_v - \theta_0)}{H \cdot B(\theta_i - \theta_0)^2}$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial (HB)} = \frac{P_r + \dot{m}_0 \cdot c_p (\theta_0 - \theta_0) - \dot{m}_v \cdot c_p (\theta_v - \theta_0) - kA(\theta_i - \theta_0)}{(H \cdot B)^2 \cdot (\theta_i - \theta_0)}$$

Dessa partiella derivator kan användas vid beräkning av maximalfel respektive medelfel (standardavvikelse) för k_2 . Med maximalfel avses det största teoretiskt möjliga fel, som k_2 kan ha. Detta maximalfel förutsätter att ett maximalt fel finns hos alla parametrar samt att dessa fels tecken samverkar till att ge ett maximalt fel

hos k_2 . Eftersom sannolikheten för detta är mycket liten, brukar man i stället för maximalfel vara mer intresserad av det s k medelfelet eller standardavvikelsen. Om sannolikheten för ett visst fel hos ett mätvärde följer den s k Gauss-fördelningen, avses med medelfel den felgräns inom vilken ca 68 % av mätvärdena ligger. Maximalfelet d_V hos en funktion V blir:

$$dV = \left| \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 \right| + \left| \frac{\partial V}{\partial x_2} dx_2 \right| + \left| \frac{\partial V}{\partial x_3} dx_3 \right| + \text{osv}$$

där x_1, x_2, x_3 osv är de i funktionen V ingående variablerna samt dx_1, dx_2, dx_3 osv är maximalfelet hos dessa variabler.

Maximalfelet hos k_2 blir sålunda:

$$\begin{aligned} dk_2 = & \frac{\partial k_2}{\partial P_r} dP_r + \frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_0} d\dot{m}_0 + \frac{\partial k_2}{\partial (\theta_0 - \theta_o)} d(\theta_0 - \theta_o) + \frac{\partial k_2}{\partial c_p} dc_p + \\ & + \frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_V} d\dot{m}_V + \frac{\partial k_2}{\partial (\theta_V - \theta_o)} d(\theta_V - \theta_o) + \frac{\partial k_2}{\partial (kA)} d(kA) + \\ & + \frac{\partial k_2}{\partial (\theta_i - \theta_o)} d(\theta_i - \theta_o) + \frac{\partial k_2}{\partial (HB)} d(HB) \end{aligned}$$

Medelfelet s_{x_2} hos en funktion V blir:

$$s_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x_1} s_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x_2} s_{x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x_3} s_{x_3} \right)^2 + \text{osv}}$$

där $s_{x_1}, s_{x_2}, s_{x_3}$ osv är medelfelen hos de ingående variablerna.

För k_2 blir då medelfelet:

$$\begin{aligned} s_{k_2} = & \sqrt{\left(\frac{\partial k_2}{\partial P_r} s_{P_r} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_0} s_{\dot{m}_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_0 - \theta_o)} \right.} \\ & \left. s(\theta_0 - \theta_o) \right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial c_p} s_{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_V} s_{\dot{m}_V} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_V - \theta_o)} \right.} \\ & \left. s(\theta_V - \theta_o) \right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (kA)} s(kA) \right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_i - \theta_o)} s(\theta_i - \theta_o) \right)^2 + \\ & \left. + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (HB)} s(HB) \right)^2 \right| \end{aligned}$$

De olika tänkbara felen hos de olika parametrarna kan indelas i fyra olika typer av fel:

- a) Systematiska fel är sådana fel, som beror på tillverkningen av mätutrustningen. De är antingen lika stora hela tiden eller förändras monotont från mätvärde till mätvärde.
- b) Avläsningsfel beror på svårigheten att avläsa en skala exakt. Olika personer avläser ett instrument något olika. Även avläsningen hos en och samma person kan variera slumpartat från det ena mättillfället till det andra.
- c) Apparatfel beror på inre friktion hos instrumentet. Denna inre friktion får som följd att instrumentet ger olika utslag beroende på från vilket håll mätvärdet närmas.
- d) Metodfel är fel, som beror på att en för den speciella mätuppgiften felaktig mätmetod använts.

Felen hos de olika variabler, som ingår i uttrycket för k_2 är:

Q_r Vid bestämning av k_2 har korrigerig för värmeupplagring i byggnadens innerväggar gjorts. Ett möjligt fel i uppmätningen av temperaturändringen i väggen finns dock. Om ytterligare värmelagring sker i väggarna kan den radiator-effekt P_2 , som tillförs rummet skrivas som:

$$P_r = P_{el} - m_{vägg} \cdot c_{p_{vägg}} \frac{\Delta\theta_{vägg}}{\tau} \quad \text{där:}$$

P_{el} är den eleffekt, som tillförs radiatorerna.

$m_{vägg}$ är massan hos byggnadens innerväggar samt ca 2 % av isoleringens massa, vilken kan antas delta i värmeupplagringen, totalt 180 kg.

$\frac{\Delta\theta_{vägg}}{\tau}$ = det eventuella felet i den uppmätta temperaturändringen i väggarna.

Felet i P_{el} är maximalt + 1.1 %, varav 0.1 % härrör sig från apparatfel och 1 % från avläsningsfel.

Felet i $m_{vägg}$ kan sättas till maximalt 10 kg.

$\frac{\Delta\theta_{vägg}}{\tau}$ kan uppskattas till maximalt $\pm 0.5^\circ\text{C/h}$

Medelfelet hos P_r blir då:

$$s_{P_r} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_r}{\partial P_{el}} s_{P_{el}}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_r}{\partial m_{vägg}} s_{m_{vägg}}\right)^2 +$$

$$\left(\frac{\partial P_r}{\partial (\Delta\theta_{vägg})} \frac{s(\Delta\theta_{vägg})}{\tau}\right)^2 =$$

$$\sqrt{(1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,011 \cdot 2800)^2 + (-25000 \cdot \frac{2}{3} \cdot 10)^2 +$$

$$(-180 \cdot 2500 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{0,5}{3600})^2} = 46 \text{ W} \Rightarrow \frac{47}{2800} = \pm 1.7 \%$$

medelfel.

Faktorn $\frac{2}{3}$ härrör sig från att medelfelet kan uppskattas till $\frac{2}{3}$ av maximalfelet, då den exakta felfördelningsfunktionen ej är känd.

\dot{m}_0 Felet vid bestämning av luftflödet med hjälp av en inströmningsdysa kan sättas till maximalt $\pm 5 \%$ av luftflödet.

$\theta_0 - \theta_o$ De avvikelser som finns hos mV-metern ger för de punkter, som används vid bestämningen av $(\theta_0 - \theta_o)$, $(\theta_v - \theta_o)$ samt $(\theta_i - \theta_o)$ ett maximalt fel hos temperaturdifferensen på $\pm 0.25^\circ\text{C}$.

\dot{m}_v Liksom för \dot{m}_0 kan felet sättas till maximalt $\pm 5 \%$ av luftflödet.

$\theta_v - \theta_o$ Enligt ovan maximalt $\pm 0.25^\circ\text{C}$.

kA Vid bestämning av kA isolerades portöppningen och byggnaden tillfördes en effekt på 2000 W, varvid en temperaturdifferens $(\theta_i - \theta_o)$ på 63.8°C uppmättes. Medelfelet hos tillförd effekt P_r är enligt ovan 1.7% $\Rightarrow 0.017 \cdot 2000 \text{ W} = 34 \text{ W}$. Maximalt fel i temperaturdifferensen $(\theta_i - \theta_o)$ är enligt ovan 0.25°C . Dessutom fås ett möjligt fel genom att luft kan ha läckt igenom portisoleringen. Detta möjliga läckage kan uppskattas till maximalt 0.1 luftomsättningar/h, vilket motsvarar $0,1 \cdot 14,2 \cdot 1,2/3600 \text{ kg/s} = 473 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$. Eftersom kA kan skrivas om

$$kA = \frac{P_r}{(\theta_i - \theta_o)} - \dot{m}_{\text{läck}} \cdot c_p \text{ blir medelfelet}$$

hos kA

$$\begin{aligned}
 s_{(kA)} &= \sqrt{\left(\frac{\partial (kA)}{\partial P_r} s_{P_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial (kA)}{\partial (\theta_i - \theta_o)} s_{(\theta_i - \theta_o)}\right)^2 +} \\
 &+ \left(\frac{\partial (kA)}{\partial \dot{m}_{\text{läck}}} s_{\dot{m}_{\text{läck}}}\right)^2 = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{1}{63,8} \cdot 34\right)^2 + (-1007 \cdot \frac{2}{3} \cdot 473 \cdot 10^{-6})^2 +} \\
 &+ \left(-\frac{2000}{63,8} \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,25\right)^2 = 0,63
 \end{aligned}$$

$(\theta_i - \theta_o)$

Enligt ovan maximalt $\pm 0.25^\circ\text{C}$.

c_p Det möjliga felet hos c_p är så litet (maximalt 0.005 %) att det helt kan försummas.

HB Det möjliga mätfelet hos portarean är även det så litet att det kan försummas.

Nu kan medelfelet hos k_2 beräknas för t ex fall 3. För detta fall blir:

$$\begin{aligned}
 s_{k_2} &= \sqrt{\left(\frac{\partial k_2}{\partial P_r} s_{P_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_o} s_{\dot{m}_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_o - \theta_o)} s_{(\theta_o - \theta_o)}\right)^2 +} \\
 &+ \left(\frac{\partial k_2}{\partial \dot{m}_v} s_{\dot{m}_v}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_v - \theta_o)} s_{(\theta_v - \theta_o)}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_2}{\partial (kA)} s_{(kA)}\right)^2 +} \\
 &+ \left(\frac{\partial k_2}{\partial (\theta_i - \theta_o)} s_{(\theta_i - \theta_o)}\right)^2 = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{1}{0,86^2 \cdot 22,6} \cdot 0,017 \cdot 2787\right)^2 + \left(\frac{1007 \cdot 57,3}{0,86^2 \cdot 22,6} \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,2 \cdot\right.} \\
 &\left. \cdot 0,05 \cdot 0,077\right)^2 + \left(\frac{0,077 \cdot 1,2 \cdot 1007 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,25}{0,86^2 \cdot 22,6}\right)^2 +} \\
 &+ \left(\frac{1007 \cdot 22,6}{0,86^2 \cdot 22,6} \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,2 \cdot 0,05 \cdot 0,090\right)^2 +} \\
 &+ \left(\frac{0,090 \cdot 1,2 \cdot 1007 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,25}{0,86^2 \cdot 22,6}\right)^2 + \left(-\frac{1}{0,86^2} \cdot 0,63\right)^2 +} \\
 &+ \left(\frac{2787 + 0,077 \cdot 1,2 \cdot 1007 \cdot 57,3 - 0,090 \cdot 1,2 \cdot 1007 \cdot 22,6}{0,86^2 \cdot 22,6^2}\right)^2
 \end{aligned}$$

$$\cdot \frac{2}{3} \cdot 0,25)^2 = \sqrt{154} = 12,4 \text{ W/m}^2\text{k}$$

Beräknar man på samma sätt medelfelet hos k_2 för alla fall, finner man att det varierar mellan 6.7 och 18.8 W/m²k. Beräknar man det största medelfelet hos k_2/k_0 för de olika kurvorna i figur 2.27, kan man lägga in felgränser kring linjerna i enlighet med figur 1.

JÄMFÖRELSE MODELL - FULLSKALA

Lufthastigheten från vindtunneln har, 1,7 m framför modellbyggnaden, varit antingen 1,2 eller 1,8 m/s. Beroende på ridåhastigheten i modellen motsvarar detta en viss verklig vindhastighet. Om den tänkta verkliga ridån har ridåhastigheten 40 m/s fås motsvarande verklig vindhastighet vid olika modellridåhastigheter.

Vindtunnel- hastighet	Modellridå- hastighet	Verklig ridå- hastighet	Motsvarande verklig vindhastig- het
1.8	17.4	40	4.1
1.8	18.1	40	4.0
1.8	26.0	40	2.8
1.2	17.4	40	2.8
1.2	18.1	40	2.6
1.2	26.0	40	1.8

Dessa motsvarande verkliga vindhastigheter fås genom att förhållandet mellan vindhastighet och ridåhastighet satts lika i modellfallet och det riktiga fallet. Om vi i stället vill att I_w/I_c skall vara lika i modellfallet och det riktiga fallet, fås en något avvikande verklig vindhastighet för varje modellridåhastighet.

Eftersom:

$$\frac{I_w}{I_c} = \frac{1}{4} \frac{\rho_w}{\rho_0} \cdot \frac{H}{b} \cdot \frac{u_w^2}{u_0^2} \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad \text{gäller}$$

$$\frac{(I_w/I_c) \text{ verklig}}{(I_w/I_c) \text{ modell}} = \frac{\left(\frac{\rho_w}{\rho_0} \cdot \frac{u_w^2}{u_0^2}\right) \text{ verklig}}{\left(\frac{\rho_w}{\rho_0} \cdot \frac{u_w^2}{u_0^2}\right) \text{ modell}}$$

Om förhållandet (ρ_w/ρ_0) är lika i modell och verkligt förhållande fås alltså verkliga vindhastigheter enligt tabellen ovan. Om inte, får denna hastighet korrigeras med faktorn:

$$\frac{(\rho_w/\rho_0)_{\text{modell}}}{(\rho_w/\rho_0)_{\text{verklig}}}$$

Den verkliga temperaturdifferens, som motsvarar en viss temperaturdifferens i modellförsöken fås genom att sätta Arkimedes tal Ar lika i modell och verkligt förhållande:

$$Ar = \frac{g \cdot l \cdot \Delta\theta}{273 \cdot u^2}$$

$$Ar_{\text{modell}} = Ar_{\text{verklig}} \Rightarrow \frac{\Delta\theta_{\text{modell}}}{u_0^2_{\text{modell}}} = \frac{7 \cdot \Delta\theta_{\text{verklig}}}{u_0^2_{\text{verklig}}}$$

Om vi sätter den tänkta verkliga ridåhastigheten till 40 m/s får vi förhållandet mellan verklig temperaturdifferens och temperaturdifferens i modell vid olika modellridåhastigheter.

Modellridåhastighet m/s	Verklig ridåhastighet m/s	$\frac{\Delta\theta_{\text{verklig}}}{\Delta\theta_{\text{modell}}}$
17.4	40	0.75
18.1	40	0.70
26.0	40	0.34

Exempel

Fall 27

I detta fall är temperaturdifferensen över porten 34.7°C . Ridåns övertemperatur är 22.2°C . Eftersom $u_0 = 18.1$ m/s får vi motsvarande verklig temperaturdifferens till $0.7 \cdot 34.7^\circ\text{C} = 24.3^\circ\text{C}$ över portens. Motsvarande övertemperatur hos ridåstrålen blir $0.7 \cdot 22.2^\circ\text{C} = 15.5^\circ\text{C}$. I modellförsöket var innetemperaturen 58.5°C och alltså utetemperaturen 23.8°C och ridåtemperaturen 80.7°C . I en verklig byggnad har vi kanske en innetemperatur på 15°C och får då med de framtagna temperaturdifferenserna utetemperaturen till -9.3°C och ridåtemperaturen till 30.5°C .

$$(\rho_w - \rho_0)_{\text{modell}} = \frac{1.172}{0.985} = 1.19$$

$$(\rho_w - \rho_0)_{\text{verklig}} = \frac{1.314}{1.148} = 1.14 \Rightarrow \frac{(\rho_w/\rho_0)_{\text{modell}}}{(\rho_w/\rho_0)_{\text{verklig}}} =$$

$= 1.02 \Rightarrow$ motsvarande verklig vindhastighet $= 4.19$ m/s då vintunnelhastigheten är 1.8 m/s. Allt det-

ta under förutsättning att den tänkta verkliga ridåhastigheten är 40 m/s.

TEMPERATURTRYCK I FÖRHÅLLANDE TILL VINDTRYCK

Den maximala tryckdifferensen över en port till en tät byggnad är:

$g \cdot \frac{H}{2} \cdot (\rho_o - \rho_i)$ där ρ_o respektive ρ_i är densiteter för ute- respektive inneluften.

Vindtrycket är $\rho_w \frac{u_w^2}{2}$

För fall 27 gäller:

$$\rho_o = 1.172 \text{ kg/m}^3 = \rho_w \Rightarrow$$

$$\rho_i = 1.052 \text{ kg/m}^3$$

Maximala temperaturtrycket är $9.81 \cdot \frac{0.86}{2} (1.172 - 1.052) \text{ Pa} = 0.51 \text{ Pa}$

Vindtrycket = $1.172 \cdot \frac{1.8^2}{2} \text{ Pa} = 1.9 \text{ Pa}$.

För motsvarande verkliga fall fås:

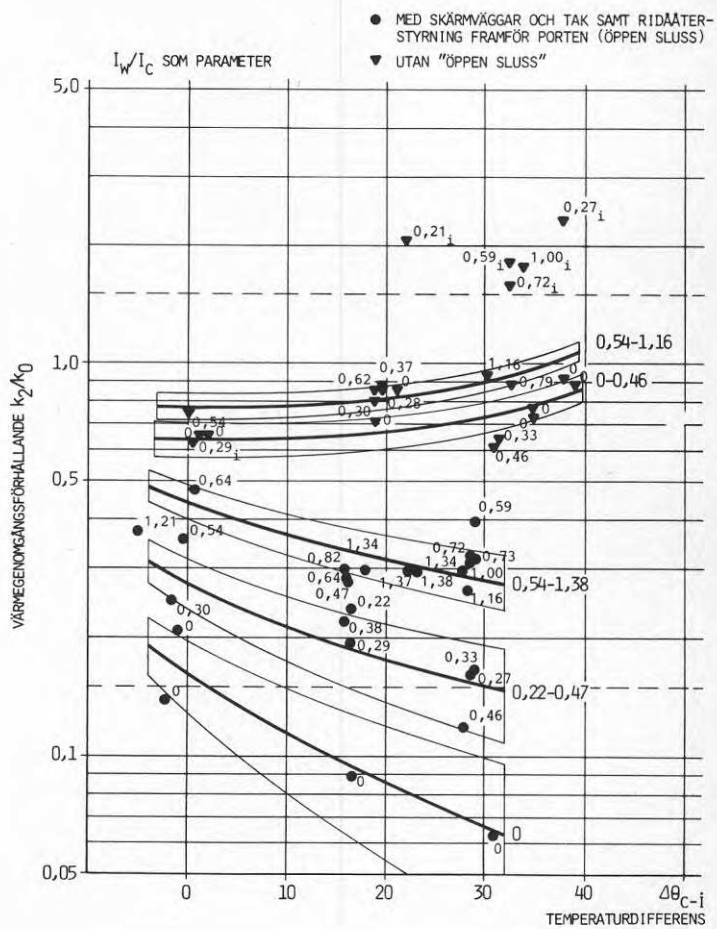
Maximala temperaturtrycket är $9.81 \cdot \frac{6}{2} (1.314 - 1.208) \text{ Pa} = 3.1 \text{ Pa}$

Vindtrycket = $1.314 \cdot \frac{4.19^2}{2} \text{ Pa} = 11.5 \text{ Pa}$

Förhållandet mellan vindtryck och max temperaturtryck blir i modellfallet $1.9/0.51 = 3.7$.

I motsvarande verkliga fall blir förhållandet $11.5/3.1 = 3.7$.

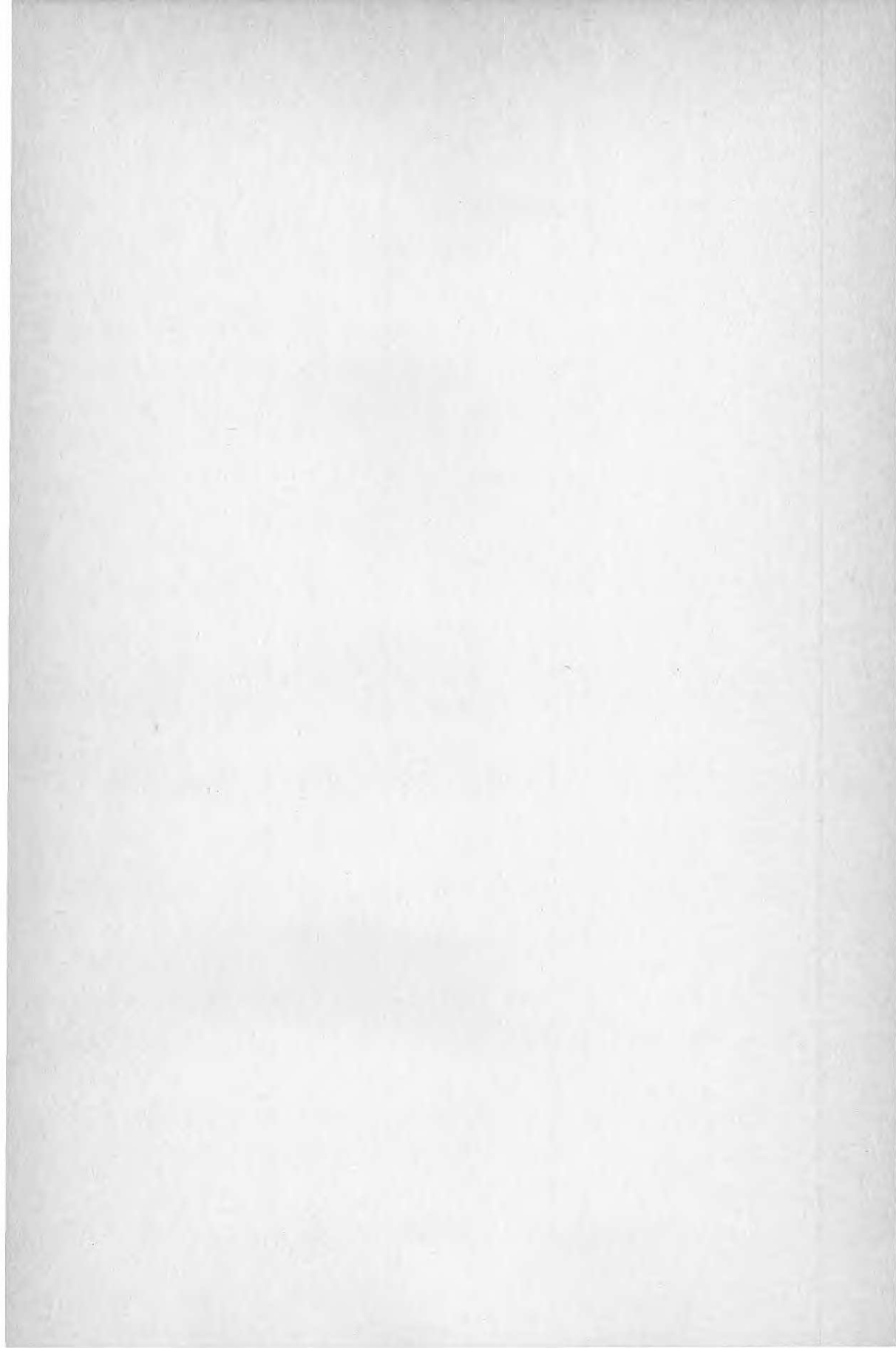
Således god överensstämmelse.



BILAGA 1 Energibesparing vid användande av luftridå.
Figur 1 Felgränser vid modellförsöken

LITTERATUR

- 1 Baturin, V V, 1972, Fundamentals of Industrial Ventilation. Pergamon.
- 2 Lajos, T, Preszler, L, 1975, Untersuchung von Torluftschleieranlagen. Heizung, Lüftung und Haustechnik 26, 5 och 6.
- 3 Reichardt, H, 1941, Über eine neue Theorie der freien Turbulenz. Z f ang Math u Med, Band 21, heft 5, Okt.
- 4 Hetsroni, G, Hall C W, 1961, Heat Transfer Through Air Curtain, Michigan Quarterly Bulletin, 43, 3 feb.
- 5 Hetsroni, G, Hall C W, Dhanak, A M, 1963, Heat Transfer Properties of an Air Curtain. Transactions of the ASAE 6:4.
- 6 Hetsroni, G, Hall, C W, 1964, Further Studies of the Air Curtain, Michigan Quarterly Bulletin, 46, 3 feb.
- 7 Hetsroni, G, Hall C W, 1965, Heat Transfer Through an Air Curtain. Air Engineering 4.
- 8 Hetsroni, G, Hall, C W, Dhanak, A M, 1965, Momentum Transfer in Thermally Asymmetric Turbulent Jets. Journal of Heat Transfer, 11.
- 9 Rolloos, M, 1977, On the possibilities and limitations of modelling room air flow conditions. Technische Hogeschool Delft, rapport nr K 69, maj.
- 10 Jensen, M, Franck, N, 1965, Model-scale tests in turbulent wind. Part II. The Danish Technical Press, Copenhagen.
- 11 Elrod, H G, 1954, Computation charts and theory for rectangular and circular jets. Heating, Piping and Air Conditioning, mars.
- 12 Carslaw & Jaeger.
- 13 Handa, K, 1979, Wind induced natural ventilation, BFR D10.
- 14 Ingenjörsvetenskapsakademins (IVA) och Transportforskningskommissionens (TFK) meddelande nr 80, 1975.
- 15 Lind, L, Termiskt klimat vid transportöppningar, ASF 76/200.



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
780886-9 från Statens råd för byggnadsforskning
till Bahco Ventilation Entreprenad AB, Enköping.

R86: 1982

ISBN 91-540-3750-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700586

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirka pris: 40 kr exkl moms