

Tjyvdrag eller ventilation?

Täthetens betydelse – en systemanalys

I denna artikel presenteras en översiktlig systemanalys av tekn dr Per Olof Nylund vid Tyréns företagsgrupp. Syftet är att bidra till att skapa en gemensam utgångspunkt för diskussion och fortsatt arbete när det gäller byggnaders lufttätethet.

De nya energihushållningsnormerna, Supplement 1 och tillhörande kommentarer, har gett upphov till en intensiv debatt och till en omfattande aktivitet. Det står klart att otillräcklig täthet hos en byggnads ytterhölje medför avsevärda energiförluster i form av onödigt höga ventilationsförluster samtidigt som man får olägenheter i form av drag.

Det är rimligt att uppfatta den nu föreliggande normen som ett första försiktigt steg i en utveckling mot successivt alltmera skärpta krav på byggnaders täthet.

Synpunkterna i artikeln kan förhoppningsvis vara ett bidrag till att skapa förståelse för problemet.

Samspel mellan höljets lufttätethet och ventilationen

Huvuddragen i analysen av sambandet mellan lufttätetheten hos en byggnads anslutningsytor och ventilation/läckaget i byggnaden kan belysas med utgångspunkt från fig 1 och en beskrivning av ett analogt problem från ett annat område – hållfasthetsläran.

Ett analogt förhållande på hållfasthetsområdet

Som exempel kan vi ta problemet att teoretiskt bestämma nedböjning för en belastad balk. De grundläggande experimentellt bestämda data som behövs är uppgifter om materialets deformationskaraktäristika som vanligen definieras av ett σ/ϵ -diagram. För mätliga belastningar utgörs den erforderliga materiaikaraktäristiken av E-modulen, d.v.s. σ/ϵ -kurvens lutning. (För högre belastningar över proportionalitetsgränsen kröker kurvan av, och beräkningen av förskjutningar blir mer komplicerad.)

Utöver detta behövs uppgifter om belastningsförutsättningar och ingenjörs-kunskap beträffande beräkningsteorin.

Mot bakgrunden av och i analogi med detta skall här redogöras för de olika delproblem som ingår i fig 1.

Läckagekaraktäristika

Tätheten hos en byggnads ytterhölje eller av en del av ytterhöljet bestäms på så sätt, att man med en fläkt åstadkommer en tryckskillnad över höljet eller över den detalj man vill prova och mäter det luftflöde som passerar igenom. Provningsen görs vid ett antal nivåer på övertryck eller undertryck. Resulta-

tet blir en kurva som anger samband mellan tryckskillnad och läckage och som kan ses som begreppsmässigt analog med ett σ/ϵ -diagram. Fig 2 visar det principiella utseendet hos en sådan läckagekurva. Vid små tryckskillnader – i närheten av origo i figuren – dominerar luftens viskositet, läckaget är laminärt och sambandet mellan läckage och tryck är linjärt. Vid höga tryckskillnader är läckaget en följd av transformering av tryckenergi till rörelseenergi, strömningen är turbulent, och läckaget är proportionellt mot kvadratroten ur tryckskillnaden. I området mellan små och stora tryckskillnader är strömningen ett "mellanting". Inom begränsade intervaller för tryckskillnaden kan läckaget uttryckas med den i figuren insprängda exponentialfunktionen, där exponenten β för låga tryckskillnader = 1 och för höga tryckskillnader = 0,5 och i området mellan dessa har ett värde som varierar från 1,0–0,5. Det finns skäl för följande konstanteranden:

● I det allmänna fallet är läckagekurvan icke-linjär. Det innebär, att flöden av olika tryckskillnader inte kan adderas. Man måste i stället först addera tryckskillnaderna till varandra och sedan se vilket läckage som fås av summatrycket.

● Variationen av värdet för exponenten β gör att det sannolikt inte är meningsfullt att söka uttrycka en läckagekurva analytiskt med ett enda exponentialuttryck.

Detta innebär i sin tur svårigheter att analytiskt beräkna sammansatt täthet av två deltätningar i serie, t.ex. yttre och inre tätskikt i en vägg eller två tätningar som är placerade parallellt, t.ex. ett fönster och omgivande väggparti. I stället kan man tillämpa ett grafiskt förfarande. En redogörelse för hur detta kan ske har angivits i en tidigare byggforskningsrapport: "Vindtäthet hos flerskiktsvägar" (1966).

För analysen i det följande kan vi anta att läckaget genom en ytenhet av ytterhöljet kan uttryckas av det allmänna uttrycket i fig 2, d.v.s.

$$q_{in} = f(\Delta p) \quad (1)$$

där q_{in} anger läckage in genom höljet för en tryckskillnad Δp , som räknas positiv då trycket på utsidan är större än på insidan. För en negativ tryckskillnad fås ett läckage

$$q_{ut} = g(-\Delta p) \quad (2)$$

Karaktäristikorna $f(\Delta p)$ och $g(\Delta p)$ är ofta men inte alltid lika.

Drivkrafter

Läckage genom ytterhöljet eller delar av ytterhöljet uppstår då det finns tryckskillnad mellan ut- och insida. Drivkraften för läckaget är således den tryckbild som gäller för byggnaden, d.v.s. storlek och variation av tryck på utsidan och på insidan av väggar, fönster, tak m.m. Tryckbilden är sammansatt av de mikroklimatiska deltryck som uppträder av

- vindkrafter
- termik
- fläktkrafter.

Den av dessa deltryck sammansatta tryckbilden kan uppfattas som en belastningsförutsättning.

De oberoende drivkrafterna är yttre vindtryck, termisk tryckgradient i byggnadens höjddel och flödet i fläktdrivna ventilations-system. (Med oberoende menas här att krafterna inte beror av om höljet är mer eller mindre otätt.)

Yttre vindtryck – $p(A)$

Deltryckbilden av vindens inverkan är mycket komplicerad. Omständigheter och faktorer som påverkar tryckbilden har redovisats i en programskrift "Ofrivillig ventilation" (1976) som utarbetats av en arbetsgrupp under ledning av G. Kärrholm vid CTH.

Det yttre trycket invid en yta definieras för stationära strömningförhållanden som en produkt av det dynamiska trycket och en formfaktor. Om trycket betecknas $p(A)$ – där A står för aerodynamiskt deltryck gäller att

$$p(A) = \bar{p}(A) \cdot c = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot c \approx 0,6 \cdot v^2 \cdot c \quad (3)$$

där

ρ = luftens densitet (kg/m^3),

v = vindhastighet (m/s) och

c = formfaktor. Det ungefärliga uttrycket anger trycket i (Pa).

Värden för formfaktorer finns angivna i vindlastbestämmeiserna där beräkning av vindtrycket sker enligt (3). Detta uttryck får även i den fortsatta analysen här representera inverkan av yttre vindtryck, om vi bara är medvetna om att de verkliga förhållandena är mer komplicerade än så.

● Den jämna fördelningen av formfaktorer över delytorna och därmed jämna fördelningen av det yttre vindtrycket, enligt vindlastnormen, innebär en stark förenkling.

● Vindhastigheten har förutsatts vara stationär. I verkligheten är den, i synnerhet nära marken, beroende på omgivningens topografi m.m. och är icke-stationär. Det gör att en tillfällig vindstöt med hög vindhastighet ger upphov till en trycksänkning på läsidan, som inte inräffar exakt samtidigt. Det är i verkligheten alltså fråga om dynamiska

förlopp med fasförskjutna tryckstegringar och trycksänkningar.

Vi kan således tänka oss förm faktorn c ersatt av en funktion

$$c = c(x, y, z, t)$$

där

x, y och z är rumskoordinater och t anger tid och att det är frågan om ett icke-stationärt samband.

Den yttre tryckbilden, som sålunda är ganska komplicerad, varierar med byggnadens höjd, utformning, läge och omgivande topografi men knappast med tätheten hos ytterhöljet. Det är därför som det yttre vindtrycket här betraktas som oberoende.

Termik - $p(T)$

Lufttrycket på en viss nivå är detsamma som tyngden av ovanför varande luftpelare. Vid konstant temperatur avtar trycket, med försumbart fel, linjärt med ökad höjd över marken. Luftens densitet minskar med ökande lufttemperatur, vilket gör att tryckminskningen i höjddel för inomhusluften är mindre än motsvarande tryckminskning för kallare utomhusluft. Den oberoende delen av termodynamisk drivkraft för läckage är tryckgradienten i höjddel - som kan uttryckas som

$$\frac{dp(T)}{dz} = -\rho_0 \cdot g \cdot 273 \left(\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (4)$$

där

z = höjd över byggnadens bas

ρ_0 = luftens densitet vid 0°C

T_y = yttre lufttemperatur (K)

T_r = inre lufttemperatur (K)

Lösningen till denna ekvation blir

$$p(T) = -\rho_0 \cdot g \cdot 273 \left(\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_r} \right) z + \text{konst.} \approx -0,04 \cdot \Delta T \cdot z + \text{konst.} \quad (5)$$

där

ΔT = temperaturskillnad ute/inne.

Det ungefärliga uttrycket gäller för z i (m) och $p(T)$ i (Pa).

Summan av de yttre deltrycken på en delyta A_i fås ur (3) och (5) - om vi använder de ungefärliga uttrycken, som tar mindre plats, till

$$p_i = 0,6 v^2 \cdot c_i - 0,04 \cdot \Delta T \cdot z_i + \text{konst.} \quad (6)$$

Jämviktstvillkor - flödesbalans

För en inuti öppen byggnad - utan väsentliga strömningsmotstånd inuti - fås, om den påverkas av vindtryck och termik, ett inre jämviktstryck p_r . Tryckskillnaden över delytan A_i fås då enligt uttrycket

$$\Delta p_i = 0,6 v^2 \cdot c_i - 0,04 \cdot \Delta T \cdot z_i - p_r \quad (7)$$

Integrationskonstanten från uttrycket (5) kan slopas eftersom p_r nu representerar den term som bestäms av jämviktstvillkoren. Dessa består i att mängderna inströmmande och utströmmande luft skall vara lika stora.

Byggnad utan ventilationsanordningar

Det kan vara lämpligt att börja med ett förenklat fall - en byggnad utan ventilationsanordningar.

Det sammanlagda läckaget in fås enligt (1) som

$$Q_{in} = \sum A_i \cdot f_i(\Delta p_i) \quad (8)$$

med (Δp_i) enligt (7)

Läckaget ut blir på samma sätt

$$Q_{ut} = \sum A_j \cdot g_j(\Delta p_j) \quad (9)$$

Sorteringen av termer för läckage in och ut blir möjlig sedan jämviktstrycket p_r bestämts ur villkoret

$$Q_{in} \cdot \frac{T_r}{T_y} = Q_{ut} \quad (10)$$

Faktorn T_r/T_y betingas av att inströmmande kallare luft utvidgas.

Den genomströmmande luftmängden Q_{in} är måttet på läckage/ventilation.

Jämviktstrycket p_r bör i systemanalysen uppfattas som en funktion - liksom förm faktorn c .

För en måttligt stor inuti öppen byggnad gäller $p_r = p_r(t)$. I det allmänna fallet - innerväggar, dörrspringor etc - gäller $p_r = p_r(x, y, z, t)$. Grundläggande modeller för bestämning av inre strömning och tryckbild finns redovisad i den tidigare nämnda programskriften och kan i princip "hakas på" systemanalysen här.

Byggnad med självdragsventilation

För fullständighetens skull kan vi anta en byggnad med såväl intagsöppningar som evakueringsöppningar. Dessa öppningar är jämförbara med otätheter i det övriga höljet.

Läckage in och ut genom dessa kan uttryckas som tilläggstermer till (8) och (9).

Vi får

$$Q_{in} = \sum A_i \cdot f_i(\Delta p_i) + F_i(\Delta p_i) \quad (11)$$

och

$$Q_{ut} = \sum A_j \cdot g_j(\Delta p_j) + G_j(\Delta p_j) \quad (12)$$

där

F_i och G_j är läckagekaraktäristika för ventilationskanaler som utmynnar vid deltytor i respektive j .

Jämviktstvillkoret - flödesbalansen bestäms av samma uttryck (10) som förut.

Byggnad med frånluftsventilation

Inledningsvis under rubriken drivkrafter nämndes att flödet i fläktdrivna ventilationsystem betraktas som ett - av höljets otätheter - oberoende kraftsystem. Anledningen är att fläktsystemen arbetar med stora tryckskillnader och stora motstånd över in- och utblåsningsdon. Detta innebär vid frånluftsventilation att man har ett konstant luftflöde ut genom ventilationsanläggningen som är oberoende av otätheter hos byggnaden. (Givetvis inom rimliga gränser. Är höljet helt tätt, fås inget flöde.)

För ett frånluftssystem kan inströmmande luftvolym uttryckas enligt (8) eller ev (11). Likaså kan utströmmande volym - den som inte går ut genom frånluftssystemet - uttryckas enligt (9).

För flödesbalansen gäller däremot följande uttryck

$$Q_{in} \cdot \frac{T_r}{T_y} = Q_{ut} + Q_{fläkt} \quad (13)$$

där Q_{ut} är den volym som passerar ut genom höljet och $Q_{fläkt}$ är flödet ut genom frånluftsfälten.

Byggnad med från- och tilluftsventilation

Vid balanserad ventilation är mängderna tillförd och evakuerad luft lika stora. Ett sådant ventilationssystem ger alltså inte upphov till några inre över- eller undertryck. Tryckförhållandena i höljet blir detsamma som om det inte funnits något ventilationssystem alls och som här tidigare redogjorts för. Sambanden (8), (9) och (10). I praktiken kan dock obalans inte undvikas helt, varför flödesbalansen uttrycks av (13), där tecknet på den sista termen beror på åt vilket håll obalansen är riktad.

Möjligheter till förenklingar

I det tidigare har betonats att läckage av olika drivkrafter i det allmänna fallet inte kan överlagras därför att läckagekaraktäristika inte är linjära. I varje fall inte då tryckskillnaderna är förhållandevis stora, t.ex. då

forts sid 32

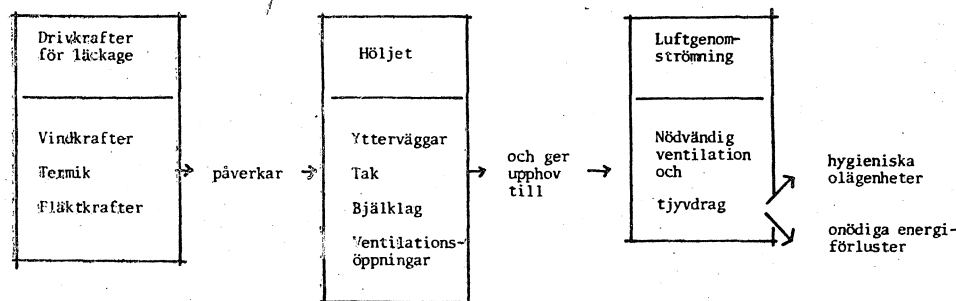


Fig 1. Principiell grundsyn för analysen i uppsatsen.

Läckage q

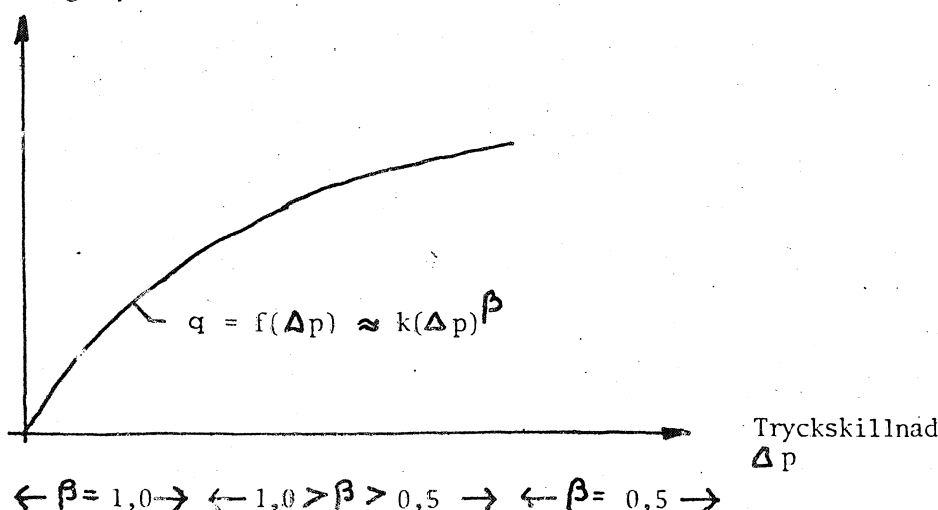


Fig 2. Principiell uppbyggnad av läckagekurva.