

Kappa-modellen

Kappa-modellen – en simpel model for tilnærmet bestemmelse af vertikal temperaturfordeling i rum

Af: Henrik Brohus, Aalborg Universitet, Institutet for Bygningsteknik
Henrik Ryberg, Carl Bro as

Følgende notat er en dokumentation af "Kappa-modellen" i BSim2000 (tsbi5), en simpel model som tilnærmet kan tage højde for vertikale temperaturgradienter i rum. Der vil indledningsvis kort blive redegjort for formålet med nævnte model, dernæst præsenteres selve modellen og endelig behandles implementeringen af modellen.

Baggrund

Fuldstændig opblanding

Når der regnes på energi- og komfortforhold i ventilerede rum, har det traditionelt været en meget udbredt antagelse, at luften i det aktuelle rum regnes fuldstændigt opblandet. Det umiddelbare incitament til antagelsen er, at det giver en markant lettelse i beregningerne – det være sig i hånden eller via computerprogrammer. Denne antagelse er også benyttet i fx *tsbi3*.

Ved fuldstændig opblanding vil der i teorien ingen gradienter forekomme for hverken temperatur- eller koncentrationsfordeling i et rum. Det vil sige, at temperaturen og koncentrationen i princippet er den samme overalt og dermed den samme tæt ved indblæsningsarmaturerne som i nærheden af varme- og forureningskilder for at nævne to yderpunkter. Man siger kort og godt, at tilstanden i den udsugede luft er repræsentativ for tilstandene de øvrige steder i rummet.

I forholdsvis lavloftede rum med mekanisk ventilation efter opblandingsprincippet som det fx anvendes i mange kontorlokaler, vil antagelsen normalt være ganske god.

Rum med gradienter

Derimod vil man i rum, som er ventileret efter fortrængningsprincippet, ikke kunne bruge denne antagelse, idet den ventilationsform netop vil generere gradienter (i vertikal retning). I fortrængningsventilerede rum vil man finde, at temperaturen og koncentrationen i udsugningsluften normalt er signifikant højere end i opholdszonen, hvilket da også er den væsentligste grund til at princippet i det hele taget anvendes (Skistad, 1994; Yuan et al., 1998; 1999). Det giver i forhold til opblandingsventilation en højere temperatur- og ventilationseffektivitet eller sagt på en anden måde, får man fjernet mere energi pr. m³ luft og opnår en lavere forureningskoncentration i opholdszonen. Tilstedeværelsen af temperatur- og koncentrationsgradienter vil dermed have en direkte indflydelse på den termiske komfort, luftkvaliteten og energiforbruget. Ventilationsprincippet har naturligvis også sine begrænsninger eksempelvis i opvarmningssituationen, hvilket ikke vil blive kommenteret yderligere her, se fx Brohus og Nielsen, 1996; Nielsen, 1996 samt Mundt, 1996.

I naturlig eller hybrid ventilerede bygninger samt i højloftede lokaler, hvor ventilationen er beskeden, vil der ofte gælde de samme forhold som i rum, der ventileres mekanisk efter fortrængningsprincippet (Howarth, 1985; Kato et al., 1995; Niemelä og Koskela, 1996; Heiselberg et al., 1998).

Udviklingen over det sidste årti er således gået i retning af, at der er et klart voksende behov for at kunne tage vertikale temperaturgradienter i regning.

Indflydelse af stråling

Varmebalancen for rum med temperaturgradienter vil i højere grad end andre være påvirket af indbyrdes strålingsudveksling mellem de indvendige overflader. Fx vil gulvtemperaturen i fortrængningsventilerede rum være højere end lufttemperaturen i umiddelbar nærhed og modsat vil lofttemperaturen være lavere end lufttemperaturen umiddelbart under loftet, hvilket blandt andet er en følge af gensidig strålingsudveksling mellem loft og gulv. I det hele taget vil langbølget stråling have en stor indflydelse på temperaturfordelingen, idet den er med til at "omfordele" energien, eksempelvis fra den relativt varme luft øverst i rummet via loft og højtliggende vægflader til fladerne og luften i den nederste del af rummet (Li et al., 1992; 1993).

På samme måde vil solstråling på flader have en stor indflydelse på de lokale temperaturforhold (Schild, 1996; Heiselberg et al., 1998).

Randbetingelser til CFD

Hvis der ønskes en detaljeret bestemmelse af de lokale felter i et rum, eksempelvis lufthastighed, temperatur eller forureningskoncentration, må der foretages numeriske strømningsberegninger ved hjælp af CFD (Computational Fluid Dynamics) - alternativt kan der opbygges og måles på en model i reduceret eller fuld skala.

Kvaliteten af CFD-simuleringer afhænger meget af, om det er muligt at fastsætte tilstrækkeligt gode randbetingelser, fx den konvektive varmestrøm fra en solbeskinnede vægoverflade. Programmer til termisk bygningsmodellering som BSim2000 vil være oplagte at bruge til at bestemme randbetingelser for CFD-simuleringer. Her er det selvfølgelig en forudsætning, at modellerne er tilstrækkelig udbyggede og i passende udstækning kan tage højde for blandt andet temperaturgradienter, solindfald og langbølget strålingsudveksling. Generering af gode randbetingelser til CFD simuleringer er derfor yderligere et incitament til at implementere en model for temperaturgradienter.

Kappa-modellen - modelbeskrivelse

Når temperaturen af udsugningsluften fra et rum er kendt (fx ved hjælp af en varmebalance baseret på fuldstændig opblanding af rumluften), kan den vertikale temperaturfordeling bestemmes tilnærmet ved hjælp af følgende model, når rummets geometri og varmekilder er kendte.

Forudsætninger

Den vertikale temperaturfordeling afhænger meget af strømningsfeltet. Hvis rumluften er tæt på at være fuldt opblandet, vil der ikke forekomme nogen særlig temperaturgradient, mens en stratificeret strømning som ved fortrængningsventilation vil kunne skabe en betydelig gradient.

I naturligt ventilerede rum, hvor rumhøjden er begrænset (fx under 2,5 m), vil temperaturgradienten normalt være ubetydelig i vintertilfældet, mens en sommertilstand vil kunne skabe en lille gradient. I tilfælde af høje rum vil både vinter- og sommertilstanden kunne give anledning til temperaturgradienter, især når indblæsningsåbningerne er placeret lavt og udsugningsåbningerne højt. En fleretagers bygning med relativt store åbninger i vertikal retning kan have en næsten ensartet temperaturfordeling på hver etage, og samtidig en trinvist stigende vertikal temperatur for bygningen som helhed.

Den følgende metode antager, at der forekommer et stratificeret strømningsfelt. Den antager også, at en eventuel horisontal temperaturgradient kan negligeres.

Beskrivelse af den simple model

En simplificeret fremgangsmåde anvendes til at bestemme den vertikale temperaturgradient, hvor det faktiske temperaturprofil modelleres med et tilnærmet lineært profil. Hældningen bestemmes fx ud fra kendskab til varmekilderne jævnfør tabel 1.

For lokaler med store rumhøjder og varmekilder placeret i flere niveauer, vil det lineære lodrette temperaturprofil som "Kappa-modellen" beskriver ofte være en ret grov tilnærmelse. Såfremt der for fortrængningsventilerede lokaler afviges væsentligt fra de situationer, hvor κ kan sættes til 0,5, bør valget af κ ske på baggrund af luftstrømningsmæssige betragtninger.

Der gøres opmærksom på, at en brugbar tilnærmelse af temperaturgradientens forløb i nogle tilfælde kun kan opnås ved introduktion af et stykkevist lineært temperaturprofil, hvilket "Kappa-modellen" i sin nuværende form ikke er i stand til.

Kategori	Kildetype	κ	Sandt profil	Tilnærmet profil
I	Intensiv kilde, punktkilde, solbeskinnet væg <i>Industrielt byggri med kraftige varmekilder</i>	0,35		
II	Pc, kontorlamper, printer, blandede kilder <i>Kontorlokaler</i>	0,50		
III	Fordelt kilde, solbeskinnet gulv, loftbelysning <i>Auditorier, Atrier</i>	0,65		

Tabel 1. Bestemmelse af tilnærmet vertikal temperaturfordeling i tilfælde af stratificeret strømning. Resultaterne er blandt andet baseret på Ryberg og Bech (1997).

Når varmekilderne er kendte, kan κ findes. Temperaturen ved gulvet og det vertikale temperaturprofil bestemmes da ved hjælp af

$$T_f = T_0 + \kappa(T_R - T_0) \quad (1)$$

hvor T_f er lufttemperatur ved gulvet (°C)
 T_0 er indblæsningstemperatur (°C), se også under afsnit 3
 T_R er udsugningsluftens temperatur (°C)

og således

$$\kappa = \frac{T_f - T_0}{T_R - T_0} \quad (2)$$

Under forudsætning af fuld opblanding, kan T_R fx findes ved

$$T_R = T_0 + \frac{\Phi_{konv.}}{\rho c_p q_v} \quad (3)$$

hvor $\Phi_{konv.}$ er konvektiv varmebelastning (W)
 ρ er densitet (kg/m³)
 c_p er varmekapacitet (J/kg °C)

q_v er luftmængde (m^3/s)

På dimensionsløs form fås udtrykket

$$T^* = y^*(1 - \kappa) + \kappa \quad (4)$$

hvor y^* er den dimensionsløse højde, og T^* er den dimensionsløse temperatur

$$y^* = y / H \quad (5)$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_R - T_0} \quad (6)$$

Ved gulvet er $y^* = 0$ og $T^* = \kappa$. Ved loftet er $y^* = 1$ og $T^* = 1$.

Når $\kappa = 0,5$ svarer denne metode til "50% - reglen", en tommelfingerregel der ofte anvendes ved dimensionering af fortrængningsventilation (Skistad, 1994). Ved fuldt opblandet rumluft fås $\kappa = 1,0$.

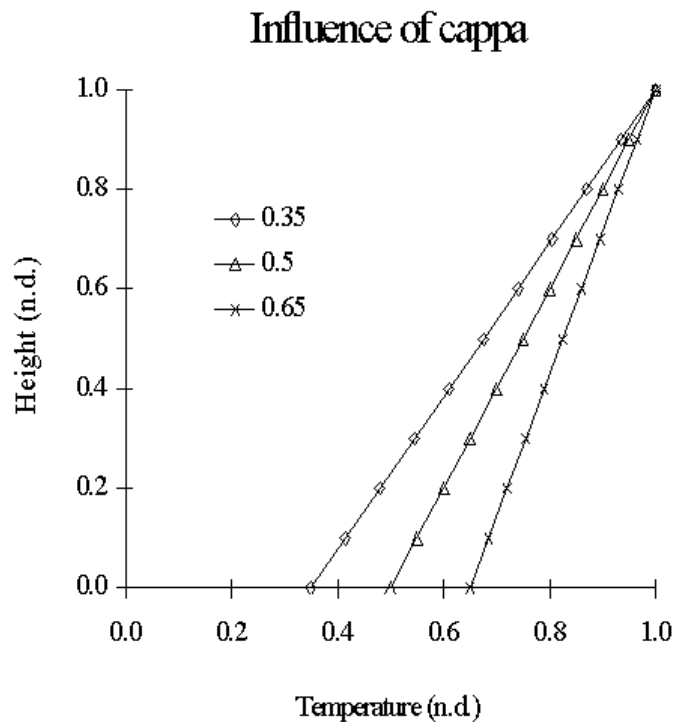
Skrives udtrykket direkte, fås den vertikale temperatur som funktion af højden

$$T = T_0 + (T_R - T_0) \left(\frac{y}{H} (1 - \kappa) + \kappa \right) \quad (7)$$

Figur 1 viser en dimensionsløs afbildning af det vertikale temperaturprofil for de tre tilfælde i tabel 1.

I praksis vil man skulle skønne κ efter et kendskab til varmekilderne i et givet rum, hvor der vil forekomme en stratificeret strømning jævnfør ovennævnte forudsætning. Hvis man er i besiddelse af målinger eller erfaringer for temperaturforløbet, anvendes den værdi af κ , som giver den bedste lineære tilnærmelse af det sande temperaturprofil.

En anden mulighed er at "kalibrere" temperaturforløbet iterativt ved hjælp af CFD-simulering. Her anslås først en værdi af κ hvorved BSim2000 kan beregne den konvektive varmestrøm fra de indvendige overflader. Varmestømmene anvendes som randbetingelse i CFD-simuleringen, der returnerer det vertikale temperaturforløb, som nu kan anvendes til at korrigere den først anslåede værdi af κ , osv.



Figur 1. Dimensionsløs vertikal temperaturfordeling ved tre forskellige værdier af κ svarende til de tre forskellige slags varmekilder i tabel 1.

Kappa-modellen - Implementering i tsbi5

"Kappa-modellen" er implementeret efter beskrivelsen ovenfor med følgende forhold in mente.

Indblæsningstemperaturen T_0

Temperaturen T_0 er ovenfor benævnt "indblæsningstemperaturen". Hvis der er tale om ren mekanisk ventilation, og der i teorien ingen infiltration forekommer, svarer T_0 til indblæsningstemperaturen. Hvis bygningen omvendt alene ventileres naturligt uden varmegenvinding, svarer T_0 til temperaturen af udeluften. Kombineres mekanisk ventilation med fx vinduesåbning (naturlig ventilation), bliver indblæsningstemperaturen en blanding af de to størrelser. Her bestemmes T_0 som en vægtet værdi af indblæsningstemperaturen og udeluftens temperatur:

$$T_0 = \frac{m_{nat} \cdot T_{nat} + m_{mek} \cdot T_{mek}}{m_{nat} + m_{mek}} \quad (8)$$

hvor m_{nat} er massestrøm fra naturlig ventilation (kg/s)
 m_{mek} er massestrøm fra balanceret mekanisk ventilation (kg/s)
 T_{nat} er temperaturen af "naturlig ventilationsluft", normalt svarende til udeluften (°C)
 T_{mek} er indblæsningstemperatur ved balanceret mekanisk ventilation (°C)

Hvis der kun er mekanisk udsugning, bør der regnes med udeluftens temperatur.

I praksis vil der desuden forekomme et bidrag fra infiltration, i særdeleshed ved høje og utætte bygninger. Temperaturen af denne luftmængde vil ligge et sted mellem udeluftens og rumluftens temperatur efter passage og varmeveksling gennem revner og sprækker. *Indtil videre* ses der bort fra dette bidrag til T_0 , men på sigt bør det indregnes.

Da udsugningsluftens temperatur T_R afhænger af blandt andet den konvektive varmestrøm langs alle indvendige overflader – som igen afhænger af det vertikale temperaturforløb – vil det være nødvendigt med en iterativ beregning. Her beregnes først F_{konv} efter formel (3) uden hensyn til temperaturgradienten, dernæst bestemmes temperaturen T som funktion af højden y ved hjælp af formel (7), idet H , k og T_0 allerede er kendte. Hermed kan der foretages en korrigeret beregning af F_{konv} , osv. Hvis der regnes med fuldstændig opblanding, er denne procedure unødvendig, hvorfor man i programmet springer den over, når $k=1,0$ og dermed reducere regnetiden.

Beregning af konvektiv varmestrøm

Den konvektive varmestrøm fra gulv til luft beregnes ved hjælp af temperaturredningen $T_{gulv} - T_f$ og den konvektive varmestrøm fra loft til luft som $T_{loft} - T_R$. For vægfladerne regnes med differencen mellem vægfladens overfladetemperatur og lufttemperaturen i fladens middelhøjde. De konvektive varmeovergangstal skal kunne ændres. Som default for indvendige konvektive varmeovergangstal kan værdierne i tabel 2 anvendes.

Bygningsdel	Konvektivt varmeovergangstal (W/m ² °C)
Gulv	2,5
Loft	2,0
Vægge	3,0

Tabel 2. Default konvektive varmeovergangstal til bestemmelse af den konvektive varmestrøm fra de indvendige overflader. Reference: Hansen et al., 1987.

Default k

Værdien af k bør som default være 1,0. Hermed vil beregningen svare til den traditionelle antagelse om fuldstændig opblanding, hvorved man ikke af vanvare ubevidst kommer til at regne, som om der var fortrængningsventilation.

Operativ temperatur

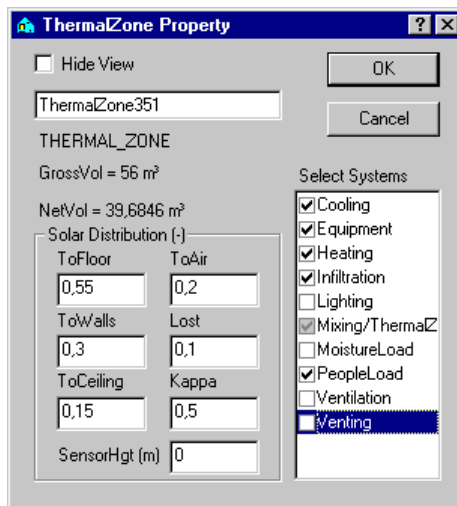
Den operative temperatur skal nødvendigvis tage hensyn til den nye temperaturfordeling. I *tsbi3* er den tilnærmet fundet som gennemsnittet af lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen under antagelse af fuldstændig opblanding. I *BSim2000* beregnes den operative temperatur som gennemsnittet af lufttemperaturen i højden 1,1 m (default) og middelstrålingstemperaturen. Dermed vil den operative temperatur svare til "det sædvanlige", når $k=1,0$. Af hensyn til beregning af atrier med flere etager, kan brugeren ændre højden, hvori den operative temperatur beregnes.

Ustabil lagdeling

Hvis en beregning resulterer i, at udsugningstemperaturen bliver mindre end indblæsningstemperaturen og dermed temperaturen ved gulvet, vil en temperaturlagdeling være ustabil og bryde sammen. Det medfører, at rumluften opblandes, hvilket her kan simuleres ved at sætte $k=1,0$.

Kappa-modellen, inddata

Inddata til kappa-modellen defineres på den termiske zone hvor den ønskes benyttet. Der skal defineres en værdi for kappa samt en højde over gulvet hvor den operative temperatur i den termiske zone skal beregnes.



Inddata til kappa-modellen gives i "ThermalZone Property" som en værdi af kappa og en højde over gulvet hvor den operative temperatur skal beregnes.

Kappa-modellen - Referencer

- Brohus, H., Nielsen, P.V. (1996): Personal Exposure in Displacement Ventilated Rooms, Indoor Air, Vol. 6, No. 3, pp. 157 – 167.
- Hansen, H.E., Kjerulf-Jensen, P., Stampe, O.B., Red., (1987), Danvak Grundbog, Varme- og Klimateknik, 1. udgave, ISBN 87-982652-1-0, Danvak ApS, København.
- Heiselberg, P., Murakami, S., Roulet, C.-A., Eds. (1998): Ventilation of Large Spaces in Buildings - Analysis and Prediction Techniques, IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 26: Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures, ISSN 1395-7953 R9803, Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- Howarth, A.T. (1985): The Prediction of Air Temperature Variations in Naturally Ventilated Rooms with Convective Heating, Building Services Engineering Research & Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 169-175.
- Kato, S., Murakami, S., Shoya, S., Hanyu, F., Zeng, J. (1995): CFD Analysis of Flow and Temperature Fields in Atrium with Ceiling Height of 130 m, ASHRAE Trans., Vol. 101, Part 2, pp. 1144-1157.
- Li, Y., Sandberg, M., Fuchs, L. (1992): Vertical Temperature Profiles in Rooms Ventilated by Displacement: Full-Scale Measurements and Nodal Modelling, Indoor Air, Vol.2, No.4, pp.225-243.
- Li, Y., Sandberg, M., Fuchs, L. (1993): Effects of Thermal Radiation on Airflow with Displacement Ventilation: an Experimental Investigation, Energy and Buildings, 19, pp.263-274.
- Mundt, E. (1996): Temperature Gradient Models in Displacement Ventilated Rooms, Proceedings of Roomvent '96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, July 17 - 19, Yokohama, Japan, Vol.3, pp.331 - 338.
- Nielsen, P.V. (1996): Temperature Distribution in a Displacement Ventilated Room, Proceedings of Roomvent '96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, July 17 - 19, Yokohama, Japan, Vol.3, pp.323 - 330.

- Niemelä,R., Koskela,H. (1996): Air Flow Patterns in a Large Industrial Hall with Displacement Ventilation, Proceedings of ROOMVENT '96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Vol. 3, pp. 363-370, July 17 - 19, Yokohama, Japan.
- Ryberg, H., Bech, S.E.B. (1997): Vertical Temperature Distribution in Displacement Ventilated Rooms - An Experimental Study, Afgangprojekt, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet.
- Schild,P.G. (1996): CFD Analysis of an Atrium, using a Conjugate Heat Transfer Model Incorporating Long-Wave and Solar Radiation, Proceedings of Roomvent '96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Vol. 2, pp. 185-194, Yokohama, Japan.
- Skistad, H. (1994): Displacement Ventilation, ISBN 0 471 95089 0, John Wiley & Sons Inc.
- Yuan,X., Chen,Q., Glicksman,L.R. (1998): A Critical Review of Displacement Ventilation, ASHRAE Transactions, Vol. 104, Part 1A, pp. 78-90.
- Yuan,X, Chen,Q., Glicksman,L.R. (1999): Models for Prediction of Temperature Difference and Ventilation Effectiveness with Displacement Ventilation, ASHRAE Transactions, Vol. 105, Part 1, pp. 353-367.

Kappa-modellen - Nomenklatur

C_p	Varmekapacitet (J/kg °C)
$m_{mek.}$	Massestrøm fra balanceret mekanisk ventilation (kg/s)
$m_{nat.}$	Massestrøm fra naturlig ventilation (kg/s)
q_v	Luftmængde (m ³ /s)
y	Højde (m)
y^*	Dimensionsløs højde (-)
H	Rumhøjde (m)
T_0	Indblæsningstemperatur (°C)
T_f	Lufttemperatur ved gulvet (°C)
$T_{mek.}$	Indblæsningstemperatur ved balanceret mekanisk ventilation (°C)
$T_{nat.}$	Temperaturen af "naturlig ventilationsluft", normalt svarende til udeluften (°C)
T_R	Udsugningsluftens temperatur (°C)
T^*	Dimensionsløs temperatur (-)
κ	(-)
ρ	Densitet (kg/m ³)
$\Phi_{konv.}$	Konvektiv varmebelastning (W)