

Forureningskomponenter i indeluften i »Nulenergihuset« ved DTH

Af cand.scient. L. Mølhav, Hygieinisk Institut, Århus og dr.med. I. Andersen, Arbejdsmiljøinstituttet, Hellerup

Indledning

De seneste års boligbyggeri har været karakteriseret af en stigende anvendelse af industrielt fremstillede byggemoduler og -komponenter, ofte bestående af nyudviklede materialer af kompliceret sammensætning, således at der er mulighed for afgasning af mange forskellige kemiske komponenter. Samtidig har en stadig større lufttæthed af bygningskonstruktionerne bevirket, at det naturlige luftskifte er væsentligt lavere end tidligere. Disse forhold tilsammen bevirker, at der i nyere boliger kan forventes større koncentrationer af stadigt flere luftforureningskomponenter stammende fra byggematerialer end i tilsvarende ældre boliger.

Undersøgelsens formål

Det såkaldte »Nulenergihus« ved DTH, Lyngby, er et forsøgsbyggeri udført for at indhøste erfaringer fra bygninger med meget lavt energiforbrug. Nærværende rapport behandler resultaterne af et måleprogram med det formål at foretage en kvalitativ og kvantitativ bestemmelse af forekomsten af gasser og dampe af typen organiske opløsningsmidler samt af

ventilationens indflydelse herpå. Endvidere foretages en sundhedsmæssig vurdering af de påviste stoffer. Undersøgelsen er finansieret af *Helsefonden*.

Beskrivelse af »Nulenergihuset«

Forsøgshusets plan er vist på fig. 1. Huset, der er nærmere beskrevet i [1], består af to kasseformede boligsektioner hver på 60 m², adskilt af en glasoverdækket atriumgård på 70 m². Gården er ikke opvarmet, men er beskyttet mod blæst og regn af stålkonstruktionen, som bærer glas og solfangerne. De to boligkasser er bygget af præfabrikerede lette bygningselementer til vægge, gulve og lofter. Elementerne er opbygget som sandwichkonstruktioner med en 12 mm fenollimet spånplade indvendig og en 9 mm vandfast krydsfinér udvendig. Kernen består af mineraluld; 30 cm i vægge og 40 cm i loft og gulv. Yderst på den færdige bygning er monteret eternitplader som regnskærm. Samlinger er tætnede med fugesnor og silikonefugemasse. Hver boligblok har sit eget ventilations-

system, som er baseret på varmegenindvinding fra afkastluften. Den friske, opvarmede luft fordeles til blokkens opholdsrum. Afkastet fra hver blok sker samlet fra badeværelset.

Målemetode

Nulenergihuset var på måletidspunktet ca. 4 år gammelt og havde i dette tidsrum været beboet af forskellige familier i tilsammen ca. 3 år. Under målingerne var huset ubeboet og sparsomt møbleret med lette møbler, men mellem målingerne blev huset lejlighedsvis anvendt som gæstebolig. Vore målinger er foretaget i den nordlige opholdsbloks kombinerede køkken og opholdsrum og udenfor i boligens vindside.

I måleperioden gennemførtes tre serier målinger i dagene 13.-15. marts 1978, 27.-31. juli 1978 og 25.-27. januar 1979 for at dække typiske forår-, sommer- og vinterbetingelser. Hver måleserie var ens opbygget.

I løbet af hver måleperiode gennemførtes målinger med såvel idriftværende som stoppet ventilationsanlæg svarende til henholdsvis 1.0 og 0.05

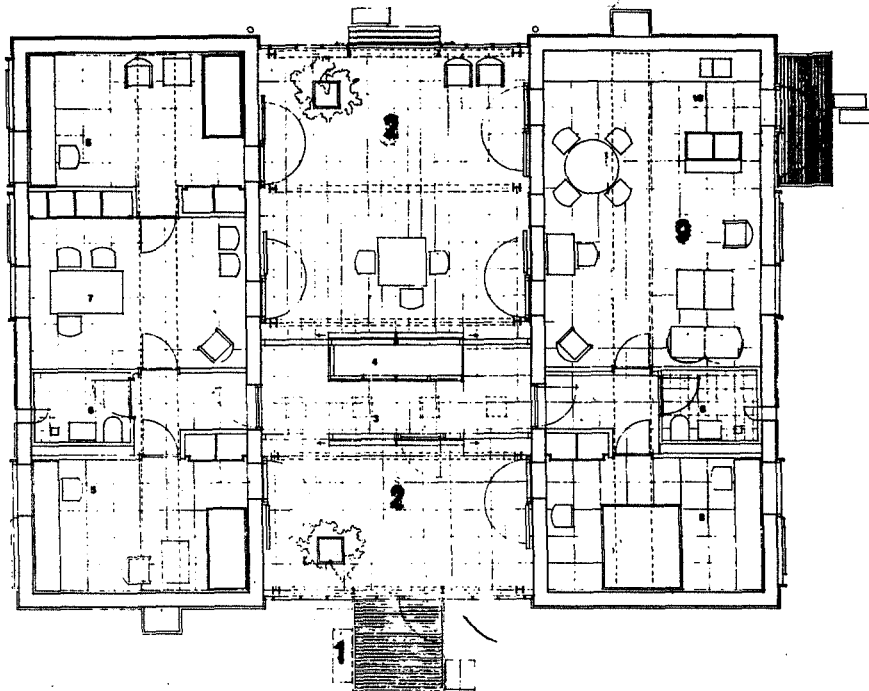


Fig. 1. Oversigtstegning af Nulenergihuset, DTH, Lyngby, med angivelse af målepunkter. 1) Prøveudtagningssted for udeklimamålinger. Ved målingerne valgtes det sted, som var i vindsiden. 2) Lugtvurderingssted. 9) Prøveudtagningssted for gasser og dampe i indeluften samt for lugtvurdering af indeluften.

luftskifte pr. time [2]. Under målingerne var alle døre og vinduer lukkede, og der var adgangsforsbud.

I hele det første døgn var ventilations-systemet afbrudt, for at en opbygning af luftforureningskoncentrationerne kunne finde sted på samme måde, som det vil være tilfældet i weekends og ferier, hvor ventilationsanlægget er afbrudt, eller i perioder med strømafbrydelser eller svigt af ventilationsanlæg.

Under disse betingelser gennemførtes det første sæt målinger. Det næste sæt gennemførtes, efter at ventilationssystemet havde været i brug i mindst 8 timer svarende til normal drifttilstand. Samtidig med hver indeluft-

måling gennemførtes en udeluftmåling, således at der ialt blev foretaget fire sæt målinger i løbet af hver undersøgelsesserie. Målingerne blev udført i samarbejde med *civilingeniør P. Espensen, Laboratoriet for varmeisole- ring, DTH, Lyngby.*

Hvert målesæt omfattede måling af luftens indhold af gasser og dampe af opløsningsmiddelklassen »organiske opløsningsmidler«, af formaldehyd samt af lugtkvalitet og lugtstyrke ved hjælp af et lugtpanel, d.v.s. en gruppe personer, der optræder som lugtdommere. Herudover blev registreret *temperaturer og luftfugtighed ude og inde samt vindhastighed og -retning* i vindsiden af bygningen.

Udstyr og målemetoder til bestemmelse af koncentrationen af gasser og dampe af opløsningsmiddelklassen er detaljeret beskrevet tidligere [3]. Kort fortalt er metoden baseret på gennem-sugning af luften i et prøverør med aktivt kul som adsorptionsmateriale. Herfra desorberes luftforureningskomponenter i laboratoriet med N.N. dime-thylformamid, og eluaterne analyseres med kombineret gaskromatografimas-sespektrometri. Detektionsgrænsen varierede fra stof til stof, men var af størrelsesordenen 0,01-0,05 mg/m³. Målingerne af formaldehydkoncentra-tionen foregik med chromatoprosyre-metoden [4], idet ca. 50 l luftprøve opsam-ledes i 15 ml 10% NaHSO₃; detek-tionsgrænsen var ca. 0.02 mg/m³. Lugtstyrke og lugtkvalitet blev bedømt af 8-12 personer, som fik ude- eller rumluftprøver tilført via teflonslanger. Vurderingerne foregik som sniffning i nulenergihusets atriumgård, hvor to personer ad gangen præsenteredes for henholdsvis rumluft og udeluft. Må-lingerne foregik under de herskende vejrforhold. Resultaterne blev udtrykt såvel som et *intensitetsindeks* varie-rende mellem 0 og 100 svarende til henholdsvis »ingen lugt« og »uudhol-delig stærk lugt« og som et *accepter-barhedsindeks* mellem -1 og +1 sva-rende til henholdsvis »absolut ubeha-gelig, frastødende lugt« og »absolut behagelig, tiltrækkende lugt«.

Resultater

Resultaterne af de tre måleserier er vist i tabel 1, i hvilken samhörrende måleværdier med og uden ventilation er anført. Nederst i tabellen er udreg-net aritmetisk middelværdi og stan-darddeviation for de samme målinger. Målingerne i rummet foregik ved en lufttemperatur fra 17 til 27°C og en luftfugtighed fra 34 til 52% RH. I udeluf-ten var temperaturen fra -2 til 24°C og luftfugtigheden fra 56 til 84% RH.

Måleserie	Indeklima		Udeklima			Totalkoncentration mg/m ³		Antal stoffer		Lugtintensitet 1-100		Lugtbehag -1 til +1	
	°C	%RH	°C	%RH	Vind-hast.	Med vent.	Uden vent.	Med vent.	Uden vent.	Med vent.	Uden vent.	Med vent.	Uden vent.
marts 1978	17,4	42	6,9	80	6	0,24	2,83	12	27	6,7	33,7	-0,26	-0,09
juli 1978	26,6	52	23,6	56	3	0,52	1,95	23	25	8,2	13,4	-0,08	-0,12
jan. 1979	17,6	34	-2,2	84	1	0,29	1,18	20	24	7,7	26,8	-0,23	-0,16
\bar{x}	20,5	42,7	9,4	73	3	0,35	1,65	18,3	25,3	7,6	24,6	-0,19	-0,12
SD	5,3	9,0	13,1	15	3	0,15	0,41	5,7	1,5	0,8	10,6	-0,09	-0,04

Tabel 1. Klimamålinger i »Nulenergihuset« på Danmarks tekniske Højskole i Lyngby.

Stof	Formodet kræftfremkaldende stof [6].	Luftvejsirriterende stof	Middelkonc. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Arbejdshyg. grænseværdi mg/m^3 [5].
alfa-pinén	+a	+	170	c 560
halocan I	?	÷	160	d 5600
3-xylen	÷	+	160	435
ethylbenzen	+a	+	120	435
cyclohexan	÷	+	110	1050
isooctan	÷	+	110	e 1450
toluen	+a	+	86	375
methylcyclohexan	÷	+	71	1600
halocan II	?	÷	59	d 5600
1-hepten	÷	ukendt	54	-
2 propanon	+a,b	+	48	1200
n-nonan	÷	+	34	1050
2-xylen	÷	+	25	435
1.2.4. trimethylbenzen	÷	+	24	120
1.3. ethylmethylbenzen	÷	ukendt	23	f 120
4-xylen	÷	+	20	435
delta 3 caren	+a	+	17	c 560
trichlorethylen	+a,b	+	13	160

- a) Højt prioriteret i det amerikanske Environmental Protection Agency (EPA)
b) Undersøgelser påbegyndt ved det amerikanske National Cancer Institute (NCI)
c: Som vegetabilisk terpenin
d: Som freon
e: Som octan
f: Som 1.2.4. trimethylbenzen

Tabel 2. Stoffer påvist i indeluften i »Nulenergihuset« DTH, Lyngby.

Målinger af organiske gasser og dampe

Organiske gasser og dampe påvistes i indeluften såvel med som uden ventilation. Totalkoncentrationen var fra 4 til 12 gange højere uden ventilation end med ventilation. Uden ventilation var koncentrationen fra 1,2 til 2,8 mg/m^3 og med ventilation fra 0,2 til 0,5 mg/m^3 . Baggrundsbelastningen fra udeluften var ca. 0,06 mg/m^3 .

I prøverne kunne konstateres fra 12 til 27 forskellige stoffer, hvoraf ialt 18 kunne identificeres. Disse 18 stoffer er anført i tabel 2, hvor de samme stoffers middelkoncentration i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ er anført. Antallet af påviste stoffer var højest i prøver fra det uventilerede rum. Dette skyldes sandsynligvis, at ved de højere koncentrationer lå flere enkeltstoffers koncentration over analyseudstyrets detektionsgrænse. Dette underbygges af, at der ikke kunne konstateres kvalitative forskelle mellem prøver taget med og uden ventilation.

Størst koncentration er målt for stofferne *alfa-Pinén*, *halocan* (halogeneret alkan), *3-xylen*, som alle er målt i koncentration større end 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tolv af de 18 stoffer er optaget på den danske liste over hygiejniske grænseværdier [5]. Fire stoffer er tilskrevet den hygiejniske grænseværdi for andre stoffer af tilsvarende art. Alle disse værdier er anført i tabel 2.

Formaldehydmålinger

Der kunne ikke påvises formaldehyd i rumluften; koncentrationen var mindre end detektionsgrænsen (ca. 0,02 mg/m^3).

Lugtmålinger

Lugtintensiteten på en skala fra 0 til 100 var fra 7 til 8 med ventilation og fra 13 til 34 uden ventilation. Lugtstyrken var således større uden ventilation end med ventilation. Lugtubehaget på en skala fra -1 til +1 var i gennemsnit ca. -0,2 og ca. -0,1, henholdsvis med og uden ventilation, hvilket svarer til svagt ubehagelig lugt. Der var således større ubehag ved lugten, når ventilationen var i drift, men forskellen var ikke statistisk signifikant.

Diskussion

De påviste luftforureningskomponenter i indeluften må antages at stamme fra byggematerialerne, da huset under målingerne var ubeboet og sparsomt

møbleret. Afgasningsbidrag fra personer, møbler og madlavning mangler derfor. Det må også antages, at antal og mængde af luftforureningskomponenterne tidligere har været større, idet huset var ca. 4 år gammelt på måletidspunktet.

En sådan reduktion i afgasningen med tiden er kendt fra andre undersøgelser [7]. Endelig var indetemperaturen under vinter- og forårsmålingerne lavere end normalt for danske boliger (se tabel 1), hvilket vil medføre en lavere afgasningshastighed. Det må derfor forventes, at beboere, der flyttede ind i det nye hus, må have været udsat for en større belastning af luftforureningskomponenter end den her påviste.

Mens betydningen af ovennævnte forhold ikke kan klarlægges ved nærværende undersøgelse viser resultaterne, at ventilation og indetemperatur er af betydning for indeklimaet.

Af tabel 1 fremgår således, at den mekaniske ventilation med 1 luftskifte pr. time reducerer ligevægtskoncentrationen fra 1,7 til 0,4 mg/m^3 , d.v.s. til ca. 20% og lugtintensiteten fra 25 til 7,6 - d.v.s. til ca. 31%. En tilsvarende reduktion i lugtubehaget findes derimod ikke, men spredningen på disse målinger er også langt større end på analyserne af de organiske gasser og dampe.

Indetemperaturens indflydelse på luftkvaliteten fremgår af Tabel 3, som viser måleresultater fra målinger med ventilation. Vinter- og forårsmålingerne (måleserie 1 og 3) er her slået sammen til én gruppe, idet indetemperaturen var ens ved disse to omstændigheder, jfr. tabel 1. Det fremgår, at en forøgelse af indetemperaturen på ca. 9°C svarer til en fordobling af ligevægtskoncentrationen. Denne koncentrationsstigning medfører, at flere stoffers koncentrationer overskrider detektionsgrænsen, hvorfor et øget antal stoffer påvises. Lugtintensiteten er uforandret, men lugtens ubehag synes reduceret.

40% af de identificerede stoffer var *alifatiske kulbrinter*, 40% *aromatiske kulbrinter*, medens 20% var andre organiske forbindelser. Denne sammensætning af stoffer i luftprøverne svarer til tidligere fund med headspace analyse af byggematerialer og i opholdsrum [7].

Måleserie	Indetemperatur °C	Organiske opløsningsmidler mg/m^3	Lugtstoffer		
			Antal	Lugtintensitet	Lugtbehag
1 og 3	17,5	0,27	16	7,2	-0,25
2	26,6	0,52	23	8,2	-0,08

Tabel 3. Indetemperaturens indflydelse på luftkvaliteten med ventilation.

Nulenergihusets usædvanlige konstruktion har således ikke betydet kvalitative kemiske ændringer i luftens indhold af opløsningsmiddeldampe sammenlignet med traditionelt konstruerede boliger.

En sundhedsmæssig vurdering af indeluftforureningskomponenter kræver bistand fra toksikologisk uddannet personale. Skal sådanne vurderinger kunne foretages af mindre specialiseret medicinsk og teknisk personale, og skal producenter kunne foretage en rationel tilpasning af deres byggematerialeproduktion til sundhedsmæssige krav, må der foreligge bolighygiejniske grænseværdier såvel for de særlige giftige stoffer som for de hyppigst forekommende stoffer i indeluften.

Hverken i Danmark eller i andre lande findes fastsat sådanne værdier. For udeluftforurening findes i udlandet fastsat grænseværdier for enkelte stoffer (i USA således for syv stoffer), men disse vedrører især forbrændingsprodukter, der ikke er aktuelle for indeluftforhold, når bortses fra den tidligere omtalte værdi for hydrokarboner.

En almen-toksikologisk vurdering af den sundhedsmæssige effekt ved den samtidige udsættelse for flere forskellige stoffer må omfatte såvel en vurdering af enkeltstoffernes effekt hver for sig som en vurdering af den samlede effekt. Vedrørende enkeltstoffer vil det være af særlig interesse, om luften indeholder kræftfremkaldende stoffer, luftvejsirriterende stoffer eller stoffer med virkning på indre organer, f.eks. centralnervesystem, lever, nyre m.v.

Blandt de påviste stoffer i boligluften var der ingen, der med sikkerhed vides at fremkalde kræft hos mennesker. Et stof, *trichlorethylén*, anses på basis af resultater fra dyreforsøg at være kræftfremkaldende, medens yderligere fem (se tabel 2) er under afprøvning herfor. De af denne grund iværksatte undersøgelser er ikke afsluttede og vurderede. Koncentrationen af stofferne er ikke stor, men i en sundhedsmæssig vurdering af udsættelse for kræftfremkaldende stoffer må altid indgå, at vor viden om effekten af disse stoffer i små koncentrationer er meget usikker. Det er en herskende anskuelse, at der ikke eksisterer nogen tærskelværdi for stoffer med kræftfremkaldende virkning, og drejer det sig derfor om et stort antal mennesker, der er udsat for påvirkningen gennem meget lange tidsrum, således som det er tilfældet med påvirkninger i boligen, må det forventes, at selv lave koncentrationer af kræftfremkaldende stoffer vil kunne give anledning til nogle kræfttilfælde. Et eksem-

pel herpå er befolkningens udsættelse for den radioaktive gasart *radon* i boligen, der stammer fra byggematerialer, især beton, sten og lignende tunge materialer. I Danmark skønnes denne udsættelse af give anledning til 15-50 tilfælde af lungekræft om året [8] - i Sverige er skønnet 82-460 tilfælde om året [9].

Medens det er vanskeligt at forestille sig, at radonafgasningen i boligen kan fjernes, da der er behov for byggematerialer som sten, grus m.v., er opløsningsmidler ikke i samme grad uundgåelige. Opløsningsmidlerne i boligluften stammer især fra sammensatte byggematerialer, hvori lime, farvestoffer, imprægneringsmidler m.v. indgår.

De kræftfremkaldende eller formodet kræftfremkaldende opløsningsmidler vil i de fleste tilfælde kunne erstattes med andre mindre farlige stoffer med tilsvarende tekniske egenskaber (»substitutionsprincippet«). Der er således ingen principielle hindringer for iværksættelsen af en kemisk sanering af byggematerialers indhold af disse stoffer. En sådan sanering ved kilden vil være den mest rationelle foranstaltning, da afgangning af de farlige stoffer herved umuliggøres. Påføring af overfladebehandlingsmidler etc. med det formål at hindre afgangningen af farlige stoffer vil også kunne anvendes, men fortsat kontrol af disses effektivitet er da nødvendig. En forøgelse af ventilationen ville være en anden egnet teknisk foranstaltning, men er ikke realistisk af energisparehensyn.

En meget hyppigt forekommende klage fra nye boliger er irritation i øjne og øvre luftveje, ofte beskrevet som tørhedsformemmelse. Ved en række undersøgelser er det sandsynliggjort, at disse gener ikke har deres årsag i lav luftfugtighed, men derimod skyldes luftvejenes reaktion på luftbårne forureningskomponenter. Såvel øjensom næseslimhinde nerveforsynes af samme store ansigtsnerve (»trigeminius«), og enhver påvirkning af disse områder, hvad enten forureningskomponenterne er en gasart, en damp, støv eller smådråber, vil blive opfattet på samme måde, idet organismen ikke er i stand til med dette varslingsystem at skeine mellem de forskellige årsager.

Det fremgår af tabel 2, at hovedparten, 14 af ialt 18 påviste stoffer i indeluften kan forårsage luftvejsirritation. Dette forekommer principielt uheldigt dels i betragtning af den lange opholdstid i boligen og dels under hensyn til, at flere procent af befolkningen lider af luftvejssygdomme. Kendskabet til stof-

fernes irritationseffekt i de fundne lave koncentrationer er ikke stort, men det kan nævnes, at den amerikanske grænseværdi for udeluftens samlede hydrokarbonindhold er 0,16 mg/m³. Det fremgår af tabel 1, at selv med ventilation er indeluftens indhold højere end denne værdi, medens den uden ventilation er mere end 10 gange større. Den amerikanske værdi for hydrokarboner er fastsat efter deres betydning som udgangsmateriale for den fotokemiske omsætning i udeluften, der resulterer i dannelsen af meget stærkt øjen- og luftvejsirriterende stoffer. Det vides imidlertid ikke idag, om en tilsvarende omdannelse kan finde sted under indendørs forhold.

Endelig bør det være et krav til indeluft, at den ikke har en generende lugt. Lugtpåvirkninger vides ikke idag at give anledning til egentlig sundhedsfare, men må betegnes som en sanitær ulempe. Ved forekomst af generende lugt i et lokale vil de tilstedeværende ofte iværksætte udluftning, hvorfor en sådan forekomst vil være meget energiforbrugende på grund af den store mængde erstatningsluft, der skal opvarmes i hele fyringsperioden. Det er lidet sandsynligt, at organskader på centralnervesystem, lever eller nyre vil kunne udvikles ved de målte koncentrationer.

Resumé

Der er foretaget målinger af inde- og udeluftens indhold af organiske opløsningsmidler (hydrokarboner), formaldehyd og lugtstoffer i en forsøgsbolig (»Nulenergihuset«, Lyngby) med meget lavt energiforbrug opnået ved høj isolering og stor lufttæthed. Boligen var ca. 4 år gammel, ubeboet og kun sparsomt møbleret.

Målingerne blev foretaget i tre omgange - forår, sommer og vinter - og omfattede temperatur og luftfugtighed inde og ude samt enkle meteorologiske målinger, bestemmelse af luftens indhold af organiske forureningskomponenter, formaldehyd samt luftens indhold af lugtstoffer.

Lugtindtrykket blev af et lugtpanel angivet som let ubehageligt; lugtstyrken var ca. 3 gange stærkere uden ventilation end med ventilation.

Der blev ikke påvist formaldehyd i luften, men der var et samlet indhold af organiske opløsningsmidler på 1,65 mg/m³ uden ventilation og på 0,35 mg/m³ med ventilation. Det må antages, at disse stoffer er afgangningsprodukter fra byggematerialer.

De organiske opløsningsmidler omfattede ialt 18 stoffer; alfa-pinén, halocan