

DIAB husbygning



LE CORBUSIER

Elementær bygningsfysik

Frits B. Olesen

Hr. civilingeniør John. Alnæs-Petersen
Med venlig hilsen
E. B. Olsen

TILHØRER
INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET
SU NR 0117092

10: Elementær bygningsfysik

FORORD

Nærværende kompendium udgør kapitel 10 af en samlet serie på ialt ti kapitler om elementær husbygningsteknik, udarbejdet som grundbog for forelæsningerne på 3. halvår i faget husbygning ved Danmarks Ingeniørakademis Bygningsafdelinger i København og Aalborg.

Fremstillingens form og indhold er snævert afpasset efter det formål, den tjener, nemlig på et tidligt tidspunkt af studiet at give et elementært, men dog sagligt forsvarligt grundlag for en beskrivelse af husbygningskonstruktioner, anskuet ud fra deres fysiske virkemåde. Denne begrænsning af emnet til kun at omfatte konstruktionsdelene er grunden til, at bygningsfysikken i fremstillingen her er beskåret med sådanne emner som klimafysiologi og belysningsteknik, der bedre doceres i forbindelse med andre fag ved ingeniørakademiet.

Kapitlet her omfatter kun det almindelige grundlag, fælles for bygningsdelene; praktiske eksempler er givet i de øvrige kapitler. Fremstillingen er iøvrigt søgt begrænset mest muligt. Således er tabeller over de forskellige fysiske data helt udeladt, ligesom lovbestemmelser o.l. kun er sporadisk omtalt; endelig er bygningsfysiske målinger kun omtalt i den udstrækning, selve målemetoden tjener til definition af den pågældende fysiske størrelse.

Bygningsfysikken er selvfølgelig ikke nogen ny disciplin inden for bygningsteknikken, men den ses sjældent fremstillet under eet. Når det er gjort her, er det fordi det forekommer overordentlig vigtigt, at de studerende allerede fra starten vænnes til at betragte en bygningskonstruktion som noget, der skal kunne mange ting; ikke mindst i en specialiseringens tidsalder er det væsentligt, at man til stadighed anskuer det enkelte funktionskrav i sammenhæng med de øvrige.

Tegningerne er udført af teknisk assistent, fru Ingrid Christensen, maskinskrivningen af fru Birte Torstveit, begge Bygningsafdelingen i Aalborg.

Aalborg, juli 1969

Frits B. Olesen

INDHOLD

<u>10.0. FUNKTIONSANALYSE</u>	7
<u>10.1. STATISKE FUNKTIONSKRAV</u>	
10.1.1. STATISKE FUNKTIONER	12
10.1.2. STYRKE OG STIVHED	14
Styrkeproblemer	14
Stivhedsproblemer	16
10.1.3. DET STATISKE SYSTEM	17
Systemets geometriske og statiske egenskaber .	17
Det statiske systems mekaniske model	18
10.1.4. BELASTNINGER	21
Hvilende belastning	21
Nyttelast	22
Snebelastning	23
Vindbelastning	24
Jordtryksbelastning	30
Dynamisk belastning	30
Temperaturvariationer	30
Svind og svulning	32
Krybning og relaxation	34
Eksceptionelle belastninger	34
10.1.5. KONSTRUKTIONSELEMENTERNE	36
Anordning af de bærende konstruktioner	36
Konstruktionselementernes statiske virkemåde .	36
Dimensionering	39
10.1.6. EKSEMPEL	42
Statisk system	42
Belastninger	44
<u>10.2. AKUSTISKE FUNKTIONSKRAV</u>	
10.2.1. AKUSTISKE FUNKTIONER	46
10.2.2. LYD	48
Lydbølger	48
Periodiske lyde	50
Ikke-periodiske lyde	51

10.2.3.	FYSISKE GRUNDBEGREBER	52
	Frekvens	52
	Lydtryk	53
	Lydenergi	54
	Lydfeltets udbredelse	56
10.2.4.	LYDOPFATTELSE	57
	Lydens fysiologiske styrke	57
	Hørestyrke og høreindtryk	58
	Frekvenskarakteristikker	58
10.2.5.	LYD I LUKKET RUM	60
	Direkte og reflekteret lyd	60
	Lydabsorption	61
	Lyddødt og lydhårdt rum	62
	Lydfelts opståen og hendøen	63
	Efterklangstiden	65
10.2.6.	LYDISOLATION	67
	Luftlyd og bygningslyd	67
	Reduktionstal og rumisolation	67
	Trinlydisolation	69
	Masse/frekvens-loven og koincidens-effekten ..	70
	Funktionskrav	73
10.2.7.	RUMAKUSTIK	77
	Lydregulering	77
	Lyddæmpning	79
	Lydabsorbenter	79
<u>10.3.</u>	<u>HYGROTERMISKE FUNKTIONSKRAV</u> -	
10.3.1.	HYGROTERMISKE FUNKTIONER	84
10.3.2.	VARMETRANSPORT	86
	Ledning	86
	Konvektion	87
	Stråling	88
	Varmeovergang ved overflader	90
	Varmetransport gennem luftlag	92
10.3.3.	FUGTTRANSPORT	94
	Luftfugtighed	94
	Materialefugtighed	96

	Diffusion	98
	Kapillarsugning	100
10.3.4.	VARMEISOLERING.....	101
	Varmetab fra bygninger	101
	Ventilationstab	101
	Varmetransmissionstal	102
	Varmeledningstal	105
	Funktionskrav	108
	Temperaturforløb gennem en bygningsdel	110
10.3.5.	FUGT OG ISOLERING	112
	Fugtkilder og fugtskader	112
	Kondensation	113
	Vanddampdiffusion gennem bygningsdele	114
	Fugtophobning og udtørring	118
	Funktionskrav	119
10.3.6.	KULDEBROER	121
10.3.7.	VINDTÆTHED OG SLAGREGN	125
	Vindtæthed	125
	Slagregn	126
	Funktionskrav	129
10.3.8.	SOLAFSKÆRMNING	131
<u>10.4.</u>	<u>BRANDTEKNISKE FUNKTIONSKRAV</u>	
10.4.1.	BRANDTEKNISKE FUNKTIONER	133
	Brandlovgivning, myndigheder og institutioner	133
	Planlægningsforanstaltninger	135
	Brandbekæmpelse	137
10.4.2.	MATERIALERS BRANDTEKNISKE EGENSKABER	139
	Brændbarhed, Klassifikation	140
	Brændværdi	140
	Termiske egenskaber under brand	142
	Mekaniske egenskaber under brand	147
10.4.3.	BRANDTEKNISK KLASSIFIKATION AF BYGNINGSDELE	151
	Normeret brandprøvning	151
	Bærende og adskillende bygningsdele	152
	Beklædninger	154

10.4.4.	BRANDTEKNISK DIMENSIONERING	155
	Brandbelastning	155
	Brandforløb	156
	Dimensionering	157
10.4.5.	FUNKTIONSKRAV	160
	Brandteknisk bedømmelse	160
	Bærende konstruktioner	161
	Adskillende konstruktioner	162
	Beklædninger	162
<u>10.5.</u>	<u>ANDRE FUNKTIONSKRAV</u>	<u>164</u>
<u>10.6.</u>	<u>LITTERATUR</u>	<u>166</u>

På de fleste områder er der en skærende kontrast mellem den udvikling, teknikken er undergået i det tyvende århundrede, og den udvikling, der ligger forud. I så henseende danner husbygningsteknikken ingen undtagelse. Siden oldtiden har husbygningsteknikken været baseret på erfaring og - indtil det tyvende århundrede - på erfaring alene; den tekniske udvikling har været præget af en jævn og rolig videreføring af foregående generationers byggeskik, karakteriseret ved stor konservatisme i materialevalg og konstruktionsteknik.

Denne traditionsbundethed må til ethvert tidspunkt ses i lyset af det almindelige tekniske udviklingstrin. Valg af byggematerialer var førhen i høj grad geografisk betinget og i det hele taget præget af stor bundethed, ligesom det ikke var muligt at beskrive de fysiske forhold i og omkring bygninger og bygningsdele samt de fysiologiske forhold, der knytter sig til menneskers ophold i huse. Under disse omstændigheder var der selvfølgelig ikke andre muligheder end at lade husbygningsteknik være en erfarings sag. Den eneste måde at skaffe sig sikkerhed for, at en konstruktion var brugelig, var at anvende kendte materialer og dimensioner og iøvrigt holde sig til en konstruktiv udformning, som man var vant til og fortrolig med.

Idag slår en sådan empirisk behandling af problemerne ikke længere til inden for husbygningsteknikken. Hvis de muligheder, der er åbnet med den almindelige teknisk-videnskabelige udvikling, skal udnyttes inden for husbygningen, må husbygningsteknikken tage mere systematiske metoder i anvendelse. Situationen er i første række præget af den eksplosionsagtige udvikling af nye byggematerialer og af et efterhånden langt mere indgående kendskab til de fysiske og fysiologiske aspekter ved bygningers virkemåde og menneskers færden i dem. I takt med den stigende velstand stilles der stadigt større krav til bygningers tekniske standard, sikkerhed og komfort, og endelig har den almindelige økonomiske udvikling haft en afgørende indflydelse på vilkårene for byggeriets produktionsmetoder. I denne situation er det en helt anderledes kompliceret sag end tidligere at vælge de "rigtige" materialer og

konstruktioner i en konkret opgave. Skal denne opgave gribes systematisk an, må det ske ved en analyse af de fysiske påvirkninger, en konstruktionsdel kan forventes at blive udsat for, og derefter en sammenfatning af dens forskelligartede funktioner til en syntese.

Som udgangspunkt for en sådan analytisk problembehandling må det altså først klarlægges, hvilke fysiske påvirkninger konstruktionen kan blive udsat for, og hvilke af disse påvirkninger det i den givne sammenhæng er relevant at tage hensyn til. Disse påvirkninger kan være kræfter, temperaturpåvirkninger, fugt, lyd, lys, brand, kemiske påvirkninger, stråling, bakteriologiske påvirkninger og talrige andre. En del af disse påvirkninger er forholdsvis veldefinerede, f.eks. tyngdekræfter, medens andre er yderst usikre, f.eks. vindpåvirkninger; endelig må en del karakteriseres som eksceptionelle, f.eks. brandpåvirkninger, hvilket selvfølgelig er af betydning for den vægt, man vil tillægge den enkelte påvirkning i en større sammenhæng.

Næste fase i analysen må blive at fastlægge kvantitativt, hvilke egenskaber konstruktionen eller konstruktionsdelen skal have i relation til de nævnte påvirkninger. Her må anlægges en række synspunkter af sikkerhedsmæssig, sundhedsmæssig og komfortmæssig art. Det vil dog umiddelbart forstås, at det for langt de fleste af de fysiske fænomener, der er tale om, er forbundet med overordentlig stor usikkerhed at fastsætte talstørrelser, der udtrykker, at en bygningsdel i en given sammenhæng fungerer tilfredsstillende. Ikke mindst de fysiske påvirkninger, der har relation til indendørsklimaet, frembyder overordentlig stor usikkerhed, fordi dette udover de fysiske krav har en række fysiologiske og psykologiske aspekter og dermed jo reelt er unddraget fysisk måling. Denne usikkerhed omkring de fysiske forhold i forbindelse med bygningskonstruktioners virkemåde bør man altid erindre sig, når man på dette grundlag arbejder med praktiske dimensioneringsopgaver. I langt de fleste tilfælde vil det ikke være muligt at fastlægge de fysiske parametre på noget eksakt grundlag; de må oftest vælges efter bedste skøn og er for en række størrelses vedkommende i mangel af bedre nedfældet som erfaringstal i normer og lovbestemmelser.

Hele den teknisk-videnskabelige disciplin, der beskæftiger sig med de fysiske fænomener i og omkring bygningskonstruktioner og -materialer, benævnes bygningsfysikken, en betegnelse, der hidtil ikke har været meget anvendt herhjemme, men som benyttes i f.eks. Norge, Sverige og Tyskland, ofte dog uden nogen helt klar og konsekvent definition af det faglige område.

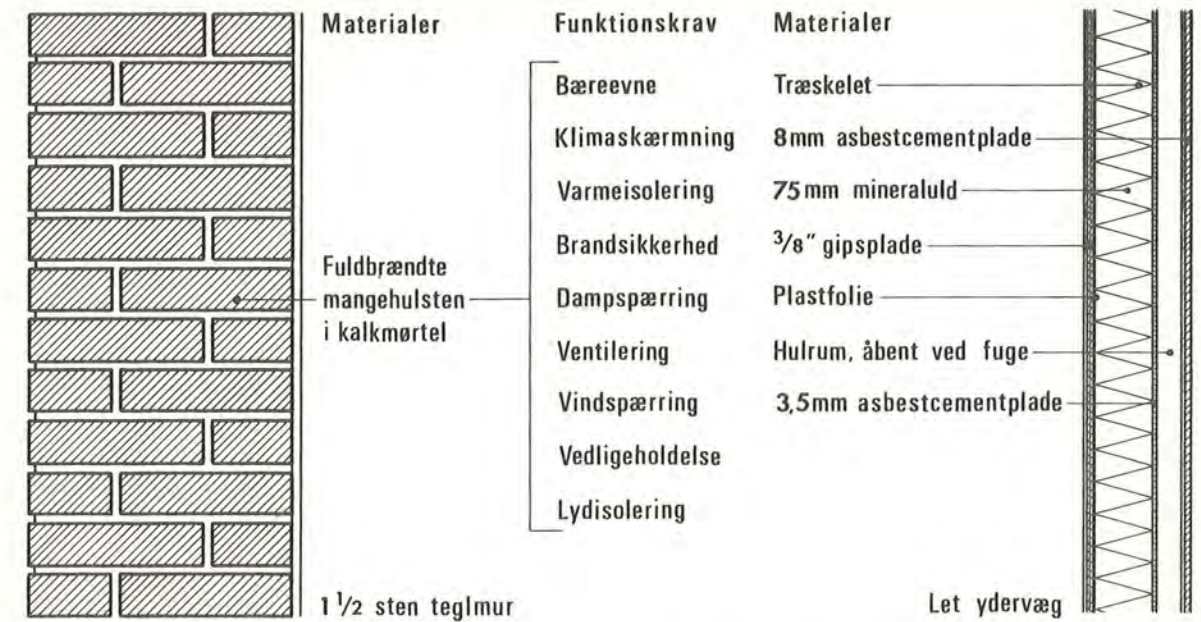
På grundlag af en formulering af den bygningsfysiske problemstilling kan der for den enkelte bygningsdel opstilles en række funktionskrav, som skal være opfyldt, for at den i den givne sammenhæng kan fungere tilfredsstillende. Disse funktionskrav kan kort sammenfattes i følgende hovedgrupper:

statiske funktionskrav
akustiske funktionskrav
hygrotermiske funktionskrav
brandtekniske funktionskrav
andre funktionskrav.

For mange konstruktionsdele vil der kun blive tale om et enkelt funktionskrav, f.eks. et fundament, der kun har statiske funktioner, medens andre skal opfylde funktionskrav inden for alle grupper, f.eks. en ydervæg. I sådanne tilfælde vil kravenes opfyldelse ofte være modstridende, og man vil da stå overfor at skulle vælge, hvilket funktionskrav der skal tillægges størst betydning - et ofte overordentligt vanskeligt valg.

Som eksempel på, hvilke funktionskrav der i en konkret situation er aktuelle, er i figur 10.01 vist to ydervægge. De opfylder stort set de samme funktionskrav, men på vidt forskellig måde og i vidt forskellig grad. I den tunge, massive mur opfyldes kravene alene af murværket, medens den lette ydervæg er karakteriseret ved stor differentiering af funktionerne, således at hver enkelt del af konstruktionen har sin ganske bestemte opgave at varetage.

Funktionskravene er imidlertid ikke det eneste af de tekniske synspunkter, der må lægges til grund for den konstruktive udformning. Gennem dem udtrykkes kravene til de færdige bygninger og bygningsdele. Et ikke mindre væsentligt grundlag er



Figur 10.01: 1½ stens ydermur og let ydervæg, 1:10

produktionskravene, der udtrykker de krav til den konstruktive udformning, som skal stilles, for at bygningen eller bygningsdelen overhovedet kan fremstilles og vel at mærke fremstilles fornuftigt. Denne problemstilling er ingenlunde ny indenfor byggeriet (jvf. f.eks. det almindelige murstensformat, der er betinget af en praktisk opmuringsteknik), men har fået en mere og mere central plads inden for det moderne byggeri med dets anvendelse af stadig større byggekomponenter. Selvom problemerne omkring de produktionstekniske forudsætninger for den konstruktive udformning falder uden for rammerne af denne fremstilling, skal det her understreges, at man ved alt konstruktionsarbejde nøje må gøre sig klart, hvorledes de konstruerede bygningskomponenter kan produceres og sammensættes.

Endelig kan det ikke tilstrækkeligt stærkt fremhæves, at husbygningsteknikken er en del af arkitekturen og som sådan må indordne sig under en større helhed. Selvom en del af de komponenter, der indgår i en husbygningskonstruktion, kan anordnes og dimensioneres alene ud fra tekniske og økonomiske forudsætninger, må der generelt ved alt konstruktionsarbejde blive tale om en syntese af teknisk-økonomiske aspekter og andre aspekter, oftest af mindre veldefinerlig art, æstetiske og psykologiske, altså forhold, som ikke i samme grad som de

tekniske kan behandles på videnskabeligt grundlag, men først og fremmest må hvile på talent. Denne syntese må med den efterhånden mere og mere forfinede teknik, der står til rådighed, baseres på et snævert samarbejde, først og fremmest mellem ingeniør og arkitekt (af græsk: "archi", den øverste, og "tecton", tekniker) men også undertiden med andre, f.eks. billedhuggere, malere, mosaikkunstnere, psykologer eller pædagoger. I dette samarbejde er det ingeniørens opgave at varetage husbygningsteknikken, men det er af afgørende vigtighed, at han til stadighed formår at se sit arbejdsområde som en del af en større helhed.

10.1. STATISKE FUNKTIONSKRAV

10.1.1. STATISKE FUNKTIONER

I de statiske funktionskrav formuleres de fordringer til såvel styrke som stivhed, som er en forudsætning for enhver bygningsdels - som forøvrigt enhver brugsgenstands - anvendelighed. Det er naturligvis i første række de bærende konstruktioner - altså de bygningsdele, hvis primære funktioner er statiske - der er interessante i denne sammenhæng, men i virkeligheden er enhver bygningsdel, uanset hvad der er dens primære funktioner, underkastet visse styrke- og stivhedskrav.

Selv om det således egentlig er mere konsekvent at lade betegnelsen bærende konstruktion referere til en bestemt funktion snarere end til bestemte bygningsdele, vil betegnelsen i denne fremstilling blive anvendt i den gængse betydning, nemlig om de bygningsdele, hvis hovedopgave er at overføre kræfter. Man taler om den bærende hovedkonstruktion og mener hermed det kompleks af bygningsdele, som tilsammen udgør det statiske system, hvorigennem kræfterne på bygværket føres til jorden. Karakteristisk for hovedkonstruktionens komponenter er, at de er dele af et samlet kraftoverføringssystem og altså deltager i overføringen af såvel direkte som indirekte virkende kræfter. Udover den bærende hovedkonstruktion vil der i et bygværk normalt være en række bærende konstruktioner af mere sekundær art (trappeløb, "ikke-bærende" skillevægge o.s.v.), som i statisk henseende virker isoleret fra det samlede system og altså ikke har nogen indflydelse på den bærende hovedkonstruktions principielle virkemåde.

Hovedkonstruktionens virkemåde er en så fundamental del af ethvert bygværks udtryk, at det statiske system må tages med i de allerførste skitsemæssige overvejelser. I den forbindelse er det helt afgørende, at arkitekten og ingeniøren fra første færd finder sammen i et forsøg på at formulere den fælles problemstilling og hver især ud fra sine forudsætninger bidrager til at klarlægge de konstruktive muligheder i den foreliggende opgave. Det er af afgørende betydning, at dette samarbejde indledes på det tidligst mulige stadium af projekteringsprocessen.

Når de første overvejelser om de mulige konstruktionsformer er nået så vidt, at den egentlige skitseprojektering kan begynde, er det ingeniørens opgave nøje at gøre sig klart, hvorledes de forskellige påvirkninger, de enkelte konstruktionsdele og konstruktionen som helhed udsættes for, kan optages, eller med andre ord: det statiske systems virkemåde klarlægges. På grundlag af denne kvalitative formulering af systemets egenskaber må ingeniøren oftest allerede på dette tidlige stadium jugere visse hoveddimensioner, for at man kan danne sig et indtryk af bygværkets proportioner og herudfra beslutte, om det foreliggende system er et brugeligt grundlag for det videre projekteringsarbejde, eller om det straks må forkastes eller omarbejdes. Denne fase af skitseprojekteringen er af afgørende betydning for det videre arbejde med projektet, og det er derfor af største vigtighed, at ingeniøren i denne situation handler med sikkerhed og konstruktiv fantasi.

10.1.2. STYRKE OG STIVHED

Til enhver bærende konstruktion knytter sig to hovedproblemer, hvis løsning er helt afgørende for konstruktionens brugelighed, nemlig styrke og stivhed. Denne problematik, der ikke er specielt husbygningsteknisk, er vel nok den del af bygningsfysikken, der er grundigst behandlet i litteraturen, og er derfor kun medtaget i denne oversigt i det omfang, en sammenfattende fremstilling af det bygningsfysiske problemkompleks nødvendiggør det. Angående beregning af snitkræfter, dimensionering og konstruktiv udformning henvises til litteraturen om bærende konstruktioner.

Styrkeproblemer

Ved konstruktionens styrke forstås dens evne til at modstå de påvirkninger, den udsættes for. Denne evne, bæreevnen, er et udtryk for, hvor stor en belastning man kan påføre konstruktionen, før den bryder sammen. I praksis kan man naturligvis ikke påføre konstruktionen denne belastning, brudbelastningen, men må kræve, at der er en passende sikkerhedsmargin. En sådan sikkerhedsmargin tilvejebringes ved f.eks. at kræve, at der ikke påføres større belastning, end at spændingerne overalt i konstruktionen formelt holdes under en vis tilladelig størrelse, der for de forskellige konstruktionsmaterialer og belastningskombinationer fastsættes som en vis brøkdels $\frac{1}{n}$ af materialets brudspænding. Konstruktionen siges at have sikkerhedsgraden n mod brud. Tilsvarende kan man fastsætte sikkerheden mod flydning, udknækning m.m. En anden måde at formulere sikkerhedskravet på, er partialsikkerhedssystemet, hvor man regningsmæssigt betragter et nominelt brudstadium og knytter et sikkerhedskrav til både belastninger og materialeegenskaber, idet man multiplicerer belastningerne med en partialsikkerhedskoefficient $\geq 1,0$ (afhængig af den nøjagtighed, hvormed belastningernes størrelse kendes), og tilsvarende dividerer materialernes styrke med en passende sikkerhedskoefficient $> 1,0$. Endelig kan nævnes generel-sikkerhedssystemet, hvor man knytter en sikkerhedskoefficient til både belastninger og materialer og desuden fastsætter en vis generel sikkerhedsgrad for det behandlede belastningstilfælde. Det skal bemærkes, at begrebet "brud" i denne sammenhæng naturligvis skal forstås i videste forstand og ikke blot omfatte brud

(eller flydning) i selve konstruktionsmaterialet, men også flytning (væltning eller skridning) af konstruktionen som et stift hele i forhold til omgivelserne. En udførlig diskussion af de forskellige sikkerhedssystemer og af sikkerhedsproblemet ved faststående statiske konstruktioner i det hele taget er givet i litt. [1968.1].

Spørgsmålet om, hvor stor en sikkerhedsgrad man skal kræve, og hvordan den skal tilvejebringes, må naturligvis vurderes ud fra konstruktionsdelens betydning for sikkerheden for de personer, der færdes i eller omkring bygningen. En gulvbelægning f.eks. vil normalt ikke have nogen betydning for person-sikkerheden, og dens brudsikkerhed kan derfor alene fastsættes ud fra andre kriterier. Men så snart der er tale om en konstruktionsdel, for hvilken et svigt vil kunne frembyde en fare for personer, altså først og fremmest den bærende hovedkonstruktion, men også enhver anden kraftoverførende bygningsdel, såsom trapper, rækværker, tagbelægninger, facadebeklædninger etc. etc., må sikkerhedsgraden fastsættes under hensyn hertil, og sikkerhedsproblemet er hermed blevet et lovspørgsmål.

Herhjemme er lovgrundlaget for bærende konstruktioners sikkerhed nedfældet i byggelovgivningen, for købstæderne og landet (d.v.s. hele landet undtagen Københavns og Frederiksbergs kommuner, Færøerne og Grønland) således "Byggelov for købstæderne og landet" (lov nr. 246 af 10.6.1960), hvori det i § 6 bestemmes, at de sikkerhedsmæssige krav til bygningskonstruktioner fastsættes i "Bygningsreglement for købstæderne og landet" (i det følgende benævnt BR 1966). I BR 1966, kapitel 5, bestemmes det, at grundlaget for bærende konstruktioners dimensionering og udførelse skal være Dansk Ingeniørforenings "Normer for bygningskonstruktioner", hvoraf en del er udgivet som Dansk Standard (DS). Disse normer har altså status som lovgrundlag.

I andre lande er lovgrundlaget for konstruktioners sikkerhed på tilsvarende måde nedfældet i normer, der forøvrigt varierer ret stærkt fra land til land med hensyn til, hvor frit den projekterende stilles, hvad angår beregningsmetoder og konstruktionsprincipper. Det danske normgrundlag må ialt

siges at være forholdsvis liberalt sammenlignet med visse andre landes.

Stivhedsproblemer

Det andet hovedproblem er den bærende konstruktions stivhed. En konstruktion kan meget vel besidde den fornødne styrke til sit formål og alligevel være aldeles ubrugelig, fordi den er for slap, ligesom det omvendte kan være tilfældet.

Til illustration af dette forhold betragtes en tagbjælke, under hvilken der er anbragt en let, ikke-bærende facadekonstruktion (letbeton, glas, letmetal el.lign.). Hvis facadekonstruktionen er stiv, vil den ikke kunne tåle ret stor sammentrykning uden at brydes; det vil sige, at selv om tagbjælken har styrke nok til at bære sin belastning, men ikke den fornødne stivhed, vil den under belastningen kunne få deformationer, der er for store til, at facadekonstruktionen kan følge med, hvorfor denne prøver at bære belastningen, hvad den naturligvis ikke kan og derfor brydes.

Eksemplet er karakteristisk for mange af de konstruktive problemer i husbygningen. Da bygningskonstruktioner jo består af både bærende og ikke-bærende dele, stive og slappe, stærke og svage komponenter, er det af afgørende betydning, at de bærende konstruktioner udover den fornødne styrke har sådanne stivhedsegenskaber, at de deformationer, enhver bærende konstruktion får under belastningsoptagelsen, ikke er så store, at de øvrige bygningsdele på grund af deres stivhed ikke kan følge med og dermed tvinges til at deltage i belastningsoptagelsen, som alene var tiltænkt de bærende konstruktioner.

Selvom det altså således ikke så meget er de bærende konstruktioner selv, stivhedsproblemet knytter sig til, må det dog fremhæves, at en bærende konstruktion naturligvis ikke bør anordnes så slap, at det bliver direkte synligt eller mærkbart. Stivhedsproblemet er selvfølgelig set fra et lovgivningssynspunkt ikke så vitalt som sikkerhedsproblemet og er derfor ikke i samme grad som dette behandlet detaljeret i lovgivningen, omend visse bestemmelser dog er nedfældet. Men fra den projekterendes side må stivhedsproblemerne vurderes ligeså seriøst som sikkerhedsproblemerne; i virkeligheden er det i husbygningen ofte stivhedskriterier, der bestemmer dimensionerne.

10.1.3. DET STATISKE SYSTEM

Systemets geometriske og statiske egenskaber

Ved anordningen af den bærende hovedkonstruktion må det i første række iagttages, at systemet bliver rumligt stabilt, d.v.s. det skal principielt kunne optage kræfter af vilkårlig retning på en sådan måde, at det punkt, hvor kræften angriber konstruktionen, bliver liggende, eller rettere kun får flytninger hidrørende fra konstruktionsdelenes elastiske deformationer, d.v.s. flytninger, som kan regnes uendelig små i forhold til konstruktionens geometriske udstrækning.

Inden den videre behandling af den bærende konstruktions statiske virkemåde skal kort rekapituleres nogle grundlæggende begreber om konstruktioners geometriske og statiske egenskaber.

For at en konstruktion for en vilkårlig belastning skal være stabil i ovennævnte betydning, må den naturligvis være geometrisk fastlagt, d.v.s. hvert enkelt punkt af den må være rumligt bestemt eller overbestemt. Konstruktionens geometriske egenskaber er som bekendt bestemt dels af de indre geometriske forhold, dels af understøtningsforholdene. Er konstruktionen et stift hele (altså indvendig geometrisk bestemt eller overbestemt), må den fikseres i rummet ved 6 uafhængige understøtningsbetingelser; er der flere, er konstruktionen et tilsvarende antal gange udvendig geometrisk overbestemt og dermed statisk ubestemt; er der færre, er konstruktionen et tilsvarende antal gange udvendig geometrisk underbestemt (statisk overbestemt); i dette tilfælde er konstruktionen altså forskydelig i en eller flere retninger og kan derfor ikke optage kræfter i disse retninger og er følgelig ikke stabil. Er konstruktionen sammensat af flere stive enheder, der indbyrdes er bevægelige, er den et vist antal gange indvendig geometrisk underbestemt (statisk overbestemt) og må altså for at være stabil understøttes således, at den er et tilsvarende antal gange udvendig geometrisk overbestemt. Understøtningsbetingelserne må selvfølgelig fastsættes i nøje overensstemmelse med de indvendige geometriske egenskaber. Eksempelvis bliver en plan bjælke, der er simpelt, bevægeligt understøttet i begge ender, ikke mindre bevægelig af at få

endnu en bevægelig understøtning; den er statistisk overbestemt for visse påvirkninger og statistisk ubestemt for andre og altså alt i alt stadig ikke stabil.

En husbyggningskonstruktion vil i praksis altid være sammensat af et større eller mindre antal komponenter, hvis indbyrdes forbindelser repræsenterer geometriske og statiske bindinger, hvilket naturligvis kan gøre det vanskeligt at overskue konstruktionens geometriske og statiske egenskaber. Ofte er disse bindingers antal så uoverskueligt, at det ikke er overkommeligt at bestemme den samlede konstruktions grad af statistisk ubestemthed, hvilket iøvrigt også er mindre væsentligt; det afgørende er at gøre sig klart, hvilke bindinger der har betydning for den statiske virkemåde, og på grundlag heraf sikre sig, at ingen konstruktionsdele er bevægelige.

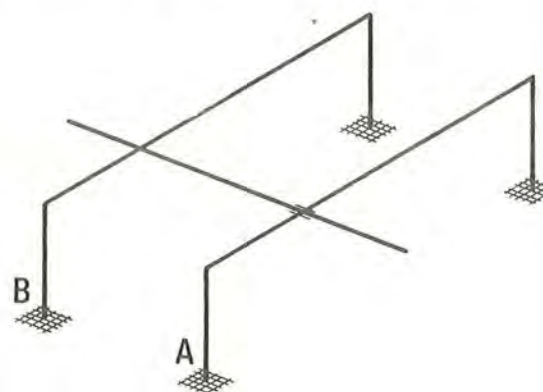
Disse betragtninger angår kun konstruktionens virkemåde i kvalitativ henseende; kvantitativt er det naturligvis vidt forskelligt, hvad konstruktionen skal kunne præstere, alt efter hvilke belastninger det drejer sig om. Visse af påvirkningerne er så små, at man umiddelbart kan ræsonnere sig til, at de ikke giver anledning til problemer. Men det er væsentligt at gøre sig klart, at en hvilken som helst bygningsdel kan blive udsat for visse tilfældige og utilsigtede påvirkninger, som ikke er taget med i regning, og at konstruktionens egenskaber må indrettes under hensyn hertil.

Det statiske systems mekaniske model

Når den bærende hovedkonstruktions principielle virkemåde i hovedtrækkene er klarlagt, opstilles konstruktionens mekaniske model, som er grundlaget for den videre beregningsmæssige behandling af systemet. Det er værd at notere sig, at denne selvfølgelig aldrig er et mål i sig selv, men udelukkende tjener til at sikre, at konstruktionen styrke- og stivhedsmæssigt er i orden. Dette formål med de statiske beregninger bør aldrig tabes af syne og må især tilgodeses indledningsvis, således at systemets mekaniske model ikke vælges mere kompliceret end højst nødvendigt, men samtidig ikke gøres mere forenklet, end at modellens virkemåde til stadighed giver et passende realistisk billede af den virkelige konstruktion. Denne indledende fase af de statiske beregninger er

af afgørende betydning for værdien af beregningsarbejdet, og det er derfor væsentligt, at dette spørgsmål ofres særlig opmærksomhed.

Ved opstillingen af en husbygningskonstruktions mekaniske model må man først gøre sig klart, at det sjældent drejer sig om en enkelt model af det samlede system, men oftest modeller af flere delsystemer. For det første er som før omtalt en husbygningskonstruktion normalt sammensat af så mange komponenter, at det samlede systems statistiske egenskaber vanskeligt kan overskues og formuleres under eet, for det andet er der oftest tale om mange forskellige former for belastninger. Systemets virkemåde er i reglen vidt forskellig for de forskellige belastningsarter, og det samme må selvfølgelig gælde den mekaniske model, der illustrerer virkemåden. Et simpelt eksempel anskueliggør dette forhold.



Figur 10.02: Statisk system

På figur 10.02 er vist to ens rammer, A og B, som for simpelhed skyld tænkes udført af cirkulære profiler. Rammerne ligger i to parallelle planer og er fast indspændte ved vederlagene og er altså hver især 6 gange geometrisk overbestemte. Forbindes rammerne med en bjælke, der er understøttet simpelt, bevægelig (i sin akse) på ramme A og fast, simpelt understøttet på ramme B og vridningsstift forbundet med denne, repræsenterer bjælken ikke nogen geometrisk tvang, og systemet kan betragtes som tre uafhængige delsystemer (de to 6 gange statistisk ubestemte rammer og den statistisk bestemte bjælke). Det ses umiddelbart, at for en vilkårlig kraftpåvirkning i bjælkens normalplan kan såvel bjælke som rammer hver for sig betragtes som plane konstruktioner, medens kræfter vinkelret derpå påvirker bjælken til normalkraft og rammerne som indbyrdes uafhængige rumlige konstruktioner.

Erstattes nu bjælkens bevægelige understøtning på ramme A med en fast, betyder dette intet for konstruktionens virkemåde

over for kræfter i bjælkens normalplan, og systemet kan fortsat betragtes som tre uafhængige delsystemer (plane konstruktioner). For kræfter vinkelret derpå derimod betyder ændringen en geometrisk tvang, således at systemet nu må betragtes som eet 13 gange statisk ubestemt system.

Eksemplet illustrerer, at det selv ved forholdsvis simple systemer, hvis statiske egenskaber i og for sig meget vel kan karakteriseres eksakt, kan betyde en stor forenkling at formulere en konstruktions statiske virkemåde successivt for de forskellige arter af belastning, eller med andre ord at ansøge de statiske egenskaber i relation til en bestemt statisk funktion.

Inden den videre behandling af konstruktionernes rumlige anordning og de ofte meget omfattende forenklinger, der må foretages ved opstillingen af systemernes mekaniske model, skal der gives en oversigt over de belastninger, en husbygningkonstruktion kan blive udsat for.

10.1.4. BELASTNINGER

De belastninger, en husbyggningskonstruktion under normale forhold kan blive udsat for, er generelt følgende:

hvilende belastning	
bevægelig belastning:	nyttelast snebelastning vindbelastning jordtryksbelastning dynamisk belastning
særlige påvirkninger:	temperaturvariationer fugtighedsvariationer svind og svelning krybning og relaxation.

Hertil kommer under særlige omstændigheder nogle påvirkninger, som kan karakteriseres som

eksceptionelle belastninger: nedstyrtningslast
eksplosionsbelastning.

Den sandsynlighed, hvormed to eller flere påvirkninger optræder samtidigt, afspejler sig i de forskellige sikkerhedsgrader, der må forlanges i de forskellige belastningstilfælde. Disse belastningskombinationer er i henhold til de her i landet gældende normer forskellige for de forskellige konstruktionsmaterialer og er derfor ikke nedfældet i belastningsforskrifterne (DS 410), men i normerne for de respektive konstruktionsmaterialer.

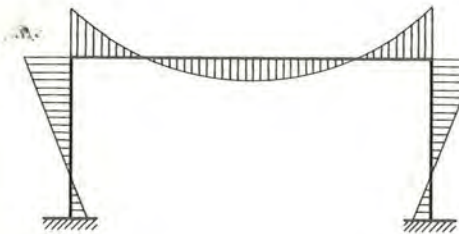
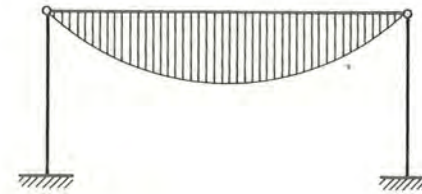
I det følgende skal kort gennemgås de karakteristiske træk ved de forskellige belastninger.

Hvilende belastning

Den hvilende belastning er belastningen hidrørende fra vægten af samtlige konstruktionsdele, bærende som ikke-bærende, som efter byggeprocessen kan påregnes at være permanent tilstede på samme sted i bygningen. Den hvilende belastning omfatter således foruden de bærende konstruktioner alle blivende konstruktionsdele, gulve, lofter, skillevægge, isoleringsmaterialer, faste installationer, vinduer, døre, porte m.m. Derimod omfatter den hvilende belastning ikke sådanne konstruktionsdele, som kan forventes at ville blive flyttet, f.eks. visse skillevægge. Ved vurderingen af, om en konstruktionsdel

skal regnes til den hvilende eller til den bevægelige belastning, må det iagttages, at man ikke regner nogen belastning til gunst, som man ikke kan være sikker på er tilstede. For en let tagkonstruktion vil således den hvilende belastning virke til gunst, når det drejer sig om dimensionering af forankring for opadrettede kræfter, og det vil derfor være på den usikre side at regne med for stor hvilende belastning. Det er altså ikke nok ukritisk at regne med en hvilende belastning, der "i hvert fald er mindst lige så stor som den, der kan tænkes at optræde".

Ofte vil det være nødvendigt at dele den hvilende belastning op i den bærende konstruktions egenvægt og den øvrige hvilende belastning, idet en konstruktions virkemåde godt kan være forskellig under montagen og i færdigmonteret tilstand. Således vil overliggeren i den viste ramme (figur 10.03) eksempelvis



Figur 10.03

virke som en simpelt understøttet bjælke for egenvægten, når den er lagt op på rammebenene. Når den stive forbindelse i rammehjørnerne derefter er etableret, vil konstruktionen for den resterende hvilende belastning - som for al yderligere belastning - virke som en statisk ubestemt rammekonstruktion. Eksemplet illustrerer, hvorledes man ofte under projekteringen må gøre sig klart, hvordan den bærende

konstruktion kan monteres, og eventuelt regne med alternative muligheder.

Nyttelast

Nyttelasten omfatter den belastning af tilfældig størrelse og varighed, en konstruktion kan blive udsat for hidrørende fra vægten af personer, varer, maskiner, inventar m.m. Nyttelasten kan ifølge sin natur ikke fastsættes som nogen veldefineret størrelse; kun i visse specielle tilfælde, f.eks. en lagerbygning til et ganske bestemt formål eller en maskinstue med en ganske bestemt maskinopstilling, kan nyttelasten defineres. I alle andre tilfælde må nyttelasten fastsættes ved et

- ofte groft - judgement, naturligvis baseret på erfaring og på en iagttagelse af den pågældende konstruktions anvendelse. Sådanne erfaringstal er nedfældet i belastningsforskrifter, her i landet Dansk Standard 410 af marts 1945 med tillæg af 17.12.1959. Heri fastsættes, hvilke enhedslaster (m^2 -belastninger) etageadskillelser, trapper, altaner og lignende skal beregnes for, hvis man ikke i det enkelte tilfælde kan påvise rigtigere værdier. For vægten af ikke-bærende skillevægge er angivet visse ækvivalentbelastninger.

Ved belastningsansættelsen må det nøje vurderes, om det samlede systems belastninger skal fastsættes ved summation af påvirkningerne på de enkelte dele, eller om der skal anstilles statistiske betragtninger over delpåvirkningernes samtidighed. Dette sidste vil hyppigt være tilfældet; eksempelvis regnes en etageadskillelse i boligbyggeri for en nyttelast på $150 \text{ kp}/m^2$, hvilket næppe er for meget, hvis der f.eks. er placeret en bogreol over en enkelt gulvbjælke, men naturligvis ville det være urimeligt at regne med, at der i en 100 m^2 lejlighed som helhed befinder sig 15 Mp personer og møbler, og endnu mere urimeligt at regne med, at dette er tilfældet i hver eneste lejlighed i en ejendom.

Sådanne statistiske betragtninger er også indeholdt i belastningsnormerne, idet der f.eks. i DS 410 er optaget en bestemmelse om, at man bl.a. i beboelseshuse ved beregning af konstruktioner som f.eks. vægge, søjler og fundamenter, der påvirkes af belastning fra to eller flere etager, kan reducere den bevægelige belastning fra etageadskillelser, trapper etc. til en trediedel.

I det hele taget bør man behandle spørgsmålet om belastningsansættelsen kritisk og i hvert enkelt tilfælde nøje vurdere, i hvilken udstrækning de specifikke belastninger på de sekundære bygningsdele bør anvendes ved de primære bygningsdele.

Snebelastning

Snebelastningen er belastningen hidrørende fra de sne- og ismasser, der lægger sig på et bygværk. Denne belastning er ligesom de øvrige bevægelige belastninger yderst usikkert bestemt og må derfor i mangel af bedre fastsættes som erfaringstal, jvf. f.eks. DS 410, hvor det i § 6 er anført, hvor-

ledes snebelastningen kan fastsættes i afhængighed af tagets form.

Vindbelastning

Vindbelastningen på et bygværk hidrører fra den naturlige vind og er en dynamisk og bevægelig belastning. Konstruktioner eller konstruktionsdele af stor slankhed vil ofte være følsomme overfor dynamiske påvirkninger og må derfor undersøges for en dynamisk virkende vindbelastning, men for langt de fleste bygningskonstruktioner vil følsomheden være så ringe, at man med rimelighed kan regne vinden virkende som en statisk belastning.

Den vindbelastning, der angriber et bygværk, er ifølge sagens natur så kompliceret, at det ikke er muligt at beskrive den blot nogenlunde eksakt. Vinden ændrer retning og fart fra sted til sted og fra øjeblik til øjeblik, men for overhovedet at behandle problemet beregningsmæssigt, må man gøre en række simplificerende antagelser og regne vindretning og -hastighed konstant; men selv med disse drastiske forenklinger i forhold til virkeligheden er fastsættelsen af vindbelastningen på et bygværk en overordentlig kompliceret opgave, og hele det hertil knyttede problemkompleks er endnu kun ufuldstændigt behandlet i litteraturen. I det følgende skal meddeles nogle hovedtræk af problemet, idet der iøvrigt henvises til en udførligere behandling af spørgsmålet i litt. [1936.1] og [1959.1].

Aerodynamiske grundbegreber

I den klassiske aerodynamik gøres der to forenklende forudsætninger om luften: den regnes usammentrykkelig, og den regnes friktionsfri. Hvad luftens usammentrykkelighed angår, er det selvfølgelig ikke en forudsætning, der gælder under alle bygningsfysiske forhold (således beror lyds udbredelse i luft netop på dennes kompressibilitet, jvf. artikel 10.2.2.), men som beregningsforudsætning er den meget nær opfyldt ved de små hastigheder, der er tale om ved vindbelastninger. Den anden forudsætning er ligeledes meget nær opfyldt i den frie luftstrøm, men selvfølgelig ikke altid i grænseområderne ved faste legemer, som luftstrømmen stryger opad.

Med disse forudsætninger gælder for den hvirvelfri, stationær-

re strøm Bernoulli's ligning (idet der ses bort fra tyngdefeltet)

$$\frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + p' = \text{konstant}$$

hvor ρ er luftens massefylde,

v er luftens hastighed,

p' er luftens tryk;

første led kaldes hastighedstrykket, andet led det statiske tryk. Anvendes i stedet for det absolutte tryk p' trykket $p =$ overtrykket over det statiske tryk p'_0 i den uforstyrrede luftstrøm, haves, idet altså $p = p' - p'_0$

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \frac{1}{2}\rho v_0^2$$

Tænkes luftstrømmen at blive standset fuldstændigt ($v = 0$) af en (uendelig stor) flade, vil hele den kinetiske energi blive omsat til trykenergi, så trykket på fladen bliver

$$p = \frac{1}{2}\rho v_0^2$$

Måles sammenhørende værdier af trykket p på et legeme i en luftstrøm og dennes hastighed v_0 , kan sammenhængen udtrykkes ved

$$p = \frac{1}{2}\rho v_0^2 c,$$

hvor c benævnes formkoefficienten; udtrykket betyder ikke, at trykket er proportionalt med hastighedens kvadrat, da c er en funktion af Reynolds tal $v_0 d/\nu$ (d er en karakteristisk længde, ν luftens kinematiske gnidningskoefficient), og dermed afhængig af v_0 .

Udtrykket betyder imidlertid, at målinger til bestemmelse af c ikke nødvendigvis skal ske i fuld skala, men kan udføres som modelforsøg, når blot forsøget anstilles ved samme Reynolds tal som den virkelige strømning.

Sættes for atmosfærisk luft massefylden $\rho = \frac{1}{800} \cdot \frac{1}{g} \frac{\text{Mp}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}} \sim$
 $\frac{1}{8} \frac{\text{kps}^2}{\text{m}^4}$,

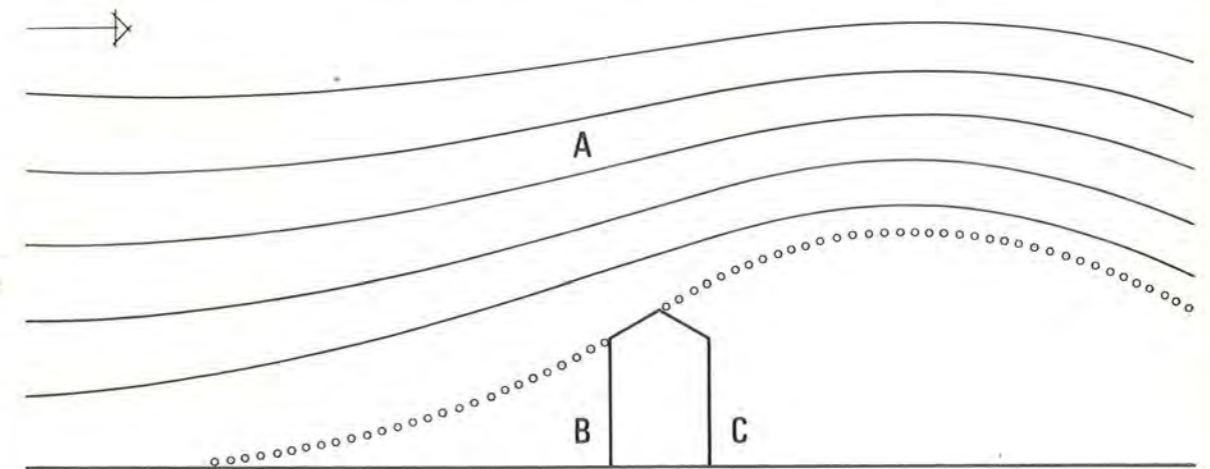
$$p = c \cdot \frac{1}{16} v_0^2 \text{ kp/m}^2,$$

idet v_0 indsættes i m/s.

Luftstrøm omkring bygninger

Hvor en luftstrøm grænser op til faste legemer eller en luftstrøm med en anden hastighed, vil forholdene være væsentlig mere komplicerede end i den frie strøm; her spiller friktionskræfterne en rolle, fordi de fuldstændigt ændrer strømningsbilledet. I skillefladen vil der ske en hvirveldannelse og dermed et energitab, altså en diskontinuitet i potentialiet, hvis der er tale om to strømme med hver sin hastighed. Ændringen i Bernoulli-konstanten er lig med differensen mellem hastighedstrykkene på de to sider af skillefladen, d.v.s. de statiske tryk er lige store (bortset fra centrifugalkræfterne ved krumme skilleflader).

Til illustration af forholdene omkring en langstrakt, fritliggende bygning er på figur 10.04 skematisk vist, hvorledes



Figur 10.04: Luftstrøm omkring bygning

man kan tænke sig dannet en hvirvelflade, der strækker sig i en flad bue fra et punkt på jorden foran bygningen til tagkanten og fortsætter fra kippen opad mod et toppunkt for derefter at nærme sig jordoverfladen langt bag bygningen. Hvirvelfladen deler luftrummet omkring bygningen i tre dele, A, B og C, potentialfeltet A, hvor den frie strømning foregår, og grænselagsområderne B og C, hvor hastighederne er meget ringe, og hvor det statiske tryk er meget nær trykket i den frie strøm udenfor. Udfør B er hastigheden mindre, udfør C større end i den uforstyrrede strøm, hvorfor der er henholdsvis tryk og undertryk i områderne foran og bag bygningen.

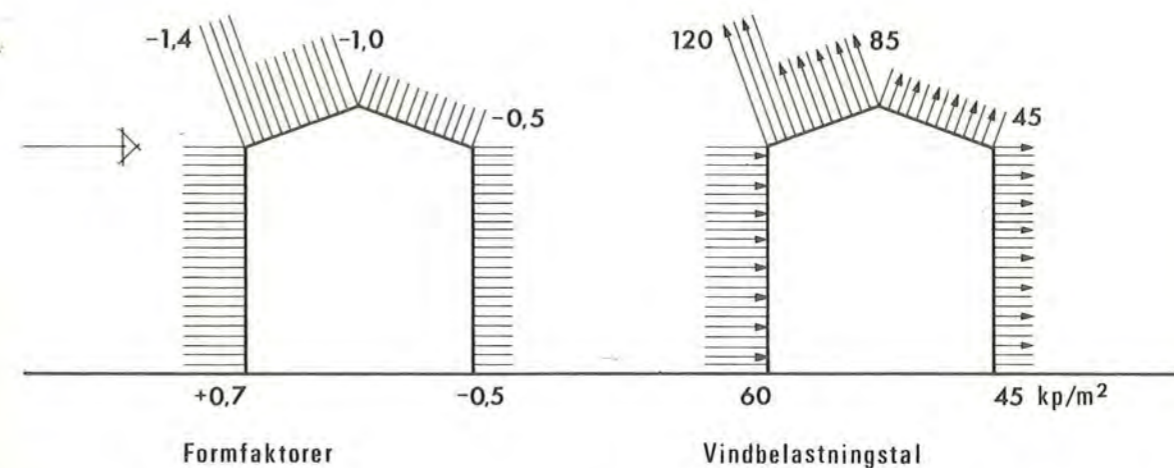
Strømliniebilledet omkring virkelige bygninger vil selvfølgelig i praksis være så kompliceret, at det ikke er muligt at behandle problemet matematisk. Den praktiske fremgangsmåde er på grundlag af modelforsøg at bestemme formfaktoren c for de enkelte dele og punkter af bygningen og derefter bestemme vindbelastningen som

$$p_v = c \cdot \frac{1}{16} v_0^2 \text{ kp/m}^2,$$

hvor v_0 som nævnt er vindhastigheden i den frie, uforstyrrede luftstrøm.

Der er udført et meget stort antal modelforsøg med forskellige bygningstyper og -former, se eksempelvis Dansk Ingeniørforenings "Vejledning for fastsættelse af vindbelastninger", der er et bilagsblad til DS 410, men der er kun udført få målinger i naturen til kontrol af de fundne forsøgsværdier.

Eksempelvis fås for en 4-etagers bygning med sadeltag de på figur 10.05 viste formfaktorer svarende til vindhastigheden ved tagets øverste punkt samt de anførte belastningstal (kp/m^2).



Figur 10.05: Vindbelastning på 4-etagers bygning med 15° sadeltag.

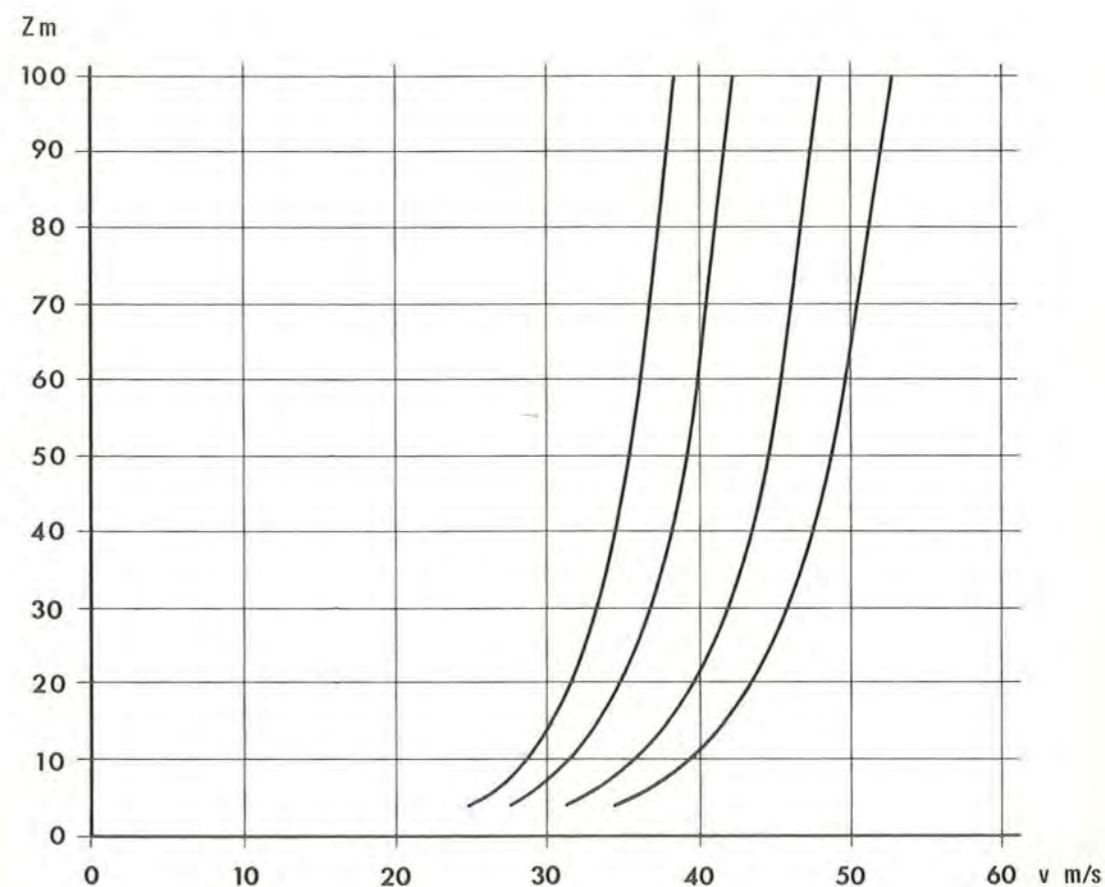
Hastighedsprofiler

De vindhastigheder, der skal anvendes ved beregning af hastighedstrykket, må baseres på målinger i naturen af hastighedens variation gennem lange perioder; på grundlag heraf bestemmes maksimalhastigheden, defineret udfra en fastsat årlig hyppighed, normalt 0,02, altså den hastighed, der statistisk

optræder 1 gang pr. 50 år.

Vindens hastighed er stærkt afhængig af højden over jordoverfladen. Selve jordoverfladen med dens større eller mindre ruhed (bevoksning, bebyggelse etc.) udøver en bremsende virkning på luftstrømmen, og først i en vis højde er denne virkning uden betydning for vindhastigheden; her optræder den såkaldte gradientvind. I de mellemliggende luftlag stiger hastigheden efter en logaritmisk funktion af højden over jordoverfladen. Gradientvindens højde over jordoverfladen er stærkt afhængig af dennes ruhed, således af størrelsesordenen 200 meter over hav og åbent land, medens den er af størrelsesordenen 500 meter ved høj og tæt bymæssig bebyggelse.

Dette forhold får selvfølgelig betydning for de hastighedsprofiler, der skal regnes med. I den nævnte vejledning (bilag til DS 410) regnes der således for statistisk vindbelastning med fire forskellige hastighedsprofiler, alt efter bygningens beliggenhed:



Figur 10.06: Hastighedsprofiler for statistisk virkende vindbelastning (jvf. DS 410)

Ved Vesterhavet, normalt : $v = 1,1 \cdot 12 \cdot (\log_{10} z + 2)$
 Ved Vesterhavet, beskyttet: $v = 0,88 \cdot 12 \cdot (\log_{10} z + 2)$
 Øvrige land, normalt : $v = 12 \cdot (\log_{10} z + 2)$
 Øvrige land, beskyttet : $v = 0,8 \cdot 12 \cdot (\log_{10} z + 2)$

hvor v er vindhastigheden (m/s)

z er højden over jordoverfladen (m).

Hastighedsprofilerne er vist grafisk på figur 10.06.

Dynamisk vindbelastning

Konstruktioner eller konstruktionsdele af stor slankhed vil som nævnt ofte være følsomme overfor vindens dynamiske påvirkning. Virkningen af vindstødernes dynamik kan tages i regning ved at ækvivalere vindbelastningen med en statisk virkende af størrelsen

$$p = c \cdot q \cdot \phi$$

hvor c er formfaktoren,

q er middelhastighedstrykket (normalt over 10 minutter),

ϕ er en stødfaktor (jvf. f.eks. bilag til DS 410).

En særlig virkning af vindens dynamik er den rytmiske hvirvelafløsning, som kan forekomme ved høje slanke bygværker som fritstående skorstene, tårne, master etc. Den bevirker en pulserende tværkraftpåvirkning, hvis frekvens i visse tilfælde kan ligge så nær konstruktionens egenfrekvens, at de to svingninger kommer i resonans med deraf følgende kraftpåvirkninger, som kan være af en helt anden størrelsesorden end påvirkningen fra hastighedstrykket. Sådanne slanke konstruktioner bør altid undersøges for disse forhold.

Om den detaljerede behandling af disse problemer henvises til litt. [1959.1] og [1967.1].

Massekraften

I visse tilfælde, f.eks. ved lave bygninger af stor udstrækning i planen, kan den regningsmæssige vindbelastning blive meget lav i forhold til den lodrette belastning. Der bør dog altid regnes med en horisontal minimumsbelastning, der er en vis brøkdel (eksempelvis 1,5%) af den samlede lodrette belastning, for at dække belastninger fra jordrystelser og andre tilfældige påvirkninger, som ikke på anden måde kan tages i regning.

Samt andregående
 udbøjningsmomenter (ikke-lodrette vægje)

Jordtryksbelastning

Jordtrykket på en konstruktion består dels af et tryk vinkelret på konstruktionen og dels af en kraft langs med konstruktionen. Begge dele afhænger af konstruktionens geometri, dens eftergivelse og ruhed, jordfyldens geotekniske egenskaber samt belastningen på jordfylden.

Til behandlingen af en jordtrykspåvirket konstruktion knytter sig det problem, at det i princippet kun er muligt at sige noget om jordtrykkets størrelse i brudtilstanden, som altså må lægges til grund ved styrkeberegningen, hvorimod konstruktionens deformationer i brugstilstanden ikke lader sig beregne. En særlig form for "belastning" hidrører fra den langtidsdeformation, som jordfylden under fundamenter får under belastning; for statisk ubestemte konstruktioner må størrelsen af disse sætninger altid vurderes og om fornødent tages i regning.

For jordtrykspåvirkede konstruktioner gælder herhjemme et særligt normblad, Dansk Ingeniørforenings "Normer for bygningskonstruktioner, 6: Fundering", (DS 415).

Ved enhver bærende konstruktion må det tillige undersøges, hvilken indflydelse grundvandstanden og eventuelle variationer heri kan have af belastningsmæssig art.

Dynamisk belastning

Hidrørende fra kraner, elevatorer, maskiner med større eller mindre accelererende eller roterende masser kan de dynamiske påvirkninger på en bygningskonstruktion være af en sådan størrelse, at de må tages i regning som sådanne.

Temperaturvariationer

På tilsvarende måde, som de ydre kræfter (hvilende og bevægelig belastning) bevirker spændingstilstande i en konstruktion og dertil svarende tøjninger, vil en temperaturændring i konstruktionen bevirke tøjninger og - hvis disse ikke kan foregå frit - dertil svarende spændingstilstande.

Det er imidlertid forbundet med overordentlig stor usikkerhed at skulle fastsætte, hvilke temperaturer en given konstruktionsdel kan antage; det er således heller ikke i danske normer konkretiseret, hvordan en husbygningskonstruktion skal

behandles i så henseende. Ikke desto mindre er temperaturvariationerne ofte af den allerstørste betydning for en konstruktions - og ikke mindst de tilstødende konstruktionsdele - styrke- og deformationsforhold, så det er absolut nødvendigt, at de tages i betragtning, om ikke på anden måde, så i hvert fald ved, at man gør sig klart, at de forekommer, og indretter sin konstruktion under hensyntagen hertil, støttet af et jugement over variationernes størrelse.

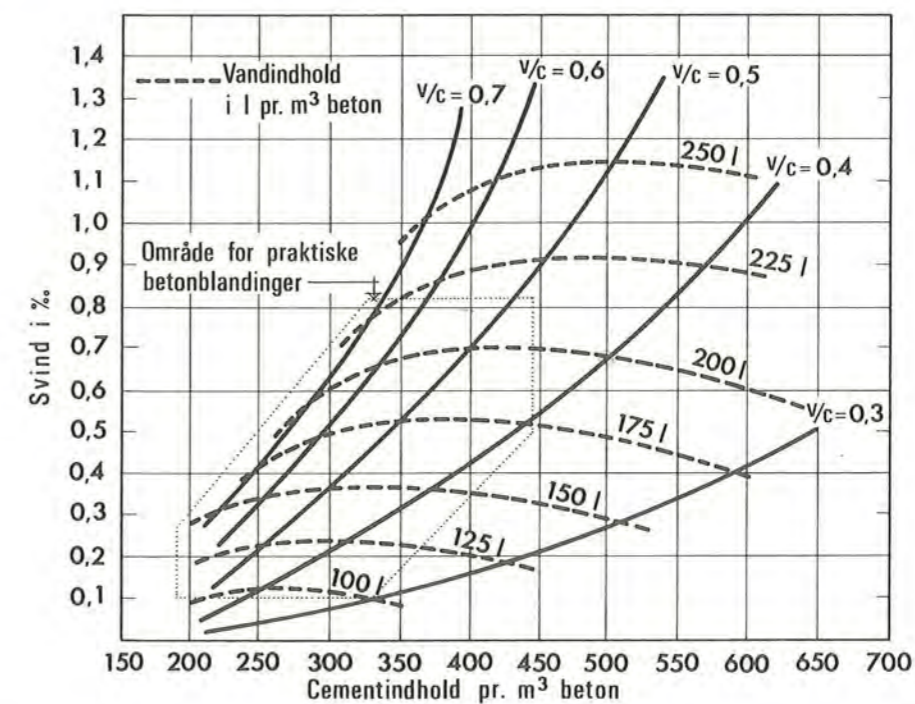
Et sådant jugement må naturligvis være baseret på en vurdering af, i hvor høj grad den pågældende konstruktion eller konstruktionsdel ligger i det fri og dermed er underkastet den udendørs temperaturs variationer. Ligger den helt i det fri, kan man passende regne med de for brokonstruktioner fastsatte variationer (iflg. DS 410 således $+45^{\circ}\text{C}/-25^{\circ}\text{C}$ for stålkonstruktioner, $+15^{\circ}\text{C}/-15^{\circ}\text{C}$ for betonkonstruktioner; svenske normer foreskriver, at der tages hensyn til konstruktionsdelenes geometri, idet der for betonkonstruktioner regnes med middeltemperaturer på maks. $3 \cdot (8-d)^{\circ}\text{C}$ og min. $-4 \cdot (4-d)$, hvor d er middeltykkelsen i meter). Man må imidlertid være opmærksom på, at solbeskinnede, mørke konstruktionsdele kan få væsentlig højere temperaturer, helt op imod 100°C .

Ligger konstruktionen helt inden døre, må det mulige temperaturinterval vurderes på grundlag af bygningens varmeisolering og dens brugsfunktioner. Det er klart, at man må ansætte intervallet rigeligt, da man naturligvis ikke kan basere bygningens stabilitet på, at en aldrig svigtende varmeinstallation bibringer den bærende konstruktion en konstant temperatur. Det skal dog i den forbindelse fremhæves, at temperaturvariationerne sjældent frembyder noget styrkemæssigt problem for de bærende konstruktioner - en ekstrem temperatursituation motiverer jo i sig selv en lavere sikkerhed - men knytter sig i langt højere grad til de - normalt stive og svage - bygningsdele, som de bærende konstruktioner er sammenbygget med. Konstruktivt kan problemet løses ved at opdele bygningen i passende dilatationsafsnit og eventuelt inden for disse at opdele de ikke-bærende bygningsdele i mindre sektioner, så der er mulighed for visse små indbyrdes forskydninger. Naturligvis repræsenterer sådanne permanente bevægelsesmuligheder

en ofte betydelig fordyrelse af konstruktionen, så spørgsmålet om dilatationsafsnittenes størrelse må blandt andet løses på grundlag af en vurdering af risikoen for en ekstrem temperaturvariation og af omfanget af de heraf følgende skader. I den forbindelse skal nævnes de særlige vilkår, konstruktionerne er underkastet i byggeperioden, idet der her kan herske temperaturforhold, som ville være utænelige for det færdige bygværk, og som det ville være urimeligt at tage hensyn til ved udformningen. Ofte er det en langt billigere løsning, at man affinder sig med de skader, der - måske - opstår, og udbedrer dem, når huset er lukket og opvarmet, end at anordne kostbare dilatationsfuger, der kun skal fungere denne ene gang og aldrig sidenhen.

Svind og svulning

Svind og svulning har navnlig relation til betonkonstruktioner; ved spændbetonkonstruktioner er det således af helt afgørende betydning, at disse påvirkninger tages i regning. Men også ved enhver anden betonkonstruktion må man træffe de nødvendige foranstaltninger til imødegåelse af disse påvirkningers eventuelle skadelige indflydelse.



Figur 10.07: Svind i mørtel og beton som funktion af cementindhold og vand-cement-forhold (iflg. litt. [1942.1])

Svindet er den volumenformindskelse, den afbundne beton får under udtørringen. Dets størrelse er afhængigt af mange forhold, først og fremmest betonens proportionering (jvf. figur 10.07), men også udtørringens intensitet og konstruktionselementernes dimensioner og form spiller en rolle.

Svindet foregår kraftigst de første par måneder, men er først afsluttet helt efter 1-2 års forløb. I første række søger man naturligvis at begrænse svindet mest muligt, hvilket for pladsstøbt beton sker ved at hindre for kraftig udtørring (vanding, afdækning m.m.) og for præfabrikerede bygningsdele ved lagring under passende fugtighed. Men selv under de gunstigst mulige lagringsforhold vil der være et vist svind fremover, af størrelsesordenen 0,3 - 0,5 %. Til udstøbning af smalle fuger mellem betonelementer må der normalt anvendes en ret tyndtflydende mørtel med stort svind, 1,0 - 1,2 %.

Konstruktivt kan svindproblemerne ofte klares ved at indlægge en vis armering, der ikke har til hensigt at hindre svindet, men derimod at sikre, at der ikke enkelte tilfældige steder opstår store synlige revner, men i stedet en mængde små - uskadelige - revner. En sådan revnefordelende "svindarmering", der naturligvis skal lægges tæt under konstruktionsdelens overflade, er ofte for dyr en løsning; i stedet kunne man acceptere, at de store revner kommer, og til gengæld sørge for, at de kommer, hvor man vil have dem, d.v.s. anordner en revneanvisning, altså en bevidst svækkelse af konstruktionsdelen på ganske bestemte steder, og efter svindets afslutning eventuelt foretager udbedring. Ved visse grove konstruktioner, f.eks. kældervægge, vil den billigste løsning ofte simpelthen være en udbedring af de tilfældige grove revner, der måtte opstå, forudsat naturligvis, at man kan tolerere den skæmmende virkning. Endelig kan problemet i visse tilfælde klares ved "afbrudt støbning", d.v.s. konstruktionen udstøbes i sektioner af passende størrelse, adskilt ved mindre områder, som først udstøbes, når svindet i de først udstøbte sektioner i alt væsentligt er overstået.

Ved meget lange bygninger vil svinddeformationerne kunne blive ganske anselige, således at det kan blive nødvendigt at anordne dilatationsfuger; disse må da føres hele vejen igen-

nem bygningen, hvilket selvfølgelig medfører en del konstruktive komplikationer. Det er ikke usædvanligt at undlade dilatationsfuger i bygninger af helt op til 150 meters længde, udført som montagebyggeri, dels på grund af elementernes beskædede restsvind, dels på grund af, at svindbevægelserne fordeles på et meget stort antal fuger.

Krybning og relaxation

Den plastiske tøjning, betonen i tidens løb får som følge af langvarig trykpåvirkning, bevirker for jernbetonkonstruktioner deformationer, der kan blive væsentlig større end de elastiske deformationer, hidrørende fra tilsvarende kortvarige belastninger. For statisk ubestemte konstruktioner vil krybningen altså bevirke en omlejring af snitkræfterne, og navnlig for spændbetonkonstruktioner vil betonens krybning - og stålets relaxation - øve indflydelse på styrkeforholdene.

Krybningen vokser med betonspændingen og med belastningens varighed og er jo større, jo yngre betonen er, når kræfterne påføres. Den kan derfor i nogen grad formindskes ved at opsætte påføringen af belastningen, til betonen har opnået en vis alder, således for pladsstøbt beton ved at vente længst muligt med afformningen.

For simple normalt dimensionerede husbygningskonstruktioner kan de plastiske deformationer tilnærmelsesvis ækvivaleres med elastiske, beregnet på grundlag af urevnet betontværsnit og en formel "elasticitetskoefficient" af størrelsesordenen $0,75 \cdot 10^5$ kp/cm².

Iøvrigt henvises til speciallitteraturen om disse fænomener.

Eksceptionelle belastninger

De eksceptionelle belastninger adskiller sig fra de normale derved, at de i påkommende tilfælde påregnes til dels at ødelægge konstruktionen, til hvilken der altså i sikkerhedsmæssig henseende ikke stilles andre krav, end at den lige netop yder tilstrækkelig beskyttelse af personer, herunder redningsmandskab, i katastrofesituationen.

Disse belastningers størrelse er det selvfølgelig ikke muligt at fastsætte på et præcist fysisk grundlag; hvoledes den energiudladning, der sker ved f.eks. en gasekspllosion, påvir-

ker konstruktionsdelene, er et problem, der unddrager sig beregning. Det er imidlertid klart, at sådanne eksplosioner kan forekomme, og at de bærende konstruktioner derfor må anordnes således, at der ikke kan udvikles en kædeproces, der giver ulykken en katastrofes omfang. Problemet eksisterer selvfølgelig i første række ved højt byggeri. Det sikreste er naturligvis at anordne de bærende konstruktioner således, at enhver bygningsdel skal kunne svigte totalt, uden at nedstyrtningen kan udbrede sig til andre etager end den, hvor eksplosionen er sket. Dette krav kan dog i visse tilfælde være vanskeligt eller umuligt at opfylde, og der må da i stedet stilles visse arbitrært bestemte krav til bygningsdelene og - navnlig - til samlingerne mellem dem. I tillæg 3 til BR 1966 er sådanne krav konkretiseret for visse former for boligbyggeri.

De bygningsdele, der omgiver beskyttelsesrum, må udover den normale belastning dimensioneres for de kræfter, der hidrører fra sammenstyrtningen af de overliggende bygningskonstruktioner. For sikringsrums vedkommende er sådanne belastningstal fastlagt i indenrigsministeriets "Bekendtgørelse af 16. april 1962 om udførelse af sikringsrum", hvortil der henvises.

Til de eksceptionelle belastninger hører endelig de særlige påvirkninger, en konstruktion kan blive udsat for under brand. Disse er behandlet særskilt i afsnit 10.4.

10.1.5. KONSTRUKTIONSELEMENTERNE

Anordning af de bærende konstruktioner

I det foregående er det fremhævet som et fundamentalt krav til enhver bærende konstruktion (såvel det bærende hovedsystem som de sekundære bærende konstruktioner), at systemet er rumligt stabilt; kvantitativt bestemmes kravene ud fra belastningsansættelserne, som beskrevet i artikel 10.1.4.

Når dette fundamentale princip er slået fast, er det for så vidt overflødigt at sige mere om, hvordan de bærende konstruktioner anordnes. Resten er alene et spørgsmål om at tænke konstruktivt, altså i første række beroende på talent og fantasi. Naturligvis er det ikke uden værdi at studere, hvordan andre har grebet problemerne an i tilsvarende situationer (det er nødvendigt alene for at skaffe sig et erfaringsgrundlag for at bedømme den økonomiske side af sagen), men det skal understreges, at sådanne kendte løsninger (søjle/bjælkesystemer, rammesystemer, skive/dæk-systemer etc.) aldrig bør anskues som forbilleder, men højst som inspiration til udvikling af nye ideer. Principielt bør den enkelte husbygningkonstruktion behandles helt fordomsfrit ud fra sine specielle forudsætninger.

Inden for det samlede bærende system kan de enkelte konstruktionsdele meget vel have flere statiske funktioner (foruden andre funktioner) at varetage, alt efter hvordan de indgår i det bærende hovedsystem. I det følgende skal der gives nogle eksempler herpå.

Konstruktionselementernes statiske virkemåde

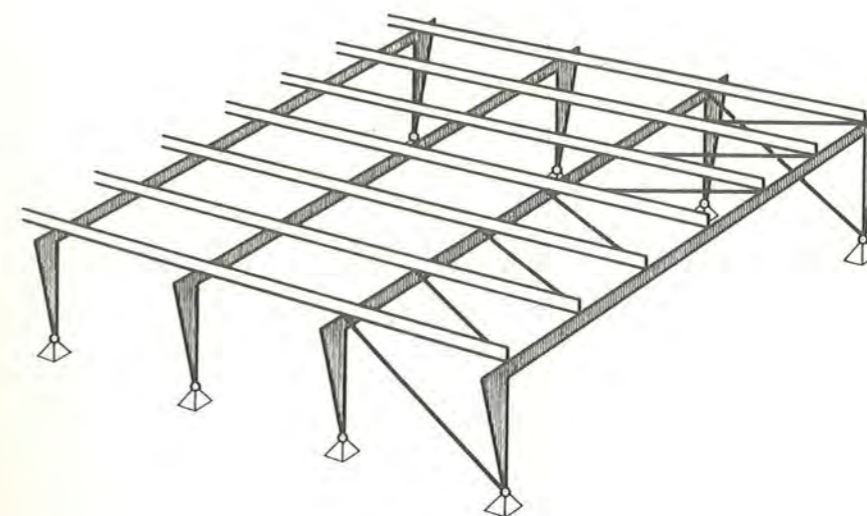
Enhver bygningskonstruktion er opbygget af en række bærende komponenter; disse kan inddeles i

træk- og trykstænger
tove
bjælker
buer
plader
skiver
skaller.

Med disse betegnelser refereres til den statiske funktion og ikke til konstruktionsdelens geometriske form eller dens placering i bygværket. En vægkonstruktion vil således dels virke som søjle (for lodrette kræfter i væggen plan), dels som skive (for vandrette kræfter i væggen plan) og dels som plade (kræfter vinkelret på væggen). En bygningsdel kan således i virkeligheden sjældent karakteriseres som en af de nævnte komponenter; hvad den skal benævnes, afhænger af de belastninger, man ser den i relation til.

Det vil umiddelbart forstås (jvf. artikel 10.1.3.), at det for en praktisk forekommende konstruktion - selv den simplest tænkelige - ikke er muligt under ét at give en fuldstændig formulering af dens statiske egenskaber. Beskrivelsen af konstruktionernes virkemåde må ske på den måde, at man først klarlægger, hvilke belastninger det er relevant at undersøge konstruktionen for, og dernæst følger disse påvirkningers forløb gennem konstruktionen; under dette forløb kan en konstruktionsdel meget vel komme til at varetage flere funktioner, d.v.s. på forskellig vis indgå som bærende led i flere delsystemer, der varetager hver sin bærende funktion. Et eksempel vil illustrere dette forhold.

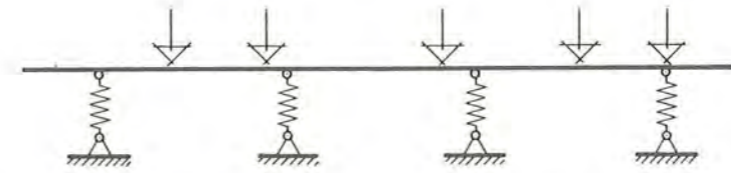
På figur 10.08 er vist en skeletbygning, opbygget af en række ens rammer, indbyrdes forbundne med åse. I det yderste fag ved gavlen er indlagt diagonaler i de rektangulære felter,



der dannes af åsene og rammernes overliggere. Systemet skal kunne optage kræfter af vilkårlig retning angribende i vilkårlige punkter af åse eller rammer.

Figur 10.08: Skeletbygning, statisk system

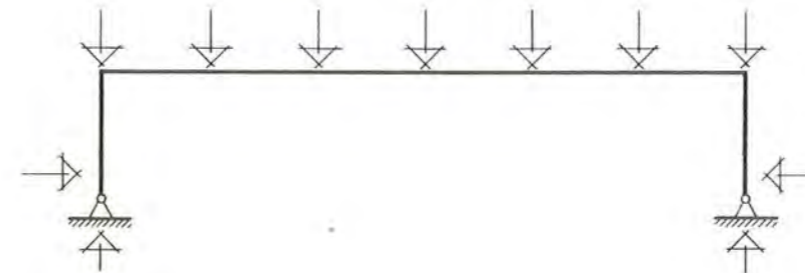
Lodrette kræfter optages ved bøjende moment (vandret vektor) og lodret forskydningskraft i åsene, der regnes kontinuerlige (se figur 10.09)



Figur 10.09: Mekanisk model af åse

og understøttet elastisk på rammerne, som derved påvirkes af vederlagskræfterne fra åsene.

For disse belastninger kan rammerne betragtes som plane konstruktioner (1 gang statisk ubestemte), som er i stand til at føre belastningen til de faste vederlagspunkter (se figur 10.10).



Figur 10.10: Mekanisk model af rammer

I rammerne optræder overalt 3 snitkræfter, normalkraft, forskydningskraft og bøjende moment. Vandrette kræfter vinkelret på åsene optages af disse ved bøjende moment (lodret vektor) og vandret forskydningskraft. Åsenes reaktioner påvirker rammerne i deres plan som vandrette kræfter, der optages på samme måde i rammerne som de lodrette, altså ved normalkraft, forskydningskraft og bøjende moment.

Vandrette kræfter i åsenes retning føres, såfremt de angriber f.eks. rammen i gavlen, gennem bøjning af rammens overligger (lodret bøjningsvektor), der her virker som en vandret kontinuerlig bjælke, der er understøttet i knudepunkterne af den vandrette gitterdrager, der udgøres af yderste og næstyderste rammes overliggere (flanger), åsene (vertikaler) og de omtalte diagonaler. Fra disse knudepunkter føres kræfterne gennem gitterkonstruktionen ud til bygningens facader, hvor de bevirker en vandret kraft i næstyderste rammes to hjørner. Disse to vandrette reaktionskræfter optages af det stangsystem i hver facade, som udgøres af næstyderste rammes ben og de viste diagonaler i yderste facadefelt. Begge disse stænger (rammeben og diagonal) får herunder en normalkraft.

Rammernes overliggere har således tre funktioner: De indgår i de plane rammekonstruktioner, der optager belastningerne i rammernes plan. Dernæst overfører de vandrette kræfter vinkelret på planen til det vandrette gitter, og endelig indgår de i dette som gitterstænger. Tilsvarende har rammebenene tre statiske funktioner. Åsene optager vandrette og lodrette kræfter ved bøjning og indgår yderligere som vertikaler i den vandrette gitterdrager.

Det må her tilføjes, at man naturligvis nøje må vurdere, i hvilket omfang man ved den beregningsmæssige behandling kan addere de enkelte spændingsbidrag hidrørende fra de forskellige funktioner, bygningsdelene varetager, eller med andre ord: man kan ikke ukritisk forudsætte superpositionslovens gyldighed. Dette vil ved konstruktionsdele med stor slankhed eller ved jernbetonkonstruktioner kunne føre til helt fejlagtige konklusioner.

Dimensionering

I det viste eksempel (figur 10.08) er hovedkonstruktionen udelukkende opbygget af simple, stangformede elementer.

Dimensionering og spændingsberegning af sådanne elementer frembyder forsåvidt kun elementære problemer. De beregningsmæssige problemer af sådanne konstruktioner ligger i samlingerne og i en formulering af konstruktionens statiske virkemåde, som på den ene side er så tilpas forenklet, at den overhovedet kan gøres til genstand for beregning, og på den anden side tegner et så realistisk billede af de virkelige forhold, at den kan danne et rimeligt grundlag for bestemmelsen af snitkræfterne. Som det fremgår af det foregående eksempel, må man ved selv ganske simple konstruktioner foretage ret store forenklinger for at kunne behandle konstruktionerne beregningsmæssigt.

Imidlertid er det som nævnt ved de i praksis forekommende husbygningskonstruktioner sjældent, at man kan karakterisere systemerne alene ved sådanne simple komponenter, som er benyttet i det foregående. Oftest vil der indgå plader eller skiver - eller skaller - i det bærende system. Det vil således forstås, at man i almindelighed - for overhovedet ad beregningsmæssig vej at kunne skaffe sig sikkerhed for, at kon-

struktionen er brugelig - må betragte systemet i en overordentlig forenklet form. Det vil oftest være umuligt - og forøvrigt også formålsløst - at skaffe sig andet end groft tilnærmede talmæssige udtryk for, hvad der sker i konstruktionen som helhed. Man bør her stedse have for øje, at de statiske beregninger aldrig har nogen værdi i sig selv, men blot er et middel for konstruktøren til at verificere, at den konstruktive udformning - dimensioner og materialer - der gives bygværket og dets enkelte dele, frembyder den fornødne sikkerhed - såvel styrkemæssigt som stivhedsmæssigt.

Fremfor at optegne et fuldstændigt billede af, hvad der sker overalt i konstruktionen, må man oplede de punkter, der er kritiske - i den forstand, at hvis en beregning her udviser den fornødne sikkerhed, kan man umiddelbart slutte, at konstruktionen som helhed er i orden. Efter sådanne indledende overvejelser, som oftest sker på et yderst simplificeret grundlag, kan man så koncentrere de nøjagtigere beregninger om de - ofte få - steder, en sådan beregning er påkrævet.

Selv om det mange gange er helt andre funktionskrav end de statiske - f.eks. produktionstekniske, akustiske eller brandtekniske - som er bestemmende for en konstruktions eller en konstruktionsdels udformning, er det naturligvis ofte ønskeligt af både æstetiske og økonomiske grunde - især ved større konstruktioner - at komme så nær en optimal udnyttelse af konstruktionsmaterialerne som muligt. Ved meget simple konstruktionsdele kan man ligefrem gennem beregningen eksplicit udtrykke kravene til dimensionerne. Ved dimensioneringen af f.eks. et simpelt understøttet gulvbjælkelag kan man ud fra belastningen udtrykke det maksimale moment, som sammen med den tilladelige spænding giver det nødvendige modstandsmoment. Af de forhåndenværende gangbare dimensioner kan man så vælge den, der er billigst. Men selv i dette tilfælde - som er det simplest tænkelige - må man for at kunne fastsætte belastningen jugere en omtrentlig egenvægt af bjælkerne - og altså på forhånd danne sig et groft skøn over dimensionerne.

Eksemplet antyder fremgangsmåden ved dimensioneringen, hvis denne skal ske på grundlag af de statiske funktionskrav. Indledningsvis forudsætter man en statisk virkemåde og vælger

konstruktionsmaterialet; dernæst foretager man et groft skøn over dimensionerne for at kunne danne sig et begreb om størrelsesordenen af konstruktionens egenvægt. På grundlag heraf og de øvrige belastninger verificerer man ved simple og stærkt forenkede beregninger, om det overhovedet er realistisk at fortsætte på det valgte grundlag, eller om man allerede straks skal korrigere de skønnede dimensioner. På denne måde ledes man gradvist frem mod de endelige dimensioner under anvendelse af et stadigt mere forfinet beregningsapparat. Naturligvis må man undervejs til stadighed være opmærksom på både styrke- og stivhedsproblemerne. Ofte vil man under processen finde anledning til at foretage større eller mindre korrektioner af det først valgte statiske system, da det godt kan være vanskeligt på forhånd at overskue et systems problemer og muligheder.

Endelig skal det bemærkes, at de bærende konstruktioner kan være udformet så kompliceret, at en beregningsmæssig godtgørelse af deres brugelighed ikke er mulig; i sådanne tilfælde kan beregningerne suppleres med eller helt erstattes af modelforsøg eller andre laboratorieundersøgelser.

10.1.6. EKSEMPEL: 6-ETAGERS KONTORBYGNING

På figur 10.11 er skematisk vist den principielle anordning af de bærende konstruktioner i en 6-etagers kontorbygning, udført som montagebyggeri. Pr. 6 meter i bygningens længderetning er der anordnet en plan hovedkonstruktion, der i hver etage består af to 2-charniers-rammer over 6 meter, indbyrdes forbundne med en bjælke over midterkorridoren af 3 meters spænd. Alle samlingerne mellem elementerne er uden bøjningsstivhed. Dækkene (incl. taget) er TT-dækelementer af 6 meters længde, simpelt understøttede på hovedkonstruktionerne. Facaderne og gavlene er foroven ophængt i dækkene, forneden simpelt, bevægeligt understøttet sideværts på dækkene. Bygningens længdeværts stabilitet er tilvejebragt ved to langsgående trapperumsvægge af 6 meters længde i hver ende af bygningen.

Statisk systemDækkonstruktion

Lodrette kræfter:

figur 10.12 A

Kræfter \perp facade:

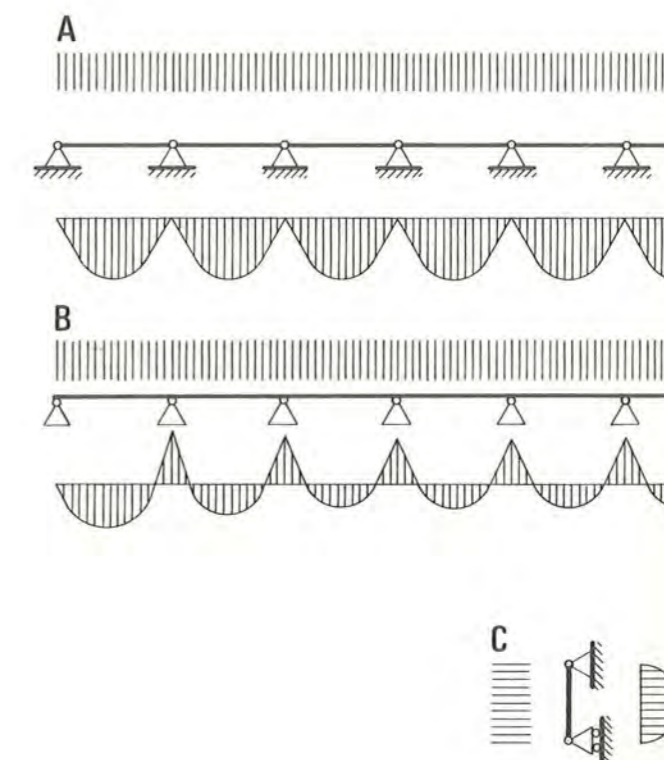
figur 10.12 B

Kræfter \perp gavl:

figur 10.12 C

Facade og gavl

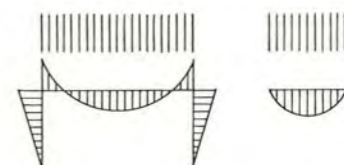
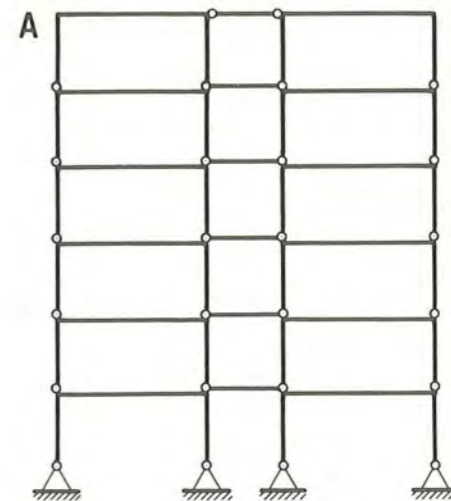
figur 10.12 C



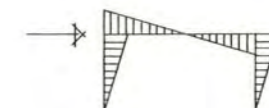
Figur 10.12: Statisk system for dæk, facade og gavl

Hovedkonstruktion

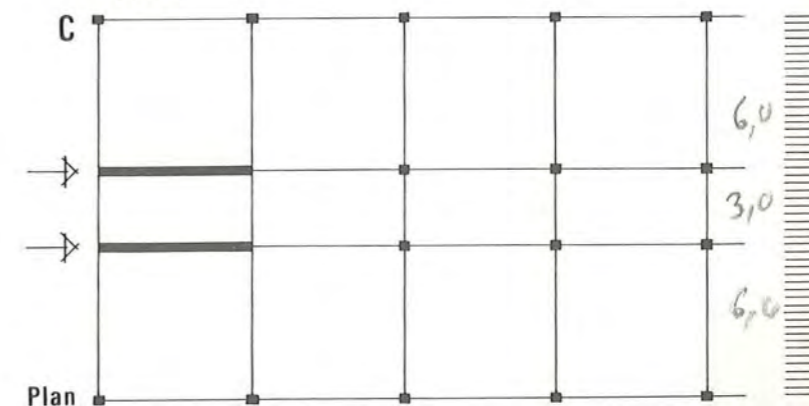
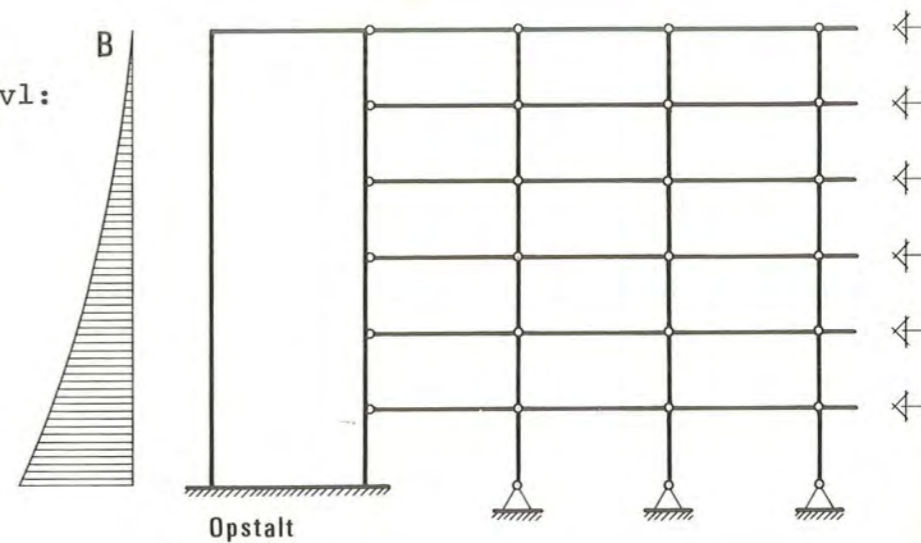
Lodrette kræfter:
figur 10.13 A



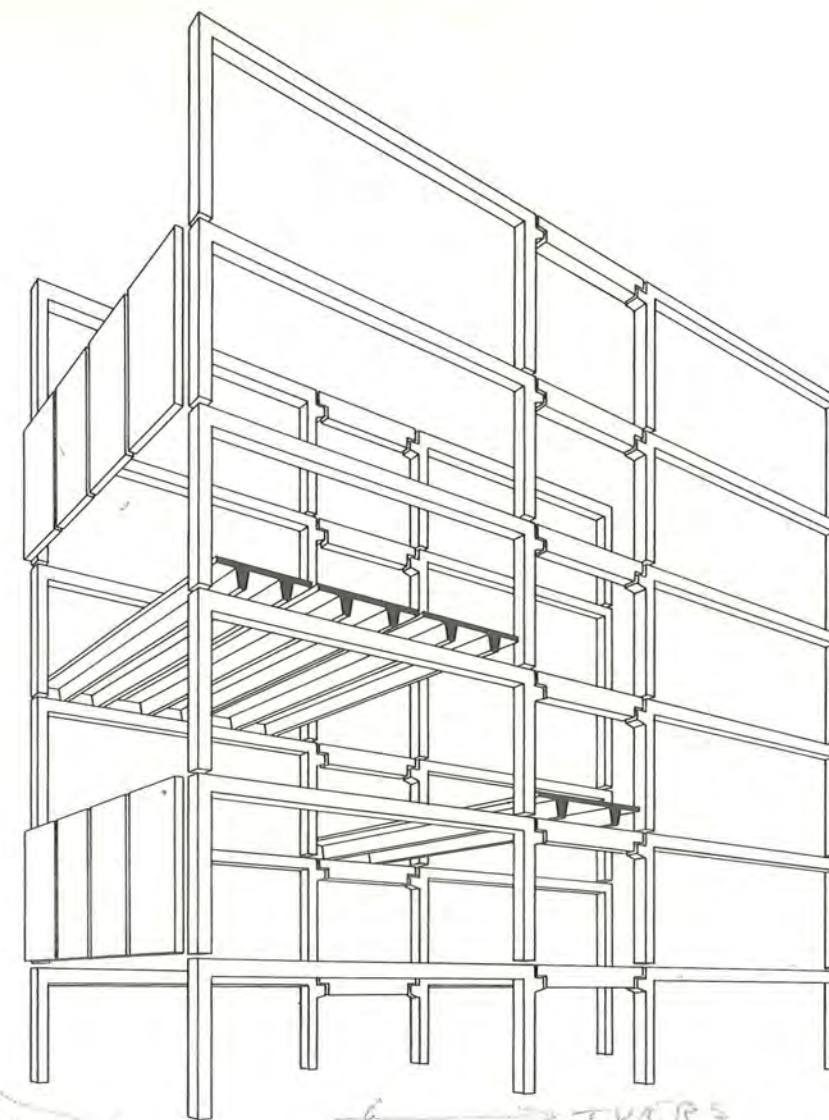
Kræfter \perp facade:
figur 10.13 A



Kræfter \perp gavl:
figur 10.13
B og C



Figur 10.13: Statisk system for hovedkonstruktion



Figur 10.11: Konstruktionsprincip, 6-etagers kontorbygning

Belastninger

Hvilende belastning på dæk (incl. disses egenvægt) føres gennem systemet figur 10.12 A til understøtningerne, som udgøres af rammekonstruktionerne, der som plane konstruktioner (figur 10.13 A) fører dæklasten samt rammernes egenvægt til fundamentene og derfra til jorden.

Nyttelast på dæk samt snebelastning på taget føres på samme måde som den hvilende belastning til jorden.

Vindbelastning \perp facaderne føres af disse (figur 10.13 C) til dækkene, der som kontinuerlige bjælker (eller skiver) fører vindlasten til hovedrammerne, der som plane konstruktioner (figur 10.13 A) fører lasten til fundamentene. Vindbelastning \perp gavlene (subsidiært massekraften) føres på tilsvarende

måde til dækkene, der som sammenhængende skivekonstruktioner (figur 10.13 C) fører lasten til de længdeværts afstivende trappevægge; disse er indspændte i fundamenterne, hvortil belastningen føres gennem bøjningspåvirkning (figur 10.13 B). Vindsug på taget optages på samme måde som - og overlejres iøvrigt af - den hvilende belastning.

Jordtryksbelastning og dynamisk belastning forekommer ikke.

Temperaturvariationer tages ikke i regning for hovedkonstruktionens vedkommende, idet denne forudsættes varmeisoleret fra det ydre klima, således at temperaturen kan regnes meget nær konstant. For facadekonstruktionens vedkommende elimineres temperaturvariationernes statiske indflydelse ved, at de er delt op i etagehøje elementer á 6 meters længde, indbyrdes adskilt ved fuger, hvori de - meget små - forskydninger kan foregå.

Svindpåvirkninger er uden betydning for de udvendige konstruktionsdele, facaderne, der kan dilatere frit. For de indre konstruktionsdele vil først og fremmest de store sammenhængende dæskivers svind bevirke dels kræfter i rammernes plan (figur 10.13 A), dels kræfter i bygningens længderetning, hvorved de længdeværts afstivende vægge (figur 10.13 B) får ikke ubetydelige påvirkninger, afhængigt af bygningens længde.

Krybning i dækelementernes og rammernes beton bevirker langtidsdeformationer af disse, hvilket er uden betydning for konstruktionens styrkeforhold; men der må naturligvis tages hensyn hertil ved de ikke-bærende konstruktionsdeles (f.eks. lette skillevægges) tilslutning til de bærende.

10.2. AKUSTISKE FUNKTIONSKRAV

10.2.1. AKUSTISKE FUNKTIONER

I de akustiske funktionskrav formuleres de fordringer til bygningers og bygningsdeles lydtekniske egenskaber, som er nødvendige for at tilvejebringe tilfredsstillende lydæssige - akustiske - forhold i en bygnings rum. Den gren af bygningsfysikken, der behandler disse spørgsmål, benævnes bygningsakustikken (af græsk: akuein = at høre), og den kan i henseende til problemets løsning inddeles i

Lydisolering

Rumakustik.

I lydisoleringsteknikken behandles problemerne med at begrænse lydens udbredelse til og fra det enkelte rum i bygningen, medens rumakustikken beskæftiger sig med lydregulering og lyd-dæmpning, altså problemerne med at regulere lydforholdene inden for det enkelte rum. De to problemkomplekser er selvfølgelig ikke uden en vis sammenhæng.

Hvad der forstås ved tilfredsstillende akustiske forhold, er naturligvis et subjektivt spørgsmål. Det er velkendt, at menneskers følsomhed overfor støj er uhyre forskellig, langt mere forskellig end følsomheden overfor f.eks. temperaturforholdene. Men også for det enkelte menneske er følsomheden overfor lydforholdene overordentlig variabel, alt efter situationen. Befinder man sig f.eks. i en flyvemaskine, vil man meget hurtigt vænne sig til det meget betydelige støjniveau, medens det for de fleste mennesker vil være overordentlig generende, hvis man fra sit soveværelse kan høre en vandhanes dryppen. Opholder man sig i en kirke, vil man føle rummets akustik helt naturlig på dette sted, men man ville finde det utåleligt, hvis man havde tilsvarende akustik i sit studereværelse.

Disse omstændigheder gør det naturligvis vanskeligt at formulere kvantitativt, hvad man skal forstå ved tilfredsstillende akustiske forhold. Disse må karakteriseres ved to forhold, for det første støjniveauet, for det andet de egenskaber, der kan sammenfattes i rummets lydfordeling, diffusitet og efterklangtid.

Hvad det første forhold, støjniveauet, angår, må man definere støj som enhver lyd, der er uønsket i den givne situation. Hvorvidt støjen er generende, afhænger som nævnt i første række af det pågældende menneskes følsomhed (visse mennesker er så at sige ufølsomme overfor selv store støjpåvirkninger) og af den situation, hvori støjen forekommer. Men også forhold som støjens sammensætning, varighed, pludselighed og hyppighed er væsentlige i den forbindelse, ligesom helt psykiske forhold spiller en stor rolle (naboens børn støjer altid mere end ens egne børn). Under alle omstændigheder må støj betragtes som noget, der kan have en overordentlig skadelig indflydelse på mennesker, enten som rent fysiologiske lidelser (akut eller kronisk støjtraume) eller som psykiske lidelser. De fysiologiske skader lader sig påvise gennem audiometriske målinger og kan derfor i princippet forebygges gennem passende foranstaltninger (støjdæmpning og ørebeskyttelse), medens de psykiske skadevirkninger er af væsentlig mere subjektiv karakter og derfor langt vanskeligere at gardere sig imod. Ud fra et hygiejnisk synspunkt kan der altså ikke herske tvivl om nødvendigheden af at reducere støjen mest muligt, mest naturligvis i boliger og arbejdsrum. En reduktion af støjniveauet kan for det første ske ved at dæmpe den direkte støj, altså støj, der opstår i selve det betragtede rum, for det andet ved at nedsætte den støj, der udefra trænger ind i rummet. Det første er et rumakustisk problem (lyddæmpning), det andet et lydisoleringsproblem.

Det andet forhold, som karakteriserer et rums akustiske egenskaber, angår de vilkår, der hersker i rummet, med hensyn til opfattelsen af lydindtryk ("ønskede lyde" i modsætning til førnævnte "uønskede", støj). Disse vilkår påvirkes gennem lydregulering, der har til formål at skabe en såkaldt "god akustik" svarende til rummets formål, sang, tale, musik m.m. Gennem lydregulering tilvejebringes jævn lydfordeling, passende diffusitet (lydspredning) og en passende efterklangstid. Disse problemer er altså så at sige interne (angår kun selve rummet) og har således intet med lydisoleringsteknikken at gøre, udover naturligvis, at en forudsætning for, at man har nogen gavn af en god rumakustik, må være, at lydopfattelsen ikke forstyrres af støj udefra.

10.2.2. LYDLydbølger

Ved lyd forstås den hørlige udbredelse af mekaniske svingninger i et medium, det være sig luftformige, flydende eller faste stoffer, altså svingninger inden for det hørlige frekvensområde, ca. 20 - 20.000 svingninger pr sekund; svingninger med lavere eller højere frekvenser (henholdsvis infralyd og ultralyd) behandles ikke i bygningsakustikken, og det er endda kun en mindre del af det hørlige område, der i praksis arbejdes med (jvf. artikel 10.2.3.).

Ved den fysiske behandling af bygningsakustiske problemer betragtes udelukkende lydbølger i luft; ganske vist udbreder visse lyde sig også gennem bygningsdelene (installationslyd, bankelyd etc., under eet benævnt bygningslyd), men da disse forhold kun kan behandles empirisk, og da det naturligvis kun er lyde, der når det menneskelige øre (altså i sidste instans kun luftlyd), der har interesse i en bygningsakustisk sammenhæng, forudsættes det i det følgende, at der er tale om lydbølger i luft.

Lydens udbredelse i luften er som bekendt betinget af dennes kompressibilitet; et luftmolekyle, der er forskudt fra sin ligevægtsstilling, vil på grund af trykændringen være påvirket af elastiske kræfter, der tvinger det tilbage. Betragtes et luftmolekyle, der ligger i afstanden x fra en plan lyd giver, f.eks. en svingende membran, vil det ligesom membranen udføre svingninger omkring sin ligevægtsstilling. Under idealiserede forhold kan bevægelsestilstanden karakteriseres ved differentialligningen

$$\frac{\delta^2 s}{\delta t^2} = \frac{1}{\rho_0 C} \frac{\delta^2 s}{\delta x^2},$$

*Smlg.
P. M. Prandtl
Elasticitetsteori
1946, s. 312*

hvor s er molekylets afstand fra ligevægtsstillingen,

t er tiden

ρ_0 er luftens massefylde

C er luftens adiabatiske kompressibilitet.

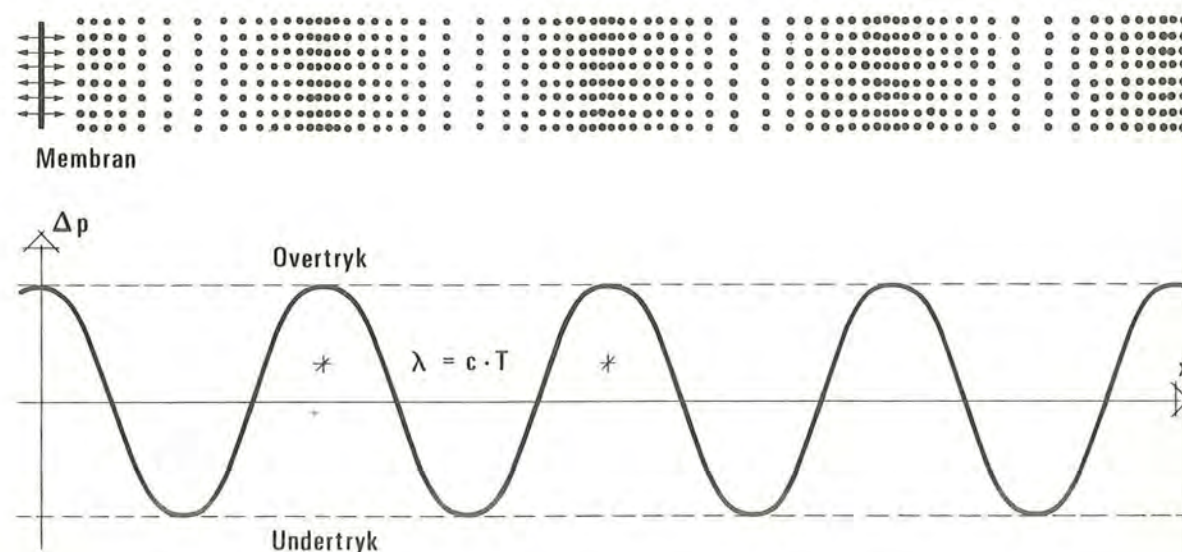
Svinger membranen harmonisk med frekvensen f og amplituden a

($s_{(x=0)} = a \cdot \sin 2\pi f t$), er løsningen

$$s(x, t) = a \cdot \sin 2\pi f \cdot (t - x \cdot \sqrt{\rho_0 C})$$

Et bestemt luftmolekyle ($x = \text{konstant}$) vil altså svinge harmonisk om sin ligevægtsstilling på samme måde som membranen, blot tidsforskudt ($\Delta t = -x \cdot \sqrt{\rho_0 \cdot C}$) i forhold til denne, d.v.s. lydbølgen bevæger sig fremad med hastigheden $c = 1/\sqrt{\rho_0 \cdot C}$ i x -aksens retning. I løbet af 1 periode ($T = 1/f$) er bølgefronten forskudt $c \cdot T = \lambda = \text{bølgelængden}$.

Betragtes et øjebliksbillede af membranen (figur 10.14), vil



Figur 10.14: Et lydfelts udbredelse

luften umiddelbart op ad denne ($x=0$) følge dens bevægelse og altså i det her betragtede øjeblik være i sin ligevægtsstilling og med maksimalhastighed, $2\pi af$ mod højre; det samme vil være tilfældet med ethvert luftmolekyle i afstanden $n \cdot \lambda$ fra membranen (n er et helt tal); i alle disse punkter vil der herske overtryk. På tilsvarende måde vil et luftmolekyle i afstanden $\frac{1}{2}\lambda$ fra membranen ligeledes være i ligevægtsstillingen, men med minimal hastighed, $-2\pi af$, svarende til et undertryk. Bølgebevægelsen er altså en række skiftevis fortætninger og fortyndinger, der bevæger sig fremad med hastigheden $c = 1/\sqrt{\rho_0 \cdot C}$. Da luftens kompressibilitet er omvendt proportional med dens absolutte temperatur, er hastigheden altså også afhængig af denne. Inden for det temperaturområde, der arbejdes med ved bygningsakustiske opgaver, er variationen dog så ringe, at c kan regnes konstant = 340 m/sek.

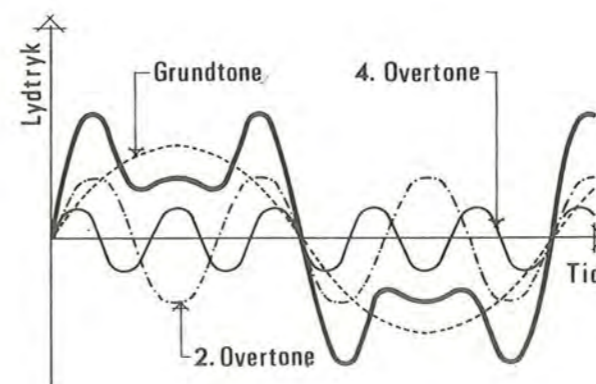
For en plan, fremadskridende bølge fås trykvariationernes

størrelse af

$$\Delta p = -1/C \cdot \frac{\delta s}{\delta x} = \frac{\sqrt{\rho_0 \cdot C}}{C} \cdot \frac{\delta s}{\delta t} = \frac{1}{C \cdot c} \cdot u = \rho_0 \cdot c \cdot u$$

Periodiske lyde

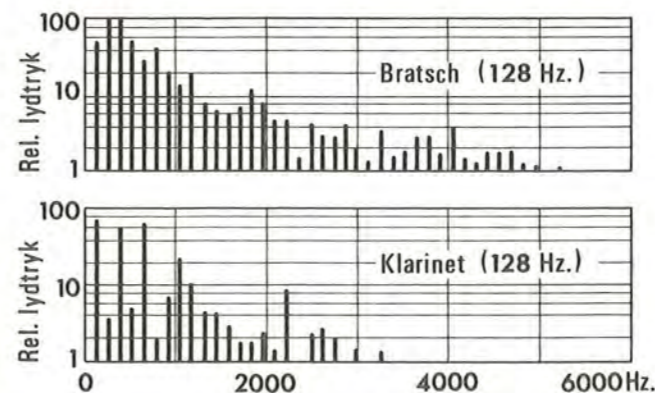
En lyd giver, der svinger harmonisk, frembringer en ren tone, d.v.s. en tone, der er karakteriseret ved en bestemt frekvens. Sådanne lyde forekommer i praksis kun, når de frem-



Figur 10.15: Periodisk svingning opløst i harmoniske svingninger

figur 10.15.

Stryges tonen C (128 Hz) på en bratsch, vil der udover grundtonen være overtoner med varierende amplituder, således som



Figur 10.16: Spektrogrammer for tonen C (128 Hz)

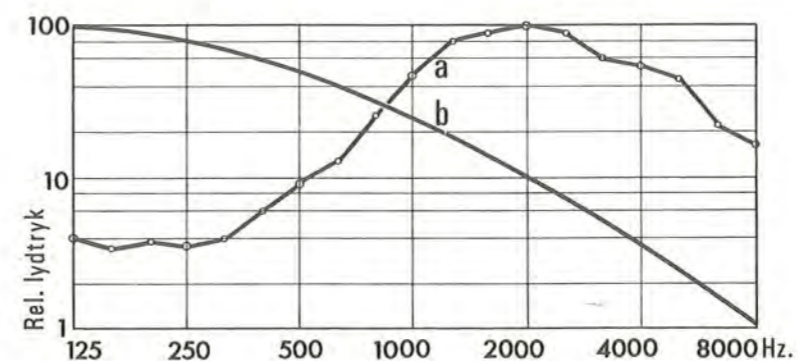
bringes af en tonegenerator. En tone, der frembringes af et musikinstrument, vil udover grundtonen, der er den dominerende, indeholde en række andre toner, hvis frekvenser er hele multipla af grundtonens, og derfor vil være periodisk med perioden = grundtonens svingningstid; omvendt kan enhver periodisk lyd opløses i en grundtone (1. harmoniske) og en række overtoner (2., 3., harmoniske), jvf.

det fremgår af figur 10.16, der viser spektrogrammet for denne tone; amplituderne er afsat i logaritmisk målestok. På samme figur er vist spektrogrammet for den samme tone, blæst på en klarinet. Den store forskel i de to instrumenters klangfarve beror netop på forskellene i overtonerne.

Ikke-periodiske lyde

Det er imidlertid de færreste af de lyde, man udsættes for i det daglige liv, der er periodiske. De lyde, hvoraf støj er sammensat, varierer bestandig i styrke og frekvens og kan derfor ikke på samme måde som de rene toner karakteriseres ved et spektrogram. Det er imidlertid af afgørende betydning for at kunne foretage effektive akustiske foranstaltninger, at man kan skaffe sig et udtryk for støjens frekvensmæssige sammensætning. Et sådant får man ved at foretage en statistisk analyse af støjens frekvenser; i stedet for at måle lydets styrke ved bestemte frekvenser måler man den gennemsnitlige styrke inden for frekvensbånd af passende bredde, almindeligvis 1/3 oktav (jvf. artikel 10.2.3.), således at styrken inden for de enkelte delområder kan regnes nogenlunde konstant med tiden, forudsat naturligvis der er tale om en nogenlunde stationær støj.

En støj, der har samme styrke inden for alle delområder, benævnes "hvid støj" (sml. "hvidt lys"); tilsvarende kunne man tale om "lyserød støj", hvor de lavere frekvenser er mere dominerende end de højere. Almindeligt forekommende støj er dog



Figur 10.17: Spektrogrammer af fabriksstøj (a) og gadestøj (b)

oftest mere varieret sammensat end hvid og lyserød støj. Spektrogrammet på figur 10.17 (kurve a) viser eksempelvis den relative styrke inden for 1/3-oktav-båndene af støjen i et fabrikslokale. Der er her tale om ret højfrekvent støj (høj og hvinende støj); i andre virksomheder kan maksimum ligge ved væsentlig lavere frekvenser, f.eks. 200 Hz (dyb og buldrende støj). For gadestøj ligger de største styrker ved ca. 100 Hz, og styrken aftager jævnt med frekvensen (kurve b på figur 10.17).

oftest mere varieret sammensat end hvid og lyserød støj. Spektrogrammet på figur 10.17 (kurve a) viser eksempelvis den relative styrke inden for 1/3-oktav-båndene af støjen i et fabrikslokale. Der er her tale om ret

10.2.3. FYSISKE GRUNDBEGREBER

Frekvens

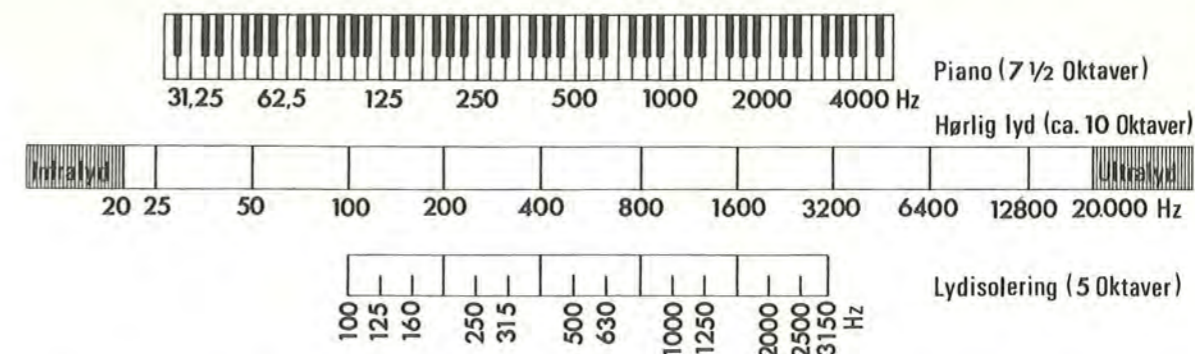
Det normale menneskelige øre er i stand til at opfatte lyde af frekvenser fra ca. 20 Hz til ca. 20.000 Hz, svarende til et område på 10 oktaver ($20 \cdot 2^{10} \sim 20.000$); det er som nævnt kun en del af dette område, der er af praktisk betydning i bygningsakustikken. Ved lydmålinger arbejdes der i henhold til international standard (ISO rekommendation R 140) med frekvensbånd af 1/3 oktavs bredde, altså hver især begrænset af frekvensen f_1 og f_2 , hvor $f_1 = \sqrt[3]{2} \cdot f_2 = \sim 1,25 \cdot f_2$. Delområdet karakteriseres ved middelfrekvensen $f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$, og de standardiserede middelfrekvenser er

100 Hz
 125 Hz
 160 Hz
 200 Hz
 250 Hz
 315 Hz
 400 Hz
 500 Hz
 630 Hz
 800 Hz
 1000 Hz
 1250 Hz
 1600 Hz
 2000 Hz
 2500 Hz
 3150 Hz,

altså ialt 16 standardfrekvenser, dækkende et område på ca. 5 oktaver ($3150/100 \sim 2^5$).

Figur 10.18 viser måleområdet placering i forhold til hele det hørlige område og til klaverets frekvensområde.

Ved visse rumakustiske målinger arbejdes ofte med frekvenser højere end 3150 Hz (jvf. artikel 10.2.7.).



Figur 10.18: Frekvensområder

Lydtryk

Som udtryk for lydets fysiske styrke måles lydtrykket, d.v.s. de variationer i lufttrykket, som skyldes de af lyd giveren frembragte pulserende fortætninger og fortyndinger. For en ren tone varierer lydtrykket (kort p i stedet for Δp) harmonisk, og dets ekstremale størrelser er $p = \pm \rho_0 \cdot c \cdot u = \pm \rho_0 \cdot c \cdot 2\pi f \cdot a$, hvor a er amplituden. For ikke-harmoniske lyde giver maksimalværdien ikke noget rimeligt udtryk for lydets styrke; i stedet benyttes det "effektive" lydtryk, defineret for periodiske lyde ved

$$p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2 dt;$$

for en harmonisk lyd er således $p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{2} \cdot p_{\text{max}}^2$.

Af udtrykket for p vil det umiddelbart ses, at trykvariationerne er uhyre små i sammenligning med det atmosfæriske tryk, som de overlejrer. Almindelig tale giver således anledning til lydtryk, der ikke er mere end ca. 10^{-6} atmosfærens tryk. Som måleenhed anvendes $1 \mu\text{bar} = 1 \text{ dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2 = 10^{-6} \text{ kp/cm}^2$. Hørlige lyde bevirker lydtryk fra ca. $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$ (den svageste hørlige lyd) til ca. $200 \mu\text{bar}$ (smertegrænsen). Forholdet mellem lydtrykket for den stærkeste og den svageste lyd er altså ca. 10^6 , et overordentligt stort måleområde, hvor det både instrumentteknisk og afbildningsmæssigt ville være ubekvemt at angive lydtrykket i aritmetisk målestok.

Af denne grund benyttes i stedet for en aritmetisk skala en logaritmisk, idet man som mål for lydtrykket f.eks. kunne an-

give 10-tals-logaritmen af lydtrykket i forhold til en referenceværdi. Enheden for den logaritmiske skala er 1 Bel = $\log 10$. Nu har man imidlertid af praktiske grunde defineret lydtrykniveauet som et udtryk for lydenergien, der er proportional med anden potens af lydtrykket (jvf. det følgende), hvorved lydtrykniveauet altså defineres

$$L = \log\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \text{ Bel} = 2 \cdot \log\frac{P}{P_0} \text{ Bel} = 20 \cdot \log\frac{P}{P_0} \text{ dB}$$

som referenceværdi p_0 har man internationalt sat $2 \cdot 10^{-4}$ μbar som det svageste hørlige.

Denne angivelse af lydtrykniveauet stemmer desuden fortrinligt med det menneskelige øres opfattelse af lydets styrke. En bestemt ændring i lydtrykket vil opfattes langt kraftigere ved små lydtryk end ved store lydtryk; det er med andre ord trykændringerne i forhold til det herskende lydtryk, øret især opfatter, og i mindre grad de absolutte trykændringer.

Mellem lydtrykket og lydtrykniveauet er der herefter følgende sammenhæng:

$p = p_0$	$= 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{b}$	0 dB	(over $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{b}$)
$p = 2p_0$	$= 4 \cdot 10^{-4} \mu\text{b}$	6 dB	"
$p = 10p_0$	$= 2 \cdot 10^{-3} \mu\text{b}$	20 dB	"
$p = 100 p_0$	$= 2 \cdot 10^{-2} \mu\text{b}$	40 dB	"
$p = 5000 p_0$	$= 1 \mu\text{b}$	74 dB	"
$p = 10^6 p_0$	$= 200 \mu\text{b}$	120 dB	"

En ændring på 1 dB er lige netop hørlig, en ændring på 3 dB er tydelig, mens en ændring på 6 dB opfattes som en kraftig ændring, og den svarer da også til en fordobling af lydtrykket idet

$$20 \cdot \log\frac{2p}{p} = 20 \cdot \log 2 = 6 \text{ dB}$$

Lydenergi

Betragtes den for en plan, fremadskridende, harmonisk bølge udledte ligning for flytningen s af partiklen x til tiden t

$$s(x,t) = a \cdot \sin 2\pi f \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

fås den energi, der pr. tidsenhed overføres gennem en arealenhed, som produktet af partikelhastigheden $u(x,t)$ og tryk-

ændringen $p(x,t)$, altså

$$I_{(x,t)} = \frac{\delta s}{\delta t} \cdot (-1/c \cdot \frac{\delta s}{\delta x}) = a \cdot 2\pi f \cdot (-1/c) \cdot a \cdot (\frac{2\pi f}{-c}) \cos^2 2\pi f \cdot (t-x/c)$$

Idet lydintensiteten i en given retning defineres som middelfeffekten over 1 periode pr. arealenhed fås ved integration over en hel periode, $T = \frac{1}{f}$,

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T I_{(x,t)} \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot 2\pi f \cdot \frac{2\pi f \cdot c}{c} = \frac{1}{2} p_{\max}^2 \cdot \frac{1}{c \cdot \rho_0}$$

For en periodisk bølge (ikke nødvendigvis harmonisk) gælder tilsvarende

$$I = p_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{1}{c \cdot \rho_0}$$

I stedet for at regne med I benytter man intensitetsniveauet I_N , defineret som

$$I_N = \log \frac{I}{I_0} \text{ Bel} = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ dB} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ dB}$$

Som referenceværdi I_0 benyttes det til $p_0 = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$ svarende, altså - idet $c = 340 \text{ m/s}$ og $\rho_0 = 1/800 \text{ g/cm}^3$

$$I_0 = (2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot \frac{800}{34000} \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}\right) \cdot \left(\frac{\text{s}}{\text{cm}}\right) \cdot \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{g}}\right) = \frac{3,2}{3,4} \cdot 10^{-9} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s}$$

$$\sim 10^{-16} \text{ watt/cm}^2.$$

Energitætheden E defineres som middelværdien af lydenergien pr. volumenenhed over en periode. Idet der gennem en arealenhed pr. tidsenhed transmitteres energien $I \cdot c$, er energitætheden

$$E = I/c = p_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{1}{c^2 \cdot \rho_0}$$

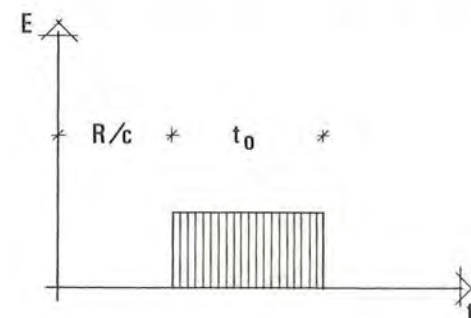
En lyd giver karakteriseres ved den udsendte lydeffekt N , altså den pr. tidsenhed udsendte energi (watt). Dens effektniveau N_N defineres som

$$N_N = 10 \cdot \log \frac{N}{N_0} \text{ dB},$$

hvor referenceeffekten N_0 er 10^{-12} watt .

Lydfeltets udbredelse

Betragtes en i det fri anbragte lyd giver, der til tidspunktet $t = 0$ starter med at afgive en konstant effekt N , vil der i



Figur 10.19: Energitætheden i afstanden R fra lydgi-
veren

punktet P i afstanden R fra lydgi-
veren være energitætheden $E = 0$
indtil tidspunktet $t = R/c$; i det-
te øjeblik stiger energitætheden
til en konstant værdi

$$E = \frac{N}{c \cdot 4\pi R^2}$$

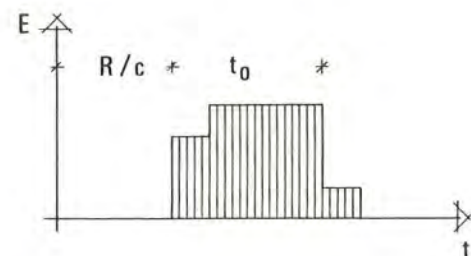
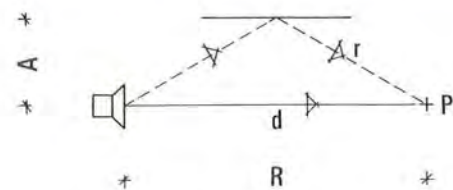
(i tidsrummet dt afgives energien
 $N \cdot dt$, der befinder sig inden for
en kugleskal af tykkelsen $c \cdot dt$ og
areal $4\pi R^2$). I punkt P er lydtryk-
ket altså

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{E \cdot c^2 \cdot \rho_0} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot c \cdot \rho_0}{4\pi}}$$

altså omvendt proportional med afstanden R .

Standses lyd giveren til tidspunktet $t = t_0$, vil energitæthe-
den i punkt P forblive konstant E indtil $t = t_0 + R/c$.

Anbringes der i nærheden af lyd giveren en reflekterende skærm



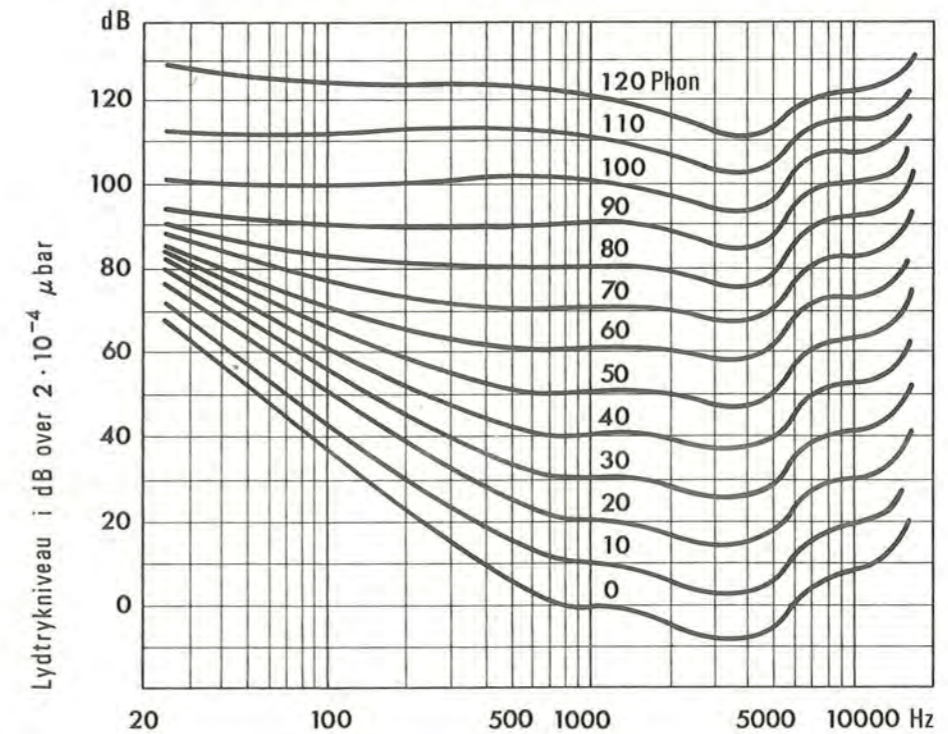
Figur 10.20: Direkte og
reflekteret
lyd

(figur 10.20), vil der til punkt
 P foruden den direkte lyd (d) kom-
me en reflekteret lyd (r); den
skal imidlertid tilbagelægge en
længere vej ($\sqrt{R^2 + (2A)^2}$) end den
direkte (R) og bidrager derfor
først senere til energitætheden i
 P , ligesom dens bidrag ophører se-
nere end den direkte lyds efter
lyd giverens standsning.

10.2.4. LYDOPFATTELSE

Lydens fysiologiske styrke

De i det foregående behandlede udtryk for lydets fysiske styrke giver ikke nogen direkte information om, hvordan det menneskelige øre vurderer lydets styrke. Den fysiologiske styrke afhænger nemlig foruden af den fysiske styrke også af lydets frekvens; en 1000 Hz-tone vil således opfattes som væsentlig stærkere end en 100 Hz-tone med samme fysiske styrke.



Figur 10.21: Fletcher-Munsons ørefølsomhedskurver for rene toner

Det forhold er anskueliggjort i figur 10.21, der viser resultaterne af de af amerikanerne H. Fletcher og W.A. Munson gjorde forsøg på at klarlægge sammenhængen mellem lydets fysiologiske og fysiske styrke. Eksperimentet blev udført (o. 1930) på den måde, at forsøgspersonerne blev udsat for en række lyde af forskellig frekvens og fysisk styrke og for hver enkelt af dem skulle udtale sig om, hvilken 1000 Hz-tone de styrkemæssigt ville sammenligne den med. Toner, der forekom forsøgspersonerne lige stærke, blev afsat som punkter på diagrammets kurver, isophoner.

Hørestyrke og høreindtryk

På grundlag af forsøget defineres en tones hørestyrke som A phon, når den forekommer det menneskelige øre at være af samme styrke som en 1000 Hz-tone af fysisk styrke (lydtrykniveau) A dB over $2 \cdot 10^{-4}$ μ bar. Som det fremgår af isophonerne, er der navnlig for små lydtryk overordentlig stor forskel på den fysiske styrke af højfrekvente og lavfrekvente toner, der forekommer lige stærke. For store lydtryk er forskellen mindre udtalt; f.eks. er 100 phon-kurven praktisk taget vandret. For det praktiske arbejde med lydisoleringsproblemer er disse informationer om lydens fysiologiske styrke af afgørende betydning, idet de fortæller, hvilke lyde der opfattes kraftigst og derfor vil genere mest; på grundlag af kurverne kan man direkte slutte, at lydisolationen bør være væsentlig bedre for de høje end for de lave frekvenser, jvf. artikel 10.2.6.

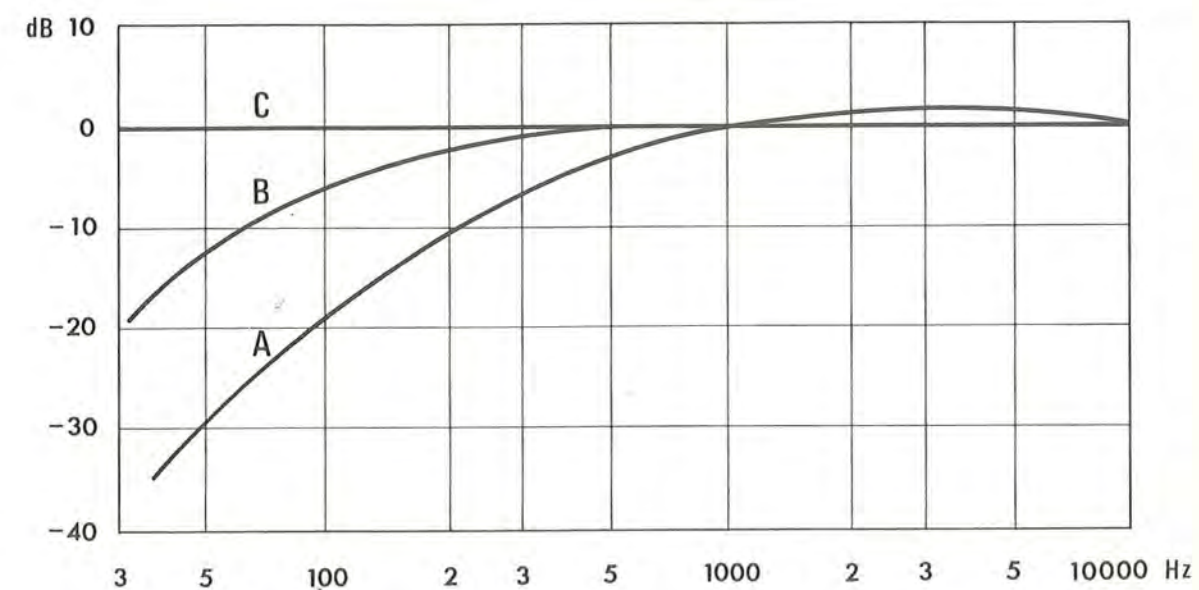
Et andet mål for lydens fysiologiske styrke er høreindtrykket (også benævnt lydindtrykket), der er et mål for lydenes indbyrdes styrke. En tone af hørestyrken 40 phon siges at give høreindtrykket 1 son, en lyd, der forekommer dobbelt så kraftig, 2 son, o.s.v. Høreindtrykket finder dog ingen praktisk anvendelse i bygningsakustikken.

Frekvenskarakteristikker

Skal man skaffe sig et udtryk for en sammensat lyds styrke, kan det ske ved at måle lydtrykket. Det gennemsnitlige lydtryk er imidlertid uden interesse i en bygningsakustisk sammenhæng, da de lave frekvenser kommer til at dominere i alt for høj grad i forhold til, hvordan det menneskelige øre opfatter dem, jvf. det foregående. En måling af den sammensatte lyds hørestyrke kan ske ved at inddele frekvensområdet i delområder og måle den fysiske styrke, lydtrykket, for hvert af disse og derefter korrigere de målte lydtryk udfra ørefølsomhedskurverne.

Denne proces kan imidlertid meget vel indbygges i måleinstrumentet, således at det direkte giver et mål for en sammensat lyds hørestyrke. Det lader sig dog af instrumenttekniske grunde ikke gøre at foretage korrektionen kontinuert med varierende hørestyrker; i stedet har man internationalt vedta-

get tre korrektionskurver, frekvenskarakteristikkerne A, B og C, svarende til henholdsvis 40 phon-kurven og 70 phon-kurven i Fletcher-Munson-diagrammet samt det ikke korrigerede lydtryk (C), se figur 10.22.



Figur 10.22: Frekvenskarakteristikker

Ved at ændre lydtrykmålerens følsomhed i henhold til disse karakteristiker fås direkte et udtryk for lydets hørestyrke. Det må naturligvis altid præciseres, hvilken følsomhedskarakteristik der er benyttet, hvilket sker ved at angive støjniveauet i dB(A), dB(B) eller dB(C). Det bemærkes, at hørestyrken i dB(C) er identisk med lydtrykniveauet.

Frekvenskarakteristikken A anvendes ved hørestyrker fra 30 til 60 phon, karakteristikken B ved hørestyrker over 60 phon. Til illustration af forskellige støjniveauer skal nævnes

Tærskelværdien for hørelsen	0 dB(A)
Sagte hvisken	20 dB(A)
Stille arbejdsværelse	40 dB(A)
Normal samtale	60 dB(A)
Kontor med skrivemaskiner	70 dB(B)
Kraftig radiomusik	80 dB(B)
Støj i alm. værksteder	90 dB(B)
Pladeværksted	100 dB(C)
Orkestermusik (fortissimo)	110 dB(C)
Propelfly, smertegrænse	120 dB(C)

10.2.5. LYD I LUKKET RUMDirekte og reflekteret lyd

I artikel 10.2.3. er der gjort rede for, hvorledes et lydfelt udbreder sig i det uforstyrrede medium; lydtrykket er omvendt proportionalt med afstanden til lyd giveren. I et lukket rum derimod udbreder lydfeltet sig ikke uforstyrret; foruden den direkte lyd vil man i ethvert punkt af rummet modtage indirekte lyd, altså lyd, der reflekteres fra de omgivende flader, ikke blot en enkelt gang, men adskillige gange. Alt efter disse fladers materialekarakter vil den direkte eller den reflekterede lyd være dominerende, og på grund af, at der ved hver reflektion sker et vist energitab, vil bidraget til den samlede energitæthed være mindre, jo flere gange en lyd har været reflekteret, inden den når det punkt, den observeres. En grafisk fremstilling af lydfeltets opbygning fra det øjeblik, lyd giveren startes, vil altså tage sig ud som en kurve, der når sit maksimum gennem små spring af aftagende størrelse.

Er de flader, lyden rammer, således beskafne, at så godt som hele den indfaldende lyd reflekteres, vil energitætheden overalt i rummet være præget af stor ensartethed, altså ikke som i det fri være afhængig af afstanden til lyd giveren. Et sådant lydfelt kaldes diffust.

Gøres der nu den forenklende antagelse, at energitætheden er ens overalt i rummet, og at energiudbredelsen i ethvert punkt foregår ligeligt i alle retninger, kan lydfeltets opbygning beskrives matematisk; forinden skal det vises, hvor stor en energi der pr. tidsenhed rammer en arealenhed af rummets begrænsningsflade.

Betragtes et arealelement dS af rummets begrænsningsflade, vil det fra ethvert volumenelement dV inden for en halvkugle med radius $c \cdot dt$ i løbet af tiden dt modtage energien $E dV \frac{dS \cos \theta}{4\pi R^2}$, hvor θ er vinkelen mellem dS 's normal og retningen til dV . Ved integration over denne halvkugle og division med dt fås energien pr. tidsenhed

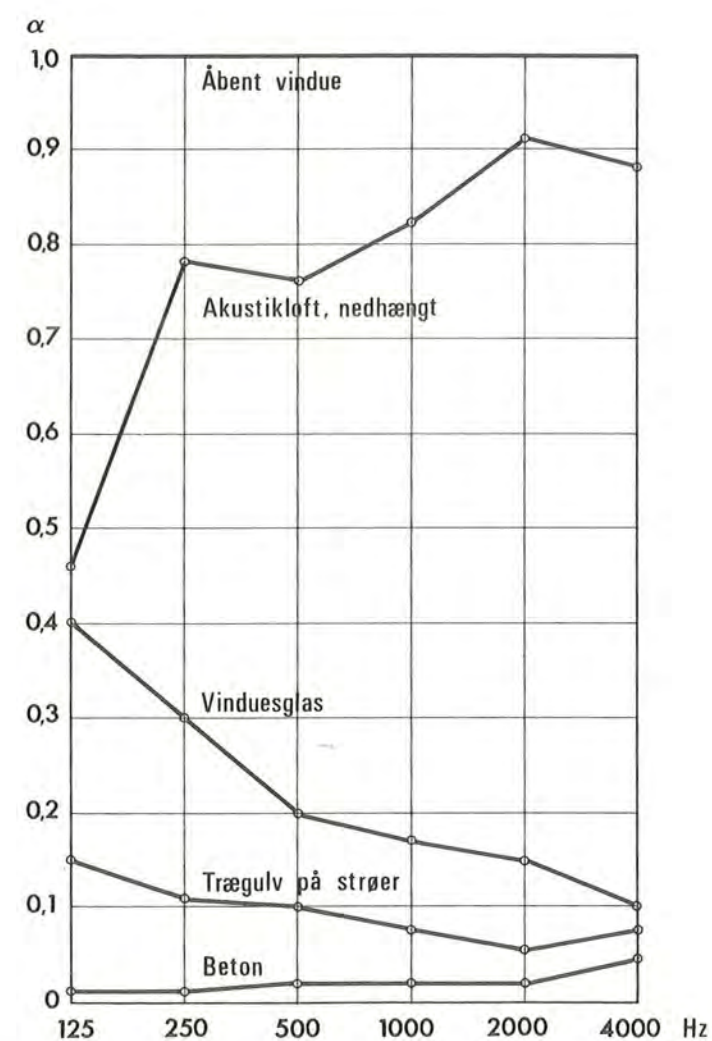
$$\frac{1}{4} \cdot E \cdot c \cdot dS.$$

Lydabsorption

Når lyden rammer en flade, er det imidlertid ikke hele den indfaldende energi, der reflekteres; en del af den absorberes, d.v.s. den enten omdannes til varme eller transmitteres gennem fladen. Som udtryk for fladens absorptionssevne defineres dens absorptionskoefficient α som

$$\alpha = \frac{\text{absorberet energi}}{\text{indfaldende energi}}$$

Absorptionskoefficienten er normalt stærkt varierende med frekvensen, jvf. figur 10.23, der viser nogle karakteristiske materialers absorptionssevne.



Figur 10.23: Absorptionskoefficienter

$A = \sum \alpha_n \cdot S_n$ er rummets samlede antal absorptionsenheder; enheden benævnes m^2 -sabin. For personer, møbler og andre enkeltgenstande regnes ikke med absorptionskoefficienter og areal,

men med absorptionsenheder.

Lyddødt og lydhårdt rum

Et rum, hvis omgivende flader absorberer al den lydenergi, der rammer dem, kaldes et lyddødt rum. I et sådant rum er energitætheden i et vilkårligt punkt i princippet alene bestemt af lyd giverens effekt N og afstand R til punktet,

$$E = \frac{N}{4\pi R^2 c}$$

I et lyddødt rum er det altså kun den direkte lydbølge, der når øret; tale høres klart og tydeligt.

Tilsvarende kaldes et rum lydhårdt, hvis de omgivende flader reflekterer så stor en del af lydenergien, at lydfeltet er diffust (d.v.s. samme energitæthed overalt i rummet). Under stationære forhold er den afgivne effekt N lig med den af de omgivende flader absorberede energi, der - som det blev vist i det foregående - for delarealet dS er $\alpha \cdot \frac{1}{4} \cdot E \cdot c dS$, d.v.s.

$$N = \sum \alpha_n \cdot \frac{1}{4} \cdot E \cdot c \cdot S_n = \frac{1}{4} \cdot E \cdot c \cdot A;$$

Energitætheden i det diffuse lydfelt er altså

$$E = \frac{4N}{cA}$$

I det lydhårde rum er talen næsten uforståelig; lyden kastes frem og tilbage mellem de omgivende flader, således at refleksionerne af det ene ord bliver ved længe efter, at det næste er begyndt.

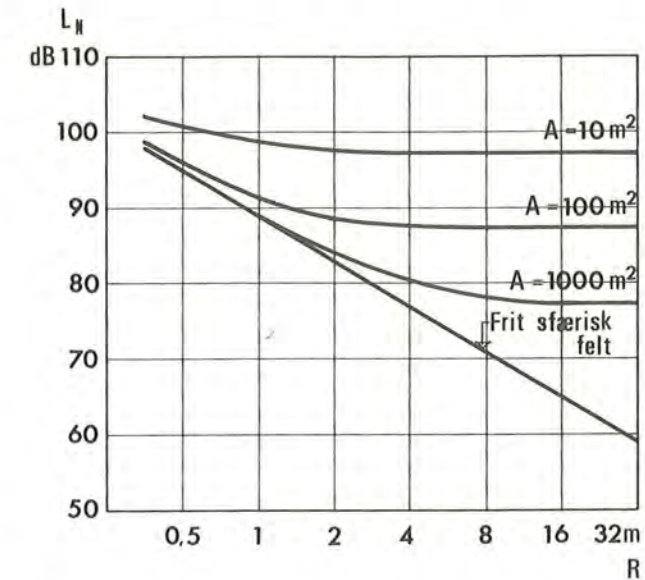
I praksis er rum naturligvis hverken helt lyddøde eller helt lydhårde; men selv i sådanne lyddøde og lydhårde rum, som alene tjener til akustiske målinger, er energiforholdene ikke de nævnte ekstreme. Lyden vil altid bestå af direkte og reflekteret lyd, så energitætheden er i princippet

$$E = \frac{N}{4\pi R^2 c} + \frac{4N}{cA}$$

Lydtrykniveauet ($L_N = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$) er altså

$$L_N = N_N + 10 \cdot \log \left(\frac{1}{4\pi R^2} + \frac{4}{A} \right)$$

Figur 10.24 viser for rum med forskellig absorption A lydtrykniveauet som funktion af R fra en lyd giver med effekt niveauet $100 \text{ dB}/10^{-12} \text{ watt}$. Det fremgår, at lydtrykniveauet kan nedsættes ved at forøge A,



Figur 10.24: Lydtrykket i lukket rum

nedsættes ved at forøge A, dog aldrig mere end svarende til den rette linie, der repræsenterer det frie, sfæriske lydfelt, for hvilket L_N falder 6 dB, hver gang afstanden fordobles.

Det skal understreges, at disse rent statistiske betragtninger om lydenergien er baseret på stærkt forenklede forudsætninger; lyden absorberes ikke kontinuerligt som forudsat, men springvis; lydfeltet

er ikke diffust i den forstand, det er forudsat, men er sammensat af bølgebevægelser og altså retningsbestemt, ligesåvel som øret også er det; og endelig er der set bort fra, at også luften i sig selv dæmper lyden. Alligevel giver den statistiske rumakustik et værdifuldt grundlag for den praktiske løsning af bygningsakustiske problemer.

Vedrørende en dyberegående fremstilling af de her behandlede spørgsmål henvises til litt. [1949.1].

Lydfelts opståen og hendøen

Startes en lyd giver med effekten N i et rum med volumen V og omgivende flader med ialt A absorptionsenheder, vil energitætheden i et bestemt øjeblik - under forudsætning af diffust lydfelt - være bestemt af

$$V \cdot \frac{dE}{dt} = N - \frac{1}{4} E \cdot c \cdot A;$$

(energitilvæksten er den tilførte energi minus den absorbere de energi); ved integration fås med randbetingelsen $(E, t) = (0, 0)$

$$E = \frac{4N}{cA} \left(1 - e^{-\frac{cA}{4V} \cdot t} \right)$$

For $t \rightarrow \infty$ er $E \rightarrow E_0 = \frac{4N}{cA}$, energitætheden i den stationære tilstand.

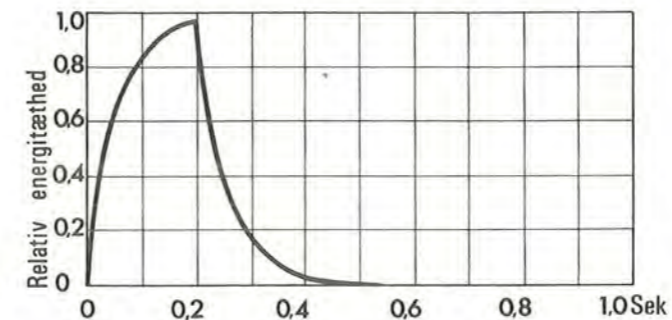
Standses lyd giveren, er energitætheden bestemt af

$$V \cdot \frac{dE}{dt} = -\frac{1}{4} E \cdot c \cdot A;$$

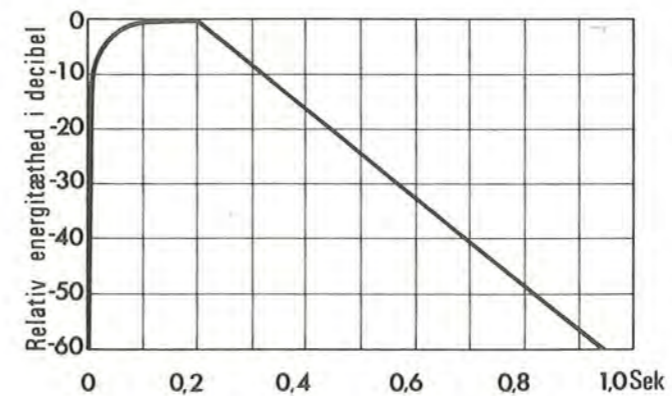
ved integration fås med randbetingelsen ($E, t = E_0, 0$)

$$E = \frac{4N}{cA} \cdot e^{-\frac{cA}{4V} \cdot t}$$

Lydfeltets opståen og hendøen er altså bestemt af den samme eksponentialfunktion og tager altså principielt lige lang tid,



Figur 10.25: Lydfelts opståen og hendøen, lineær afbildning



Figur 10.26: Lydfelts opståen og hendøen, logaritmisk afbildning

således som det fremgår af figur 10.25, der viser lydfeltet (karakteriseret ved det relative lydtryk) under opbygning og under hendøen efter 0,2 sekunder; (strengt taget varer begge dele dog uendelig lang tid, jvf. eksponentialudtrykket).

Således opfattes processen imidlertid ikke af øret; lydfeltets opståen forekommer momentan, medens dets hendøen klart strækker sig over en vis tid. Det skyldes, at øret - som tidligere omtalt - registrerer de relative trykændringer og ikke de absolute, således at en logaritmisk afbildning af lydtrykkets variation langt bedre illustrerer ørets

opfattelse af lydfeltets opståen og hendøen, jvf. figur 10.26. Det, der har interesse i rumakustisk henseende, er den tid, lydfeltet er om at dø hen, altså f.eks. hendøningstiden, defineret som den tid, der forløber, fra lyd giveren standser, til lydtrykniveauet er faldet til tærskelværdien.

Efterklangstiden

Hendøningstiden er altså afhængig af lydtrykkets maksimalværdi og ørets følsomhed og giver således ikke en entydig information om rummets egenskaber. Langt bedre i så henseende er den af W.C. Sabine definerede efterklangstid, som er den tid, lydtrykniveauet er om at falde til en milliontedel (altså 60 dB) af udgangsniveauet. Under forudsætning af diffust lydfelt er altså

$$E = \frac{4N}{cA} \cdot e^{-\frac{cA}{4V} \cdot t} = 10^{-6} \cdot \frac{4N}{cA},$$

hvoraf $-\frac{cA}{4V} \cdot t = \ln 10^{-6};$

efterklangstiden t_{sab} er altså

$$t_{\text{sab}} = -\ln 10^{-6} \cdot \frac{4V}{cA} = 6 \cdot 2,30 \cdot 4 \cdot \frac{1}{340 \text{ (m/s)}} \cdot \frac{V}{A} = 0,16 \text{ (s/m)} \cdot \frac{V}{A}$$

hvor V er rummets volumen og A dets antal absorptionsenheder.

Dette udtryk, Sabine's efterklangsformel, passer fortrinligt med udførte praktiske målinger, så længe forudsætningerne er opfyldt i rimelig grad, hvilket er tilfældet ved langt de fleste almindeligt forekommende opgaver, såsom boliger, skoler, arbejdsrum, butikker m.m. Men er der tale om stærkt dæmpede rum, spiller det en rolle, at lydabsorptionen ikke foregår kontinuerligt, men springvis; for sådanne rum ($\alpha_m > 0,3$) har Eyring udledt efterklangsformlen

$$t = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot \ln \frac{1}{1 - \alpha_m}},$$

hvor S er arealet af de rummet omgivende flader og α_m er disse fladers middelabsorptionskoefficient. For små værdier af α ses de to efterklangsformler umiddelbart at give samme t .

Det bemærkes, at der i begge formler ses bort fra luftens absorption; den er imidlertid - ved høje frekvenser - ikke gan-

ske ubetydelig, særligt naturligvis i rum, der i forvejen er svagt dæmpede. Den kan tages i regning ved at korrigere Sabine's efterklangsformel til

$$t = \frac{0,16}{A + m \cdot V} ,$$

hvor m empirisk kan sættes lig med 0,001 ved 1000 Hz, 0,003 ved 2000 Hz og 0,007 ved 4000 Hz ved 50% relativ luftfugtighed; A og V angives i henholdsvis m² og m³.

10.2.6. LYDISOLATION

Luftlyd og bygningslyd

Lydisoleringsteknikken beskæftiger sig som nævnt med at reducere opstået lyds forplantning til og fra de enkelte rum i bygningen. I henseende til lydets forplantning skelnes der mellem

luftlyd og
bygningslyd.

Luftlyd forplanter sig gennem luften og sætter de omgivende konstruktionsdele, vægge og etageadskillelser, i svingninger, som igen sætter luften på den anden side i svingninger, således at der her frembringes luftlyd. Bygningslyd forplanter sig gennem en bygnings konstruktionsdele ved direkte påvirkning fra en lyd giver. Bygningsdelen sætter den omgivende luft i svingninger, der forplanter sig gennem luften til øret.

De hyppigst forekommende bygningslyde er trinlyd og installationslyd, som er et problem i så at sige alle bygninger, hvor mennesker færdes, boliger, skoler, hoteller, kontorer etc. Ved trinlyd forstås den del af den opståede lyd, som forplanter sig direkte gennem konstruktionsdelen, og som altså ikke høres i selve rummet, hvor lyd kilden - f.eks. færdsel på gulvet - befinder sig. Den resterende del, altså den del, som opfattes i selve rummet, kaldes trommelyd, som er en luftlyd. Installationslyd er den lyd, der frembringes af vands strømning gennem rør og ventiler; den er altså egentlig både bygningslyd (den del af lyden, der forplanter sig direkte) og luftlyd (den del af lyden, som fremkommer i selve det rum, hvor lyd kilden er installeret).

Reduktionstal og rumisolation

Som udtryk for en adskillende bygningsdels (vægs eller etagedæks) lydisoleringsevne defineres dens transmissionsforhold som forholdet mellem den effekt N_2 , der afgives fra bygningsdelen på modtagesiden, og den effekt N_1 , der rammer den på sendesiden, altså

$$q = \frac{N_2}{N_1};$$

den resterende del $N_1(1 - q)$ af den indfaldende energi, er dels reflekteret til modtagerummet, har dels forplantet sig

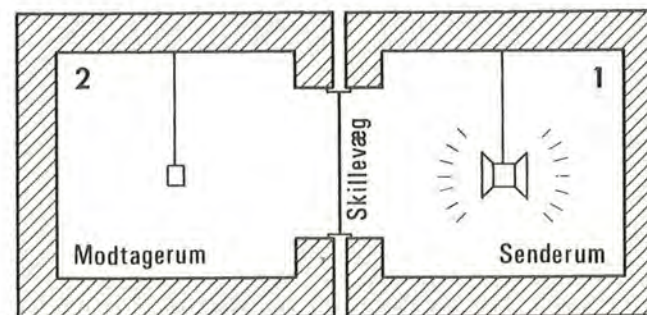
, som bygningslyd, og er dels opbrugt som varme på grund af bygningsdelens indre dæmpning.

Almindeligvis benyttes ikke transmissionsforholdet, men reduktionstallet R , der er defineret som

$$R = 10 \cdot \log \frac{1}{q} = 10 \cdot \log \frac{N_1}{N_2} \text{ dB};$$

R og q er altså størrelser, der er karakteristiske for bygningsdelen, uanset hvordan den indgår i sammenhæng med andre, og lader sig altså måle i laboratoriet.

Reduktionstallet giver imidlertid ikke entydigt nogen infor-



mation om, hvordan det forholder sig med energitæthederne, som direkte udtrykker lydets styrke. Betragtes en forsøgsopstilling som den på figur 10.27 viste, hvor et senderum (1) er adskilt fra et modtagerum (2) gennem en skille-

Figur 10.27: Lydisolationsmåling

væg af areal S og med reduktionstallet R , fås følgende sammenhæng mellem rumisolationen, defineret som $D = 10 \cdot \log E_1/E_2$, og reduktionstallet R

$$D = 10 \cdot \log \frac{E_1}{E_2} = 10 \cdot \log \left(\frac{4N_1}{c \cdot S} \cdot \frac{c \cdot A_2}{4N_2} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{N_1 \cdot A_2}{N_2 \cdot S} \right) = R + 10 \cdot \log \frac{A_2}{S}$$

Rumisolationen er altså afhængig af modtagerummets dæmpning; omskrives med Sabine's efterklangsformel, fås

$$D = R + 10 \cdot \log \left(0,16 \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{1}{t} \right)$$

For at sikre passende lav energitæthed i modtagerummet har man internationalt vedtaget at regne med et rumisolationstal $D_{0,5}$, der er det målte rumisolationstal D korrigeret til en efterklangstid på 0,5 sekund, svarende til almindelige opholdsrum i boliger, kontorer, skoler etc., d.v.s.

$$D_{0,5} = R + 10 \cdot \log(0,16 \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{1}{0,5}) = D + 10 \cdot \log \frac{t}{0,5}$$

I udtrykket for D er det forudsat, at lydfelterne er fuldstændigt diffuse, og at transmissionen foregår udelukkende gennem skillevæggen. Denne sidste forudsætning er ikke opfyldt i praksis, idet der yderligere vil ske en transmission dels gennem flankerende bygningsdele (flanking-effekt), dels gennem utætheder i bygningsdelen. Regnes disse at reducere rumisolationen med henholdsvis C_1 og C_2 dB, fås

$$D_{0,5} = R + 10 \cdot \log 0,32 \frac{V}{S} - C_1 - C_2$$

C_1 kan, alt efter omstændighederne, udgøre 0 - 10 dB.

Reduktionstallet for en bygningsdel - og dermed også rumisolationen mellem de rum, den adskiller - er normalt stærkt afhængig af frekvensen. Ved praktiske målinger arbejdes med de 16 standardfrekvenser, og det aritmetiske middeltal af måleresultaterne benævnes henholdsvis middelreduktionstallet og middelrumisolationen.

Trinlydisolation

Som mål for et etagedæks trinlydisolation angives det lydtryk-niveau, benævnt trinlydniveauet, som frembringes i rummet under dækket, når dette sættes i svingninger gennem direkte påvirkning af en standardiseret bankemaskine. Da det målte lydtryk-niveau er afhængigt af modtagerummets efterklangstid, må det for at være et entydigt mål korrigeres til en bestemt efterklangstid, i praksis 0,5 sekund; det korrigerede trinlydniveau defineres

$$T_{0,5} = L - 10 \cdot \log \frac{t}{0,5} ,$$

hvor L er det i modtagerummet målte lydtryk-niveau (dB), og t er efterklangstiden i sek.

Trinlydniveauet måles ved de samme standardfrekvenser 100 - 3150 Hz, som benyttes ved måling af luftlydisolation. I modsætning til luftlydisolation karakteriseres trinlydniveauet ikke ved et gennemsnitstal af de ved de forskellige frekvenser målte værdier, men kun af disse alene. Om dækkonstruktions trinlydisolation henvises til HB 4.2.

Masse/frekvens-loven og koincidens-effekten

Forholdene ved lydtransmission gennem en adskillende bygningsdel er så komplicerede, at de unddrager sig en blot nogenlunde realistisk matematisk behandling. Ved en række stærkt forenklede forudsætninger kan det dog meget vel beregningsmæssigt anskueliggøres, hvad der i fysisk henseende sker i bygningsdelen under lydens gennemgang. Der kan dog kun blive tale om rent principielle betragtninger; virkelige bygningsdeles lydisolations kan kun klarlægges på een måde, ad eksperimentel vej.

Betragtes en uendelig stor, homogen, uporøs skillevej eller dækkonstruktion af ringe tykkelse, der rammes af en plan harmonisk lydbølge vinkelret på fladen, og er modtagerummet fuldstændigt absorberende, vil alle delarealer af væggen til ethvert tidspunkt være i samme svingningstilstand og svinge uafhængigt af hinanden. Idet delarealets masse er m , er den kraft der påvirker den

$$p = m \cdot \frac{\delta^2 s}{\delta t^2} = j \cdot m \cdot \omega \cdot u,$$

hvor $j = \sqrt{-1}$

$$\omega = \text{vinkelfrekvensen} = 2\pi f$$

$$u = \text{hastigheden} = \frac{\delta s}{\delta t}.$$

Denne kraft er lig med det resulterende tryk af de lydbølger, der rammer elementet, d.v.s.

$$p = p_i + p_r - p_t,$$

hvor p_i = den indfaldende bølges tryk ($= \rho_0 \cdot c \cdot u_i$)

p_r = den reflekterede bølges tryk ($= \rho_0 \cdot c \cdot u_r$)

p_t = den transmitterede bølges tryk ($= \rho_0 \cdot c \cdot u_t$).

Idet partikelhastigheden i den transmitterede bølge u_t er lig med elementets hastighed u og lig med differencen mellem den indfaldende og den reflekterede bølges partikelhastigheder u_i og u_r , altså

$$u = u_t = u_i - u_r,$$

fås umiddelbart

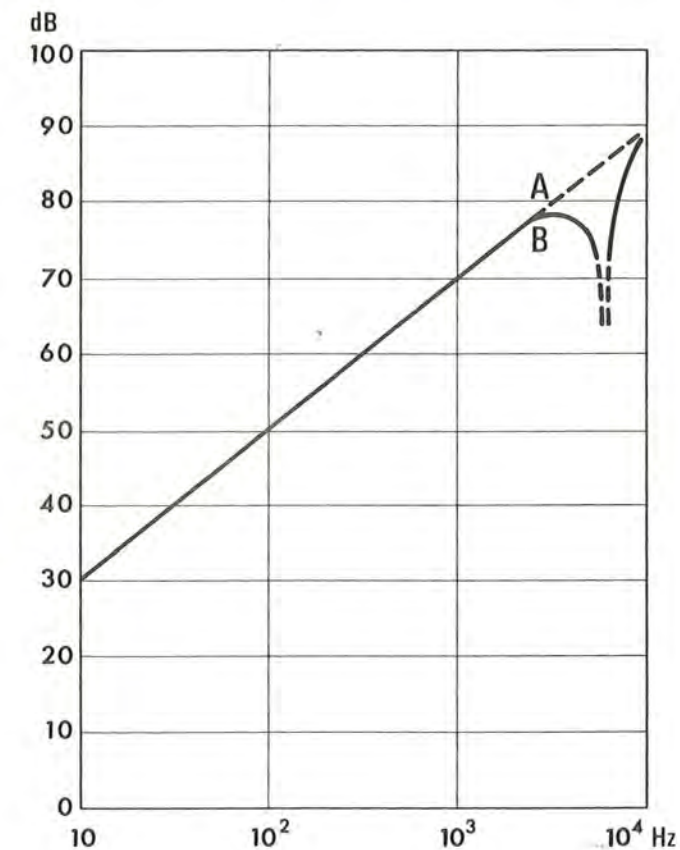
$$p_i = \rho_0 \cdot c \cdot u + \frac{p}{2}$$

$$p_t = \rho_0 \cdot c \cdot u$$

Idet de to led i p_i er faseforskudt $\frac{\pi}{2}$ ($p = j \cdot m \cdot \omega \cdot u$), fås

$$R = 10 \cdot \log \left| \frac{p_i}{p_t} \right|^2 = 10 \cdot \log \left(1 + \frac{\omega^2 m^2}{4(\rho_0 c)^2} \right) \sim 20 \cdot \log m + 20 \cdot \log f - C,$$

hvor C er en konstant, der afhænger af m 's og f 's enheder; (indsættes m i kg/m^2 , f i sek^{-1} , er $C = 43 \text{ dB}$). En fordobling af m eller af f betyder altså en forøgelse af R på 6 dB. Denne relation mellem en bygningsdels reduktionstal, frekvensen og massen benævnes masse/frekvens-loven.



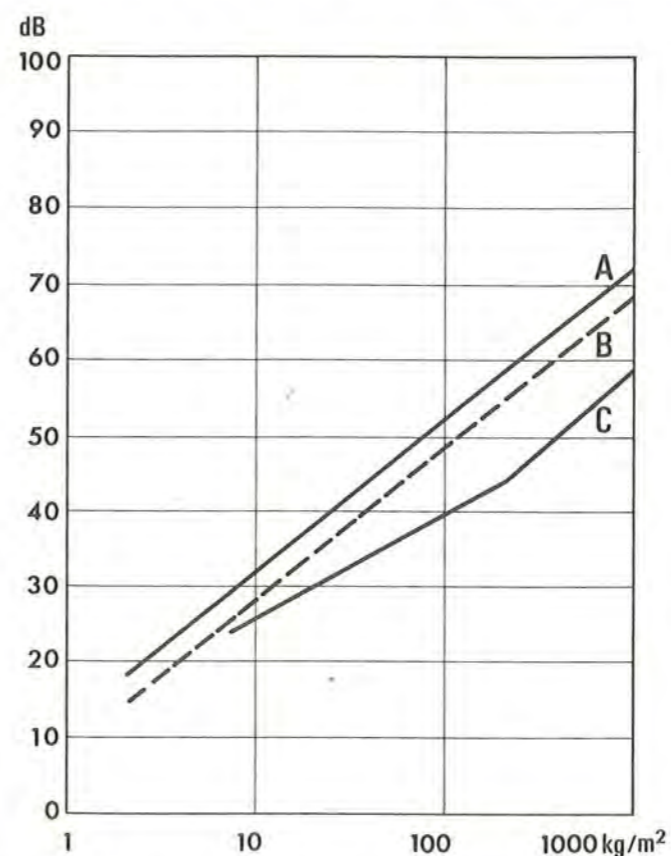
Figur 10.28: Reduktionstallets afhængighed af frekvensen (idealiseret væg)

På figur 10.28 (kurve A) er vist R 's afhængighed af f for en bestemt værdi af m , (470 kg/m^2 , svarende til en 20 cm betonavæg). For andre konstante værdier af m fås linier, der er parallelle med den viste. Forløbet af R er imidlertid ikke retlinet gennem hele frekvensområdet, sådan som masse/frekvens-loven udsiger. Kurven udviser et dyk ved ca. 8000 Hz; det skyldes, at for denne frekvens er væggenes tykkelse t lig med en halv bølgelængde i væggen ($= \frac{1}{2}c_v/f$), og R altså teoretisk 0; (det retlinede forløb forudsætter jo, at $t \ll \lambda_v$).

Afsættes R i stedet som funktion af væggenes masse, fås for en bestemt frekvens et tilsvarende retlinet forløb. Beregnes middelreduktionstallet, fås altså

$$\begin{aligned} R_{\text{middel}} &= 20 \cdot \log m + \frac{1}{16} \sum_{100}^{3150} 20 \cdot \log f - C \\ &= 20 \cdot \log m + 55 - 43 \\ &= 20 \cdot \log m + 12 \text{ dB.} \end{aligned}$$

Denne afhængighed er optegnet på figur 10.29 (kurve A). Kurve B viser R's afhængighed af m, når der i stedet for en plan



Figur 10.29: En vægs middelreduktionstal i afhængighed af dens vægt

følge af den elastiske kobling mellem væggenes partikler sættes væggen i bøjningssvingninger ved lydpåvirkningen; hvis der er resonans mellem de to svingninger, optræder den såkaldte koincidens-effekt, der medfører, at væggenes reduktionstal ved bestemte frekvenser er væsentlig lavere end svarende til kurve B på figur 10.29. Den laveste af disse frekvenser (koincidens-grænsefrekvensen eller den kritiske frekvens) kan bestemmes af

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{m}{B}},$$

hvor c er lydets hastighed i luft

m er væggenes masse pr. arealenhed

B er væggenes bøjningsstivhed (EI).

For en 20 cm betonvæg er $f_c = \text{ca. } 90 \text{ Hz}$; for en 10 mm træpla-

lydbølge vinkelret på væggen regnes med statistisk fordelte indfaldsvinkler, men iøvrigt under samme idealiserede forudsætninger som A. B ligger ca. 4 dB under A.

Imidlertid er som nævnt beregningsforudsætningerne for kurverne i figur 10.28 og 10.29 stærkt forenkede i forhold til virkeligheden; specielt er forudsætningen om væggenes uendelige størrelse selvfølgelig ikke opfyldt og dermed heller ikke, at de enkelte bestanddele svinger uden gensidig kraftpåvirkning. Som

er $f_c = \text{ca. } 1500 \text{ Hz.}$

Dette fænomen kommer til udtryk i kurve C på figur 10.29, "vægt-kurven", der er baseret på eksperimentelt bestemte middelreduktionstal for en lang række forskellige vægkonstruktioner. For massive betonvægge kan der regnes med ca. 5 dB højere værdier, end kurven viser.

Om forskellige konstruktioners lydisoleringsevne henvises til HB 5.2.2.

Funktionskrav

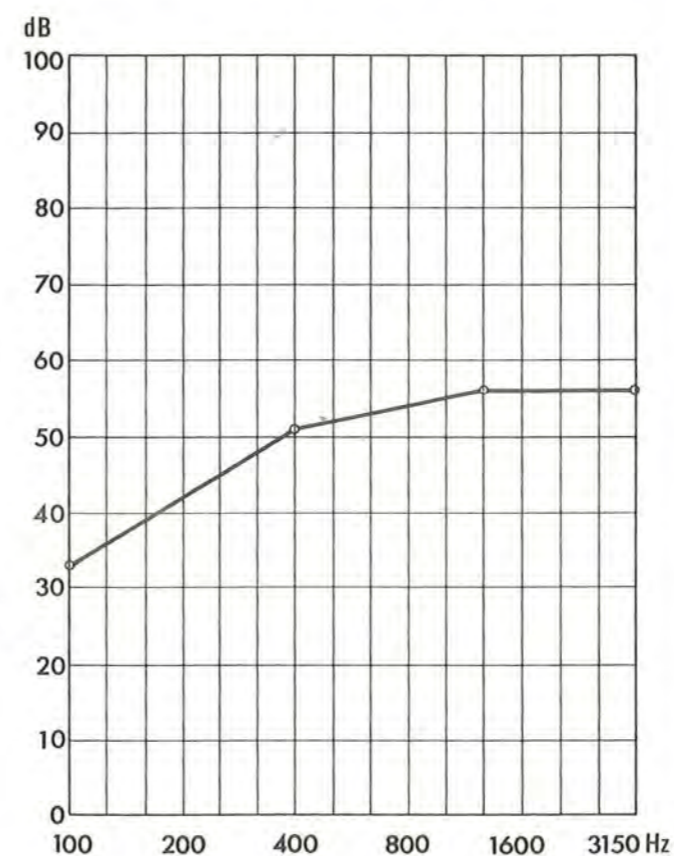
De funktionskrav, der i henseende til lydisolation skal stilles til en bygningsdel, må baseres på en vurdering af de forekommende lyde (frekvenser) og de gener, de hver især frembyder, samt på en vurdering af, hvor grænsen for, hvad der kan anses for acceptabelt, skal lægges. Hvad selve lydene angår, lader de sig måle objektivt, og ørefølsomhedskurverne giver et udmærket grundlag for at fastsætte relativt, hvor meget der skal isoleres for de forskellige frekvenser. Hovedproblemet består i at fastlægge et absolut niveau.

Et begreb om dette kan man danne sig ved at betragte baggrundsstøjniveauet; erfaringsmæssigt opfatter øret ikke lyde, der er svagere end 20 dB under baggrundsstøjen. Er eksempelvis baggrundsstøjniveauet i et soverum 40 dB(A), må man altså forlange, at støjniveauet gennem væggen til et naborum ikke overstiger 20 dB(A). Er der i naborummet et støjniveau på f.eks. 80 dB(A) (kraftig radio), må væggen altså kunne reducere støjniveauet med 60 dB(A), hvis den sovende ikke skal forstyrres. Det svarer til en middelrumisolation på ca. 53 dB. Hvis baggrundsstøjniveauet er endnu lavere end 40 dB(A) (f.eks. stille villavej om natten), må rumisolationen selvfølgelig være tilsvarende højere.

For visse gængse bygningsdele (f.eks. skillevægge og etagedæk i boliger, skoler, hoteller og kollegier) kan kravene til luftlydisolation og trinlydisolation fastsættes normmæssigt (herhjemme BR 1966 kapitel 9). Sådanne normkrav er dog i første række afpasset efter, hvad der efter traditionel byggeskik kan betragtes som i øjeblikket teknisk og økonomisk rimeligt, snarere end efter, hvad der ud fra en fysiologisk og psykologisk vurdering af problemet er tilfredsstillende. Så-

danne normkrav bør derfor kun betragtes som retningsgivende (minimumskrav); de giver på ingen måde garanti for, at lydisolationen er tilfredsstillende, især ikke vurderet med en fremtidig målestok.

I henseende til luftlydisolation må funktionskravene udtrykkes ved krav til såvel rumisolation som reduktionstal, idet ingen af dem i sig selv giver tilstrækkelig information om lyd-



Figur 10.30: Skillevægs reduktionstal

isolationen. Figur 10.30 viser eksempelvis normkurven (i henhold til BR 1966) for en skillevægs (lejlighedsskels) reduktionstal. Da der selvfølgelig må være tale om et ret lavt støjniveau i modtagerummet, er normkurven baseret på frekvenskarakteristikken A (figur 10.22), svarende til 40-phonkurven på figur 10.21. Normkravet er i det konkrete tilfælde, at væggen skal have et middelduktionstal $R_m \geq 50$ dB, og at afvigelser mod lavere værdier end normkurvens tilsammen må være højst 16 dB.

Normkravene til rumisolationen fastsættes på ganske tilsvarende måde, altså en minimumsværdi for $D_{0,5}$ og maksimal afvigelse mod højere værdier end normkurven.

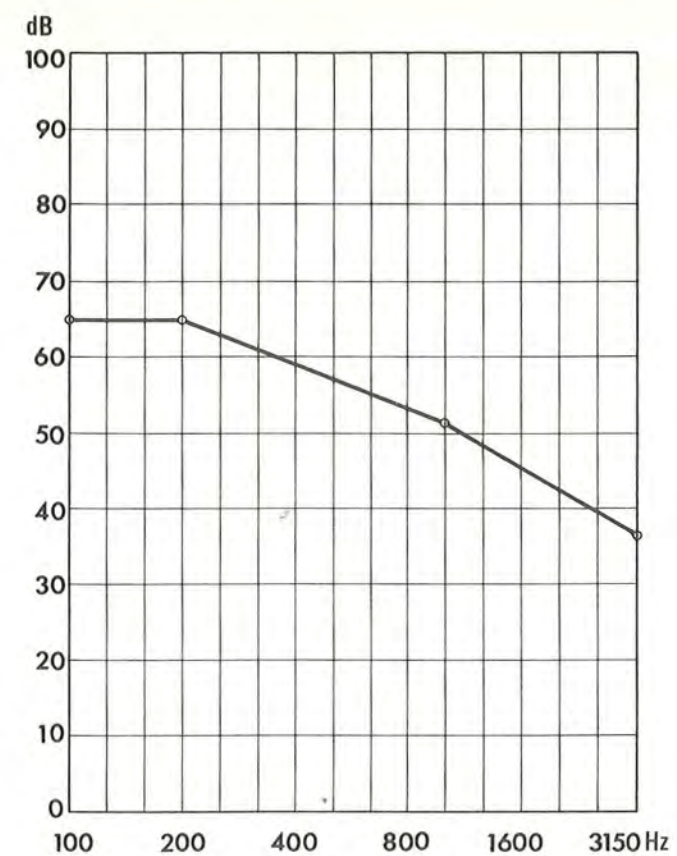
De nugældende danske normkrav (BR 1966) til middelduktion og middelduktionstal fremgår af nedenstående tabel. De svarer fuldstændig til kravene i de svenske normer, der dog er væsentlig mere differentierede med hensyn til bygningsdele, hvortil kravene er mindre (trappevægge, indvendige skillevægge etc.).

Danske normkrav (BR 1966) til luftlydisolation

	Middelrumisolation	Middelreduktionstal
Skillevægge mellem lejemål i etageboliger	49	50
Skillevægge mellem rækkehuse etc.	52	53
Dækkonstruktioner i etageboliger	49	52
Skillevægge mellem hotel- og kollegieværelser	49	50
Dækkonstruktioner i hoteller og kollegier	49	52
Skillevægge mellem klasserum i skoler	47	50
Dækkonstruktioner i skoler	47	52

Om luftlydisolationen af andre vægge og dæk end de her nævnte henvises til henholdsvis HB 5.2.2. og HB 4.2.2. Her skal blot generelt understreges, at en meget væsentlig del af lyd-isolationsproblemet ofte kan løses ved en fornuftig indretning af planerne, altså ved at placere de forskellige rum hensigtsmæssigt indbyrdes, en foranstaltning, der ofte er langt mere effektiv end den lyd-isolation, bygningsdelen kan præstere, og som tilmed er billig. Spørgsmålet er behandlet i litt. [1968.2].

Til trinlydisolationen i visse etagedæk er der ligeledes stillet normkrav, karakteriseret ved trinlydniveauet. Figur



Figur 10.31: Trinlydniveau

10.31 viser eksempelvis normkravet (i henhold til BR 1966) for dækkonstruktionerne i etageboligbyggeri. Normkravet er i det konkrete tilfælde, at de målte (og korrigerede) værdier for trinlydniveauet $T_{0,5}$ kun må overstige normkurvens værdier med tilsammen 16 dB.

Om dækkonstruktioners trinlydisolation iøvrigt henvises til HB 4.2.2.

10.2.7. RUMAKUSTIK

Medens man i lydisoleringsteknikken kun beskæftiger sig med uønskede lyde, støj, hvor problemet er at opnå størst mulig reduktion af lyden, behandler rumakustikken tillige de ønskede lyde, og problemet er her at skabe gode forhold for opfattelsen af lyd. Rumakustikken består således af to dele:

Lydregulering

Lyddæmpning.

De behandles her hver for sig, for skønt det til dels er de samme tekniske foranstaltninger, der tages i anvendelse, er det vidt forskellige opgaver, der er tale om. Lydregulering foretages almindeligvis kun i specielle rum som auditorier, klasserum, kirker, teatre og koncertsale, hvor der ikke er noget støjproblem, medens omvendt lyddæmpning netop drejer sig om at dæmpe støj i fabrikslokaler, værksteder, kontorer etc., hvor det almindeligvis er ligegyldigt, om der er gode forhold for lydopfattelsen.

Lydregulering

Spørgsmålet om, hvorvidt et rum har en "god akustik", kan ikke besvares objektivt. Dertil beror det i alt for høj grad på rent personlige vurderinger og på rent psykologiske faktorer. Skønt problemet således egentlig er unddraget en naturvidenskabelig behandling, kan det dog i nogen grad angribes ved formulering af visse funktionskrav, således at i hvert fald helt grove fejl undgås. De krav, man må søge tilfredsstillet, kan formuleres således:

jævn lydfordeling

diffusitet

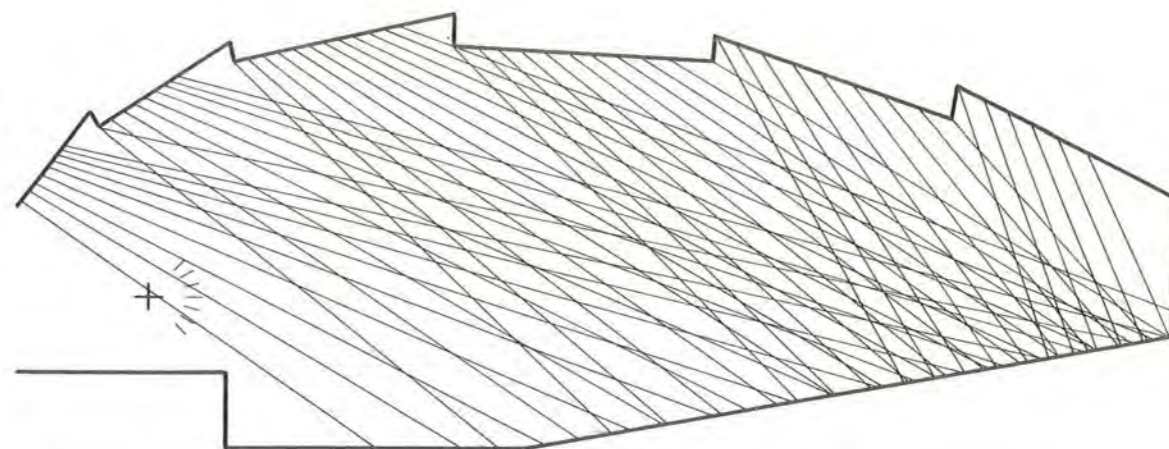
passende efterklangstid.

Da alle tre egenskaber i et rum kun har relation til bygningsdelens fysiske egenskaber på eet punkt, deres lydabsorptionsevne, skal fremstillingen her indskrænke sig til en kort omtale af det principielle i disse funktionskrav. Vedrørende en mere fyldestgørende behandling af de rumakustiske problemer henvises til litt. [1949.1], [1964.1] og [1966.1].

Lydfordeling

En jævn lydfordeling er ikke noget problem i små rum; her vil man stort set overalt have lige gode muligheder for at opfatte lyden. Men i store rum som auditorier, teatre og koncertsale er det væsentligt, at der sikres rimelige muligheder for overalt at høre tydeligt; det vil selvfølgelig være det største problem for de bageste tilhørere, for hvilke den direkte lyd er svækket betydeligt, og den reflekterede lyd altså af relativ større betydning end for de forreste tilhørere. Det er ligeledes vigtigt, at der ikke noget sted opstår ekkovirkninger, som forstyrrer lydopfattelsen (ekkoet vil kunne opfattes, når tidsforskellen mellem den direkte lyd og den reflekterede lyd er større end $1/20$ sekund).

Problemet må i første række løses ved en hensigtsmæssig rumform, som eksempelvis skitseret på figur 10.32, der viser, hvordan en speciel udformning af loftet i væsentlig grad bidrager til en jævn lydfordeling; men også andre foranstalt-



Figur 10.32: Rumformens indflydelse på lydfordelingen

ninger kan foretages, f.eks. reflektorer eller absorbenter; ekkovirkningen på de forreste pladser kan således bl.a. imødegås ved at gøre rummets bagvæg kraftigt absorberende.

Diffusitet

En god rumakustik er endvidere betinget af en passende diffusitet, altså lydspredning, der sikrer, at lyden fra reflekterende flader ikke forekommer retningsbestemt. Diffusiteten kan i væsentlig grad påvirkes ved en hensigtsmæssig geometrisk struktur af rummets vægge og loft.

Efterklangstid

I efterklangsperioden er det kun den reflekterede lyd, der høres. Det siger sig selv, at den kun kan virke forstyrrende på opfattelsen af den direkte lyd, hvis denne da ellers er tilstrækkelig kraftig. Imidlertid er det i lidt større rum i væsentlig grad netop den reflekterede lyd, der bevirker tilstrækkelig lydstyrke, så spørgsmålet om den optimale efterklangstid bliver et kompromis mellem styrke og tydelighed. I den forbindelse er det selvfølgelig helt afgørende, hvad rummet skal bruges til.

I auditorier og teatre er tydeligheden af afgørende betydning, så i sådanne rum må efterklangstiden være passende lav, af størrelsesordenen 1,0 sekund i hele frekvensområdet, og iøvrigt voksende med rummets volumen.

I musikrum er den optimale efterklangstid større, 1,5 - 2,5 sekunder, afhængig af musikkens art, mindst for kammermusik, størst for romantisk orkestermusik.

Lyddæmpning

Grundlaget for at kunne foretage lyddæmpende foranstaltninger i et rum er kendskab til den støj, der skal dæmpes; dette kendskab skaffer man sig gennem en frekvensanalyse af støjen som beskrevet i artikel 10.2.2.

Først og fremmest må den lydeffekt, støjkilden udsender, selvfølgelig reduceres mest muligt; dernæst må den udsendte lyd i videst mulig udstrækning hindres i at brede sig; det er især på dette punkt, lyddæmpende foranstaltninger effektivt kan sættes ind. I lyd giverens umiddelbare nærhed er den direkte lyd dominerende, og her nytter det selvfølgelig ikke, at rummets begrænsende flader er lydabsorberende; men i nogen afstand kan lydtrykniveauet nedsættes betydeligt ved hjælp af lydabsorberende beklædning. Figur 10.24 giver et indtryk af, hvor meget der kan opnåes; det bemærkes, at virkningen af en lyddæmpende beklædning er afhængig af, hvor meget rummet i forvejen er dæmpet; de første 100 m²-sabin reducerer lydtrykniveauet lige så meget som de næste 1000 m²-sabin, etc.

Lydabsorbenter

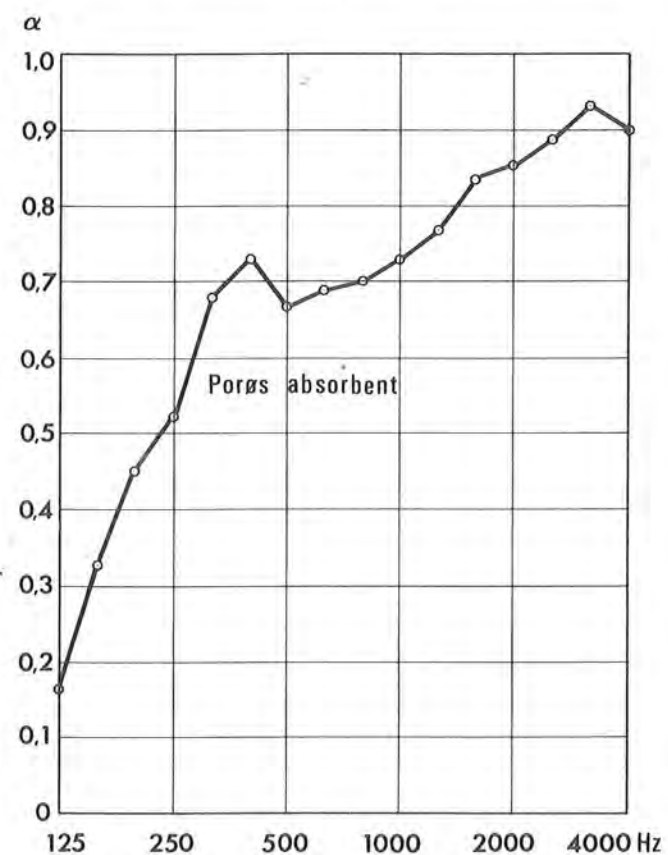
Ved hjælp af frekvensanalysen kan man se, hvilke frekvenser man i første række skal søge at dæmpe, og herudfra bestemme,

hvilke absorbenter der er hensigtsmæssige til det foreliggende formål. Afhængig af deres virkemåde inddeles absorbenterne i følgende kategorier:

- porøse absorbenter
- membranabsorbenter
- resonatorabsorbenter.

Porøse absorbenter

Porøse absorbenter er absorbenter, hvor lydenergien ved



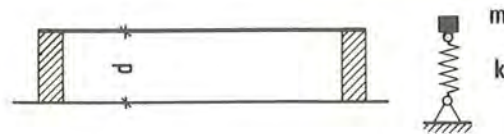
Figur 10.33: Porøse absorbents absorptionskoefficienter

svingninger i materialets porer omsættes til varme på grund af friktion. Porerne må ikke være lukkede, men skal stå i indbyrdes forbindelse; mineraluld, træuldbeton og tekstiler har således stor absorptionsevne, medens andre porøse materialer som porebeton har ringe absorptionsevne på grund af de adskilte porer. De porøse absorbenter absorberer fortrinsvis lyde af høje frekvenser, jvf. figur 10.33, der viser absorptionskoefficienterne for loftsplader af mineraluld, klæbet direkte på et betonloft.

Membranabsorbenter

Membranabsorbenter virker på den måde, at der bag en tæt beklædning på en væg- eller loftflade etableres et afspærret luftrum, der på grund af trykvariationerne over modstand mod, at beklædningen kommer i svingninger ved lydpåvirkning. Denne modstand bevirker, at en del af energien omsættes til varme.

Betragtes en fuldstændig slap membran, udspondt over et afspærret hulrum af tykkelsen d , er systemets egenfrekvens, idet der ses bort fra dæmpningen



$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Figur 10.34: Membranabsorbent

hvor k er systemets stivhed og m er massen pr. arealenhed; (løsningen til systemets bevægelsesligning $m \cdot \delta^2 s / \delta t^2 = -k \cdot s$ er $s = A \cdot \sin t \sqrt{k/m} + B \cdot \cos t \sqrt{k/m}$). Stivheden k er, idet Δp er den til sammentrykningen Δd svarende trykændring i hulrummet

$$k = \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{d}$$

hvor C er luftens kompressibilitet ($= 1/\rho_0 \cdot c^2$), d.v.s.

$$k = \rho_0 \cdot c^2 / d$$

Egenfrekvensen f er således

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{m \cdot d}}$$

Indsættes m i g/cm^2 , d i cm , fås med $c = 340 \text{ m/s}$ og $\rho_0 \sim 1/800 \text{ kg/m}^3$

$$f = \frac{188}{\sqrt{m \cdot d}} \text{ s}^{-1}$$

Under praktiske forhold er membranen imidlertid ikke fuldstændig slap, men vil besidde en vis bøjningsstivhed. Som brugelig tilnærmelse kan systemets egenfrekvens da beregnes af

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_1 + k_p}{m}} = \sqrt{f_1^2 + f_p^2}$$

hvor f_1 er den ovenfor fundne, medens f_p er egenfrekvensen af pladens bøjningssvingninger, der (jvf. udtrykket for en bjælkes bøjningssvingninger) kan beregnes af

$$f_p = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} \cdot \left[\left(\frac{n_a}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_b}{b} \right)^2 \right]$$

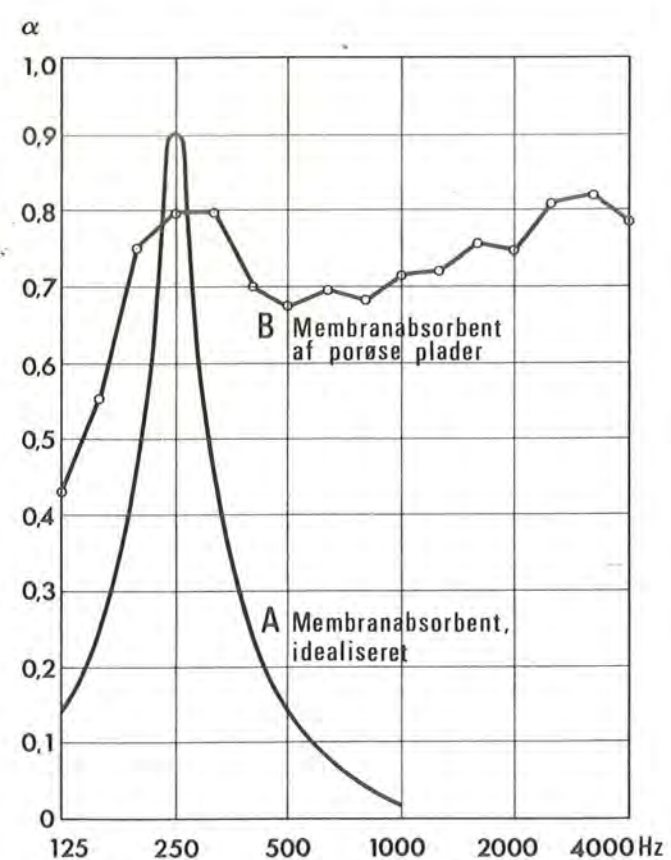
hvor E er materialets elasticitetskoefficient

I er pladens inertimoment pr. længdeenhed

a og b er pladens dimensioner

n_a og n_b er hele tal (0, 1, 2).

Har en indfaldende lyd en frekvens lig med membranabsorbentens egenfrekvens, vil der være resonans, og lydabsorptionen altså stor. Udtrykkene fortæller altså, ved hvilke frekvenser absorptionen er stor, men ikke, hvor stor den er. Dette må konstateres ved målinger, for eks. ved rummetoden, hvor princippet er, at en prøve af absorbenten anbringes i et lydhårdt rum, hvis akustiske egenskaber ændres ved prøvens tilstedeværelse. Måling af rummets efterklangstid med og uden prøvelegeme giver et udtryk for, hvor mange absorptionsenheder prøven repræsenterer, hvoraf dennes absorptionskoefficient umiddelbart kan beregnes.

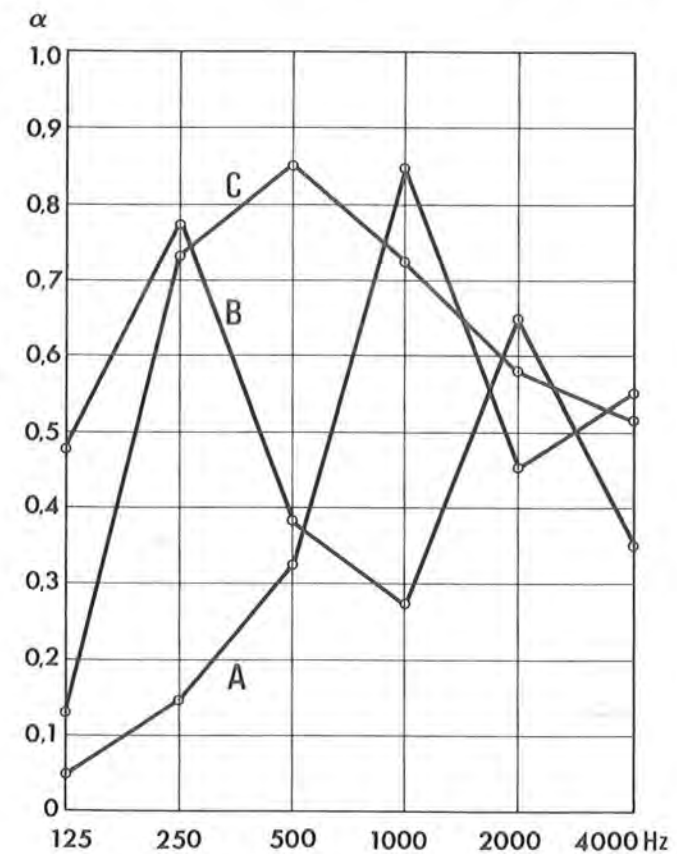


Figur 10.35: Membranabsorbents absorptionskoefficienter

På figur 10.35 viser kurve A absorptionskoefficienterne for en ideal membranabsorbent; den udviser et udpræget maksimum ved resonansfrekvensen, der for de fleste membranabsorbenter i praksis ligger i det lave frekvensområde (50-500 Hz). Ofte kombineres membranabsorbenters virkemåde med porøse absorbenters, derved at membranen udføres af materiale med høj porøsitet, således at der opnås høje absorptionskoefficienter i det meste af måleområdet (kurve B på figur 10.35).

Resonatorabsorbenter

Resonatorabsorbenter består i princippet af plader, der ligesom membranabsorbenter afspærrer et luftrum, men er perforeret, således at hulrummet står i forbindelse med det frie. Under påvirkning af en lydbølge vil luftpropperne i perforeringerne udføre svingninger, idet de dels er påvirket af trykket fra hulrummet, dels fra lydbølgen, der i tilfælde af resonans taber en del af sin energi. Resonansabsorbenter har altså udprægede resonansfrekvenser, hvor lydabsorptionen er meget høj, medens den normalt er ganske ringe ved de øvrige frekvenser. Resonatorabsorbenters fysiske virkemåde kan behandles efter tilsvarende principper som de under membranabsorbenter anførte.



Figur 10.36: Resonatorabsorbenters absorptionskoefficienter

På figur 10.36 viser kurve A absorptionskoefficienterne for en resonatorabsorbent udført ved at skalmure en betonvæg med kantstillede mangehulteglsten; kurven udviser et udpræget maksimum ved 1000 Hz og iøvrigt beskedne værdier af α . Kurve B viser den samme konstruktion, men med et 50 mm hulrum, der er dæmpet med en mineraluldmatte. Kurve C gælder for en 1/8" hård træfiberplade på 2½" lister og perforeret med 5 mm huller pr. 14 mm samt dæmpet hulrum.

En mere detaljeret behandling af lydabsorbenters fysiske virkemåde samt tabeller over materialers og konstruktioners absorptionskoefficienter er givet i litt. [1949.1].

10.3. HYGROTERMISKE FUNKTIONSKRAV

10.3.1. HYGROTERMISKE FUNKTIONER

I de hygrotermiske funktionskrav formuleres de krav, der skal sikre en bygningsdels rigtige virkemåde i henseende til fugt og varme (de eksceptionelle varmepåvirkninger under brand behandles særskilt i afsnit 10.4.). Det drejer sig i første række om de klimaskærmende funktionskrav, d.v.s. de krav, der må stilles til en bygnings enkelte dele, for at de tilsammen kan danne den afskærmning om det enkelte rum, som er forudsætningen for, at der heri kan skabes og opretholdes det ønskede rumklima. Men også fugtproblemer, der ikke direkte har relation til klimaet, har betydning i denne sammenhæng, f.eks. grundfugt og byggefugt.

Det skal bemærkes, at betegnelsen hygrotermisk ikke herhjemme er gængs i den generelle betydning, hvori den her er anvendt (den bruges normalt i en langt snævrere betydning i forbindelse med materialers fugtindhold, jvf. artikel 10.3.3.) Det forekommer imidlertid at være det ord, der mest koncist udtrykker de fysiske fænomener, det her drejer sig om, nemlig fugt og varme.

Rumklimaet eller indendørs klimaet er et uhyre kompliceret spørgsmål, hvori en lang række faktorer af fysisk, fysiologisk og psykisk art spiller ind. Dette problemkompleks falder uden for rammerne af denne fremstilling; her skal kun redegøres for de funktioner, bygningskonstruktionerne har i denne sammenhæng. Disse funktioner er som nævnt at danne skærm om det enkelte rum, hvori klimaet ønskes tilvejebragt og opretholdt. Da imidlertid fordringerne til dette klima - og i endnu højere grad de ydre vilkår for det - er stadigt skiftende, må den teknik, der skal skabe klimaet, være dynamisk, et problem, der helt og holdent må overlades til installationsteknikken, da konstruktionernes egenskaber i henseende til varme- og fugtisolering ifølge sagens natur ikke lader sig ændre efter de krav, de skiftende situationer stiller. Funktionskravene til konstruktionerne må altså baseres på ekstreme klimaforudsætninger, bortset fra de tilfælde, hvor funktionskravene fastsættes på grundlag af økonomisk optimalisering. Om grundlaget for disse krav henvises til litt. [1960.1].

De klimatiske påvirkninger, det drejer sig om i denne sammenhæng, er

temperaturdifferencer
fugtpåvirkninger
vindpåvirkninger.

Hvad temperaturdifferencer angår, skal funktionskravene i første række sikre, at konstruktionsdelene bibringes sådanne varmeisolerende egenskaber, at deres overflader ikke føles ubehageligt varme eller kolde, og at der på økonomisk måde kan opretholdes en temperaturforskel mellem det enkelte rum og dets omgivelser. Det drejer sig naturligvis væsentligst om at hindre for stort varmetab fra rum med almindelig "stuetemperatur" til den sædvanligvis koldere udendørs luft. Men også den modsatte situation kan forekomme, eksempelvis ved kølerum. Endelig skal kort omtales de særlige problemer, der knytter sig til begrænsning af varmetilførsel gennem solindfald.

Hvad fugtighed angår, drejer funktionskravene sig dels om at anordne konstruktionerne således, at de nedbørsmængder, der rammer en bygning, ikke kan trænge ind og forårsage gener eller skader, dels om at sikre, at fugttransport i bygningsdele foregår på en uskadelig måde. Hertil kommer som nævnt fugtproblemer i forbindelse med grundfugt, byggefugt etc.

Hvad vindpåvirkninger angår (bortset fra vindens betydning i statisk henseende), skal funktionskravene sikre, at konstruktionsdelene besidder fornøden vindtæthed til, at rumklimaet ikke forstyrres af de udenfor herskende vindforhold.

10.3.2. VARMETRANSPORT

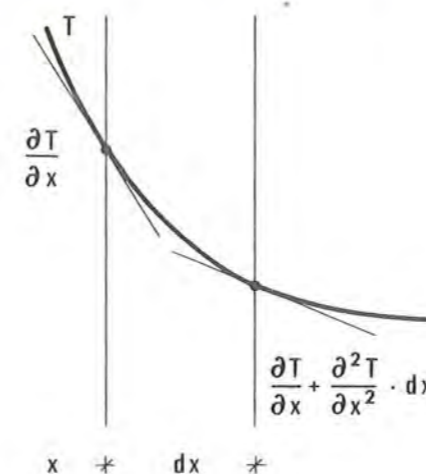
Gennem en bygningsdel, der adskiller rum med forskellig temperatur, vil der foregå varmetransport, d.v.s. transport af termisk energi. Transporten foregår principielt på tre måder:

ledning
stråling
konvektion.

Om disse former for varmetransport skal kort rekapituleres de vigtigste fysiske grundbegreber.

Ledning

Ledning er den varmetransport, der foregår ved direkte berøring mellem legemer (faste, flydende eller luftformige) af forskellig temperatur, ved at der fra de varmere molekyler overføres svingningsenergi til de koldere (langsommere svingende). Betragtes et homogent legeme, hvori temperaturen var-



Figur 10.37: Eendimensional strømning

rierer i een retning, $T = T(x)$, (eendimensional strømning) vil et dellegeme af tykkelsen dx og arealet dF pr. tidsenhed få tilført energien $Q = -\lambda \cdot dF \cdot \frac{\delta T}{\delta x}$, medens der bortledes energien

$$Q' = -\lambda \cdot dF \cdot \left(\frac{\delta T}{\delta x} + \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \cdot dx \right),$$

hvor λ er varmeledningstallet (den varmemængde, der pr. tidsenhed strømmer igennem en volumenenhed af legemet, hidrørende fra en temperaturdifferensenhed).

I legemet akkumuleres altså pr. tidsenhed varmemængden

$$\Delta Q = \lambda \cdot dF \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \cdot dx$$

Denne energi medgår til opvarmning af legemet, og idet materialets varmekapacitet og vægtfylde er henholdsvis c og γ , fås altså

$$\lambda \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \gamma \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta h},$$

hvor $\frac{\delta T}{\delta h}$ er temperaturændringen pr. tidsenhed.

For stationær tilstand er $\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = 0$, og gennem legemet transporteres altså

$$Q = \lambda \cdot dF \cdot \frac{\delta T}{\delta x} ;$$

da temperaturgradienten er konstant, er temperaturforløbet retlinet, og gennem en homogen konstruktion af tykkelsen e og areal F transporteres således

$$Q = \lambda \cdot \frac{F}{e} \cdot \Delta T = \frac{1}{m} \cdot F \cdot \Delta T,$$

hvor $m = e/\lambda$ kaldes varmeledningsmodstanden.

For to- og tredimensionale strømme gælder de analoge udtryk, altså henholdsvis (for homogent materiale, d.v.s. λ konstant)

$$\lambda \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) = \gamma \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta h}$$

$$\lambda \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) = \gamma \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta h}$$

Disse ligninger lader sig kun løse eksakt for de allersimpleste tilfælde; ved praktiske anvendelser må de løses ved iteration eller ved hjælp af elektronregnemaskine.

I ovennævnte udtryk er λ forudsat konstant, hvilket er en forenkling, idet λ i virkeligheden varierer med temperaturen. Om bestemmelsen af λ til praktisk brug henvises til artikel 10.3.4.

Konvektion

Konvektion er den varmetransport, der sker, når molekyler i luftformige eller flydende stoffer flyttes fra et sted med en temperatur til et sted med en anden temperatur. Ved fri konvektion forstås, at bevægelsen alene hidrører fra de af temperaturforskellene forårsagede vægtfyldeændringer, medens tvungen konvektion skyldes ydre kræfter. Fri konvektion har man eksempelvis i et lukket hulrum i en ydervægskonstruktion, medens tvungen konvektion sker på væggen yderside som følge af vindpåvirkningen.

Varmetransporten ved konvektion kan ikke bestemmes teoretisk og forsåvidt heller ikke eksperimentelt, da det ikke er mu-

ligt at skelne, hvad der skyldes ledning, og hvad der skyldes konvektion. Umiddelbart op ad et legeme, der er anbragt i et luftformigt eller flydende medium, vil partikelhastigheden være nul og varmetransporten alene foregå ved ledning, men uden for et vist grænselag vil transporten tillige foregå ved konvektion. I bygningskonstruktioner er der selvfølgelig altid tale om luftformigt medium, og da luft har meget ringe varmeledningsevne (lav λ -værdi), vil der ved en bygningsdels begrænsningsflader altid være et grænselag, der repræsenterer en vis varmeledningsmodstand. Af praktiske grunde sammenfatter man den varmetransport, der sker ved ledning og konvektion ved en bygningsdels grænseflade, i eet tal, varmeovergangstallet ved konvektion, α_{1k} , formelt defineret ganske analogt med det for ledning gældende, for stationær eendimensional strømning altså

$$Q_k = \alpha_{1k} \cdot F \cdot \Delta T = \frac{1}{m_k} \cdot F \cdot \Delta T,$$

hvor $m_k = \frac{1}{\alpha_{1k}}$ kaldes modstandstallet ved konvektion.

Ved beregning af varmetransporten gennem luftlag regnes - ligeledes helt formelt - med varmeovergangstallet ved konvektion, α_k , defineret ganske tilsvarende

$$Q_k = \alpha_k \cdot F \cdot \Delta T = \frac{\lambda_k}{e} \cdot F \cdot \Delta T = \frac{1}{m_k} \cdot F \cdot \Delta T,$$

hvor λ_k kaldes "konvektionstallet".

Det understreges, at disse udtryk er af helt formel karakter, da α_{1k} , α_k og λ_k på ingen måde er konstanter; de er stærkt afhængige af temperaturen og - for α_k 's og λ_k 's vedkommende - af konstruktionens geometriske forhold. Men de kan tjene til at give et indtryk af, hvilke faktorer der spiller en rolle for en bygningsdels varmeisoleringssevne (jvf. side 103).

Stråling

Stråling er den varmetransport, som beror på, at der fra ethvert legeme alene som følge af dets temperatur udstråles varme i form af elektromagnetisk energi. Denne temperaturstråling (emission) bevirker, at der fra en arealenhed af legemets overflade pr. tidsenhed afgives en energi, emittansen, der ifølge Stefan-Bolzmanns lov er

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

hvor T er legemets absolutte temperatur,

C er strålingstallet,

$\varepsilon = C/C_0$ kaldes emissionsfaktoren.

C_0 er det absolut sorte legemes strålingstal ($4,96 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{hOK}^4}$); for de fleste byggematerialer er $\varepsilon \sim 0,8-0,9$, men for et enkelt metal, aluminium, er ε meget lav, selv efter oxydering, ca. 0,1.

Et legeme, der rammes af temperaturstråling, vil dels absorbere, dels reflektere energien. Forholdet mellem den absorberede og den indfaldende energi kaldes absorptionsfaktoren a ; $= \varepsilon$ den er ifølge Kirchhoff's lov identisk med materialets emissionsfaktor ved den pågældende bølgelængde. På tilsvarende måde defineres reflektionsfaktoren r som forholdet mellem den reflekterede og den indfaldende energi, altså

$$r = 1 - a = 1 - \varepsilon,$$

idet det forudsættes, at intet af energien "trænger igennem" legemet.

Betragtes to plane flader i konstant indbyrdes afstand og med de absolutte temperaturer T_1 og T_2 og emissionstallene ε_1 og ε_2 , skal beregnes den indbyrdes varmeudveksling ved temperaturstråling. Fra de to flader afgives pr. arealenhed energien

$$Q_1 = E_1 + (1 - \varepsilon_1) \cdot Q_2$$

$$Q_2 = E_2 + (1 - \varepsilon_2) \cdot Q_1$$

Multipliseres disse med henholdsvis ε_2 og ε_1 og subtraheres, fås

$$Q' = Q_1 - Q_2 = \frac{\varepsilon_2 E_1 - \varepsilon_1 E_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2}$$

Indsættes $E_1 = \varepsilon_1 \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_1}{100}\right)^4$ og det analoge, fås

$$Q' = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] = C_{12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$

$C_{12} (= \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_0})$ kaldes det gensidige strålingstal;

som det ses, indgår fladernes afstand ikke; varmestrålingen er altså uafhængig af afstanden.

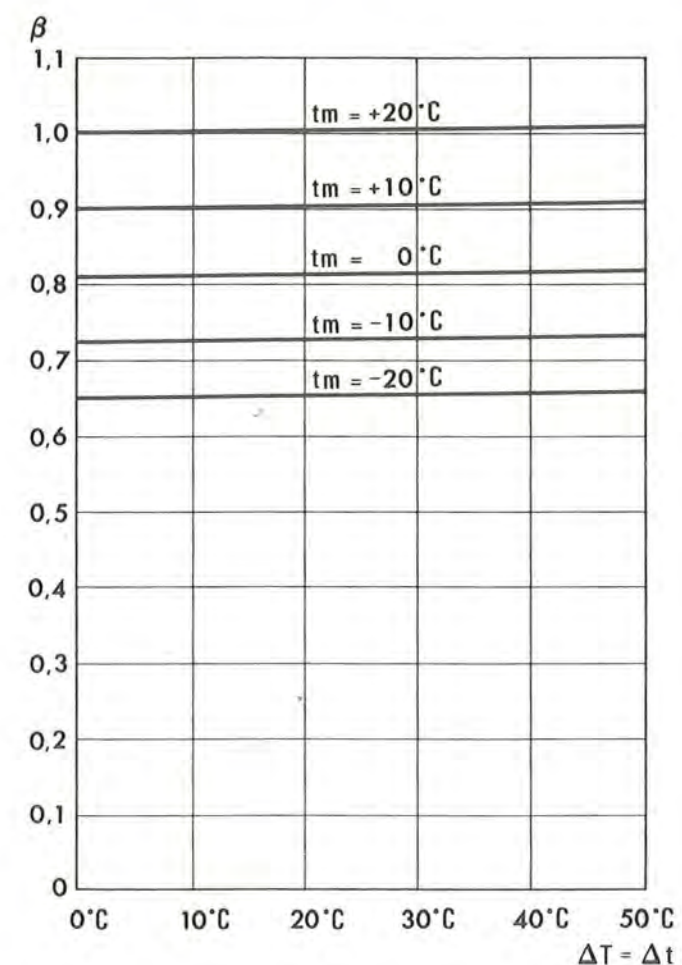
For at få udtryk, der er analoge med de for ledning gældende, sættes formelt

$$Q = C_{12} \cdot \beta \cdot F \cdot \Delta T,$$

hvor faktoren

$$\beta = \left(\frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Delta T} \right),$$

som det ses, er meget nær konstant for de små værdier af ΔT , som der er tale om inden for bygningsisoleringsteknikken, men varierer med fladernes middeltemperatur t_m , jvf. figur 10.38.



Figur 10.38: β som funktion af Δt og t_m

Varmeovergang ved overflader

Ved overfladen af et legeme, der er anbragt i luft, vil der - såfremt der hersker en temperaturforskel ΔT mellem legemets overflade og mediet - ske en varmetransport ved ledning, konvektion og stråling. Formelt kan denne varmemængde i henhold til det foregående sættes

$$Q = (\alpha_{1k} + C_{12} \cdot \beta) \cdot F \cdot \Delta T = \frac{1}{m_0} \cdot F \cdot \Delta T,$$

hvor m_0 kaldes varmeovergangsmodstandstallet.

Konvektions-leddet α_{1k} (der også indbefatter ledningsbidraget) må som nævnt bestemmes eksperimentelt. Dets størrelse afhænger i første række af lufthastigheden. Som brugelig tilnærmelse kan anvendes det empiriske udtryk

$$\alpha_{1k} = 10 \cdot v^{0,5},$$

hvor v er lufthastigheden i m/s, α_{1k} i kcal/m²h°C. Selv ved lufthastigheden 0 vil der dog altid være en vis konvektion.

Strålings-leddet $C_{12} \cdot \beta$ kan bestemmes ud fra kendskabet til emissionstallene for legemets overflade og de flader, den står i strålingskontakt med. For almindelige byggematerialer kan ved temperaturen $t = 0^\circ\text{C}$ $C_{12} \cdot \beta$ regnes $\sim 4,0$ kcal/m²h°C.

På grundlaget af disse talværdier kan der til praktisk brug fastsættes regnestørrelser for overgangstallene for normale bygningskonstruktioner. For udvendige flader sættes almindeligvis $v = 2,5$ m/s, hvoraf

$$\alpha_u = 4,0 + 10 \cdot 2,5^{0,5} = 20 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}},$$

d.v.s. et udvendigt overgangsmodstandstal $m_u = 0,05 \frac{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$ og tilsvarende for indvendige flader

$$\alpha_i = 4,0 + 2,7 = 6,7 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}},$$

d.v.s. et indvendigt overgangsmodstandstal $m_i = 0,15 \frac{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$.

Disse talværdier er selvfølgelig ingenlunde eksakte, men anvendelige til praktisk brug, idet det må erindres, at overgangsmodstanden sædvanligvis udgør en meget beskedent del af en bygningsdels samlede modstand, jvf. artikel 10.3.4.

Det må i den forbindelse understreges, at temperaturstrålingen under visse omstændigheder kan betyde en langt væsentligere varmetransport, end de anførte modstandstal antyder. Ved solbeskinnede yderflader af vægge og tage vil strålingen således kunne forårsage varmetransport modsat den, der sker ved ledning, og i klare nætter vil der fra tage kunne ske en meget betydelig udstråling til de kolde lag i atmosfæren. Dette forhold må selvfølgelig tilgodeses ved beregningen af varmetransporten gennem disse bygningsdele; normalt sker det ved at give et vist tillæg til den almindeligt beregnede varmetransport.

Disse specielle forhold er nærmere behandlet i litt. [1956.1], [1960.1] og [1969.1].

Varmetransport gennem luftlag

Varmetransport gennem luftlag foregår ligeledes ved ledning, konvektion og stråling. Et luftlag kan selvfølgelig ikke bringes større varmegennemgangsmodstand end svarende til luftens varmeledningstal $\lambda_1 \approx 0,02 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$; det, der spiller størst rolle, er imidlertid konvektionen og strålingen.

Et begreb om, hvad det er, der bestemmer et luftlags modstand mod varmetransport, fås af det formelle udtryk

$$Q = (\alpha_1 + \alpha_k + \alpha_s) \cdot F \cdot \Delta T = \left(\frac{\lambda_1}{e} + \frac{\lambda_k}{e} + C_{12} \cdot \beta \right) \cdot F \cdot \Delta T,$$

hvor e er luftlagets tykkelse. For ganske tynde luftlag (0-10 mm) spiller α_1 en væsentlig rolle, men så snart tykkelsen er over 20 mm, er det praktisk taget alene α_s , der betyder noget, d.v.s. tykkelsen spiller ingen rolle.

Skal luftlagets varmegennemgangsmodstand forøges, må det altså ske ved at reducere $C_{12} \cdot \beta$, hvilket som føromtalt kan gøres ved at lade luftrummet omgive af aluminiumfolie, der selv i oxyderet tilstand - har en lav C -værdi. Indskydes således eksempelvis aluminiumfolie på begge sider af et 50 mm hulrum, vil dets modstand forøges fra ca. 0,20 til ca. 0,60 $\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$.

Konvektionen spiller ikke nogen særlig væsentlig rolle for varmetransporten gennem luftlaget, mindst selvfølgelig ved tynde vandrette luftlag med den varme begrænsningsflade øverst.

Dansk Ingeniørforenings "Regler for beregning af bygningers varmetab" angiver som normtal for plane, ikke-ventilerede luftlagsmodstandstal ($\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$) for forskellige lagtykkelser i mm:

	5	10	20	50
luftlag med ikke-metalliske begrænsningsflader	0,12	0,15	0,20	0,20
luftlag med én begrænsningsflade af alu-folie	0,20	0,35	0,50	0,55
luftlag med to begrænsningsflader af alu-folie	0,20	0,40	0,55	0,60

For luftspalter mellem to flader med punktvis berøring angiver samme regler et modstandstal på $0,03 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ for den mellemliggende luftspalte.

10.3.3. FUGTTRANSPORT

I byggematerialerne transporteres fugt i såvel dampform som væskeform. De to former for transport benævnes i almindelighed henholdsvis diffusion og kapillarsugning. Dette er dog en forenkling af de virkelige forhold; i praksis er fugttransporten altid en kombination af de to former samt eventuelle andre, hvilket selvfølgelig gør det overordentlig kompliceret at udrede, hvad der virkeligt sker.

Problemet må altså angribes i en stærkt simplificeret form. Groft taget kan fugttransporten betragtes som diffusion ved lave fugtindhold og som kapillarsugning ved store fugtindhold. Kun disse rene transportformer er det muligt at behandle beregningsmæssigt.

Indledningsvis skal kort rekapituleres de vigtigste fysiske grundbegreber i forbindelse med luftfugtighed og materialefugtighed.

Luftfugtighed

Den atmosfæriske luft indeholder altid en vis mængde fugt i form af vanddamp. Med de små mængder vanddamp, der er tale om, kan luften betragtes som et tokomponent-system af ideale gasarter, tør luft og vanddamp, således at Dalton's lov kan forudsættes gældende, d.v.s. totaltrykket p er summen af de enkelte komponenters partialtryk, altså

$$p_{\text{total}} = p_1 + p_v.$$

Luftens evne til at indeholde vanddamp er stigende med temperaturen. Indeholder luften den største mængde vanddamp, den ved en bestemt temperatur er i stand til, kaldes den mættet, og det tilsvarende partialtryk p_v kaldes mætningstrykket p_m . Det afhænger udelukkende af temperaturen; på figur 10.39 vises 100%-kurven mætningstrykket (mmHg) som funktion af temperaturen ($^{\circ}\text{C}$).

Den absolutte fugtighed f udtrykker den mængde vand, en given luftart indeholder pr. volumenenhed, altså

$$f = \frac{m}{V} \text{ g/m}^3;$$

den relative luftfugtighed ϕ (kort benævnt RF) defineres som forholdet mellem f og den tilsvarende værdi ved mætning f_m

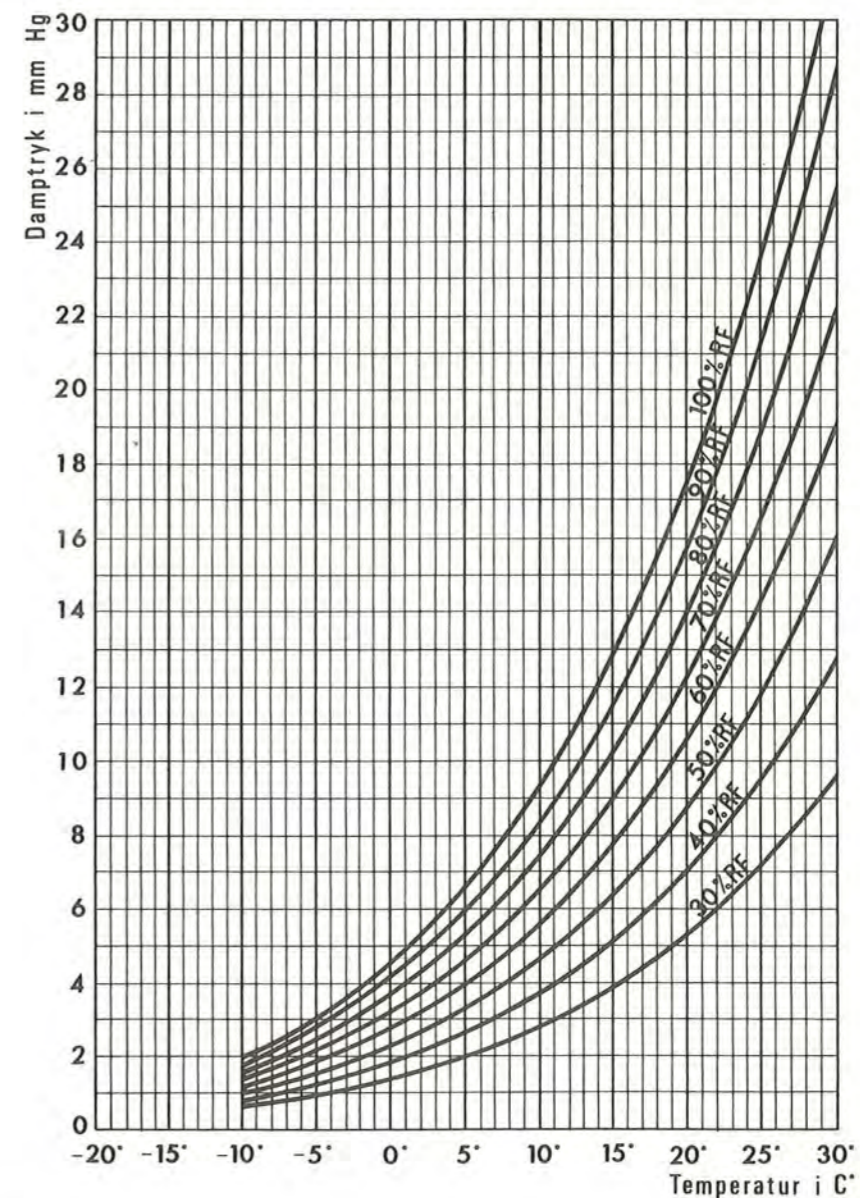
ved den pågældende temperatur, altså

$$\phi = f/f_m \% \text{ RF.}$$

Af luftarternes tilstandsligning ses umiddelbart, at

$$\phi = f/f_m = p_v/p_m$$

$$(p_v \cdot V = m \cdot R_v \cdot T, \text{ hvoraf } f = m/V = p_v/R_v \cdot T).$$



Figur 10.39: Damptrykkurver

Figur 10.39 viser damptrykkets afhængighed af temperaturen ved forskellige værdier af den relative luftfugtighed. En luftart af en bestemt temperatur og relativ fugtighed vil altså have et bestemt partialtryk, der kan aflæses på dia-

grammets ordinatakse. Sænkes temperaturen, influerer det ikke på partialtrykket, men den relative fugtighed stiger. Ved en vis temperatur, dugpunktet t_{dug} , er $\phi = 100\%$ RF; sænkes temperaturen yderligere, vil der udskilles frit vand.

Af sammenhængen mellem p_v , f , ϕ og t_{dug} ses umiddelbart, at een af disse størrelser er tilstrækkelig til sammen med t at karakterisere lufttilstanden fuldstændigt.

Et yderligere mål for luftens fugtighed er det af Mollier indførte forhold fugtighedsgraden x

$$x = \frac{\text{vægtmængde vand}}{\text{vægtmængde tør luft}}$$

en størrelse, der ikke som de øvrige mål for fugtigheden er uafhængig af lufttrykket.

Materialefugtighed

Ethvert materiale, der er i kontakt med luft af en vis fugtighed, vil binde nogle af luftens vandmolekyler til sig og således optage en vis fugtmængde. Idet der ses bort fra kemiske bindinger, (krystalvand, osmose etc.) der normalt er uden interesse i en bygningsfysisk sammenhæng, skyldes fugtbindingen to forhold, adsorption og kapillarkondensation.

Adsorptionen binder et ganske tyndt lag vand (nogle få molekylediametre) til materialets overflade. Det drejer sig altså om uhyre små fugtmængder; hvor meget, afhænger af materialets specifikke overflade. Aktivt kul har f.eks. meget stor specifik overflade og binder altså relativt store fugtmængder, medens byggematerialerne almindeligvis binder meget små mængder ved adsorption.

Kapillarkondensationen skyldes det forhold, at der over de konkave menisker i kapillarerne i et porøst materiale på grund af fugtbindingskræfterne sker en reduktion af mætningstrykket i forhold til en plan overflade. Dette udtrykkes i Thomson's formel, se eksempelvis litt. [1960.2] eller litt. [1967.2]. Er det partielle vanddamptryk i luften større end dette reducerede mætningstryk, vil der kondensere vand i kapillaren. Jo mindre kapillarenes tværdimensioner er, jo mindre er meniskernes krumningsradier og dermed det reducerede mætningstryk; det betyder, at den ved kapillarkondensation

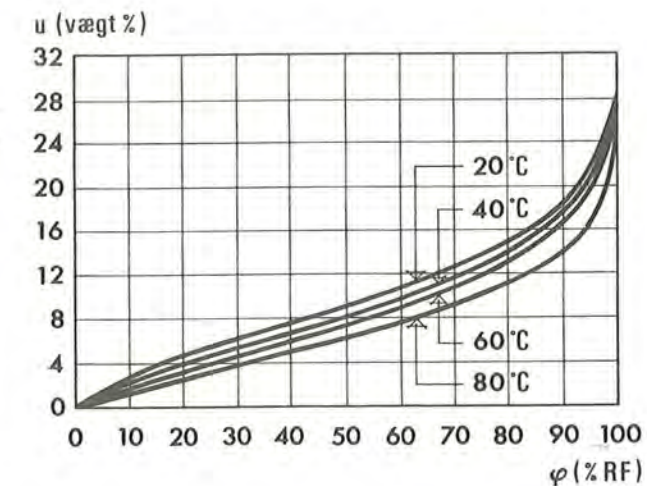
bundne fugtmængde stiger med faldende poredimensioner. Ved et vist fugtindhold, det hygrotermiske ligevægtsfugtindhold, er der ligevægt mellem materialets og luftens fugtindhold.

Den fugtmængde, der således bindes hygrokopisk til et materiale, udtrykkes ved materialets fugtindhold, u , defineret som vægtforholdet mellem vand og (tørt) materiale

$$u = \frac{\text{vægtmængde vand}}{\text{vægtmængde tørt stof}} \cdot 100 \quad (\%)$$

Også andre definitioner af fugtindholdet er benyttet i litteraturen. u afhænger som nævnt i første række af luftens relative fugtighed ϕ , men også af temperaturen (jvf. Thomson's formel), og endelig spiller det en rolle, om der er tale om fugtoptagelse (absorption) eller fugtafgivelse (desorption). For middelværdierne mellem de til absorption og desorption svarende værdier af u benyttes benævnelsen sorption.

Optegnes afhængigheden mellem ϕ og u grafisk, fås for en be-

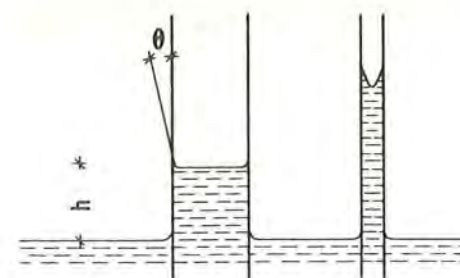


Figur 10.40: Sorptionsisotermer

stemt temperatur sorptionsisotermer ved denne temperatur. For andre temperaturer fås tilsvarende sorptionsisotermer, jvf. figur 10.40, der viser sorptionskurverne for træ; det fremgår af kurverne, at ligevægtsfugtindholdet falder med stigende temperatur, men at temperaturafhængigheden iøvrigt er beskeden.

Sorptionsisotermer for en lang række byggematerialer er gengivet i litt. [1969.1].

Står et porøst materiale i forbindelse med andre fugtkilder end den i luften indeholdte vanddamp, f.eks. et vædskevolumen, vil porerne være vandfyldte i en højde svarende til den kapillære stighøjde. Betragtes et cirkulært stigrør med radius r (figur 10.41), skal overfladekræfterne ved rørets sider holde ligevægt med tyngden af den opsugede fugtmængde



$(h \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot g)$. Er vandets overfladespænding σ , er altså

$$2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos\theta = h \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot g,$$

hvoraf stighøjden, kapillarpotentialet, fås

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho \cdot g} \cdot \frac{1}{r},$$

Figur 10.41: Kapillarer

hvor σ er væskens overfladespænding (for vand $77 \cdot (1 - 0,002 \cdot t)$ dyn/cm), ρ er væskens vægtfylde.

For de fleste byggematerialer kan "fugtinklen" θ sættes ~ 0 ; ved temperaturen $+15^\circ\text{C}$ er altså

$$h = \frac{0,15}{r} \text{ cm},$$

hvor r er angivet i cm.

Som udtryk for det kapillære potentiale anvendes også suctionen, defineret som

$$s = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{kp/cm}^2)$$

eller den såkaldte pF-værdi, defineret som $\log h$, hvor h er angivet i cm.

Diffusion

På grund af molekylebevægelserne vil to luftarter med hver sit vanddampindhold tilstræbe en fuldstændig blanding, hvis de anbringes i samme lukkede beholder. Denne blanding sker ved diffusion. Gennem et luftlag i beholderen vil der ifølge Fich's lov diffundere vanddampmængden

$$g_d = -D' \cdot \frac{\delta c}{\delta x},$$

hvor D' er diffusionskoefficienten (m^2/h),

$\frac{\delta c}{\delta x}$ er dampkoncentrationsgradienten gennem laget.

Idet vanddamp betragtes som en ideal luftart, er altså

$$g_d = \frac{D'}{R_v \cdot T} \cdot \frac{\delta p}{\delta x} = -D \cdot \frac{\delta p}{\delta x}$$

hvor p er vanddampenes partialtryk.

D afhænger af såvel temperatur som totaltryk, men ved de snævre intervaller, der arbejdes med i bygningsfysikken, kan

man uden væsentlig unøjagtighed regne $D \sim 0,09$ g/mhmmHg. I litt. [1967.2] er der nærmere redegjort for disse forhold.

For vanddamps diffusion gennem porøse materialer gælder under stationære forhold tilsvarende udtryk

$$g_d = -d \cdot \frac{\delta p}{\delta x} = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{\delta p}{\delta x},$$

hvor d benævnes diffusionstallet (jvf. varmeledningstallet),
 μ benævnes diffusionsmodstandsfaktoren.

μ er altså et udtryk for forholdet mellem materialets diffusionsmodstand og luftens, medens d er et udtryk for den fugtmængde, der pr. time diffunderer gennem 1 m^2 af et 1 m tykt lag af materialet, når damptrykforskellen er 1 mmHg . Oftest anvendes dog den mere praktiske enhed $\text{gcm/m}^2\text{hmmHg}$.

Under stationære forhold (Δp konstant) vil der altså gennem et homogent lag af tykkelsen e og areal F , hvis d kan regnes konstant, pr. tidsenhed diffundere fugtmængden

$$G = \frac{d}{e} \cdot F \cdot \Delta p = \frac{1}{m_d} \cdot F \cdot \Delta p,$$

hvor $m_d = e/d$ kaldes diffusionsmodstanden ($\text{m}^2\text{hmmHg/g}$). Denne enhed benævnes også Pam, der er den hyppigst anvendte enhed, når det drejer sig om tynde lag som papper, folier etc., der i praktiske bygningskonstruktioner netop er de lag, der yder størst modstand mod vanddampdiffusion.

Udtrykket for fugtmængden er således helt analogt til det for varmeledning gældende (jvf. artikel 10.3.2.). Spørgsmålet er imidlertid, om d kan regnes konstant. Det kan det kun indenfor meget snævre intervaller af temperatur og fugtighed. Den eksperimentelle bestemmelse af d er forbundet med overordentlig store vanskeligheder, da det vanskeligt lader sig gøre at etablere en situation med ren diffusion under isoterme forhold og uden andre fugtbevægelser. De eksperimentelle problemer er nærmere behandlet i litt. [1967.2].

I litt. [1967.3] er gengivet resultaterne af et meget stort forsøgsmateriale til bestemmelse af diffusionsmodstandsfaktoren μ . Ved benyttelse af tabeller i firmapublikationer o.l. må der tilrådes forsigtighed m.h.t. forudsætningerne for anvendelserne.

Kapillarsugning

Forholdene omkring fugttransport ved kapillarsugning i bygge-materialer er endnu så uafklarede, at de unddrager sig kvantitativ beregning. Det følgende tager derfor kun sigte på at anskueliggøre, hvilke faktorer der har indflydelse på fugttransporten.

Grundligningen for fugttransport ved kapillarsugning er Darcy's lov

$$g_k = -\kappa \rho_v \frac{\delta \phi}{\delta x},$$

hvor κ er kapillarledningsevnen (m/h),

ϕ er det kapillære potentiale,

ρ_v er væskens rumvægt.

κ er ikke nogen konstant for materialet; den afhænger bl.a. af viskositeten og er altså temperaturafhængig. Potentialet ϕ er lig med $z + h$, hvor z er den lodrette ordinat og h kapillarpotentialet.

På grundlag heraf (se litt. [1967.2]) kan g_k udtrykkes ved

$$g_k = -k_1 \frac{\delta u}{\delta x} - k_2 \frac{\delta t}{\delta x}$$

Da temperaturgradientleddet er så lille, at det kan negligeres, kan g_k altså formelt udtrykkes ved

$$g_k = -k_u \frac{\delta u}{\delta x},$$

hvor k_u benævnes kapillarledningstallet (jvf. diffusionstallet og varmeledningstallet). Dets enhed er g/mh%, og det er et udtryk for den fugtmængde, der pr. time suges gennem 1 m² af et 1 m tykt lag af materialet, når forskellen i materialets fugtighed er 1%. Det understreges, at udtrykket er formelt, og at det endnu ikke er muligt at beregne, hvor store fugtmængder der transporteres. Det giver dog en værdifuld kvalitativ forståelse af, hvordan kapillarsugning foregår; den vil således ofte foregå modsat fugttransporten ved diffusion (kapillær tilbagesugning) og giver altså forklaringen på, at der i mange konstruktioner ikke sker den fugtophobning, man ifølge en diffusionsberegning skulle forvente.

10.3.4. VARMEISOLERING

Varmetab fra bygninger

Med henblik på tilvejebringelse af tilfredsstillende temperaturforhold såvel i en bygning som helhed som i dens enkelte rum foretager man som grundlag for dimensioneringen af varmekilden en beregning af varmetabet, d.v.s. den varmetransport, der finder sted gennem de omgivende bygningsdele som følge af temperaturforskellene mellem rummet og omgivelserne. Eller rettere sagt: dimensioneringen omfatter både varmekilden og varmeisoleringen, idet der - hvis ikke andre funktionskrav bliver dimensionsgivende - lægges en optimalisering af økonomien til grund. Hvorledes denne dimensionering kan foretages, er udførligt behandlet i litt. [1960.2]. Her skal kun omtales, hvorledes de varmeisolerings tekniske funktionskrav karakteriseres, samt hvorledes de enkelte konstruktionsdele i husbygningen virker i henseende hertil.

Varmetabet fra et rum eller en bygning består af to dele,
 transmissionstab og
 ventilationstab.

Transmissionstabet er den varmeeffekt, der strømmer gennem rummets begrænsningsflader på grund af temperaturforskelle. Ventilationstabet er den varmeeffekt, som på grund af den tilsigtede eller utilsigtede luftfornyelse i rummet medgår til opvarmning af indtrængende luft. Begge varmetab er naturligvis i første række afhængige af de temperaturforskelle, der bevirker varmetransporten; hvorledes disse - og en række andre betydende - forudsætninger for beregningen fastsættes, er herhjemme normmæssigt angivet i Dansk Ingeniørforenings "Regler for beregning af bygningers varmetab".

Ventilationstab

Ventilationstabet foregår som nævnt ved, at varm luft indefra strømmer ud og ved konvektion afgiver varme. I rum uden mekanisk ventilation skyldes det strømning gennem utætheder ved fuger omkring vinduer og døre i ydervægge. Dette tab lader sig selvfølgelig ikke beregne på grundlag af fysiske betragtninger, men må fastlægges empirisk. Ventilationstabet kan udtrykkes ved

$$Q_f = f \cdot L \cdot (t_i - t_u) \text{ kcal/h,}$$

som er den varmemængde (kcal), der pr. time transporteres gennem en fuge af længden L (m) som følge af temperaturforskellen $t_i - t_u$ ($^{\circ}\text{C}$). f betegner fugens fugetal ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$), defineret som den varmemængde, der pr. time strømmes gennem 1 m af fugen ved en temperaturforskul på 1°C . Fugetallet fastsættes empirisk og er afhængigt af den konstruktive udformning og fugens beliggenhed (beskyttet, fri, udsat eller særlig udsat). Erfaringstal for f til praktisk brug er eksempelvis angivet i de nævnte regler for varmetabsberegning.

Ventilationstabet ved mekanisk ventilation er almindeligvis af en anden størrelsesorden end tabet ved naturlig ventilation, men også lettere kontrollabelt. Det afhænger af anlæggets data og falder således uden for rammerne af denne fremstilling, hvor kun bygningsdelenes fysiske egenskaber behandles.

Varmetransmissionstal

Gennem en bygningsdel vil der som nævnt foregå varmetransport ved ledning, konvektion og stråling, således som det er beskrevet i artikel 10.3.2., hvor der er udledt udtryk for varmetransporten gennem de enkelte lag, det være sig materialelag (homogene), luftlag eller grænselag ved overflader. For alle disse gælder under stationære forhold udtryk af formen

$$Q = \frac{1}{m} \cdot F \cdot \Delta t,$$

hvor m er det pågældende lags modstandstal. I varmeisoleringssteknikken udtrykkes m sædvanligvis i $\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$.

Betragtes en bygningsdel, opbygget af lag uden inhomogeniteter, vil der ske en eendimensional strømning; varmen skal "passere" samtlige lag, hvorfor modstandene ligger i serie. Konstruktionens samlede modstand er altså

$$m = m_i + \sum m_e + \sum m_l + m_u,$$

hvor m_i er overgangsmodstanden ved den indvendige overflade, m_u er overgangsmodstanden ved den udvendige overflade, m_e er varmeledningsmodstanden for materialelag, m_l er modstandstallet for luftlag.

For ethvert lag gælder

$$Q \cdot m_i = \Delta t_i \cdot F$$

\uparrow konstant \uparrow konstant

$$Q (m_1 + m_2 + m_3 + \dots) = F (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \dots)$$

$$Q = \frac{1}{\sum m_i} \sum \Delta t_i \cdot F$$

Den reciproke værdi af modstandstallet

$$k = \frac{1}{m} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h}^\circ\text{C}}$$

benævnes konstruktionens varmetransmissionstal (eller blot transmissionstal).

For det enkelte homogene materialelag er $m_e = \frac{e}{\lambda}$, hvor e er tykkelsen i meter, λ er varmeledningstallet i $\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$. For visse materialelag (folier, pap etc.), der væsentligst yder modstand på grund af de luftspalter, der omgiver dem, regnes ikke med $m_e = \frac{e}{\lambda}$, men med et empirisk bestemt m_s , jvf. artikel 10.3.2.

Overgangsmodstandstallene m_i og m_u regnes almindeligvis henholdsvis 0,15 og 0,05 $\text{m}^2 \text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$, jvf. artikel 10.3.2. De særlige forhold ved tage som følge af udstråling mod himmelrummet indregnes almindeligvis ikke i modstandstallet m , men tages i regning ved at regne varmestrømmen

$$Q = 1,15 \cdot k \cdot F \cdot \Delta t.$$

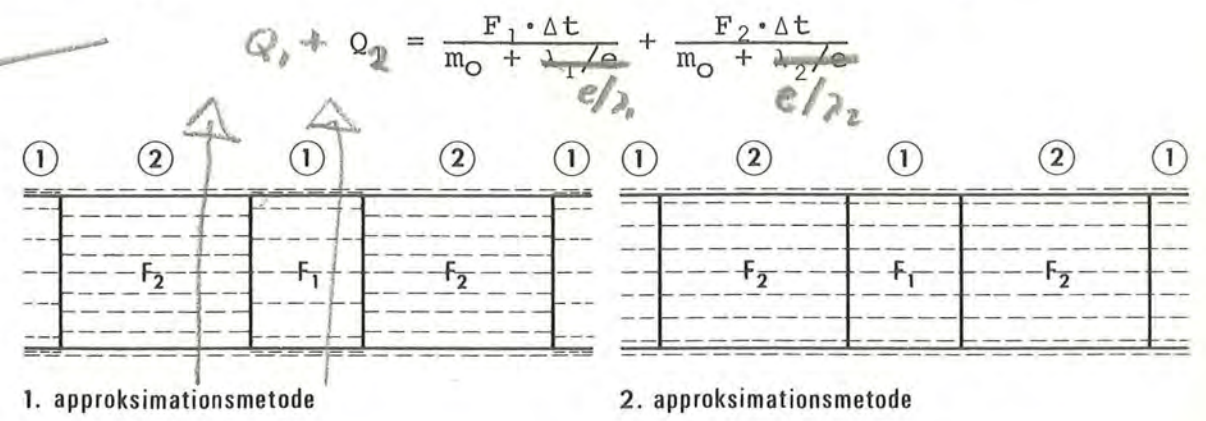
For ikke-ventilerede luftlag er praktisk anvendelige modstandstal angivet side 92.

Imidlertid er ikke alle konstruktioner opbygget således, at de enkelte lag kan regnes homogene. I en isoleret hulmur med faste bindere f.eks. vil binderkolonnerne have væsentlig ringere isoleringsevne end de øvrige partier af væggen, og tilsvarende gælder for f.eks. et træbjælkelag med mineraluldisolering. For sådanne konstruktioner er isotermerne ikke retlinede, strømmingen altså ikke eendimensional. En eksakt beregning af disse forhold er i almindelighed ikke mulig, og selv approksimationsmetoder repræsenterer sædvanligvis et for praksis uoverkommeligt arbejde; det er derfor af værdi at opstille simple beregningsmetoder, der giver et til praktisk brug acceptabelt resultat.

Betragtes tværsnittet af en konstruktion, opbygget af materialerne 1 og 2 (figur 10.42) med varmeledningstallene λ_1 og λ_2 og med delarealerne F_1 og F_2 , kan varmestrømmen gennem konstruktionen approksimativt anskues på to måder. For det første kan skillefladerne mellem materialerne betragtes som helt "varmetætte", d.v.s. isotermerne forløber retlinet og indbyr-

des uafhængigt inden for de to materialer, (1. metode). For det andet kan den samlede konstruktion betragtes som eet homogent lag med et varmeledningstal, der beregnes som gennemsnitstal af de indgående materialer efter vægt, (2. metode).

Efter 1. metode er varmestrømmen gennem ~~de to områder~~ $F = F_1 + F_2$, idet den samlede overgangsmodstand er m_0 ,



Figur 10.42: Approksimativt forløb af isotermer

og konstruktionens transmissionstal k'' altså

$$k'' = \frac{F_1 \cdot k_1 + F_2 \cdot k_2}{F_1 + F_2}$$

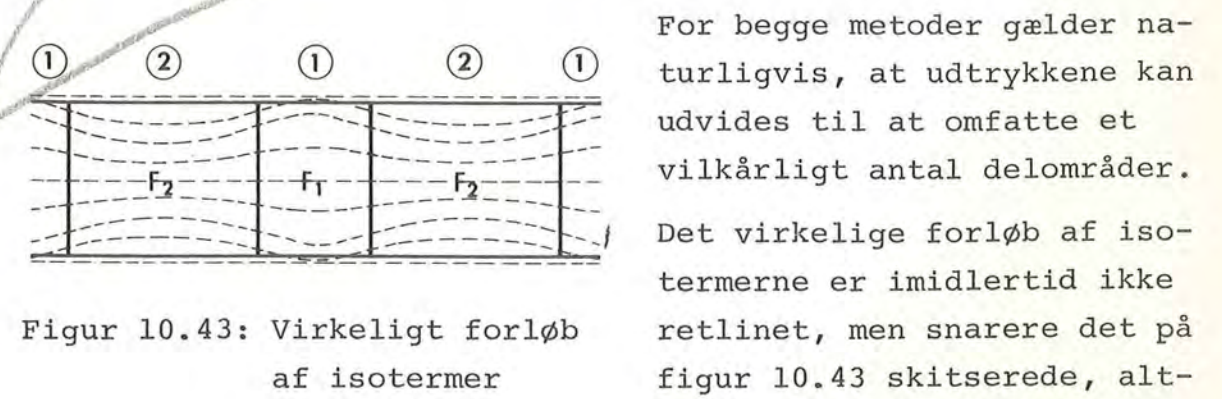
hvor k_1 og k_2 er de enkelte delområders transmissionstal (henholdsvis $1/(m_0 + e/\lambda_1)$ og $1/(m_0 + e/\lambda_2)$).

Efter 2. metode er varmestrømmen gennem F

$$Q_2 = k' \cdot F \cdot \Delta t = \frac{1}{m_0 + e/\lambda} \cdot F \cdot \Delta t$$

hvor λ er det gennemsnitlige varmeledningstal efter vægt, altså

$$\lambda = \frac{F_1 \cdot \lambda_1 + F_2 \cdot \lambda_2}{F_1 + F_2}$$



For begge metoder gælder naturligvis, at udtrykkene kan udvides til at omfatte et vilkårligt antal delområder. Det virkelige forløb af isotermerne er imidlertid ikke retlinet, men snarere det på figur 10.43 skitserede, alt-



$$\begin{aligned} \Sigma Q &= Q_1 + Q_2 \\ &= k_1 F_1 \Delta t + k_2 F_2 \Delta t \\ &= \frac{k_1 F_1 + k_2 F_2}{F_1 + F_2} (F_1 + F_2) \Delta t \end{aligned}$$

$$\Sigma Q = k'' \cdot \Sigma F \cdot \Delta t$$

Område F_1 Område F_2

(A) $Q_1 m_{0,1} = \Delta t_{0,1} \cdot F_1$ $Q_2 m_{0,2} = \Delta t_{0,2} \cdot F_2$

$m_{0,1} = m_{0,2} = m_0$
 $\Delta t_{0,1} = \Delta t_{0,2} = \Delta t_0$

hvoraf $Q = (Q_1 + Q_2) = \frac{1}{m_0} \cdot \Delta t_0 \cdot F$

$F_1 + F_2 = F$

(B) $Q_1 \frac{e}{\lambda_1} = \Delta t_{e,1} \cdot F_1$ $Q_2 \frac{e}{\lambda_2} = \Delta t_{e,2} \cdot F_2$

$\Delta t_{e,1} = \Delta t_{e,2} = \Delta t_e$

$$Q = (Q_1 + Q_2) = \frac{\Delta t_e}{e} (F_1 \lambda_1 + F_2 \lambda_2) = \frac{F \cdot \Delta t_e}{e} \left(\frac{F_1 \lambda_1 + F_2 \lambda_2}{F} \right)$$

Af (A) og (B) $\Delta t = \Delta t_0 + \Delta t_e = \frac{Q \cdot m_0}{F} + \frac{Q \cdot e}{F \cdot \lambda} = \frac{Q}{F} \left(m_0 + \frac{e}{\lambda} \right)$

eller $Q = \frac{1}{m_0 + \frac{e}{\lambda}} \cdot F \cdot \Delta t$

så en mellemting mellem de i de to metoder forudsatte. Den virkelige værdi for k vil altså ligge et sted mellem k' , der er for stor, og k'' , der er for lille. Det er altså på den sikre side at benytte k' , hvilket er almindelig praksis for $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} < 4$; for større værdier er det rimeligere at regne med et gennemsnitligt transmissionstal

$$k = \frac{k' + k''}{2}$$

Isotermernes forløb under bygninger og i jorden omkring kælderydervægge er ligeledes komplicerede. Spørgsmålet er nærmere behandlet i HB 3.2. Vedrørende praktiske regneregler henvises til Dansk Ingeniørforenings "Regler for beregning af bygningers varmetab".

Varmeledningstal

Byggematerialernes varmeisoleringssevne er uhyre forskellige. For beton er således $\lambda = 1,5 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$, medens for polystyrenplastskum $\lambda = 0,03 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$, altså 50 gange så lavt som for beton. De to materials rumvægt er henholdsvis 2300 kg/m^3 og 20 kg/m^3 . Materialernes isoleringsevne er afhængig af mange ting, men groft taget isolerer et materiale bedre, jo lettere det er. Omvendt forholder det sig med materialernes styrke. Byggematerialernes egnethed til at opfylde termiske og statiske funktionskrav er altså - groft taget - komplementære. Visse materialer er udpræget konstruktionsmaterialer, f.eks. stål og beton, medens andre er udpræget varmeisoleringsmaterialer, f.eks. mineraluld og kork. Men mellem disse yderpunkter befinder sig en lang række materialer, eksempelvis letbeton, som i fornøden grad besidder egenskaber i begge henseender, således at de er egnede til konstruktionsdele, der er både bærende og varmeisolerende. Denne dobbeltfunktion er navnlig karakteristisk for tidligere tiders byggeri; i vore dage går tendensen mod mere sammensatte konstruktionsformer med mere differentierede funktioner, eksempelvis curtain-wall-konstruktioner, hvor så at sige hver enkelt komponent varetager sine bestemte funktioner (jvf. figur 10.01).

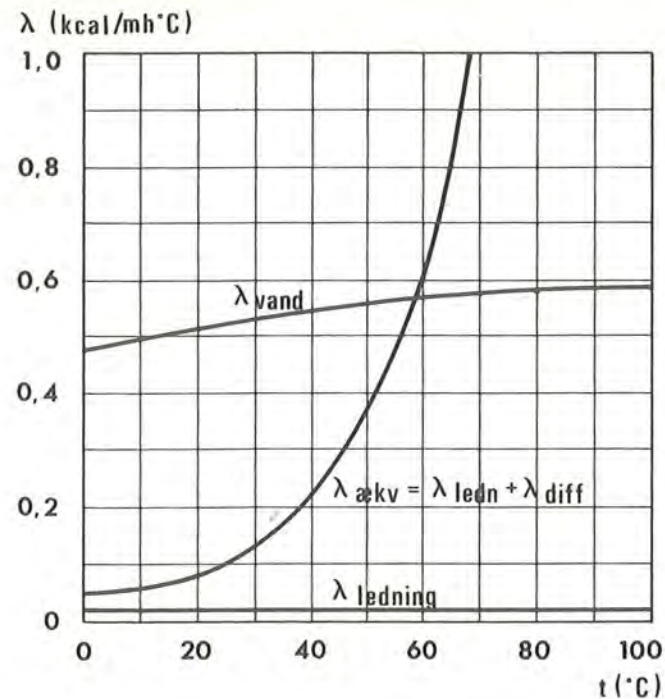
Varmeledningstallet λ er ikke i almindelighed nogen materialekonsstant; de faktorer, der er bestemmende for dets størrelse, er materialets porestruktur og -dimensioner, men desuden

er temperaturen og materialefugtigheden i den konkrete situation af væsentlig betydning.

Materialets struktur spiller en afgørende rolle for varmeledningstallet derved, at luft har et meget lavt varmeledningstal ($0,02 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$) sammenlignet med faste stoffer. Jo mere porøst materialet er, jo mindre rolle spiller varmeledningen gennem selve materialet, der udgør skillevæggene mellem porerne. λ kan dog ikke blive mindre end svarende til λ_{luft} , medmindre porerne er udfyldt med en luftart med endnu lavere λ ; dette er netop tilfældet med visse højisolerede materialer, der er ekspanderet med freon. Imidlertid spiller for meget porøse materialer også konvektionen og strålingen en rolle, og det er derfor af betydning, om porerne er indbyrdes forbundne. Den overvejende del af varmetransporten skyldes dog ledning, og det er derfor væsentligt porøsiteten og dermed rumvægten, der bestemmer varmeledningstallet.

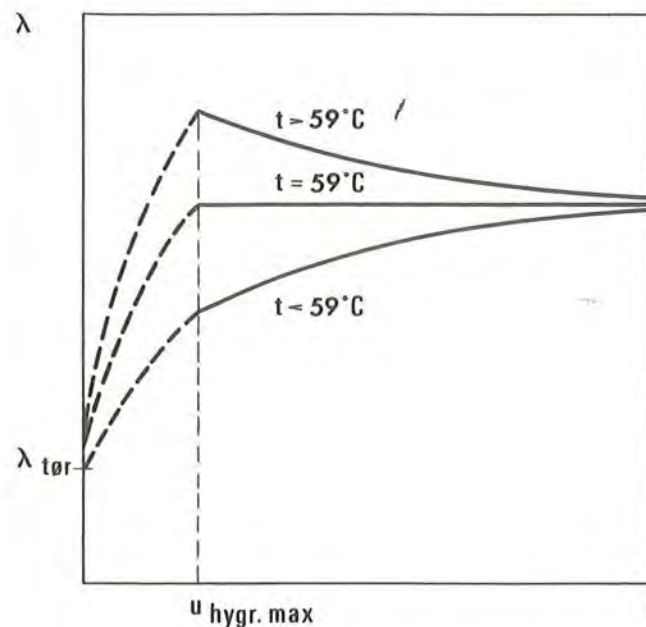
Temperaturen spiller også en rolle derved, at λ stiger med temperaturen; for de temperaturer, der normalt er tale om ved bygningsisolering, er indflydelsen dog beskednen. Men ved meget høje temperaturer (flere hundrede $^\circ\text{C}$) er strålingens bidrag til varmetransporten i porøse materialer så betydelig, at materialets varmeledningstal meget vel kan blive af en anden størrelsesorden end ved normale temperaturer, et forhold, man selvfølgelig må være opmærksom på ved valg af isoleringsmaterialer til ovne, skorstene etc.

Materialefugtigheden er for porøse materialer en faktor af afgørende betydning for varmeledningstallet. Skønt λ for vand kun er ca. $0,60 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ og således i almindelighed væsentlig mindre end for materialets tørstof, betyder en forøgelse af fugtindholdet en langt væsentligere forøgelse af det porøse materials λ , end en tilsvarende forøgelse af tørstofindholdet gør. Det skyldes, at der i et fugtigt materiale under indflydelse af en temperaturgradient vil ske vanddampdiffusion og dermed varmetransport. Figur 10.44 viser afhængigheden mellem temperaturen og den fugtige lufts ækvivalente varmeledningstal $\lambda_{\text{ækv}} = \lambda_1 + \lambda_d$; det ses, at allerede ved $t = \text{ca. } 59^\circ\text{C}$ er diffusionens bidrag λ_d så stort, at $\lambda_{\text{ækv}}$ overstiger λ_{vand} ($\sim 0,60 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$). Det betyder, at ved denne tem-



Figur 10.44: $\lambda_{\text{ækv}}$ for fugtig luft

Eksempelvis vil for letbeton ved normale temperaturer 1% forøgelse af u bevirke ca. 5% forøgelse af λ . Det vil således umiddelbart forstås, at det er af fundamental vigtighed, at



Figur 10.45: λ 's afhængighed af fugtindholdet

må der arbejdes med passende normtal, der nogenlunde dækker de gængse forhold, materialerne er udsat for i praksis; men

peratur er materialets varmeledningstal λ stigende med materialets fugtindhold u , indtil $u = u_{\text{hygr.max}}$, hvorefter det er konstant med stigende u . Ved lavere temperaturer stiger λ fortsat med u for $u > u_{\text{hygr.max}}$, mens λ ved højere temperaturer falder med u for $u > u_{\text{hygr.max}}$. Figur 10.45 viser den principielle sammenhæng mellem t , u og λ . Disse problemer er indgående behandlet i litt. [1962.1].

isoleringsmaterialerne holdes så tørre som muligt. En fugtophobning f.eks. som følge af dampdiffusion eller på grund af kapillarsugning (fugtbroer) vil således fuldstændigt ødelægge isoleringsevnen.

Ved praktiske varmetabsberegninger er det naturligvis ikke overkommeligt at foretage særlig nøjagtige bestemmelser af materialernes varmeledningstal under de givne omstændigheder; til daglig

afviger temperatur- og fugtforholdene væsentligt fra de forudsatte, må der naturligvis korrigeres herfor. Sådanne normaler er eksempelvis angivet i de omtalte regler for varmetabsberegning. For en lang række byggematerialer er der angivet værdierne for basisvarmeledningstallet λ_{10} , målt under standardiserede laboratoriemæssige konditioner ($t = 10^{\circ}\text{C}$, relativ luftfugtighed 35-50%), samt det praktiske varmeledningstal λ , svarende til et fugtindhold, materialet under gængse forhold vil have. For visse materialer, tegl, klinkerbeton, porebeton etc., er dette fugtindhold selvfølgelig forskelligt, alt efter hvor i bygningsdelen materialet er placeret, og der opereres derfor med både "udvendigt" og "indvendigt" varmeledningstal.

Vedrørende basisvarmeledningstal og praktiske varmeledningstal for de forskellige materialer henvises til de nævnte beregningsregler.

Funktionskrav

Spørgsmålet om, hvilke konkrete funktionskrav i henseende til varmeisoleringssevne der skal stilles til bygningsdelene, må anskues udfra såvel økonomiske som hygiejniske synspunkter. Hvad de økonomiske angår, er det selvfølgelig i første række de direkte besparelser i fyringsudgifter, der spiller en rolle, men hertil kommer en række indirekte forhold af samfundsøkonomisk art, som motiverer, at bygningers varmetab begrænses effektivt ved isolering. Men varmeisoleringssevne er selvfølgelig ikke gratis, og der bliver derfor tale om at optimalisere forholdet mellem isoleringsudgifter og fyringsudgifter, de direkte såvel som de indirekte. Dette regnestykke er selvfølgelig både geografisk og tidsmæssigt betinget og derfor usikkert, når det betænkes, at de dispositioner, der træffes, angår bygværker af en levetid på sædvanligvis adskillige generationer. Principperne i sådanne beregninger er udførligt omtalt i litt. [1960.2].

Hvad de hygiejniske synspunkter angår, er hensigten med varmeisoleringssevne at bidrage til opretholdelsen af tilfredsstillende temperaturforhold i en bygning, ikke blot en passende gennemsnitstemperatur, men også en acceptabel temperaturfordeling. Er f.eks. en ydervæg dårligt isolerende, vil temperatu-

ren i nærheden af den være ubehageligt lav og andre steder i rummet ubehageligt høj, selv om middeltemperaturen er passende. De kolde flader giver en for velbefindendet skadelig fornemmelse af "kuldeudstråling". Også i et større perspektiv er der hygiejniske motiver til at varmeisolere effektivt, derved at luftforureningen hidrørende fra fyringsanlæggene begrænses.

Disse synspunkter ligger til grund for de herhjemme gældende lovbestemmelser om bygningsdeles varmeisoleringssevne, som er nedfældet i BR 1966, kapitel 8, og som skal ses i sammenhæng med bestemmelserne i de øvrige nordiske lande, idet de er et resultat af det internordiske samarbejde i "Nordisk Komité for bygningsbestemmelser". Kun i ganske specielle tilfælde vil der være grund til at anstille beregninger over, hvad der er den optimale isoleringssevne af en bygningsdel. Til illustration af transmissionstallets størrelse skal følgende bestemmelser angående beboelsesbygninger gengives fra BR 1966:

Ydervægge af teglsten i bygninger med 2 etager og derunder, bortset fra kælder	$k \leq 0,85$	$\text{kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$
Ydervægge af teglsten i andre bygninger	$k \leq 1,10$	"
Andre ydervægge med vægt over 100 kg/m^2	$k \leq 0,85$	"
Ydervægge med vægt under 100 kg/m^2	$k \leq 0,50$	"
Skillevægge mod uopvarmede rum	$k \leq 1,70$	"
Gulvkonstruktioner direkte på terræn, nyttelast under 400 kp/m^2	$k \leq 0,40$	"
Gulvkonstruktioner direkte på terræn, nyttelast over 400 kp/m^2	$k \leq 0,60$	"
Gulve over ventilerede kryberum	$k \leq 0,50$	"
Etageadskillelser over det fri (portrum og lign.)	$k \leq 0,40$	"
Etageadskillelser mod uopvarmede rum	$k \leq 0,50$	"
Etageadskillelser mod delvis opvarmede rum (kælderrum med fritliggende varmerør)	$k \leq 0,70$	"

Etageadskillelser mod særligt varme rum (kedelrum, bagerier og lign.)	$k \leq 0,50 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
Lofts- og tagkonstruktioner, der begrænser opvarmede rum	$k \leq 0,40 \quad "$

Som det ses, er kravene til lette konstruktioner væsentlig større end til tilsvarende tunge konstruktioner; det skyldes dels det omtalte optimalerings synspunkt, dels det forhold, at de lette konstruktioner har langt ringere varmeakkumulerings evne end de tungere.

Det skal understreges, at de anførte tal repræsenterer minimumskrav til varmeisoleringsevnen; ofte vil man stå sig ved at isolere bedre; specielt vil man ved lette konstruktioner, eksempelvis flade tage, uden nævneværdig merudgift kunne forøge isoleringsevnen meget væsentligt i forhold til lovens krav.

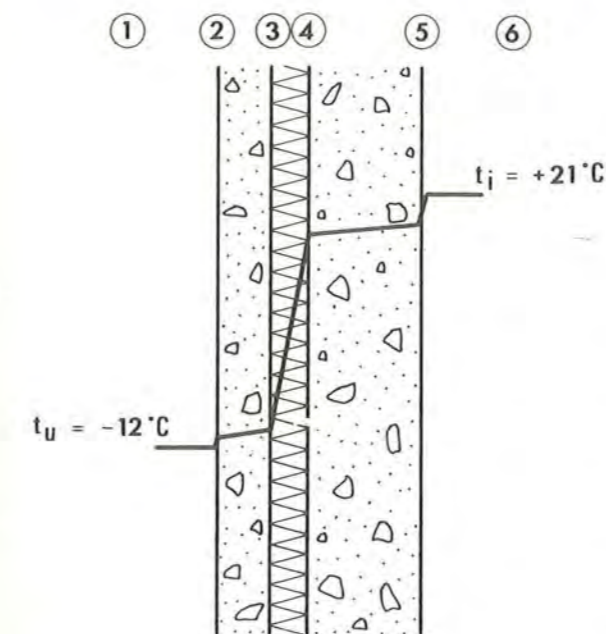
Temperaturforløb gennem en bygningsdel

Af udtrykket for en bygningsdels samlede varmegennemgangsmodstand ses det umiddelbart, at temperaturdifferencen Δt_i over det enkelte lag er proportional med lagets modstand, m_i altså

$$Q \cdot m_i = \Delta t_i \cdot F$$

$$Q \cdot \sum m_i = \sum \Delta t_i \cdot F$$

$$\Delta t_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \sum \Delta t_i$$



Figur 10.46: Temperaturforløb gennem ydervæg

$$\Delta t_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \sum \Delta t_i$$

På grundlag heraf kan temperaturen i hvert enkelt punkt af konstruktionen beregnes, når temperaturerne i omgivelserne er kendte. Den praktiske fremgangsmåde vises lettest ved et eksempel, se figur 10.46, der viser et tværsnit af en ydervæg, udført som betonsandwich-element (15 cm beton, 5 cm polystyrenplastskum, 7 cm beton); $t_i = +21^\circ\text{C}$, $t_u = -12^\circ\text{C}$.

Pkt.	e	λ	m	$\frac{m}{\Sigma m}$	Δt	t
1						-12°C
2			$m_u = 0,05$	0,03	1	-11°C
3	0,07	1,5	0,05	0,03	1	-10°C
4	0,05	0,033	1,50	0,81	26	+16°C
5	0,15	1,5	0,10	0,05	2	+18°C
6			$m_i = 0,15$	0,08	3	+21°C
			<u>1,85</u>		<u>33°C</u>	

Idet væggenes samlede modstand er $1,85 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$, er transmissionstallet

$$k = \frac{1}{m} = 0,54 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}.$$

Med de givne temperaturforhold er varmetabet altså

$$Q = 18 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}.$$

10.3.5. FUGT OG ISOLERING

Fugtkilder og fugtskader —

Enhver husbygningsskonstruktion er udsat for tilførsel af meget betydelige vandmængder; de kan i henseende til deres oprindelse inddeles i

nedbør
grundfugt
byggefugt
brugsfugt (personer, køk-
ner, baderum m.m.)

Disse fugtmængder må naturligvis skaffes bort, og ved den konstruktive udformning af bygningsdelene er det derfor af største vigtighed at sørge for, at denne bortledning kan ske hensigtsmæssigt og sikkert. Hvis ikke dette sker, vil der uvægerligt ske skader. Disse skader, som desværre er altfor velkendte, er i hovedsagen

rindende vand, fugtskjolder, frostska-
der, revner, buler, kastninger, skævheder
nedsat varmeisoleringsevne
råd, korrosion, saltudblomstringer.

Ikke alle former for fugtskader er naturligvis lige alvorlige, hvad konsekvenserne angår. Fugtskjolder kan være generende nok og bør selvfølgelig undgås, men har selvsagt ikke samme økonomiske konsekvenser som f.eks. frostska-
der, råd og korrosion, som jo regulært nedbryder og ødelægger konstruktionerne, eller f.eks. varmeisoleringstab, som jo i høj grad påvirker bygningers driftsudgifter. Alt ialt er det en kendsgerning, at fugtskader hvert år koster samfundet millionbeløb, beløb, som kunne have været en brøkdel, hvis man havde været opmærksom på problemerne og løst dem konstruktivt rigtigt.

Som det fremgår af artikel 10.3.3., er problemerne omkring fugt og fugttransport i bygningsdele så komplekse, at de kun i meget begrænset omfang - og under stærkt forenkede forudsætninger - kan behandles beregningsmæssigt. For langt de fleste af de fugtproblemer, der forekommer i praksis, kan den foretagne teoretiske behandling kun tjene til at give et fin-

gerpeg om, hvad der sker i fysisk henseende. En sådan kvalitativ vurdering kan dog give et værdifuldt begreb om, hvilke foranstaltninger der er hensigtsmæssige, og således bidrage til, at de helt store fejl undgås.

I det følgende skal det vises, hvorledes vanddampdiffusion gennem bygningsdele kan beregnes, og på grundlag heraf anvises, hvordan bygningsdele kan udformes, så diffusionen foregår uden skadevirkninger. Denne fugttransport er den eneste, der på nuværende tidspunkt lader sig beregne.

Kondensation

Afkøles en luftart med et vist fugtindhold til mætningstemperaturen, vil der ske kondensation. Dette indebærer, at hvis en konstruktionsdels temperatur er lavere end dugpunktet for den luft, der rammer den, vil der ske kondensation i eller på den. Kondensationen kan ske på to måder:

- overfladekondensation
- indvendig kondensation.

Overfladekondensation

Overfladekondensation sker, hvis en konstruktionsdels overfladetemperatur er lavere end rumluftens dugpunkt. Da forskellen mellem overfladetemperaturen og rumtemperaturen kun hidrører fra overgangsmodstanden og dermed normalt er ganske lille, vil overfladekondensation kun ske i rum, hvor rumluften i forvejen er meget nær mættet, altså i rum med ekstremt høj relativ fugtighed, eksempelvis vaskerier, svømmehaller og badstuer.

Er dugpunktet under 0°C , vil der dannes rim eller is ved kondensationen.

Overfladekondensation vil normalt ikke frembyde noget problem i husbygningskonstruktioner, da man jo almindeligvis af andre grunde vil bibringe konstruktionsdelene en vis varmeisoleringssevne, således at den indvendige overgangsmodstand kun vil være en ganske lille del af den samlede varmegennemgangsmodstand. Kun ved konstruktioner med ringe isoleringsevne, eksempelvis kælderydervægge og navnlig kuldebroer, som omtalt i artikel 10.3.6. vil der kunne ske overfladekondensation under normale forhold. Et særligt problem frembyder vindueskon-

struktioner, hvor overgangsmodstanden ofte vil være en væsentlig del af den samlede varmegennemgangsmodstand, således at den indvendige overfladetemperatur kommer under dugpunktet. De mest effektive foranstaltninger herimod er at nedsætte overgangsmodstanden gennem luftbevægelse, enten mekanisk eller ved at anbringe radiatorer under vinduerne; men mest effektivt er det naturligvis at øge den samlede varmemodstand ved f.eks. at anordne dobbelt eller tredobbelt glas.

Indvendig kondensation

Indvendig kondensation sker, hvis partialtrykket af de vanddampe, der befinder sig i en konstruktionsdel, overstiger mætningstrykket, altså det partialtryk, en mættet lufts vanddampe har ved den temperatur, der hersker det pågældende sted i konstruktionen.

Under normale forhold vil der være en forskel i vanddampenes partialtryk på de to sider af en ydervæg. Er der eksempelvis indvendigt en temperatur på $t_i = +20^{\circ}\text{C}$ og en relativ luftfugtighed på $\phi_i = 50\%$ RF, udvendigt $t_u = -5^{\circ}\text{C}$, $\phi_u = 90\%$ RF, svarer det til en forskel i partialtrykket på $p_i - p_u = 8,8 - 2,7 = 6,1$ mmHg (jvf. diagrammet figur 10.39). Denne forskel bevirker en diffusion gennem konstruktionsdelen indefra udefter. Regnes der med en stationær tilstand, kan partialtrykkets variation gennem konstruktionen bestemmes på grundlag af de enkelte lags dampdiffusionsmodstand. Beregnes på tilsvarende måde mætningstrykkets variation (svarende til temperaturvariationen), kan man af de to tryks variation direkte aflæse, om partialtrykket noget sted overstiger mætningstrykket, altså om der sker kondensation.

Vanddampdiffusion gennem bygningsdele

I artikel 10.3.4. er det vist, at der under stationære forhold pr. tidsenhed vil diffundere vanddampmængden

$$g = \frac{\Delta p}{m_d}$$

gennem en arealenhed af et homogent materiale med diffusionsmodstanden m_d , når damptrykforskellen er Δp .

Gennem en konstruktion, der er sammensat af flere lag, vil der, da modstandene ligger i serie, diffundere

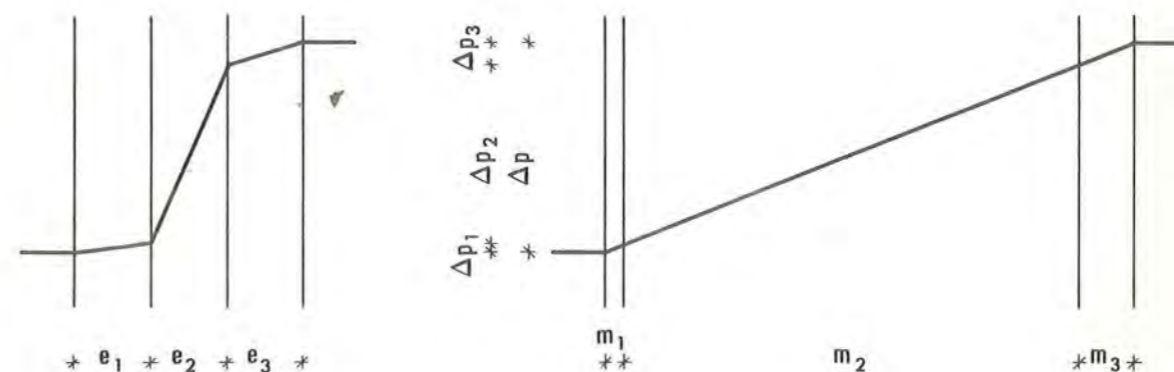
$$g = \frac{\Delta p}{\sum m_d}$$

hvor $\sum m_d = \sum \frac{e_i}{d_i} + \sum m_d^s$; e_i og d_i er henholdsvis tykkelsen og diffusionstallet for det i 'te lag, medens m_d^s er diffusionsmodstanden af særlige lag (f.eks. folier). Udtrykket er fuldstændig analogt til det for varmegennemgang gældende, bortset fra, at overgangsmodstandene er så små, at de kan negligeres ved dampdiffusion.

Trykfaldet over det i 'te lag (modstanden m_i) ses umiddelbart at være

$$\Delta p_i = \Delta p \cdot \frac{m_i}{\sum m_d}$$

Af udtrykket ses, at afbildes damptrykvariationen med diffusionsmodstanden

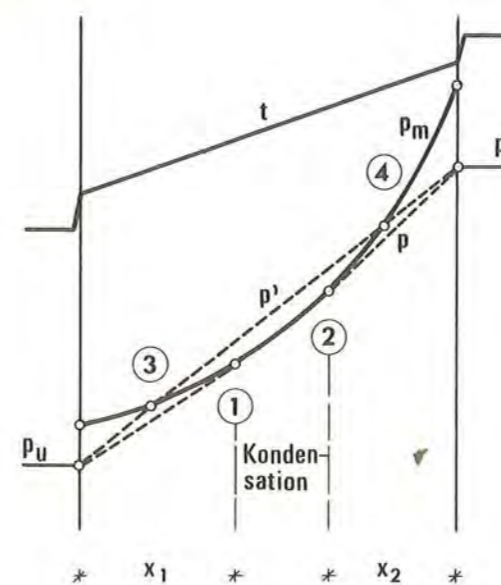


Figur 10.47: Damptrykvariation gennem sammensat konstruktion sionsmodstanden som abscisse i stedet for tykkelsen, får damptrykket et retlinet forløb (figur 10.47). Denne afbildningsform er mest hensigtsmæssig ved de praktiske beregninger.

Indtegnes mætningstrykket p_m svarende til temperaturforløbet gennem konstruktionen, kan det direkte aflæses, om p noget sted overstiger p_m . Hvis dette er tilfældet, sker der kondensation, og det beregnede forløb af p svarer således ikke til virkeligheden, da damptrykket selvfølgelig ikke reelt kan overstige mætningstrykket. Det beregnede forløb af p må altså korrigeres.

Betragtes en homogen konstruktion (figur 10.48) med temperaturforløbet t , kan forløbet af mætningstrykket p_m umiddelbart optegnes (efter figur 10.39). Med damptrykkene p_i og p_u på

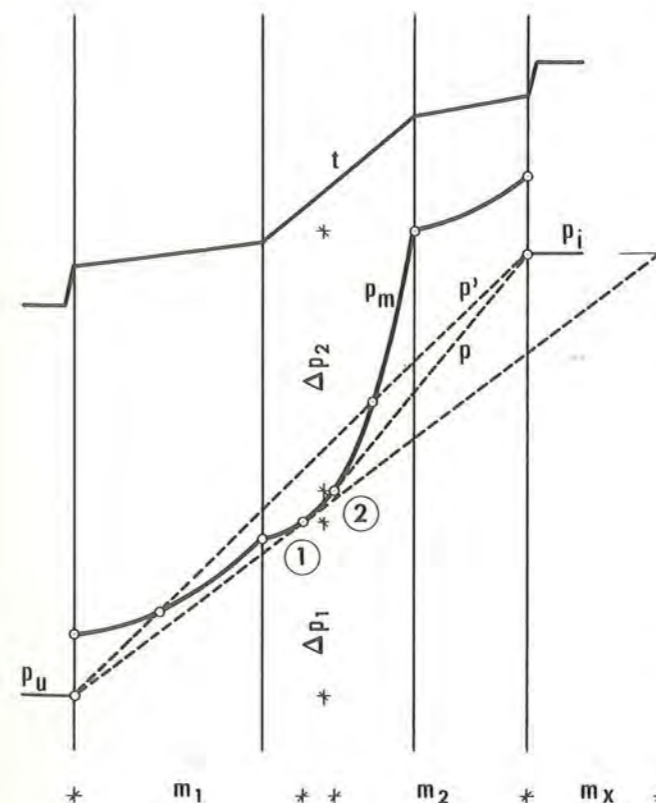
$m = \frac{e}{d}$



Figur 10.48: Kondensation

Den udskilte fugtmængde er differencen mellem den ind- og den uddiffunderende dampmængde

$$g = d \cdot \frac{p_i - p_2}{x_2} - d \cdot \frac{p_1 - p_u}{x_1} = \frac{p_i - p_2}{m_2} - \frac{p_1 - p_u}{m_1}$$



Figur 10.49: Bestemmelse af dampbremse

konstruktionens sider ville damptrykket forløbe retlinet mellem p_i og p_u , hvis ikke linien havde skåret p_m i punkterne 3 og 4. Da der ikke kan forekomme diskontinuiteter i diffusionsintensiteten $g (= -d \cdot \frac{\delta p}{\delta x})$, må p forløbe uden knæk. Det forløb af p , som kommer p' nærmest, og som opfylder betingelsen $p \leq p_m$, er kurven $p_i - p_2 - p_1 - p_u$, hvor $p_i - p_2$ og $p_1 - p_u$ er tangenter til p_m . I området 1-2 hvor $p = p_m$, sker der kondensation.

Beregningsmåden ses umiddelbart at kunne udvides til konstruktioner med et vilkårligt antal lag. Figur 10.49 viser således en trelagskonstruktion, afbildet med diffusionsmodstandene som abscisse. Da den rette linie mellem p_i og p_u skærer p_m , forløber p i stedet efter den brudte linie $p_i - p_2 - p_1 - p_u$, hvor 1 og 2 er tangentpunkter. Den udskilte fugtmængde beregnes af

$$g = \frac{\Delta p_2}{m_2} - \frac{\Delta p_1}{m_1}$$

Kondensationen kan imid-

lertid helt undgås (ved de givne klimabetingelser), hvis der på siden med det høje partialtryk p_i anbringes yderligere en diffusionsmodstand $> m_x$, hvor m_x bestemmes ved skæring mellem tangenten $p_u - p_i$ og $p = p_i$. Denne grafiske bestemmelse af m_x forudsætter naturligvis, at tilstedeværelsen af m_x ikke influerer på det temperaturforløb (og dermed p_m), der ligger til grund for bestemmelsen.

Det vil heraf ses, at princippet i den diffusionsmæssigt set rigtige udformning af en bygningskonstruktion må være at placere de mest diffusionstætte lag på den side, hvor vanddampernes partialtryk er højest og om fornødent anbringe et specielt lag, en dampbremse (eller "dampspærre"), der alene tjener det formål at bringe damptrykket i de øvrige lag i konstruktionen ned under mætningstrykket. Bortset fra de specielle forhold ved kølehuse o.l. vil damptrykket almindeligvis være størst på den indvendige side af en yderkonstruktion, hvorfor det er her, damptæthedens må være størst.

En praktisk regel er, at for lette ydervægge skal der på indersiden være en diffusionsmodstand, der er mindst 5 gange så stor som på ydersiden. Nordisk Komite for bygningsbestemmelser (NKB) foreslår således i sin publikation nr. 5 (litt. [1965.1]), at der i lette ydervægge ud for rum uden overtryk fra mekanisk ventilation skal anordnes en dampbremse på indersiden med en diffusionsmodstand på mindst 100 pam, og at ydersiden højst må have en modstand på 20 pam. I rum med overtryk skal den indvendige diffusionsmodstand være mindst 200 pam.

Dette krav kommer ofte i modstrid med andre hensyn, f.eks. ved flade tage med tagpapdækning, hvor man jo af andre årsager (vandtæthed) "ufrivilligt" har stor damptæthed. Dette problem må klares ved under det vandtætte yderlag at etablere et hulrum, der i henseende til damptryk er i forbindelse med det fri, således at man sikrer, at damptrykket ikke "holdes oppe" af den damptætte yderbeklædning (damptrykkudledning). Praktiske beregningseksempler er givet i litt. [1967.2] og [1967.3].

Det skal her atter understreges, at det billede, den skitse-rede beregningsmåde giver af forholdene, ikke må opfattes for

bogstaveligt, men højst tages som et fingerpeg om, hvad der sker. For det første forudsættes materialerne tørre, hvad de ikke er i virkeligheden; for det andet foregår diffusionen aldrig alene, men er knyttet til en samtidig kapillarsugning (de anvendte diffusionstal er således kun "tilsyneladende", idet de implicit også omfatter kapillartransport), og endelig er forholdene ikke stationære; i virkeligheden vil i visse tilfælde den tid, der går, inden tilstanden er stationær, overstige den tid, hvor de ydre klimatiske forhold kan regnes konstante.

Fugtophobning og udtørring

Af det foregående fremgår, hvorledes det tilnærmelsesvis kan beregnes, om der under givne klimaforhold vil ske kondensation i en konstruktion, samt - hvis dette er tilfældet - hvor meget der kondenseres. Spørgsmålet er så, hvilke klimabetingelser en konstruktion under praktiske forhold vil være underkastet.

Dette spørgsmål må besvares ud fra iagttagelse af, hvordan det udvendige klima (temperatur og relativ luftfugtighed) varierer i årets løb, og en fastsættelse af de tilsvarende størrelser indendøre. Normgrundlag i så henseende eksisterer endnu ikke i Skandinavien. Til orientering skal gengives de tyske bestemmelser (efter litt. [1967.2]):

<u>Klimabetingelser</u>	<u>t</u>	<u>φ</u>
Ophobningsperiode (vinter) 60 dage:		
Indvendig	+20°C	50% RF
Udvendig	-10°C	80% RF
Udtørringsperiode (sommer) 90 dage:		
Indvendig	+12°C	70% RF
Udvendig	Mure	+12°C 70% RF
	Tage	+20°C 40% RF

Den praktiske fremgangsmåde er da, at man beregner, hvor meget fugt der ophobes i løbet af en vintersæson. På grundlag heraf vurderes det, om denne fugtophobnings nedsættelse af isoleringsevnen kan accepteres, og om fugtophobningen er uskadelig med hensyn til konstruktionens holdbarhed, og ende-

lig beregnes det, om den akkumulerede fugt kan afgives i løbet af udtørningsperioden. Hvis ikke alle disse betingelser er opfyldt, må der træffes særlige foranstaltninger, almindeligvis i form af en særlig dampbremse.

I forbindelse med fugtophobning må man selvfølgelig være opmærksom på de meget betydelige fugtmængder, der almindeligvis tilføres en bygning i byggeperioden, byggefugt. For beton f. eks. vil kun ca. halvdelen af støbevandet bindes kemisk og hygroskopisk; den anden halvdel må skaffes bort ved udtørring, altså op imod 100 l/m^3 , hvilket langt overstiger de fugtmængder, der selv under ugunstige omstændigheder ophobes ved diffusion gennem en længere årrække. Denne udtørring må ske ved varmetilførsel og udluftning og kan under normale forhold først ventes afsluttet efter et års tid.

Problemerne omkring udtørringen (såvel af byggefugten som af de førømtalte fra diffusion hidrørende fugtmængder) er endnu så ufuldstændigt afklarede, at praktiske beregningsmåder ikke kan opstilles. Foreløbig må man i disse spørgsmål klare sig ved rent kvalitative vurderinger, støttet af de erfaringer, man har fra praktisk udførte konstruktioner og eksperimentelle undersøgelser. En fornuftig grundregel er, at byggefugt aldrig må spærres inde, og at der i videst mulig udstrækning bør sørges for rigelige udluftningsmuligheder.

Funktionskrav

De funktionskrav, der i henseende til fugtproblemer skal opfyldes, kan kort sammenfattes i tre hovedgrupper:

- 1) Konstruktionerne skal anordnes således, at fugten ikke giver anledning til gener eller skader af hygiejnisk art,
- 2) Konstruktionerne skal anordnes således, at deres holdbarhed ikke nedsættes på grund af fugt,
- 3) Fugttransporten må ikke give anledning til væsentlig forringelse af konstruktionernes varmeisoleringssevne.

De foranstaltninger, der skal sikre disse krav opfyldelse, kan kort sammenfattes i følgende:

- 1) Vandafledning, d.v.s. sikker bortledning af det vand, der rammer en bygning og dens omgivelser (eksempelvis

terrænregulering med fald bort fra bygninger, tilstrækkeligt fald på tage og tilstrækkelige afløbsinstallationer, fald mod afløb på gulve i baderum).

- 2) Vandtæthed af konstruktionen (eksempelvis kælderydervægge, murede ydervægge, beskyttelsespudd).)
- 3) Vandtæt isolering, d.v.s. særlig beskyttelse af konstruktionsdele, der ikke i sig selv kan bibringes fornøden vandtæthed (eksempelvis tagdækning, vandtæt gulvbelægning, fugtisolering af kælderydervægge).
- 4) Kapillarbrydning, d.v.s. afbrydelse af fugttransport ved kapillarsugning (eksempelvis drænlag af grus under terrændæk, papisolering af murværk fra fundamenter).
- 5) Diffusionstæthed (eksempelvis dampbremsende folier på ydervægges indersider og på undersiden af lofter mod tagrum).
- 6) Udluftning, d.v.s. bortledning af fugtig luft fra konstruktionsdelenes indre (eksempelvis ventilering af træskeletydervægge, tagrum, krybekældre, hulrum over isoleringen i tagkonstruktioner, etablering af ventilerede hulrum under vandtæt tagdækning).

I de øvrige kapitler (HB 1 - 9) er der givet eksempler på, hvordan disse foranstaltninger kan komme til udførelse ved praktiske konstruktioner. Et specielt fugtproblem, slagregn, er nærmere behandlet i forbindelse med vindtæthed (artikel 10.3.7.).

10.3.6. KULDEBROER

En kuldebro er en konstruktionsdetaille, hvor et materiale med ringe varemisoleringsevne bryder igennem et materiale med bedre isoleringsevne. Eksempelvis vil en altanplade, der udkrages fra et jernbetonetagedæk, danne en kuldebro, idet den med sin ringe isoleringsevne bryder igennem facadekonstruktionen, som besidder en betydelig isoleringsevne. I en almindelig murværkskonstruktion, opbygget af en formur og en bagmur adskilt med et lag mineraluld, vil ståltrådsbinderne danne kuldebroer gennem isoleringslaget.

En kuldebro har tre uheldige virkninger:

øget varmetab

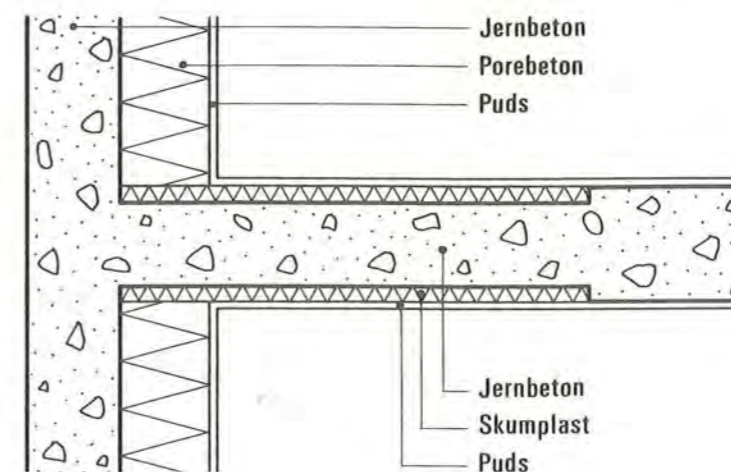
lokal tilsmudsning (større støvnedslag
på kolde flader)

lokal kondensdannelse

Det forøgede varmetab kan selvfølgelig være alvorligt nok og må i visse tilfælde tages i regning, men som skade betragtet må det regnes som mindre væsentligt. Langt alvorligere er de ofte overordentlig skæmmende misfarvninger, der forårsages af det større støvnedslag på de indvendige konstruktionsdele, der holdes kolde gennem kuldebroen, samt skader, der skyldes fugtdannelse ved kondensation, hvor den indvendige, fugtige luft rammer kolde konstruktionsdele. Endelig må man heller ikke se bort fra den personlige følelse af ubehag, der kan være forbundet med at opholde sig ved en væg eller på et gulv, der "udstråler kulde" på grund af kuldebroer.

Konstruktivt bør problemet naturligvis klares ved, at konstruktionsprincippet som helhed anordnes således, at der ingen kuldebroer er. Det vil i praksis sige, at den bærende hovedkonstruktion konsekvent placeres inden døre og adskilles fra det udendørs klima gennem en passende varmeisolering. Hvis dette ikke er muligt - og det er naturligvis langt fra altid rimeligt at fordre dette princip overholdt - må der træffes foranstaltninger til at undgå de skadelige virkninger af kuldebroerne ved konstruktionernes overgang fra det indvendige til det udvendige; dette klares almindeligvis ved at anordne en lokal isolering, der kan "tage spidsen" af kuldebroen. Det skal dog i den forbindelse bemærkes, at en i kul-

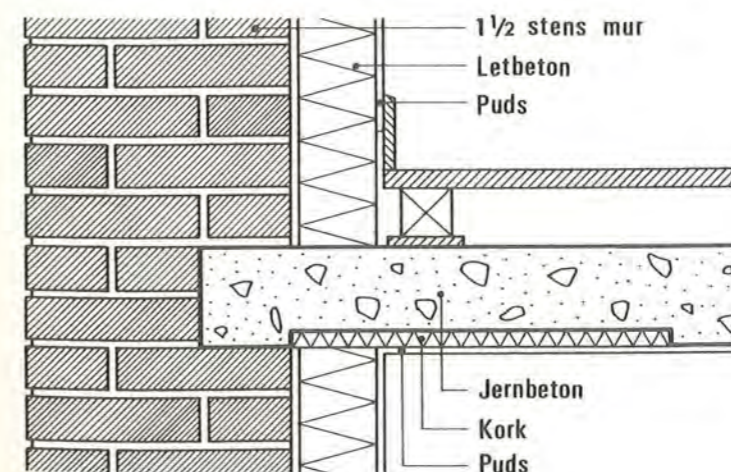
debromæssig henseende gunstig løsning ofte samtidig vil frembyde den klareste løsning med hensyn til det statiske system,



Figur 10.50: Kuldebro, vandret snit,
1:10

vist et vandret snit i en betonskillevejg, hvor den støder op til en ydervæg, som er isoleret på den indvendige side. For at undgå kondensdannelse og misfarvning på den yderste del af skillevejgen er der på begge sider af den indlagt en kuldebroisolering i form af 2-3 cm skumplast, ført 50 cm ind i rummet. Kuldebroproblemet er løst, men konstruktionsprincippet frembyder visse statiske problemer. Disse kunne være klareret ved i stedet at anordne den bærende del af ydervæggen indvendigt, isoleret på ydersiden.

Varmetabet gennem kuldebroen lader sig forholdsvis let beregne



Figur 10.51: Kuldebro, lodret snit,
1:10

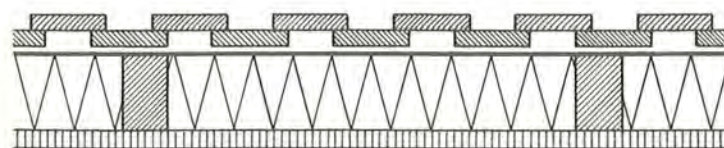
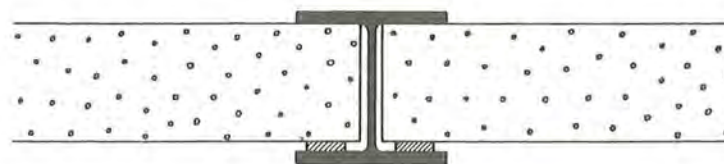
idet en konstruktionsdel, som samtidig er udvendig og indvendig, jo må regnes belastet af den herfra hidrørende temperaturvariation. I det følgende er vist nogle eksempler på disse problemer samt angivet, hvorledes kuldebroproblemet er løst.

På figur 10.50 er

regne ved numerisk beregning af isotermernes forløb (toddimensional strømning). Litt. [1969.1] gengiver en række resultater af en programmeret beregning med varierende geometriske dimensioner.

På figur 10.51 er vist et lodret snit i et jernbetondæks

vederlag på en ydermur af teglstensmurværk, isoleret indvendigt. For at hindre, at kuldebroen giver misfarvninger på dækkets underside, er det isoleret på denne med 2-3 cm kork ført 50 cm ind. På oversiden har kuldebroen ingen synlige virkninger. Konstruktionen frembyder i princippet de samme statiske problemer som i det foregående eksempel, men i langt ringere grad; for det første er såvel murværkets varmeudvidelseskoefficient som dets elasticitetsmodul væsentlig lavere end betonens, for det andet er murværket jo i sig selv en stor samling dilatationsfuger. Erfaringsmæssigt frembyder det murede byggeri ingen særlige vanskeligheder, men ved ekstremt store murværkskonstruktioner må man naturligvis være opmærksom på problemet.



Figur 10.52: Kuldebroer

Figur 10.52 viser yderligere et par eksempler på kuldebroer. Stålkonstruktionen er her langt den alvorligste kuldebro, på grund af stålets store varmeledningstal ($\lambda \sim 50$ kcal/mh⁰C); den vil på kolde dage drive af fugt. Træskeletvæggen er ikke nær

så alvorlig betragtet som kuldebro, men der må ved beregning af transmissionstallet naturligvis tages hensyn til stolpernes tilstedeværelse ($\lambda \sim 0,12$ kcal/mh⁰C).

Om kuldebroproblemer skal det sluttelig bemærkes, at deres løsning ofte medfører bygningsakustiske problemer, da byggematerialernes isoleringsegenskaber i henseende til varme og lyd ofte er komplementære. Løsningen af et kuldebroproblem vil ofte kun kunne ske på bekostning af luftlydisolationen. Et materiale som letbeton (relativ høj rumvægt, og relativ god varmeisolering) vil her ofte være den eneste løsning, der i rimelig grad kan tilgodese både varmeisolerende og akustiske hensyn. Til gengæld får man visse besværligheder med udførelsen. Denne situation er karakteristisk for husbygningen,

hvor man ofte synes at være tvunget til at skulle vælge mellem modstridende funktionskrav. Beklageligvis har der herhjemme været en tendens til at lade de varmeisoleringstekniske hensyn alene bestemme udformningen. I langt de fleste tilfælde vil det dog med lidt fantasi være muligt at finde et passende kompromis, der i rimelig grad opfylder begge funktionskrav.

10.3.7. VINDTÆTHED OG SLAGREGN

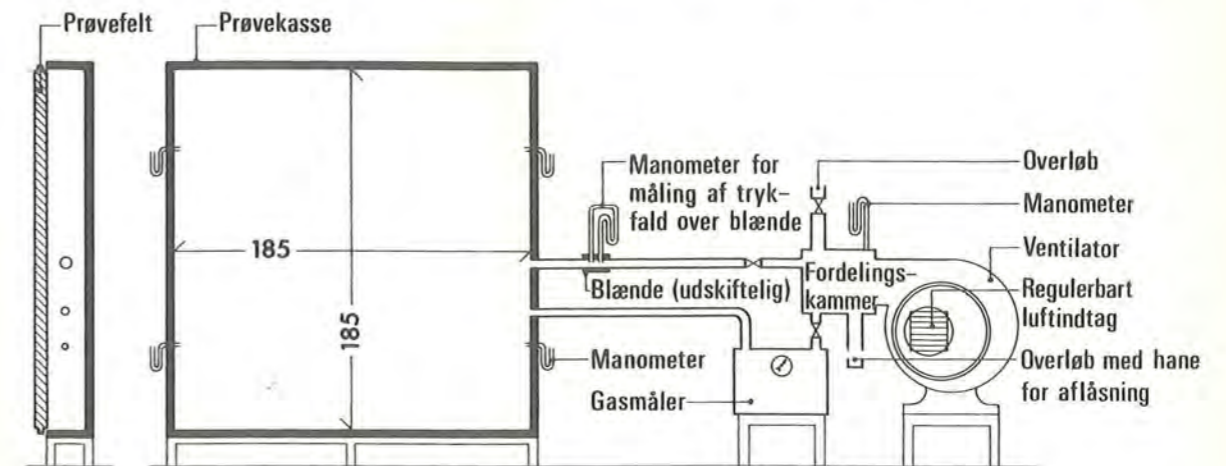
For opretholdelsen af det ønskede indendørsklima er det af afgørende betydning, at der etableres en effektiv afskærmning mod de udenfor herskende vindforhold. For tagkonstruktioner er dette almindeligvis ikke noget problem, men for ydervægge - specielt lette ydervægge - er det væsentligt, at der sikres fornøden vindtæthed. Vindpåvirkningerne på ydervægge giver desuden anledning til et specielt fugtproblem, slagregnen. De to problemer hænger nøje sammen og skal derfor behandles under eet.

Vindtæthed

Det primære krav til en ydervægs vindtæthed er, at der i rummet indenfor ikke må kunne fornemmes luftbevægelser hidrørende fra vind, der er trængt igennem væggen. Dette krav er normalt opfyldt for tunge vægge, såsom murværk og beton; i sådanne vægge er det normalt kun fugerne ved vinduer og døre, der giver problemer. Men for lette vægge, såsom træskelet-, stålskelet- og letmetalvægge, kan det også være et problem at gøre selve vægfladen tilstrækkelig vindtæt.

En let ydervæg må normalt udføres lagdelt, så det enkelte lag opfylder hver sit funktionskrav (jvf. f.eks. figur 10.01). Vindtætheden må sikres gennem et særligt lag udenpå varmeisoleringslaget, da det er af største vigtighed, at dette ikke udsættes for vind, der ved konvektion kan reducere isoleringsevnen. Til sådanne vindtætte lag kan anvendes specielle papper med lavt luftgennemgangstal μ ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{hmmVs}$), men med ringe dampdiffusionsmodstand. Selve materialets vindtæthed er selvfølgelig vigtig, men langt de væsentligste utætheder stammer fra samlinger, sømhuller, rifter etc. Hvor god vindtætheden bliver, afhænger således i langt højere grad af, hvordan overlapninger o.l. foreskrives udført, og af arbejdets udførelse end af, hvilke materialer der anvendes. På Norges byggforskningsinstitut er der udført en lang række forsøg med færdige vægkonstruktioner til belysning af disse forhold. De viser, at åbne overlappingsstød giver en meget ringe vindtæthed; klemte fuger giver væsentlig bedre tæthed, men bedst er naturligvis faldede stød. Men selv med disse er vindtætheden kun en brøkdel af selve materialets tæthed.

Målinger af vindtætheden foretages ved at anbringe en prøve af konstruktionen i et prøveapparat som det på figur 10.53



Figur 10.53: Apparat til måling af vindtæthed

viste. Prøvekassen underkastes overtryk på 10, 30, 50, 70, 40 og 20 mmVS, og den hertil fornødne luftmængde måles. Målemetoden er foreslået af Nordisk Komite for bygningsbestemmelser (litt. [1965.1]). Det bemærkes, at måleområdet maksimale tryk 70 mmVS (70 kp/m^2) svarer til en vindhastighed $\sim 40 \text{ m/s}$ ($\frac{1}{16} \cdot 40^2 \cdot 0,70 \sim 70$); for høje huse kan der imidlertid blive tale om væsentlig højere tryk (jvf. figur 10.06).

Slagregn

En faldende regndråbe vil foruden af tyngdekraften være påvirket af luftmodstand og af vinden. Disse kræfter bestemmer dens retning under faldet. Er den vandrette hastighed lig med den lodrette, vil den altså bevæge sig under en vinkel på 45° med lodret retning. Det er altså ikke blot en bygnings vandrette og skrå flader, men også dens lodrette, der rammes af nedbør. Som udtryk for den nedbørsmængde, der rammer en lodret flade, defineres slagregnmængden som den mængde, der pr. tidsenhed rammer en arealenhed af fladen.

Slagregnmængden afhænger selvfølgelig af nedbørens mængde og af vindhastigheden og vil kunne beregnes teoretisk ud fra observationer af disse størrelser. Mere pålideligt er det naturligvis at foretage direkte målinger af slagregnen. Sådanne målinger er endnu ikke foretaget systematisk herhjemme, men på grundlag af observationer af nedbørsmængder og vindhastigheder har Statens byggeforskningsinstitut for årene 1949 og

1952-54 foretaget beregning af slagregnsmængden over København og Fanø (gengivet efter et tillæg til en dansk udgave af litt. [1960.3]):

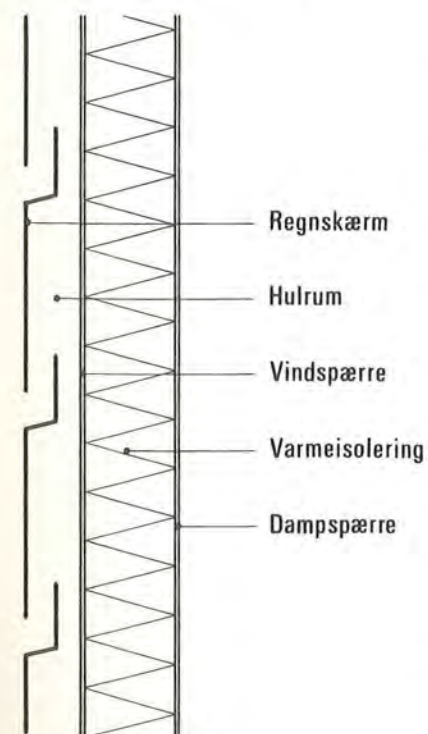
Slagregnsmængder mm/år	S	SW	W	NW	N	NE	E	SE
København	90	129	115	59	34	38	42	47
Fanø	275	391	355	186	84	80	107	146
Oslo	116		47		163		163	
Bergen	1129		688		157		120	
Trondheim	149		290		56		49	

De norske tal gælder beregnede gennemsnitsmængder og er gengivet efter litt. [1969.1].

Tallene giver et begreb om, at slagregnsproblemet ikke er lige stort alle steder. De siger imidlertid ikke noget om, hvor stor slagregnsintensiteten i et givet øjeblik kan blive, og det er jo den, der er bestemmende for de konstruktive problemer. Når slagregnen rammer en bygning, vil der til at begynde med opsuges en del i selve facadematerialet, men efter en vis

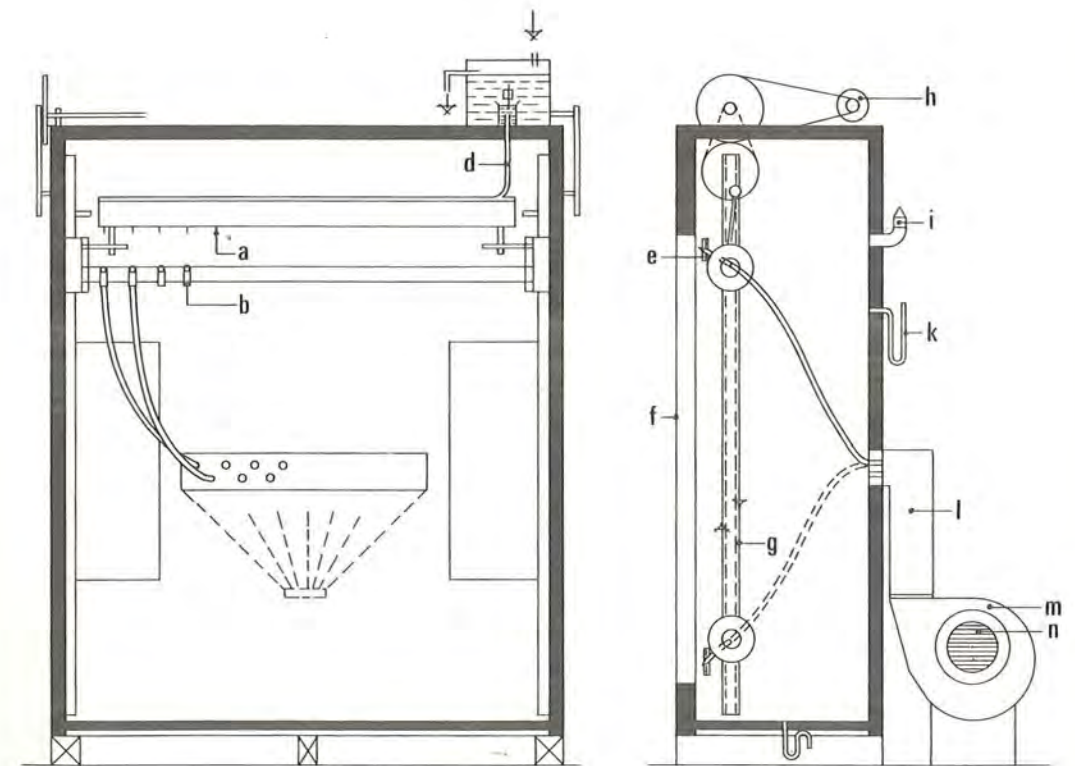
tid (afhængig af materialets sugsevne) vil slagregnen drive som en vandfilm ned over facaden. Ved meget høje bygninger vil denne vandfilm i de nederste etager kunne antage betragtelige dimensioner, adskillige cm. Systematiske målinger til klarlæggelse af disse forhold er endnu ikke foretaget.

Er der på en facade oparbejdet en vandfilm, og hersker der et vindtryk på f.eks. 70 kp/m^2 , vil det altså svare til, at der på en tilsvarende horisontalt liggende konstruktion stod 7 cm vand. Det siger sig selv, at der til en sådan konstruktion må stilles overordentlig store krav om vandtæthed, hvis vandindtrængen skal undgås. Vindtrykket er imidlertid ikke det eneste, der befordrer vandind-



Figur 10.54: To-trins-tætning, skematisk

trængen. Også kapillarkræfter, tyngdekraften og inertikræfter kan drive vand ind i utætheder i konstruktionen, ligesom indtrængende luftstrømme kan føre vandpartikler med sig. Overfor disse fugtangreb er det dog normalt muligt at sikre konstruktionen ved egnede materialer og hensigtsmæssig udformning; derimod giver det førstnævnte forhold, overtrykket på vandfilmen, anledning til alvorlige problemer. Den mest effektive måde at klare disse på er at anordne klimaskærmen som en to-trinstætning, d.v.s. en opdeling i to bestanddele, yderst en regnskærm, hvis eneste funktion er at beskytte den indenfor liggende konstruktion mod regn, og inderst en skærm, der va-



- a. Vandrende med dråbedyser
- b. Luftdyser
- c. Regulerbar blæseventil
- d. Gummislange
- e. Friktionsskive for regulering af blæsevinkel
- f. Prøvefelt
- g. Kædetræk
- h. El. motor
- i. Reguleringsventil
- k. Manometer
- l. Fordelingskammer
- m. Ventilator
- n. Spjæld

Figur 10.55: Apparat til måling af slagregnsthed

retager de øvrige funktioner, således som det skematisk er vist på figur 10.54. Mellem de to dele må der etableres et hulrum med forbindelse til det fri, således at der ikke kan oparbejdes nogen trykgradient, der kan befordre vandfilmens indtrængen i konstruktionen.

Om en projekteret konstruktion vil komme til at fungere tilfredsstillende, kan kun afgøres eksperimentelt. Til dette formål har Norges byggforskningsinstitut udviklet det på figur 10.55 viste forsøgsapparat til afprøvning af en konstruktions modstandsdygtighed overfor slagregn. I trykkammeret bag prøvelegemet etableres et overtryk, der trinvis øges fra 10 til 70 mmVS. Samtidig udsættes prøven for vandpåsprøjtning på 30-100 l/m²h, afhængig af bygningens højde. Det iagttages, om disse påvirkninger giver anledning til vandindtrængen i konstruktionen.

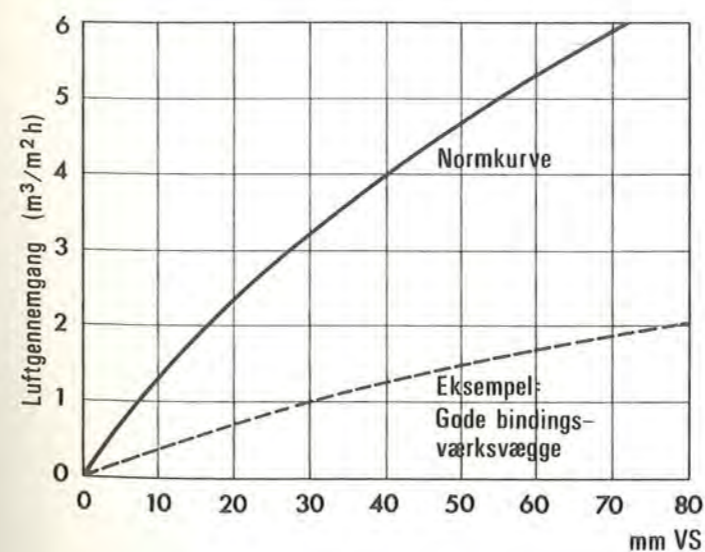
Funktionskrav

De funktionskrav, der skal stilles til en ydervæg i henseende til vindtæthed og slagregn, kan ikke baseres på teoretiske fysiske betragtninger, men må fastlægges empirisk. På grundlag af erfaringer med konstruktioner, som har vist sig at fungere tilfredsstillende, kan man normmæssigt fastsætte, hvilke empirisk definerede krav konstruktionen skal opfylde. Sådanne normkrav er endnu ikke optaget i dansk byggelovgivning.

Nordisk Komite for bygningsbestemmelser foreslår (litt.

[1965.1]) for lette ikke-bærende ydervægge følgende normkrav:

Vindtætheden skal være så stor, at luftgennemgangen gennem en konstruktion ved afprøvning i det på figur 10.53 viste apparatur ikke overstiger værdierne af den på figur 10.56 viste kurve. Varmeisoleringsmaterialet skal være an-



Figur 10.56: Normkurve for vindtæthed

bragt og beskyttet således, at der ikke på grund af konvektionsstrømme i materialet sker en forøgelse af konstruktionens varmetransmissionstal på mere end 10%.

Regntætheden skal være så stor, at der ved afprøvning i det på figur 10.54 viste apparatur ikke trænger vand gennem væggen eller ind i væggen, således at varmeisoleringens eller væggenes levetid nedsættes mærkbart, eller således at væggenes virkemåde ændres. For vægge med to-trinstætning anses kravet for opfyldt, hvis der kun kommer ubetydelig fugtning af det vindtætte lag.

Det skal sluttelig bemærkes, at det normalt altid er fugerne, der i en ydervægskonstruktion giver de største problemer. Det falder dog uden for rammerne af denne fremstilling at gøre rede for hele dette problemkompleks.

10.3.8. SOLAFSKÆRMNING

Den energi, solen udstråler, har ved jorden en intensitet på 1164 kcal/m²h (solkonstanten). Hvis jorden ingen atmosfære havde, ville jordens overflade altså modtage denne energi. I klart vejr er det kun en beskedent del (ca. 30%) af den indfaldende energi, der absorberes af atmosfæren; resten rammer jordoverfladen (dels som direkte stråling, dels som diffus stråling) og dermed de bygninger, der ligger på den. Afhængig af solens højde og strålingens indfaldsvinkel kan det altså blive ganske betydelige energimængder, der rammer en bygning. Har denne store glaspartier (som lader energien passere næsten uhindret), kan der således tilføres bygningen varmemængder, som er meget væsentlige i sammenligning med de andre varmekilder, og som derfor må tages med ved beregning af rummenes varmebalance. Dette problem (drivhus-effekt) falder dog uden for rammerne af denne fremstilling; her skal kort omtales nogle af de foranstaltninger, der kan træffes for at begrænse virkningerne af solstrålingen.

En konstruktionsdel, der rammes af solstrålerne, vil dels reflektere, dels absorbere den tilførte energi. Da energien væsentligst hidføres af de røde og de infrarøde stråler, vil konstruktionsdele, der ikke reflekterer disse stråler, få størst varmetilførsel. For langt de fleste konstruktionsdele er der ikke knyttet særlige problemer til denne varmetilførsel; mørke konstruktionsdele, f.eks. tagflader og mørke facadeelementer, kan dog på denne måde få temperaturer på op imod 100°C, hvad der naturligvis må tages hensyn til ved den konstruktive udformning.

Langt det største problem knytter sig imidlertid til glasfacader og vinduer. Almindeligt glas kan kun regnes at reflektere 7-8% og absorbere ca. 2% af den tilførte direkte og diffuse strålingsenergi. Resten transmitteres altså gennem glasset og tilføres altså rummet indenfor som varme. Hvis denne varmetilførsel er for stor for varmebalancen, må den overskydende varme altså skaffes bort ad mekanisk vej, d.v.s. gennem særlige klimaanlæg. Hvor sådanne ikke i forvejen er nødvendige, er det selvfølgelig en overordentlig kostbar løsning på solproblemet. Ad konstruktiv vej kan problemet afhjælpes ved anvendelse af varmeabsorberende glas, hvorved den indtrængende

de solenergi kan reduceres til ca. 65%. Langt den mest effektive foranstaltning er dog at forhindre solstrålerne i at ramme glasset, d.v.s. at anordne en udvendig afskærmning, f. eks. med et jalousi af varmeabsorberende glas eller bedre med metalpersienser. Fremgangsmåden benyttes ofte i forbindelse med kontor- og skolebyggeri. Indvendig afskærmning løser naturligvis ikke problemet.

Generelt gælder dog i denne sammenhæng det samme som for akustiske problemer, at den mest effektive foranstaltning ligger i en fornuftig planlægning. Det bør ikke komme bag på nogen, at store syd- og vestvendte glasarealer i perioder vil give anledning til meget stor varmetilførsel, som ikke kan klares ved at trække gardinerne for. Men hvis en i denne henseende fornuftig planløsning af een eller anden grund møder uoverstigelige vanskeligheder, er der som nævnt visse muligheder for at klare problemerne på anden vis. I artikel 5.4.6. er der nærmere redegjort herfor.

Nordisk Komite for bygningsbestemmelser anbefaler (litt. [1965.1]) at der til lette ydervægge vendende mod de ugunstigste solretninger stilles krav om, at mindst eet af følgende forhold er opfyldt:

- a) Vinduernes areal er mindre end 12% af gulvarealet.
- b) Vinduerne forsynes med udvendig solbeskyttelse, som er anbragt således, at vinduesareal svarende til højst 10% af gulvarealet rammes af solen. (Dette gælder for alle tider på dagen, marts - oktober incl.).
- c) Bygningen er forsynet med et klimaanlæg med tilfredsstillende kølekapacitet.

10.4. BRANDTEKNISKE FUNKTIONSKRAV

10.4.1. BRANDTEKNISKE FUNKTIONER

I de brandtekniske funktionskrav formuleres de krav til bygningsdelenes brandtekniske egenskaber, som sammen med de øvrige brandmæssige foranstaltninger skal sikre, at brand i en bygning får et acceptabelt forløb, vurderet ud fra personsikkerheden og ud fra økonomiske synspunkter. Hvis det sidste hensyn stod alene, kunne det brandtekniske problem løses som et optimaliseringsproblem (udgifter til brandværn og bygningsmæssig brandsikring contra statistisk beregnede brandskader), men netop personsikkerhedsproblemet gør det vanskeligt at definere, hvad der er acceptabelt, en problemstilling, der iøvrigt er ganske analog til spørgsmålet om bærende konstruktioners sikkerhed i almindelighed. Brandsikkerheden må altså i nogen grad fastsættes arbitrært og er således i sidste instans et lovspørgsmål.

Spørgsmålet om bygningsmæssig brandsikring drejer sig ikke om at forhindre, at brand opstår; noget sådant er selvfølgelig utopisk. Det helt centrale problem er derimod at forhindre, at opstået brand breder sig, og at sikre sig, at det i den udstrækning, den gør det, sker på en måde, der i videst mulig udstrækning tilgodeser de nævnte hensyn. De foranstaltninger, der skal sikre dette, kan deles i tre grupper

Konstruktive foranstaltninger

Planlægningsmæssige foranstaltninger

Brandbekæmpelse.

Af disse er det kun de konstruktive foranstaltninger, der har interesse i en bygningsfysisk sammenhæng. De hænger imidlertid så nøje sammen med de øvrige i en samlet problemstilling, at deres løsning må ses i sammenhæng med disse. Indledningsvis skal der derfor kort gives en oversigt over bygningsmæssig brandsikring i almindelighed.

Brandlovgivning, myndigheder og institutioner

Lovgrundlaget for de her omhandlede spørgsmål er herhjemme:

Lov nr. 246 af 10.6.1960: Byggelov for købstæderne og landet (ændret ved lov nr. 157 af 8.5.1968)

Lov nr. 247 af 10.6.1960: Lov om brandvæsenet i købstæderne og på landet.

Det bemærkes, at der for København og Frederiksberg gælder særlige love, ligesom også Færøerne og Grønland er undtaget.

I brandmæssig henseende dækker byggeloven (med det dertil knyttede bygningsreglement, BR 1966 + tillæg) stort set de konstruktive og planlægningsmæssige foranstaltninger, medens brandloven stort set dækker brandbekæmpelse (brandvæsen etc.). Herudover er der i en række andre love og regulativer (arbejderbeskyttelse, opbevaring af brandfarlige stoffer etc.) nedfældet bestemmelser af brandmæssig art.

Almindeligvis varetages den brandmæssige myndighedsbehandling af en byggesag sammen med den øvrige byggesagsbehandling af bygningsmyndigheden. Øverste instans i disse spørgsmål er således boligministeriet, der ligeledes administrerer en godkendelsesordning af byggematerialers brandtekniske egenskaber. I særlige tilfælde vil man ofte blive henvist til særlig forhandling med brandmyndigheden.

I BR 1966 med tilhørende tillæg (specielt nr. 6) er en lang række brandmæssige konstruktive bestemmelser knyttet til de af Dansk Standardiseringsråd udarbejdede standardblade (DS), der for en stor del er i overensstemmelse med de i det øvrige Skandinavien gældende (INSTA-rekommandationer) samt ISO-rekommandationerne. Endvidere er visse bestemmelser knyttet til prøvningsregler udarbejdet af Statsprøveanstalten. Nogle af disse regler refererer direkte til beskrivelser, der er udarbejdet af den tilsvarende svenske anstalt, Statens Provningsanstalt. Disse svenske regler er altså gældende lov i Danmark.

Endelig skal i denne sammenhæng nævnes brandforsikringselskaberne, hvis indflydelse (kanaliseret gennem Dansk Tarifforening) på et projekts brandmæssige udformning kan være ganske betydelig, specielt ved industribyggeri, hvor brandforsikringspræmierne kan være en væsentlig del af driftsomkostningerne. Dansk brandværnskomite er en af brandforsikringselskaberne og boligministeriet etableret institution til formidling af kendskabet til erfarings- og forskningsre-

sultater på det brandtekniske område.

Planlægningsforanstaltninger

De planlægningsforanstaltninger, der kan foretages med henblik på at begrænse en brands udbredelse og de skader, den forvolder, knytter sig til følgende tre forhold

Sektionering
Afstandsforhold
Redningsforhold.

Sektionering

Den mest effektive måde at begrænse en brandskades omfang på er at lokalisere branden til det rum, hvori den er opstået, så lang tid, at den kan nedkæmpes, inden den når at brede sig til andre rum. Et rum eller bygningsafsnit, der er således sikret en time, benævnes en brandcelle, (iflg. BR 1966, kapitel 6, skal en brandcelle være omgivet af konstruktioner med en brandmodstandsevne på mindst 1 time). Jo mindre brandcellen er, jo mindre er selvfølgelig - alt andet lige - skadens omfang.

Ved sektionering foretages opdeling af en bygning i brandceller. I boligbyggeri skal således hvert lejemål være en brandcelle. Spørgsmålet om, hvor vidt sektioneringen skal drives, må selvfølgelig i første række bero på bygningens brugsfunktioner. Forsamlingslokaler, kirker, koncertsale, teatre etc. kan selvfølgelig ikke opdeles, og i mange industrianlæg vil en sektionering betyde et uacceptabelt indgreb i en rationel produktionsgang. Endelig må spørgsmålet om sektionering selvfølgelig også afhænge af værdien af bygningen og dens indhold samt af en vurdering af risikoen for brand overhovedet og af mængden af brændbart materiale.

Afstandsforhold

Ved at anlægge bygninger i en passende indbyrdes afstand er der truffet en effektiv foranstaltning mod brandspredning mellem dem. Det er i første række brandspredning til naboejendomme, lovgivningen i så henseende må tilsigte at forhindre; men også inden for samme ejendom, f.eks. ved industrianlæg kan der i visse tilfælde være grund til at arbejde med brandforsvarslinier. Bestemmelserne i BR 1966 om afstandsfor-

hold og skelafstande er ikke udelukkende brandmæssigt betingede, men skal tillige tilgodesee en række hygiejniske hensyn. Hvor brandspredning ikke kan forebygges gennem afstandsholdene, f.eks. ved tæt bymæssig bebyggelse, må andre foranstaltninger træffes, f.eks. brandmure.

Redningsforhold

Det er et fundamentalt krav til enhver bygning, at den i tilfælde af brand skal frembyde rimelige redningsmuligheder for de personer, der opholder sig i den. Det grundlæggende princip er, at man fra ethvert sted i bygningen skal kunne bringe sig i sikkerhed ad mindst to indbyrdes uafhængige veje, medmindre der etableres een fuldstændig brandsikker redningsvej.

Ved byggeri i een etage er det sjældent noget problem at etablere rigelige redningsmuligheder. Større lokaler som forsamlingsale, teatre, biografer, supermarkeder etc. kan dog frembyde særlige problemer; den almindelige regel er, at der må kræves mindst to indbyrdes uafhængige udgangsveje af en sammenlagt bredde på mindst 1 meter pr. 100 personer. Hertil kommer en række andre sikkerhedsforanstaltninger, som fastsættes i det enkelte tilfælde i samråd med brandmyndigheden.

Ved etagebyggeri er problemet mere kompliceret. Ved boligbyggeri anses sikkerheden for rimelig, når man fra ethvert sted kan nå to trapper; subsidiært er een brandfri trappe samt redningsmulighed gennem vindue eller altan tilstrækkelig, hvis disse sidste kan nås af brandvæsenets stiger; (er gulvhøjden over terræn større end 10 meter, fordres særlige brandveje til fremføring af kørende materiel). I større højde end 22 meter er redning med stiger ikke mulig; i sådanne boligbyggerier må der fordres sikkerhedstrappe, hvorved forstås, at adgangen til den sker i det fri eller gennem luftsluse, og at trapperummet overhovedet ikke indeholder brændbare materialer. Ved højere byggeri end 45 meter kan kravene skærpes.

Vedrørende de detaillerede bestemmelser om døres og vinduers udformning m.m. henvises til BR 1966. For andre bygninger end boligbyggeri er bestemmelserne ikke konkretiseret. Det grundlæggende princip er det samme som for boligbyggeri, men de nødvendige foranstaltninger må i hvert enkelt tilfælde fastsættes i relation til bygningens særlige karakter (skoler,

, hoteller, sygehuse etc.) i samråd med brandmyndigheden.

Brandbekæmpelse

Af væsentlig betydning for de brandtekniske funktionskrav, der skal stilles til bygningskonstruktionerne, er mulighederne for at bekæmpe en opstået brand. Det er indlysende, at jo hurtigere bekæmpelsen sættes ind, jo mindre omfang får branden, og jo mindre betyder altså konstruktionernes brandtekniske egenskaber.

De brandbekæmpelsesforanstaltninger, der spiller en rolle i den samlede vurdering af en bygnings brandtekniske kvaliteter er

sprinkleranlæg
førstehjælpsslukningsmidler
brandalarmeringsanlæg
brandventilation.

Sprinkleranlæg

Et sprinkleranlæg er et permanent installeret, automatisk virkende slukningsanlæg, der træder i funktion ved en bestemt temperatur. Det består af et rørsystem ophængt under loftet i de rum, der skal sikres; med passende mellemrum er der på rørledningerne, der står under konstant vandtryk, anbragt dyser, sprinklerhoveder, der ved en smeltesikringsanordning åbnes ved den omtalte temperatur og derved udløser et "regnvejr" over det område, sprinklerhovedet dækker.

Sprinkling har vist sig at være den sikreste form for brandbekæmpelse, først og fremmest fordi den virker automatisk og øjeblikkeligt. Men den er selvfølgelig også bekostelig. Detaillerede bestemmelser for udførelse af sprinkleranlæg er udgivet af Dansk Tarifforening. Et forskriftsmæssigt udført sprinkleranlæg reducerer brandforsikringspræmierne med indtil 50%.

Førstehjælpsslukningsmidler

Også simple hjælpemidler som håndsprøjtebatterier og kulsyre-slukkere har i talrige situationer været effektive foranstaltninger til at forhindre en brand i at udvikle sig. Deres effektivitet beror i væsentlig grad på, at de er hensigtsmæssigt anbragt og afmærket, ordentligt vedligeholdt, og at per-

sonalet er ordentligt orienteret og instrueret i brugen af dem. Men selvfølgelig kan de i effektivitet ikke måle sig med de automatisk virkende sprinkleranlæg.

Brandalarmeringsanlæg

Hvis en brand har udviklet sig til et sådant omfang, at den ikke kan nedkæmpes med de nævnte midler, og brandvæsenet må assistere, er det af afgørende betydning, at det tilkaldes omgående. Den tid, der går, fra branden opdages, til meldingen tilgår brandvæsenet, er ofte så kritisk, at den er afgørende for, om der bliver tale om en storbrand. En effektiv sikring mod en sådan - ofte katastrofal - forsinkelse er automatiske brandalarmanlæg, d.v.s. detektorer, som ved impulser (temperatur, røg, lys etc.) foranlediger, at der øjeblikkeligt tilgår brandvæsenet melding.

Automatiske brandalarmeringsanlæg har navnlig værdi ved industrivirksomheder med sparsomt mandskab (automatisk produktion, lagre etc.). Værdien beror dog i meget væsentlig grad på afstanden til brandvæsenet og på dettes kapacitet.

Brandventilation

Når branden er så udviklet, at den må bekæmpes af brandvæsenet, er det meget vigtigt, at slukningsarbejdet ikke umuliggøres af røg og hede. En meget væsentlig foranstaltning er det derfor, at konstruktionen, særlig tagkonstruktioner, er indrettet således, at røg og varme kan undslippe. Dette kan sikres ved automatisk brandventilation, f.eks. røglemme, der automatisk bringes til åbning ved en vis temperatur, eller ved taktisk brandventilation, hvorved forstås, at der i tagkonstruktionen er anordnet partier (ovenlyskupler, glaspartier etc.), der hurtigt kan slås ud af brandmandskabet ved anvendelse af simple redskaber.

10.4.2. MATERIALERS BRANDTEKNISKE EGENSKABER

Brandlovgivningen herhjemme hviler endnu på et så empirisk grundlag, at det umiddelbart kunne synes overflødigt at nævne andet end de standardiserede betegnelser: brændbare og ubrændbare materialer samt materialer af "klasse A" og "klasse B", allesammen knyttet til normerede prøvningsmetoder, jvf. nedenfor. Det må imidlertid forudses, at bygningsbrandteknikken med tiden vil forlade dette empiriske stadium og bevæge sig i retning mod en mere funktionelt bestemt metodik, hvor brandteknisk dimensionering - i hvert fald af bærende konstruktioner - foregår på et rationelt grundlag, ganske svarende til det øvrige dimensioneringsgrundlag for bærende konstruktioner. Det må dog erkendes, at det videnskabelige grundlag for en sådan metodik endnu er for ufuldstændigt til praktiske anvendelser, men fra et bygningsfysisk synspunkt er det væsentligt at gøre sig klart, hvilken rolle materialernes og bygningsdelenes brandtekniske egenskaber spiller i denne sammenhæng.

Udgangspunktet for en rationel brandteknisk dimensionering må være at søge følgende spørgsmål besvaret:

- a) Hvad betyder materialernes egenskaber for brandens forløb?
- b) Hvordan indvirker branden på materialernes egenskaber?

Det første spørgsmål drejer sig om at bestemme, hvor meget og hvordan de forskellige materialer (ikke blot byggematerialer) i en bygning bidrager til branden; det er grundlaget for bestemmelsen af brandbelastningen og brandforløbet, jvf. artikel 10.4.4. Det andet spørgsmål drejer sig om at bestemme, dels hvordan konstruktionsmaterialernes styrke- og deformationsegenskaber er ved de ekstremt høje temperaturer under en brand, dels hvordan temperaturforløbet er gennem en brandpåvirket konstruktion; det sidste er et spørgsmål om materialernes termiske egenskaber (varmeledningsevne, strålingsegenskaber og varmfylde) under en brand.

Indledningsvis skal omtales de brandtekniske klassifikationsregler for materialer i henhold til det nugældende lovgrundlag.

Brændbarhed, Klassifikation

Klassifikation af bygningsdele sker ifølge BR 1966 i henhold til DS 1052 (jvf. artikel 10.4.3.). I DS 1052 refereres til materialers brændbarhed, defineret i henhold til DS 1057. Heri klassificeres byggematerialer som ubrændbare eller som brændbare efter følgende regler:

Der foretages prøvning af 3 prøvelegemer efter den i DS 1056 normerede metode, der i korthed går ud på, at et prøvelegeme på 40·40·50 mm anbringes i 20 minutter i en cirkulærcylindrisk ovn (ϕ 75 mm) opvarmet til $+750^{\circ}\text{C}$. Prøvelegemets og ovnens temperatur måles med termoelementer, og opståen og varighed af opflamning observeres. (Vedr. de nærmere forsøgsomstændigheder henvises til DS 1056).

Ubrændbart defineres et materiale, hvis ingen af de 3 prøvelegemer

- a) forårsager, at temperaturen målt med ovntermoelementet overstiger ovnens begyndelsestemperatur med mere end 50°C
- b) forårsager, at temperaturen målt med prøvetermoelementet overstiger ovnens begyndelsestemperatur med mere end 50°C
- c) brænder med flammer konstant i 10 sek. eller derover.

Brændbart defineres et materiale, hvis ikke alle 3 ovenfor nævnte kriterier er tilfredsstillet for alle 3 prøvelegemer.

BR 1966, tillæg 6, inddeler materialer til beklædninger i

Klasse A: ubrændbart eller svært antændeligt

Klasse B: ikke letantændeligt,

defineret i henhold til Statsprøveanstaltens "Prøvningsregler for beklædninger og materialer hertil" af 15.5.1969, hvortil der henvises, hvad angår de detaljerede prøvningsomstændigheder. Denne klassifikation har væsentligst relation til materialernes egenskaber med hensyn til røgudvikling.

Brændværdi

Bestemmelsen af en bygnings brandbelastning (jvf. artikel 10.4.4.) må bl.a. baseres på mængden af de i bygningen værende materialer og på deres brændværdi. Et materiales brændvær-

di er den varmemængde, der frigøres ved fuldstændig forbrænding af 1 kg af materialet. For faste stoffer spiller fugtindholdet en rolle for brændværdien; mellem brændværdien H (Mcal/kg) af det tørre materiale (den effektive brændværdi) og brændværdien H_F af det fugtige materiale (u_V vægt-%) gælder relationen

$$H_F = H \cdot (1 - 0,01 \cdot u_V) - 0,006 \cdot u_V$$

I de svenske normer (Svensk Bygg Norm 67) er der åbnet mulighed for at foretage dimensionering på grundlag af brandbelastning. For effektive brændværdier angives følgende normtal

Faste materialer

	H (i Mcal/kg)		H (i Mcal/kg)
Antracit	7,6-8,7	Paraffin	11,2
Asfalt	9,5	Plaster:	
Bomuld	4,2	Akryl	6,4
Cellulose	3,6	Celluloid	4,5
Fedt	9,5	Polyester, glasfiberarmeret	5,6
Gummiaffald	5,0	Polyetylen	11,0
Halm	4,1	Polystyrol	8,6-9,8
Kautschuk	10,7	Polyuretanskum	6,0-6,9
Klæder	4,0-5,0	Polyvinylklorid (PVC)	4,4
Kul	7,0	PVC-belagt væv	5,1
Koks	6,6-8,2	Urea-formaldehydskum	2,9-3,6
Kork	7,3-8,3	Skumgummi	7,6
Linoleum	5,0	Körn	4,0
Læder	4,7-4,8	Træ	4,1-4,7
Papir, pap	3,8-4,2		

Flydende materialer

	H (i Mcal/kg)
Benzin	10,4
Dieselolie	9,7-10,1
Linolie	9,4
Metanol	5,4
Råolie	10,3
Sprit	7,6-8,2
Tjære	9,0

Gasformige materialer

	H (i Mcal/Nm ³)
Acetylen	13,6
Butan	26,7
Kulilte	3,0
Propan	20,6
Bygas	4,0
Knaldgas	34,0

Termiske egenskaber under brand

Bestemmelsen af en konstruktions bæreevne under brand må baseres på kendskab til styrke- og deformationsegenskaberne temperaturafhængighed og på kendskab til temperaturforløbet i konstruktionen; dette sidste fordrer kendskab til materialernes varmeledningstal, emissionstal og varmekapacitet.

For eendimensional strømning gælder (jvf. side 86) det almindelige udtryk

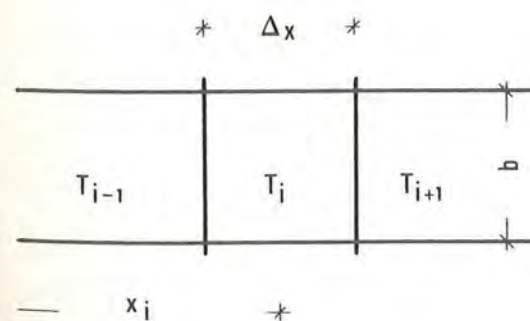
$$\frac{\delta T}{\delta h} = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$$

Størrelsen $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$ kaldes temperaturledningstallet (cm^2/s); det er et udtryk for, hvor hurtigt en temperaturændring breder sig i konstruktionen; er a lille, går det langsomt, er a stor, går det hurtigt; et forhold, man ved normale temperaturforhold kun i specielle tilfælde ved lejlighedsvis opvarmning (kirker, fritidshuse etc.) behøver at tage i betragtning.

Ved brandpåvirkning er spørgsmålet om trægheden derimod af afgørende betydning for temperaturforløbet i konstruktionen. Imidlertid kompliceres regningerne ganske betydeligt af, at de indgående konstanter er stærkt afhængige af temperaturen, således at de reelt kun kan gennemføres ved numerisk behandling. Det skal kort skitseres, hvordan problemet gribes an. For simpelhedens skyld behandles kun eendimensional strømning; ved analogibetragtninger kan to- og tredimensionale problemer umiddelbart behandles efter samme principper. I litt. [1968.3]

er det todimensionale tilfælde behandlet i polære koordinater.

Betragtes et infinitesimalt element $b \cdot \Delta x$ med koordinaten x_i , temperaturen t_i og de dertil svarende værdier λ_i , γ_i og c_i af henholdsvis varmeledningstal, rumvægt og varmekapacitet, er ligevægtsbetingelsen



Figur 10.57: Infinitesimalt element

$$\frac{\Delta(T_i \cdot c_i \cdot \gamma_i)}{\Delta h} = \left(\frac{T_{i-1} - T_i}{1/2 \cdot (1/\lambda_{i-1} + 1/\lambda_i)} - \frac{T_i - T_{i+1}}{1/2 \cdot (1/\lambda_i + 1/\lambda_{i+1})} \right) \cdot \frac{1}{\Delta x^2}$$

For et overfladeelement erstattes det ene af leddene på højre side med

$$\frac{T_f - T_i}{\frac{1}{\alpha} + \frac{b}{2\lambda_i}}$$

hvor α er varmeovergangstallet ved overfladen, og T_f er temperaturen uden for legemet.

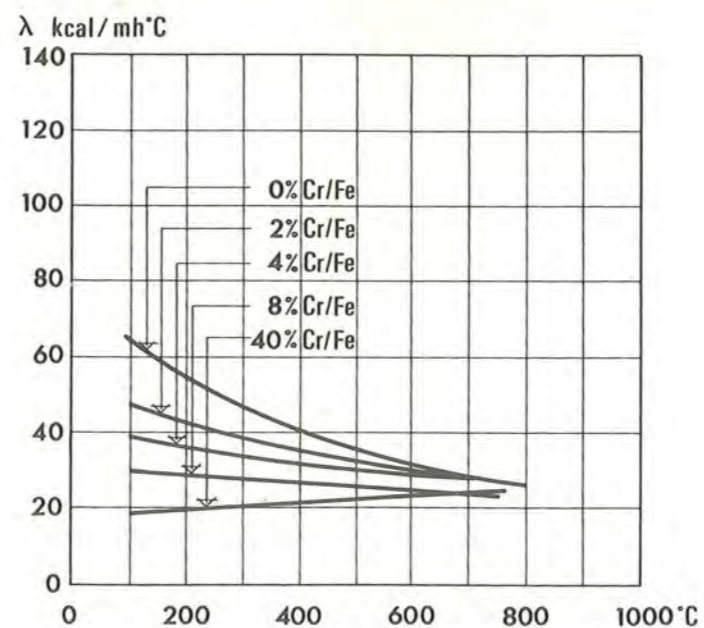
Af udtrykkene ses, at ligningssystemet kan løses numerisk, når man kender λ_i og $T_i \cdot c_i \cdot \gamma_i$ (entalpien) som funktion af T_i . Disse sammenhænge er dog endnu så sparsomt udforsket, at en beregning kun kan gennemføres i specielle tilfælde. I det følgende skal - væsentligst efter litt. [1964.2] - gengives nogle repræsentative resultater.

Træ

Træ adskiller sig fra de øvrige her omtalte konstruktionsmaterialer ved, at det selv bidrager til branden. Træ har i sig selv en ringe varmeledningsevne ($\lambda \sim 0,12$ kcal/mh⁰C), men det forkullede lag isolerer endnu bedre ($\lambda \sim 0,05-0,07$ kcal/mh⁰C). På grund af vands store fordampningsvarme spiller træets fugtighed en betydelig rolle. Dimensioneringen foretages simplest ved at antage en konstant indbrændingshastighed de første 2 timer på 0,5 - 0,7 mm/minut for nåletræ; for eg og teak kan regnes $\sim 0,4$ mm/minut.

Stål

For stål influerer den kemiske sammensætning ret stærkt på varmeledningstallets temperaturafhængighed, jvf. 10.58, der eksempelvis viser chromindholdets betydning. (Litt. [1964.2]). Ved de temperaturer, der kan blive tale om at tillade ved bærende stålkonstruktioner ($\sim 450^{\circ}\text{C}$, jvf. nedenfor), er variationen med temperaturen dog beskeden; som brugelig tilnærmelse kan man regne λ konstant ~ 40 kcal/mh⁰C. For varmfylden c foreligger ingen sikre oplysninger; som tilnærmelse kan - på den sikre side - c regnes konstant $\sim 0,12$ kcal/kg⁰C. For stål betyder varmeudvidelseskoefficienten β en del med hensyn til de nødvendige dilatationsmuligheder eller de ekstra-spændinger, en fastholdt konstruktion vil få under brand.

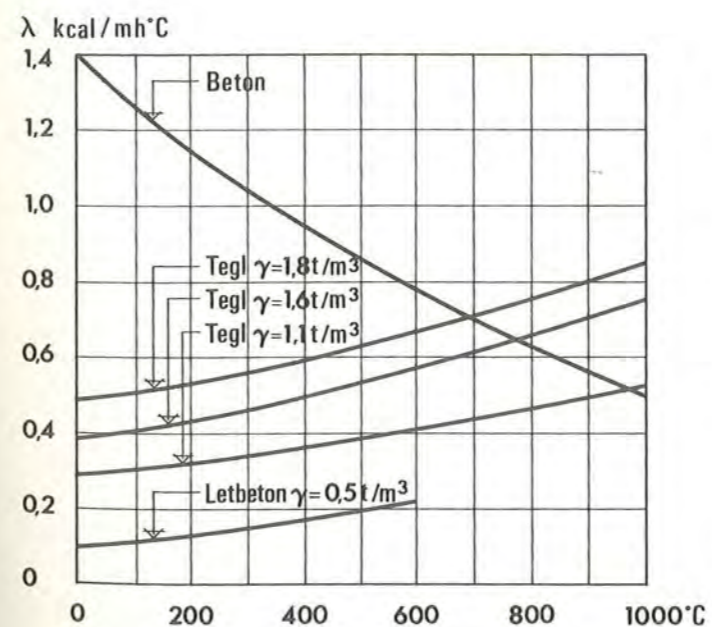


Figur 10.58: Ståls varmeledningstal

Beton

Betons varmeledningstal falder ret stærkt med stigende temperatur, jvf. figur 10.59. Litt. [1968.3] udtrykker sammenhængen ved

$$\lambda = 1,4 \cdot e^{-0,0001 \cdot t} \text{ (kcal/mh}^\circ\text{C)},$$



Figur 10.59: Betons, letbetons og tegls varmeledningstal

β er ved 0°C ca. $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ og stiger lidt med temperaturen, $\sim 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ved $+600^\circ\text{C}$.

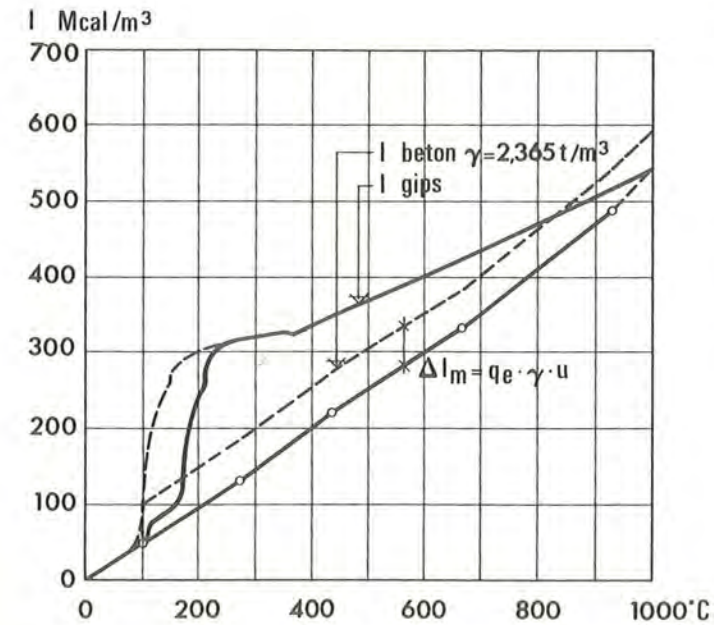
hvor t er temperaturen i $^\circ\text{C}$. Figuren viser, at λ for letbeton stiger med temperaturen.

For beton gør sig det forhold gældende, at der ved 100°C sker fordamning af den indeholdte fugt. Det betyder, at varmekapaciteten

$$c_i \cdot \gamma_i = \frac{dQ}{dt}$$

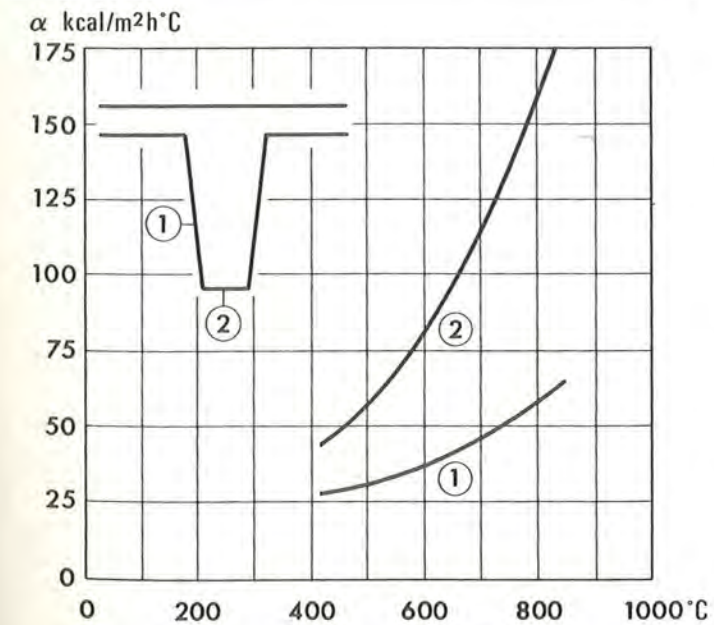
ved denne temperatur er uendelig (varmetilførslen medgår til fordamning og bevirker ingen temperaturstigning).

ning). For at klare dette regnetekniske problem benyttes (jvf. litt. [1968.3]) i stedet for varmekapaciteten entalpien



Figur 10.60: Betons varmeindhold (entalpi)

og stråling. De to førstes bidrag, $\alpha_1 + \alpha_k$, er ringe i sammenligning med strålingens bidrag. Litt. [1968.4] angiver $\alpha_1 + \alpha_k = 20 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ og det gensidige strålingstal (jvf. side 90) $C_0 \cdot \epsilon_{res} = 4,96 \cdot 0,9 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$. På grundlag af ekspe-



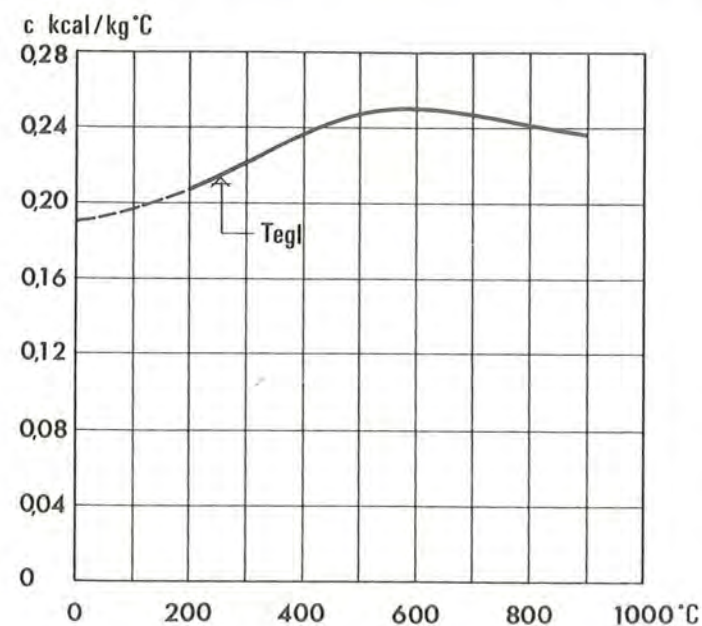
Figur 10.61: Varmeovergangstal ved betonoverflader

$I (= \int dQ)$, der jvf. figur 10.60 får en endelig diskontinuitet, $\Delta I = q_e \cdot \gamma \cdot u$, ved vands fordampningstemperatur; q_e er vands fordampningsvarme. Af kurven aflæses direkte sammenhørende værdier af $I (= T_i \cdot c_i \cdot \gamma_i)$ og T_i . Som det fremgår, er forløbet iøvrigt næsten retlinet, $c_i \cdot \gamma_i$ altså næsten konstant.

Varmeovergangen ved overfladerne hidrører fra ledning, konvektion og stråling. De to førstes bidrag, $\alpha_1 + \alpha_k$, er ringe i sammenligning med strålingens bidrag. Litt. [1968.4] angiver $\alpha_1 + \alpha_k = 20 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ og det gensidige strålingstal (jvf. side 90) $C_0 \cdot \epsilon_{res} = 4,96 \cdot 0,9 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$. På grundlag af eksperimentelle undersøgelser af temperaturforløbet på undersiden og siden af ribberne i TT-tværsnit angiver litt. [1968.3] det på figur 10.61 viste forløb af α_{total} . For ikke eksponerede overflader angiver litt. [1968.4] $\alpha_{total} = 10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$.

Tegl

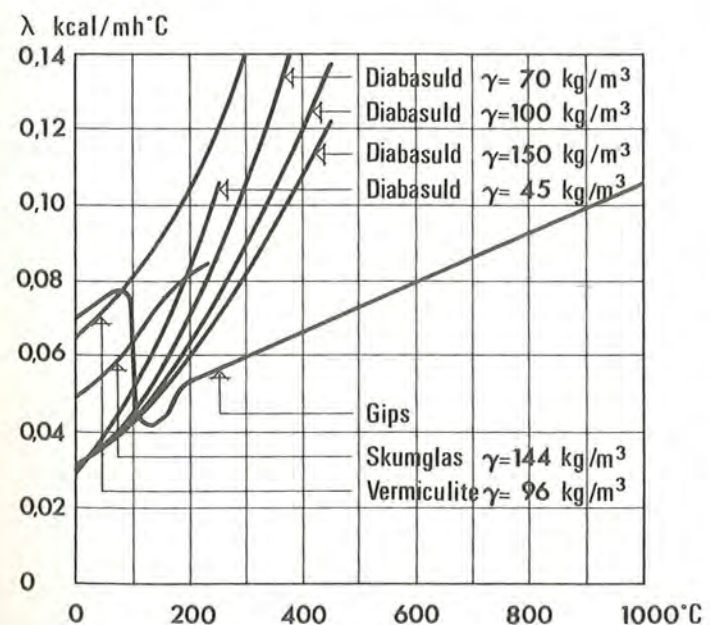
For tegl angiver litt. [1964.2] den på figur 10.59 viste sam-



Figur 10.62: Tegls varmfylde

Andre materialer

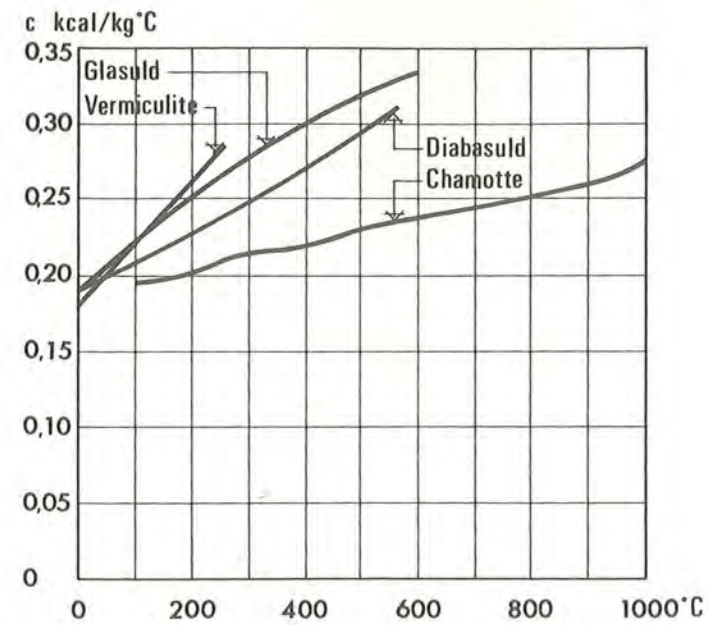
Figur 10.63 og 10.64 (gengivet efter litt. [1964.2]) viser



Figur 10.63: Isoleringens materialers varmeledningstal

menhæng mellem varmeledningstal og temperatur. På figur 10.62 er vist varmfyldens temperaturafhængighed (efter litt. [1964.2]). Varmeovergangstallet ved overfladen er ikke undersøgt. Som brugelig tilnærmelse kan regnes med de for betonoverflader angivne (figur 10.61).

henholdsvis varmeledningstal og varmfylde for en række materialer, der finder anvendelse til brandisoleringsring, væsentligst af stålkonstruktioner. λ -kurven for gips viser et karakteristisk dyk ved $+100^{\circ}\text{C}$; det skyldes fordampning af det ikke kemisk bundne vand. På figur 10.60 er efter litt. [1964.2] indtegnet entalpien for gips med et fugtindhold på 5 vægt-%.



Figur 10.64: Isoleringsmaterialers varmfylde

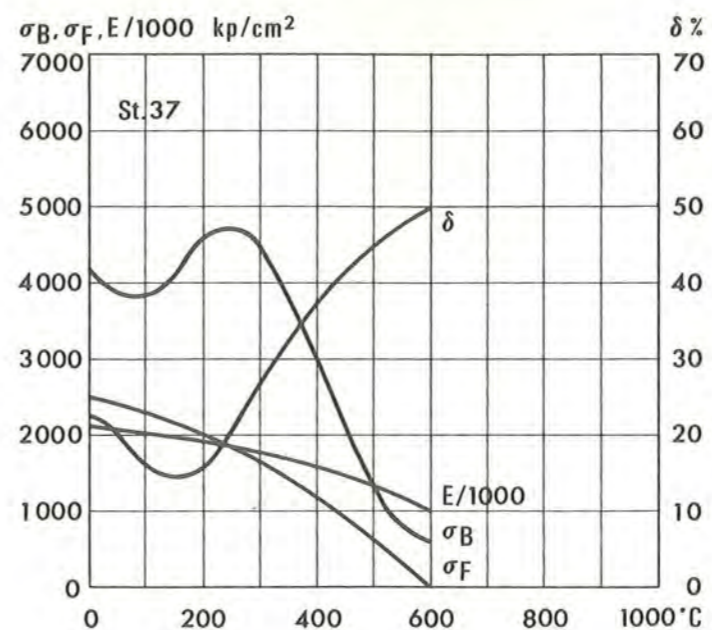
Mekaniske egenskaber under brand

Træ

Temperaturens indflydelse på træs styrke- og deformationsforhold er praktisk talt ikke gjort til genstand for udforskning. Det hænger bl.a. sammen med vanskelighederne ved at måle, hvordan temperaturen under brand varierer over konstruktionens tværsnit. Det vides dog, at variationen er meget udtalt (på grund af træets ringe varmeledningsevne), og alene denne omstændighed gør det problematisk at fastlægge de parametre, der skulle udtrykke sammenhængen mellem styrke og temperatur. Ved målinger er det konstateret, at træets temperatur i det indre af massive trækonstruktioner først efter flere timers brand stiger mærkbart. Ved praktiske beregninger vil det således næppe være uforsvarligt at regne styrken af den ikke forkullede del af tværsnittet lig styrken af det tilsvarende ikke brandpåvirkede konstruktionsmateriale. Mere dybtgående overvejelser om dette problem er refereret i litt. [1963.1]

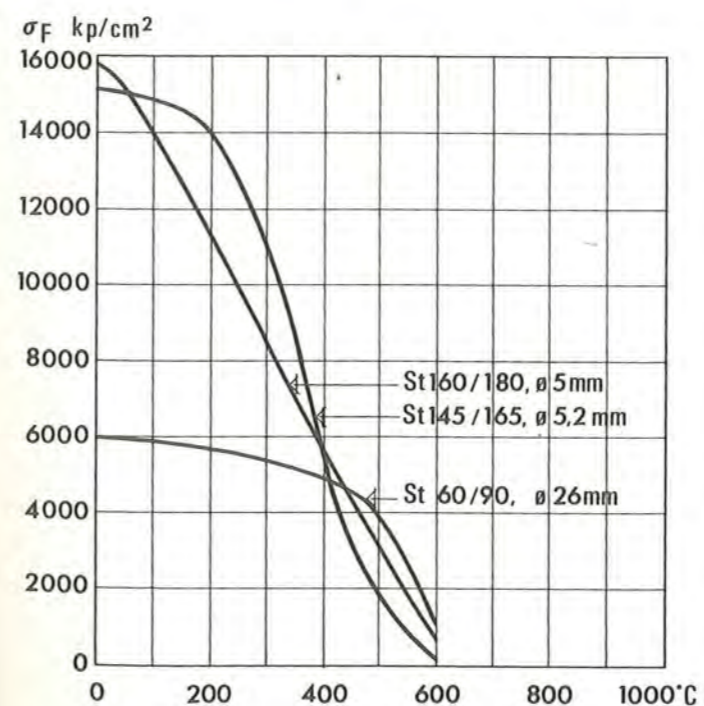
Stål

Temperaturens indflydelse på ståls styrke- og deformationsforhold er et af de brandtekniske problemer, der er bedst ud-



Figur 10.65: Blødt ståls mekaniske egenskaber

stålkonstruktion med sikkerheden $n = 1,85$ mod flydning vil sikkerheden være udtømt, når temperaturen har nået ca. 375°C . Temperaturen må altså holdes under denne størrelse, hvis flydning (for den regningsmæssige last) og altså blivende de-



Figur 10.66: Spændståls mekaniske egenskaber

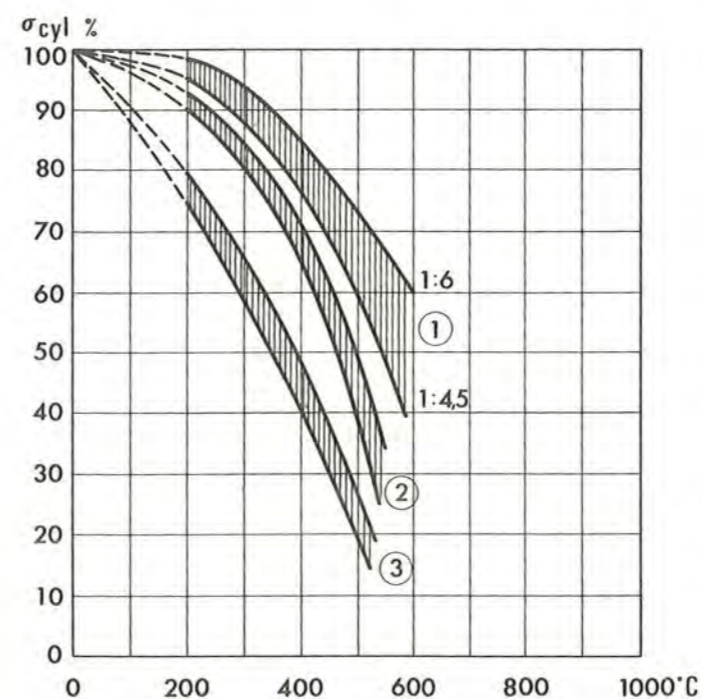
forsket. I litt. [1964.2] er gengivet en lang række forskningsresultater. Her skal kort refereres nogle karakteristiske data. Figur 10.65 viser blødt konstruktionsståls mekaniske egenskaber bestemt ved korttidsprøvning (litt. [1964.2]). Som det ses, er allerede ved 400°C flydespændingen under halvdelen af værdien ved normale temperaturer. Det betyder f.eks., at i en

stålkonstruktion med sikkerheden $n = 1,85$ mod flydning vil sikkerheden være udtømt, når temperaturen har nået ca. 375°C . Temperaturen må altså holdes under denne størrelse, hvis flydning (for den regningsmæssige last) og altså blivende deformationer skal undgås. En gunstig omstændighed er det, at stålet efter opvarmning til denne temperatur fuldstændigt genvinder sine mekaniske egenskaber ved afkøling, selv efter vandpåsprøjtning. Figur 10.66 viser flydegrænsens temperaturafhængighed for nogle spændstål. Det fremgår, at disse stål er endnu mere temperaturfølsomme end blødt stål. Endelig skal det fremhæves, at temperatur-

stigningens hastighed ikke er ganske uvæsentlig.

Beton

Det mest karakteristiske forhold ved betons styrkeforhold under brand er, at der på grund af bestanddelenes varierende termiske egenskaber opstår store lokale spændinger, der bevirker revnedannelser; disse betyder ikke så meget for konstruktionen under brand, men ved afkøling åbner revnerne sig



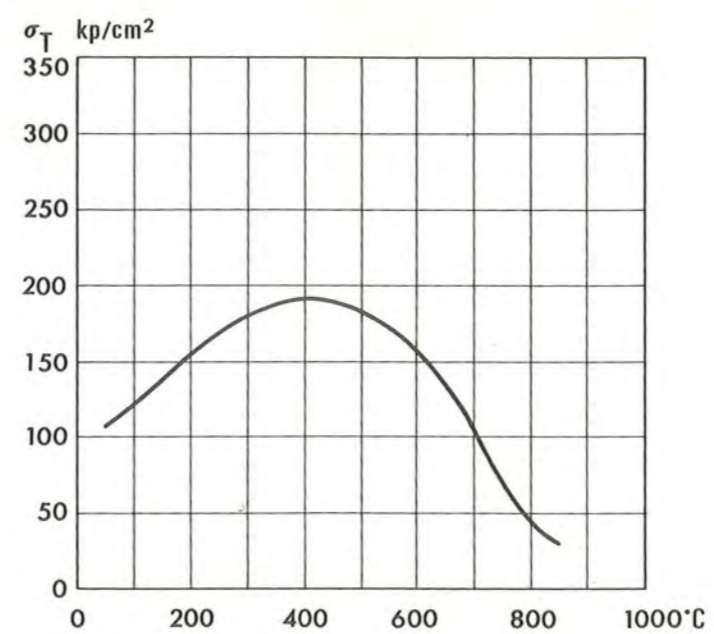
Figur 10.67: Betons cylinderstyrke

disse forhold. Figur 10.67 (gengivet efter litt. [1968.3]) viser cylinderstyrken (ϕ 5 cm, h = 10 cm) for beton under forskellige forsøgsomstændigheder:

- 1) Trykprøvning ved opvarmningstemperaturen; prøverne belastet $\sigma = 73 \text{ kp/cm}^2$.
- 2) Trykprøvning ved opvarmningstemperaturen; prøverne ubelastede.
- 3) Trykprøvning efter afkøling; prøverne ubelastede.

Øverste og nederste kurve for hvert af områderne refererer til cement/ballast-forhold på henholdsvis 1:6 og 1:4,5.

med en betydelig nedsettelse af styrken til følge. Herudover har en meget lang række faktorer indflydelse på styrkeforholdenes temperaturafhængighed, såsom prøvelegemernes form og størrelse, betonens proportionering, tilslagsmaterialernes art, brandpåvirkningens varighed og hastighed. Den omfattende litteratur giver således et yderst broget og til praktisk brug tildels mangelfuldt billede af



Figur 10.68 viser temperaturens indflydelse på damphærdet porebetons trykstyrke. Først over 700°C er trykstyrken mindre end normalt og falder derefter hurtigt. Ved ca. 1000°C begynder sintring (litt. [1964.2]).

Figur 10.68: Letbetons terningstyrke

10.4.3. BRANDTEKNISK KLASSIFIKATION AF BYGNINGSDELE

Normeret brandprøvning

Den brandprøvning, der herhjemme lægges til grund for brandteknisk klassifikation af bygningsdele, er for bærende og adskillende bygningsdele nedfældet i DS 1051 (for skorstene dog DS 1054). For beklædninger gælder (iflg. BR 1966, tillæg 6) de tidligere omtalte "Prøvningsregler for beklædninger og materialer hertil" (Statsprøveanstalten 15.5.1969). Disse sidste skal ikke nærmere refereres her.

DS 1051 skelner mellem to slags prøvninger:

- 1) Bestemmelsesprøvning (eksperimentel eller teoretisk bestemmelse af det tidspunkt under en standardiseret brand, da prøvelegemet ikke længere opfylder de til den tilsvarende bygningsdel stillede krav)
- 2) Klassifikationsprøvning (eksperimentel bestemmelse af, om en bygningsdel i et bestemt tidsrum svarende til den pågældende klassifikation opfylder de krav, der er stillet til den tilsvarende bygningsdel.

Prøvningerne foretages i en ovn, der er indrettet således, at ovnsens middeltemperatur kan forløbe efter det empiriske udtryk

$$t_h - t_0 = 1325 - 430 \cdot e^{-0,2h} - 270 \cdot e^{-1,7h} - 625 \cdot e^{-19h}$$

hvor t_0 ($^{\circ}\text{C}$) er temperaturen ved ildpåvirkningens begyndelse,
 t_h ($^{\circ}\text{C}$) er temperaturen efter h timers forløb,
 h timer er tiden fra ildpåvirkningens begyndelse.

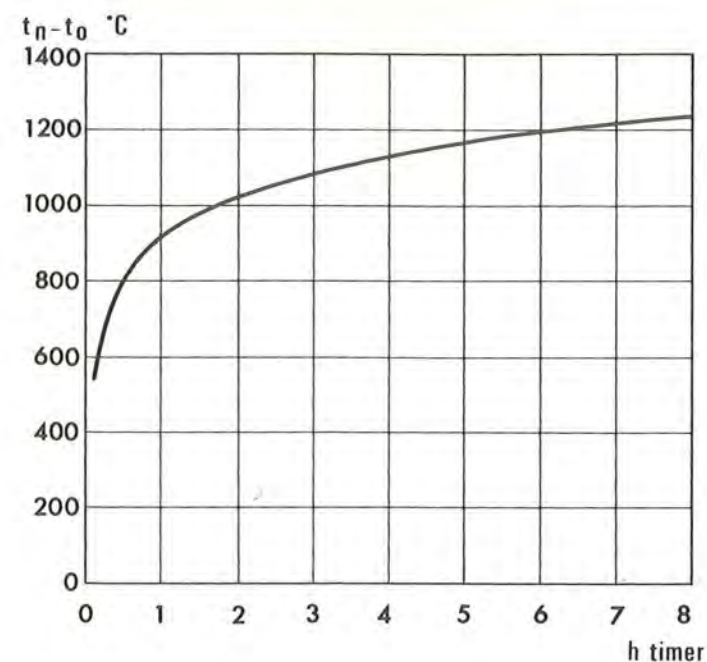
Temperatur/tid-forløbet er afbildet på figur 10.69. Temperaturen afviger en ubetydelighed (efter 30 minutter maks. $\frac{1}{2}\%$) fra den i ISO-rekommandation (ISO 92) foreslåede

$$t_h - t_0 = 345 \log(8h + 1),$$

men er bedre egnet til analytisk behandling.

Ved prøvning af bærende bygningsdele skal såvel understøtningsforhold som belastninger være i overensstemmelse med de tilsvarende under praktiske forhold.

Under prøvningen måles eller iagttages alle relevante fæno-



Figur 10.69: Ovnmiddeltemperatur efter DS 1051

mener (varmestrøm, tæthed, røgudvikling etc.) i overensstemmelse med de respektive klassifikationsregler. Vedrørende de nærmere forsøgsomstændigheder henvises til DS 1051.

Bærende og adskillende bygningsdele

Ifølge BR 1966, kapitel 6 klassificeres bærende og adskillende bygningsdele i

BS-bygningsdel	(brandsikker bygningsdel)
BD-bygningsdel	(branddrøj bygningsdel)
F-bygningsdel	(flammestoppende bygningsdel).

Det tidsrum, i hvilket en bygningsdel skal opfylde de til en brandteknisk klasse stillede krav (jvf. DS 1052), angives i minutter efter betegnelserne (eksempelvis BS-bygningsdel 60, eller kort BS 60). Betegnelserne BS og BD svarer nogenlunde til de svenske og norske betegnelser A og B, hvor brandmodstandstiden angives i timer (eksempelvis BS 60 ~ A 1).

Ifølge DS 1052 klassificeres en bygningsdel (ekskl. døre, jvf. DS 1053) efter følgende regler:

Brandsikker bygningsdel

Bærende bygningsdel:

- 1) I bygningsdelen må kun indgå ubrændbare byggematerialer (jvf. DS 1057: Brandteknisk klassifikation af byggematerialer)

- 2) Hvis prøvelegemet er belastet under prøvningen, må det ikke bryde sammen, og det skal efter afkølingen have en restbæreevne, der er $\geq 1,5 \cdot$ prøvelasten.
- 3) Prøvelegemet må ikke bryde sammen på grund af de spændinger, der eventuelt opstår ved dets deformationer som følge af ildpåvirkning.
- 4) Prøvelegemet skal kunne modstå en eventuel vandpåsprøjtning uden at bryde sammen.

Adskillende bygningsdel:

- 1-4) Som for bærende bygningsdel.
- 5) Middeltemperaturstigningen, bestemt på den fra ilden vendende side af prøvelegemet, må ikke overstige 140°C , og temperaturstigningen må i intet punkt overstige 180°C . (Den målte temperatur må ikke overstige 220°C).
- 6) Prøvelegemet skal kunne bestå en tæthedsprøvning.

Branddrøj bygningsdel

Bærende bygningsdel:

- 1) Hvis prøvelegemet er belastet under prøvningen, må det ikke bryde sammen, og det skal efter slukning og afkøling have en restbæreevne, som er $\geq 1,5 \cdot$ prøvelasten.
- 2) Prøvelegemet må ikke bryde sammen på grund af de spændinger, der eventuelt opstår ved dets deformationer som følge af ildpåvirkningen.
- 3) Prøvelegemet skal kunne modstå en eventuel vandpåsprøjtning uden at bryde sammen.

Adskillende bygningsdel:

- 1-3) Som for bærende bygningsdel.
- 4) Middeltemperaturstigningen, bestemt på den fra ilden vendende side af prøvelegemet, må ikke overstige 140°C , og temperaturstigningen må i intet punkt overstige 180°C . (Den målte temperatur må ikke overstige 220°C).

- 5) Prøvelegemet skal kunne bestå en tæthedsprøvning.
- 6) Ved prøvning for brændbare gasser må der ikke forekomme opflamning af længere varighed end 2 sek.

Flammestoppende bygningsdel (kun adskillende bygningsdele)

- 1) Ved måling af varmem strøm må de målte værdier ikke overstige følgende størrelser:

for radiometret: $8 \text{ kJ/m}^2\text{s}$ ($\approx 0,2 \text{ cal/cm}^2\text{s}$)

for begge typer termoelementer: 350°C .

Beklædninger

Ifølge BR 1966 tillæg 6 klassificeres beklædninger i

Klasse 1

Klasse 2

Beklædninger af klasse 1 er beklædninger, som yder en vis brandmæssig beskyttelse af bagved liggende brændbart materiale; dette skal i 10 minutter forhindres i antændelse under prøvningsomstændigheder, der er defineret i de indledningsvis omtalte prøvningsregler. Kravet er identisk med det, der i BR 1966 tidligere omtaltes som "beklædninger, der ikke yder mindre beskyttelse af underliggende brændbart materiale og ikke yder større tilskud til en brand end rør og puds".

Beklædninger af klasse 2 er beklædninger, som yder et vist begrænset tilskud til en brand. En sådan beklædning må under de i de omtalte prøvningsregler fastsatte omstændigheder kun i begrænset omfang give tilskud til en brand og ikke inden 10 minutter give anledning til dobbeltsidig brand samt ikke udvikle røg i større mængder end fyrretræ. Kravet er identisk med det, der i BR 1966 tidligere omtaltes som "beklædninger, der ikke yder større tilskud til en brand end 1" sammenpløjet, høvlet fyr".

10.4.4. BRANDTEKNISK DIMENSIONERING

Mulighederne for en brandteknisk dimensionering af bærende konstruktioner på et rationelt grundlag indskrænker sig efter byggelovgivningen herhjemme til enten eksperimentelt eller teoretisk at bestemme en konstruktions brandmodstandsevne på grundlag af det standardiserede temperatur/tid-forløb (figur 10.69). De funktionskrav, der stilles til bygningsdelene, er altså alene baseret på dette forløb og således helt uafhængige af, om dette temperaturforløb overhovedet er muligt under virkelige forhold. Det siger sig selv, at et sådant grundlag for brandteknisk dimensionering er aldeles utilstrækkeligt; det svarer til, at man til en bærende bygningsdel ville stille krav om en vis bæreevne uden hensyn til de belastninger, den kan blive udsat for. Fra et lovgivningssynspunkt er denne empiriske formulering af funktionskravene dog i nogen grad forståelig, da der næppe endnu er tilstrækkelig videnskabelig baggrund for at stille noget bedre i stedet. I det følgende skal det kort skitseres, hvordan et mere rationelt beregningsgrundlag i princippet kan opstilles, omend der som nævnt er mange huller, der skal udfyldes, inden det kan finde praktisk anvendelse.

Brandbelastning

Grundlaget for bestemmelsen af temperaturforløbet under en brand er en beregning af de brændbare materialers brændværdi. Denne udtrykkes ved et rums (en brandcelles) brandbelastning, et begreb der endnu ikke er indført i dansk byggelovgivning. I den svenske "Bygg Norm 67" defineres brandbelastningen som

$$q = \frac{\sum m \cdot H}{A_t} \text{ Mcal/m}^2,$$

hvor m og H er henholdsvis vægten og brændværdien af hvert enkelt brændbart materiale (herunder bygningsdele) i brandcellen, medens A_t er summen af de rummet omgivende fladers areal. Denne definition afviger fra den hyppigst anvendte (kg træ pr. m^2 gulvareal), hvor brændværdien af samtlige materialer er omsat til enheden 1 kg træs brændværdi. Den svenske definition forekommer dog mest rationel, da den indbefatter hensyntagen til rummets dimensioner.

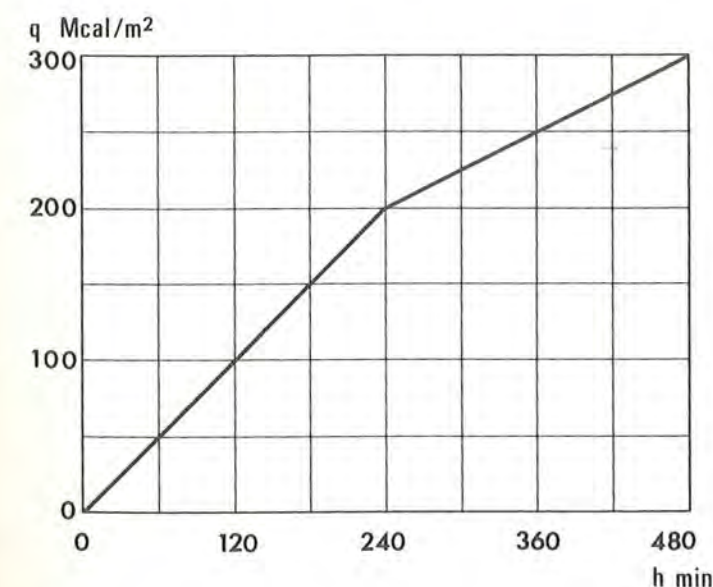
På grundlag af de på side 141 anførte specifikke brændværdier beregnes brandbelastningen ved simpel summation. Problemet er imidlertid nu, hvor store mængder af de forskellige brandbare materialer man skal regne med. For visse industrivirksomheder, lagerbygninger etc. kan man nok i nogen grad skaffe sig et sikkert beregningsgrundlag, men for boliger, kontorer, skoler etc. må brandbelastningen fastsættes på statistisk grundlag (ganske analogt til nyttelasten); spørgsmålet er imidlertid yderst sparsomt udforsket. En japansk undersøgelse (gengivet efter litt. [1964.2]) udviser følgende statistisk beregnede tal for forskellige rum i bygninger af beton (kg træ pr. m² gulvflade):

Boliger	40 - 70	Biblioteker	300 - 600
Sygestuer	30 - 60	Læsesale	50 - 350
Hoteller	25 - 40	Lagerrum	50 - 200
Kontorer	30 - 150	Varehuse	20 - 75
Skoler	20 - 50		

Disse tal kan selvfølgelig ikke umiddelbart overføres til europæiske forhold.

Brandforløb

I en række lande foreskrives en normmæssig sammenhæng mellem brandbelastningen og brandens varighed, således eksempelvis



Figur 10.70: Brandtid/brandbelastning-forløb efter SBN 67

den i "Svensk Bygg Norm 67" angivne (figur 10.70). En sådan sammenhæng turde dog være en overordentlig grov forenkling, da den hverken tager hensyn til de brandbare materialers beskaffenhed, til rummets udformning eller til lufttilførslen; alle dele er af største betydning for brandens forløb. Den svenske norm giver dog mulighed for en mere rationelt baseret beregning af

brandforløbet.

Om de meget komplicerede forhold ved spørgsmålet om brandforløbet henvises til litt. [1964.2] og [1968.3].

Dimensionering

Trækonstruktioner

Som det fremgår af artikel 10.4.2., er de termiske og mekaniske egenskabers temperaturafhængighed for træ endnu for uafklarede til, at dimensionering kan foretages på grundlag af en beregning af temperaturforløbet i konstruktionen. En simpel og praktisk brugelig fremgangsmåde er at regne med en konstant indbrændingshastighed på 0,5 - 0,7 mm/minut og regne træets styrke uændret i den ikke forkullede del af tværsnittet.

Til belysning af en massiv trækonstruktions brandmodstandstid betragtes en bjælke, der er dimensioneret for en bevægelig belastning p = den hvilende belastning g . Ifølge DS 413 (2. udgave) skal partialsikkerhedskoefficienterne være $f_g = 1,0$, $f_p = 1,5$, altså $f_q = 1,25$. Den nominelle spænding er de karakteristiske langtidsværdier/ f_m ($f_m = 1,3$).

Ifølge DS 1052 skal konstruktionen kunne bære den beregningsmæssige last ($g + p$) med totalsikkerheden 1,5. Regnes i dette (ekseptionelle) belastningstilfælde den nominelle spænding lig med de karakteristiske korttidsværdier/ f_m , og sættes $f_m = 1,0$, fås, idet $s_{\text{langtid}} \sim 0,6 \cdot s_{\text{korttid}}$, for de nødvendige modstandsmomenter før og efter brand

$$\frac{W_{\text{brand}}}{W_{\text{normal}}} = \frac{0,6 \cdot 1,5}{1,3 \cdot 1,25} = 0,55.$$

Konstruktionens brandmodstandsevne er altså den tid, der går, inden modstandsmomentet er reduceret med 45%. Regnes med en indbrændingshastighed på 0,6 mm/minut, vil altså eksempelvis en limtræsbjælke med et (fuldt udnyttet) tværsnit på 11,5 · 42 cm, have en brandmodstandsevne på 30 minutter, hvis den eksponeres på alle fire sider.

Stålkonstruktioner

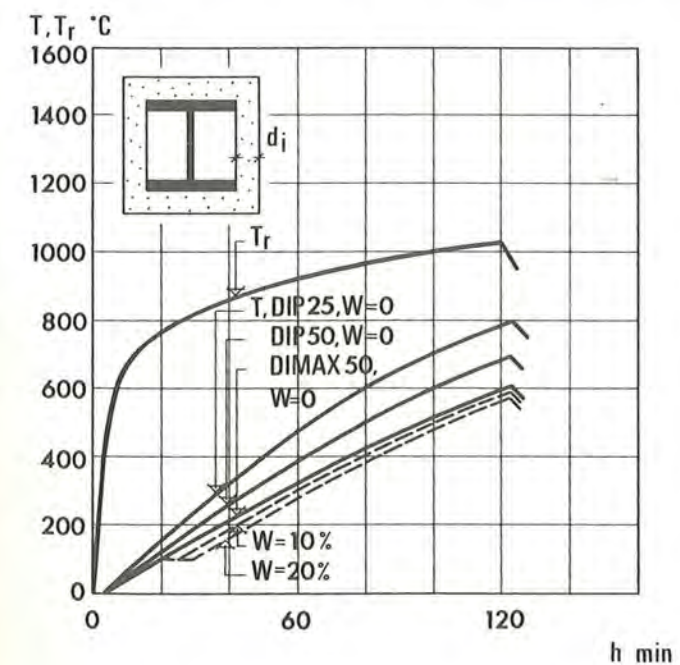
Efter det i artikel 10.4.2. anførte om ståls styrkeforhold under høje temperaturer er en stålkonstruktions bæreevne (for den beregningsmæssige last) udtømt, når temperaturen når op

i nærheden af 400°C . Danske normer foreskriver ikke nogen kritisk temperatur, og andre landes forskrifter afviger ret stærkt fra hinanden på dette punkt (ca. 250°C - ca. 550°C). Under alle omstændigheder er den kritiske temperatur dog så lav, at der i praksis må træffes særlige foranstaltninger til at sikre, at stålets temperatur holdes nede; det sker almindeligvis i form af en særlig brandisolering. En oversigt over hertil egnede materialer og deres egenskaber er givet i litt. [1966.2]. Her skal kort refereres princippet i en teoretisk beregningsmåde, gengivet efter litt. [1964.3].

I en stålkonstruktion, der er beskyttet af en isolering med konstant tykkelse d_i , kan - når λ og c for stål og isolering regnes konstante, og når varmetransporten regnes eendimensional - stålets temperatur $T = T(h)$ bestemmes af differentiaalligningen

$$\frac{dT}{dh} = \frac{\lambda_i \cdot o_i}{d_i \cdot Q} \cdot (T_r - T),$$

hvor $T_r = T_r(h)$ er brandcellens temperatur, o_i isoleringens omkreds og Q er den samlede konstruktions varmekapacitet pr. lbm. Q består af bidrag fra såvel stål som isolering samt fra eventuelle luftlag; det sidste bidrag er dog ganske ringe. Indsættes heri for T_r et differentiabelt udtryk, f.eks. det



Figur 10.71: Stålteperatur for isolerede søjler

på side 151 anførte normudtryk, og regnes opvarmningen af stålet tidsforskudt i forhold til rummets opvarmning $t_1 = \frac{1}{6} d_i^2 \cdot \gamma_i \cdot c_i / \lambda_i$, kan T umiddelbart udtrykkes analytisk. Et vandindhold W (vægt-%) i isoleringen vil betyde en yderligere forsinkelse $t_2 = q_e \cdot \gamma_i \cdot d_i^2 \cdot W / T_r \cdot \lambda_i$, hvor q_e er vands fordampningsvarme, og T_r er brandrummets middeltemperatur i tidsrummet t_2 . Figur 10.71 viser (efter

litt. [1964.3]) temperaturforløbet for nogle stålsøjler isoleret med 20 mm vermiculitecementpuds med forskelligt fugtindhold.

Endelig skal nævnes en forenklet beregningsmetode, beskrevet i litt. [1962.2].

Betonkonstruktioner

På grundlag af de i artikel 10.4.2. refererede sammenhænge mellem betons og ståls termiske og mekaniske egenskaber og temperaturer er det i princippet muligt at foretage en teoretisk beregning af en brandpåvirket jernbetonkonstruktions styrke. Selv ved statisk bestemte konstruktioner er beregningsarbejdet (specielt beregningen af temperaturforløbet) dog så omfattende, at det ikke i det daglige projekteringsarbejde er overkommeligt at gennemføre beregningerne for de enkelte konstruktioner. Man må imidlertid forestille sig, at det efterhånden - ved et internationalt samarbejde - skulle blive muligt at få gennemført så omfattende beregningsprogrammer, at de dækker størsteparten af de komponenter, der til daglig arbejdes med, således at hensyntagen til de brandtekniske aspekter ved dimensioneringen på en overkommelig måde kunne komme til at hvile på et rationelt grundlag i stedet for det helt igennem empiriske, der nu er det eneste mulige. Det er endnu uhyre sparsomt, hvad der er gennemført af beregningsprogrammer for betonkonstruktioner.

Eet af de mest seriøse arbejder i så henseende er litt. [1968.3], hvor der, på grundlag af den normerede temperaturkurve, side 152 - er gennemført en systematisk analyse af temperaturfordelingen og bæreevnen af forspændte TT-betonelementer.

Et betydeligt antal problemer er dog endnu ikke behandlet, eksempelvis problemerne omkring eventuel afskalning af betonen uden på armeringen. En systematisk analyse af forholdene i statisk ubestemte konstruktioner under brand er ligeledes en opgave, som det er af største betydning at få løst.

I litt. [1964.2] er refereret en række praktiske beregningsmetoder, væsentligst baseret på eksperimentelle undersøgelser.

10.4.5. FUNKTIONSKRAV

Som omtalt indledningsvis i dette afsnit, må de brandtekniske funktionskrav til bygningsdele ses i sammenhæng med de øvrige foranstaltninger, der kan træffes for at sikre, at en bygning som helhed frembyder "tilfredsstillende tryghed mod brand" (BR 1966 kapitel 6). Det siger sig selv, at dette begreb ikke kan defineres eksakt; det må altid i nogen grad bero på et skøn, om et projekt skal bedømmes som tilfredsstillende. For boligbyggeri er lovgrundlaget herhjemme ret detaillert, men for alt andet byggeri er der praktisk talt ingen andre bestemmelser, end at de brandmæssige forhold "skal være tilfredsstillende". I praksis vil det sige, at de projekterende sammen med brandmyndigheden foretager en brandteknisk bedømmelse af det enkelte projekt og i fællesskab søger at finde frem til en rimelig løsning på problemet. I det følgende skal kort opridses hovedpunkterne i en sådan bedømmelse.

Brandteknisk bedømmelse

En brandteknisk bedømmelse af et husbygningsprojekt bør omfatte en kritisk vurdering af følgende spørgsmål:

Beliggenhedsforhold (skelafstande; bygningsafstande; omgivelsernes brandmæssige forhold; afstand til brandvæsen; tilkørselsforhold).

Adgangsforhold (udgangsforhold; trappers, døres og vinduers størrelse, antal og beliggenhed; brandvæsenets indtrængningsmuligheder).

Brandcellestørrelser (personkoncentration; vurdering af konsekvenserne af en brand).

Brandbelastning (mængden og karakteren af brændbart materiale i bygningen; værdikoncentration; brandforløb; røgudvikling; eksplosionsfare).

Bærende konstruktioner (konstruktionernes brandmodstandsevne; flugtvejenes stabilitet).

Adskillende konstruktioner (brandmodstandsevne; brandcelleafgrænsende konstruktioner; brandmure; døres brandmodstandsevne).

Overflader (væg- og loftfladers beskyttende egenskaber; brændbarhed; røgudvikling).

Brandbekæmpelsesforanstaltninger (brandvæsenets kapacitet; brandhaners antal og dimensioner; førstehjælpsslukningsmidler; bedriftsbrandværn; sprinkleranlæg; brandalarmeringsanlæg; brandventilation).

I det følgende skal kort omtales nogle retningslinier for formuleringen af funktionskravene til bygningsdelene.

Bærende konstruktioner

Det grundlæggende begreb for fastsættelsen af de bærende konstruktioners brandstabilitet er brandcellen, defineret som det rum, hvortil branden i en vis tid kan regnes begrænset. For boligbyggeri er denne tid herhjemme fastsat til 1 time, der altså regnes som det tidsrum, der går, inden en effektiv brandbekæmpelse kan sættes ind. (Det er dog klart, at dette tidsrum ved visse byggerier må sættes anderledes, eksempelvis industribyggerier i stor afstand fra brandvæsen).

Ud fra dette kriterium må altså de bærende konstruktioner, der indgår i eller omgiver brandcellen, have en brandmodstandsevne på 1 time, altså enten være BS 60 eller BD 60. For etageboligbyggeri (hvert lejemål skal udføres som brandcelle) er disse krav dog ikke tilstrækkelige. I byggeri over 2 etager kræves BS 60-konstruktioner, og i bygninger med mere end 4 etager BS 120-konstruktioner i alle etager udover de 4 øverste. For etageadskillelser kræves dog kun BS 60-konstruktioner. Disse skærpede krav for det bærende hovedsystem i højere bygninger må ses på baggrund af de større evakueringsproblemer og problemerne med at få slukningsangrebet sat ind betids. For de bærende konstruktioner i trapperum gælder særlige krav (jvf. BR 1966, kapitel 6).

For de bærende konstruktioner i andet byggeri gælder som nævnt ingen faste regler; grundsynspunktet er det samme som for boligbyggeri i den udstrækning, en sammenligning er relevant. Her må brandmodstandsevnen i hvert enkelt tilfælde vurderes ud fra personkoncentrationen, evakueringsmulighederne, værdikoncentrationen og tidspunktet for et slukningsangreb. Litt. [1966.3] foreslår for bærende konstruktioner i industribyggeri (brandbelastning maks. 50 kg træ pr. m² gulvflade):

<u>Brandcelle, over</u>	<u>500 m²</u>	<u>1000 m²</u>	<u>2500 m²</u>	<u>5000 m²</u>
Bærende hovedsystem	BD 60	BS 60	BS 60	BS 60
(incl. hovedkonstruktion i taget)		BD 90	BD 90	BD 90
Etagedæk	BD 60	BS 60	BS 60	BS 120
Tagkonstruktioner	BD 15	BD 30	BD 30	BD 30
(incl. sekundære bærende konstruktioner)	BS 15	BS 15	BS 15	BS 15

"Svensk Bygg Norm 67" angiver en række detaljerede bestemmelser om bærende konstruktioners brandmodstandsevne.

Adskillende konstruktioner

For boligbyggeri kræver BR 1966 brandcelleafgrænsende konstruktioner udført som BD 60-konstruktioner, for så vidt der ikke i henhold til det foregående stilles større krav. For etagebyggeri med mere end 2 etager kræves dog for indvendige brandcelleafgrænsende konstruktioner BS 60 eller BD 90, og for ydervægge enten BS 60 eller BD 60 med visse krav til beklædningen (jvf. nedenfor). Herudover kræves generelt (også for eenfamiliehuse), at rumafgrænsende bygningsdele skal udføres som mindst BD 30, et krav, der i mange tilfælde synes at savne begrundelse.

Beklædninger

Udover de brandtekniske krav, der er indeholdt i de nævnte krav til bærende og adskillende bygningsdele, må der i visse tilfælde stilles krav til beklædningers brandbeskyttende egenskaber eller krav om en vis begrænsning af beklædningers tilskud til brand, jvf. klassifikationsreglerne side 154.

Gulvbelægnings brandtekniske egenskaber er erfaringsmæssigt af så ringe indflydelse på en brands forløb, at der ikke er fundet anledning til at optage lovbestemmelser herom; i visse tilfælde, f.eks. sikkerhedstrapper, bør man dog forlange belægninger udført af materialer af klasse A.

For boligbyggeri forlanges vægges og lofters overflader og eventuelle beklædninger udført efter følgende klasser:

	Have- boliger	Etageboliger		
		max. 2 etg.	max. 8 etg.	over 8 etg.
Udvendige beklædninger	2	2	2	1
Ikke-bærende yder- vægge (BD 60)			1	1
Indvendige vægflader	2	2	2	1
Loftflader	2	2	1	1
Kælderlofter	1	1	1	1
Trapperumsvægge		1	1	1
Trapperumslofter		1	1	1

10.5. ANDRE FUNKTIONSKRAV

I de foregående fire afsnit er funktionskravene til bygningsdelene karakteriseret ved bestemte, ikke-tidsafhængige egenskaber. Udover disse "egentlige" funktionskrav må der imidlertid stilles det krav til enhver bygningsdel, at den under de forskelligartede påvirkninger, den i tidens løb er udsat for, vedbliver at være i stand til at opfylde de funktionskrav, der stilles til den - at den med andre ord er bestandig. Bestandigheden kan ikke i sig selv siges at være en funktion - den kunne snarere karakteriseres som konstruktions evne til at bevare sin funktionsdygtighed. Eksempelvis må man til en bærende stålkonstruktion stille det krav, at den ikke under de givne klimabetingelser undergår sådanne ændringer (f.eks. ved korrosion), at den på et vist tidspunkt bliver - helt eller delvist - ude af stand til at varetage sine egentlige funktioner, de statiske; bestandighedskravet er i dette tilfælde et krav om holdbarhed overfor korrosion og må altså indbefatte, at korrosion forhindres. En væg, til hvilken der eksempelvis stilles det krav, at den skal være bakteriefri, må - for til stadighed at være det - være konstrueret således, at den vedblivende tåler afvaskning med de nødvendige kemiske midler; bestandighedskravet er i dette tilfælde et krav om renholdelsesmulighed og kemisk modstandsdygtighed.

Som eksempler på de mangfoldige fysiske påvirkninger, der kan have destruktiv indflydelse på en konstruktions tilstand, kan nævnes kemiske og bakteriologiske påvirkninger, luftforurening, mikroorganismer, slitage, lys, radioaktiv stråling, fugt, varme og frost. Det er selvfølgelig ikke i lige høj grad, disse påvirkninger virker nedbrydende; flere af dem har ikke egentlig ødelæggende virkning, men kan give overordentlig skæmmende misfarvninger, f.eks. sollyset.

En konstruktion, der er i stand til uden foranstaltninger efter færdiggørelsen vedblivende at modstå enhver tænkelig af disse påvirkninger, uden at disse har nogen skadelig (nedbrydende eller skæmmende) indvirkning, benævnes vedligeholdelsesfri. Hvorvidt en bygningsdel overhovedet kan - eller bør - konstrueres vedligeholdelsesfri, er selvfølgelig i høj grad

et spørgsmål om påvirkningernes art og intensitet, men desuden et økonomisk spørgsmål; vedligeholdelsesudgifterne kan i mange tilfælde være en væsentlig faktor i en bygnings driftsudgifter, så det endelige valg af konstruktionstype må baseres på en kalkulation, der medregner de kapitaliserede vedligeholdelsesudgifter.

De foranstaltninger, en ikke-vedligeholdelsesfri konstruktionsdel kræver, kan stort set deles i vedligeholdelse og reparation.

Til vedligeholdelsesforanstaltninger hører i denne sammenhæng almindelig renholdelse (afvaskning, spuling, kostning etc.), periodevis fornyelse af maling og tilsvarende overfladebehandlinger, udbedring af slidte gulvbelægninger etc., altså altsammen sådanne foranstaltninger, som er nødvendiggjort dels af den almindelige, tilsigtede anvendelse af bygværket, dels af de ovenfor nævnte, forudselige påvirkninger. Ved reparationer derimod skal i denne sammenhæng forstås udbedring af skader; disses årsager kan være enten

fejl i materialer
 fejlagtige konstruktionsforudsætninger
 fejlagtig konstruktion
 fejlagtig udførelse.

Principielt bør enhver bygningsdel konstrueres således, at den ikke på noget tidspunkt fordrer reparation. Det siger dog sig selv, at ved den sammensatte proces, et byggeri er, kan man ikke se bort fra muligheden for menneskelige fejl; denne mulighed bør altid tilgodeses, således at man ved den konstruktive udformning i rimeligt omfang gør sig et begreb om, hvordan en eventuel skade skal kunne udbedres.

Kravene til en konstruktionsdels bestandighed kan herefter i store træk sammenfattes til følgende:

vejrbestandighed
 frostbestandighed
 holdbarhed (korrosions- og træbeskyttelse etc.)
 slidstyrke
 renholdelsesmulighed
 reparationsmulighed.

10.6. LITTERATUR

- [1936.1] I.O.V. Irminger & Chr. Nøkkentved:
Wind-pressure on Buildings (2. series)
København 1936
- [1949.1] Fritz Ingerslev:
Akustik
København 1949
- [1956.1] Gösta Brown:
Värmeövergång vid byggnaders ytterytter
Stockholm 1956
- [1959.1] Martin Jensen:
Aerodynamik i den naturlige vind
København 1959
- [1960.1] Poul Becher:
Varme og ventilation, 1
København 1960
- [1960.2] Poul Becher:
Varme og ventilation, 2
København 1960
- [1960.3] Øivind Birkeland:
Ikke-bærende yttervegger
Oslo 1960
- [1962.1] O. Krischer:
Die wissenschaftlichen Grundlagen der
Trocknungstechnik, Bd 1,
Berlin 1962
- [1962.2] W. Geilinger & S. Bryl:
Feuersicherheit der Stahlkonstruktionen,
IV. Teil
Zürich 1962
- [1963.1] Träkonstruktioners Brandstabilitet.
Chalmars Tekniska Högskolas Handlinger nr. 274,
Göteborg 1963
- [1964.1] Willi Furrer:
Room and Building Acoustics and Noise Abatement
London 1964
- [1964.2] Ove Pettersson:
Den byggnadstekniska brandforskningen i dag och
i framtiden
Stockholm 1964

- [1964.3] Ove Pettersson:
Utvecklingstendenser rörande brandteknisk
dimensionering av stålkonstruktioner.
Väg- och vattenbyggaren 6 1964
- [1965.1] Nordisk Komite for bygningsbestemmelser:
Felles nordiske retningslinjer for lette
ikke-bærende yttervegger 1965
- [1966.1] Jørgen Petersen:
Bygningsakustik. Grundlag, rumakustik, 1
København 1966
- [1966.2] Reidar Bjørhovde:
Brannstabilitet og brannbeskyttelse av
stålkonstruksjoner Trondheim 1966
- [1966.3] H. Lundsgaard:
Brandtekniske problemer i industribyggeri.
Byggeindustrien 13 1966
- [1967.1] A. Coull & B. Stafford Smith:
Tall Buildings Oxford 1967
- [1967.2] P. Lund-Hansen:
Fugttransport i byggematerialer København 1967
- [1967.3] Karl Seiffert:
Wasserdampfdiffusion im bauwesen Wiesbaden 1967
- [1968.1] A.I. Moe:
Om sikkerhedsgraden i faststående statiske
konstruktioner København 1968
- [1968.2] SBI-anvisning 58:
Støj i boliger København 1968
- [1968.3] Kai Odeen:
Fire Resistance of Prestressed Concrete
Double T Units Stockholm 1968

- [1968.4] Kai Ödeen:
Experimentelt och teoretiskt studium av
brandförlopp i byggnader Stockholm 1968
- [1969.1] Hans Granum & Øivind Aschehoug:
Bygningsfysikk Oslo 1969