

**Energisystem och energihushållning för
landsbygdsföretag,
TN0258, 2011**

Föreläsning

Byggnaders energibehov, energiplanering

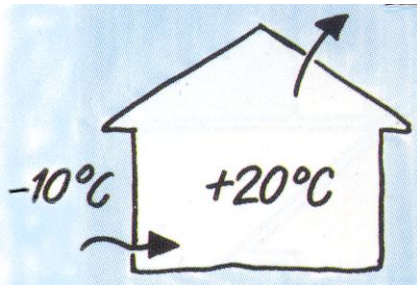
Byggnadsfysik – Värmelära

Christer Nilsson

Byggnadsfysik

- **Värme**

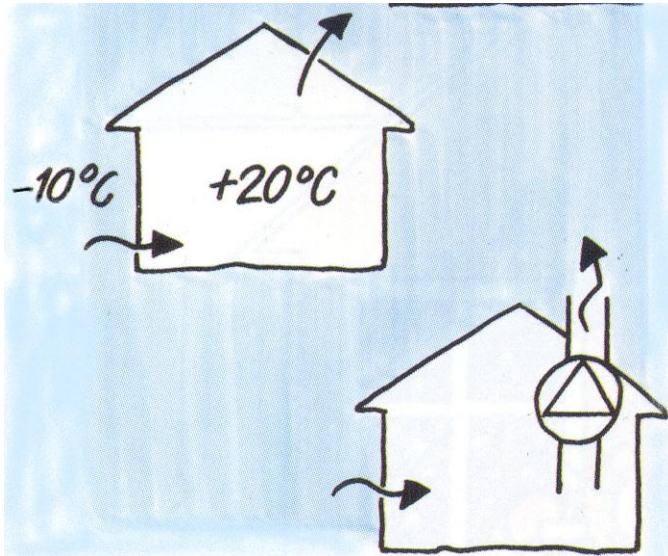
- Fukt
- Ljud
- Brand



Värmebalans

- Värmetillförsel
 - Djur, växter, produkter
 - Människor
 - Tilläggsvärme
 - Belysning
 - Maskiner
 - Solinstrålning
 - m.m.
- Värmeförluster
 - Ventilation
 - kontrollerad
 - ofrivillig
 - Transmission
 - ledning
 - strålning
 - konvektion
 - Kylning
 - Varmvatten
 - m.m.

Värmebalans

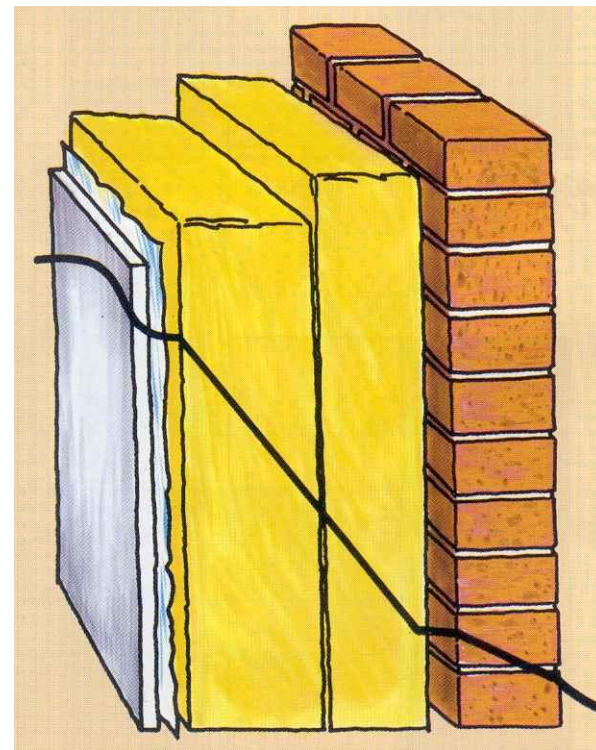
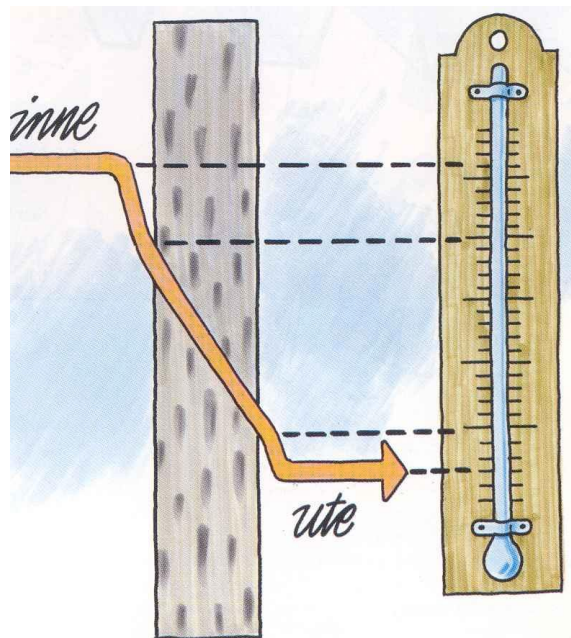
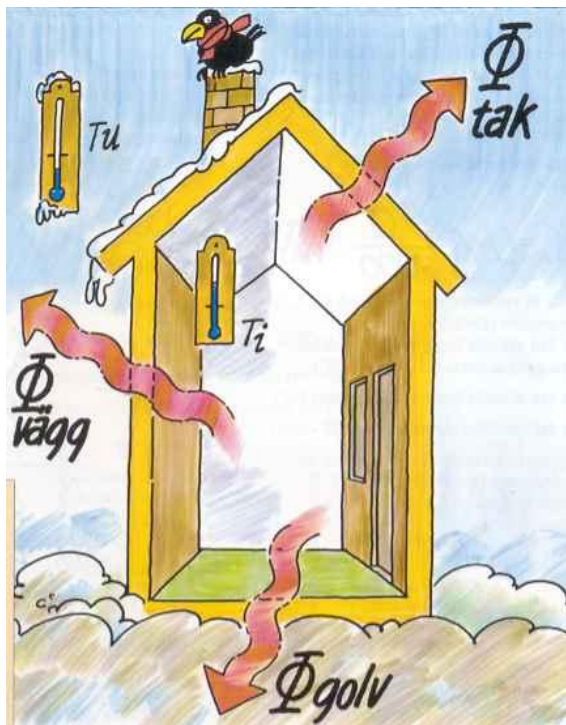


- $Q_{\text{prod}} = Q_{\text{förlust}} (\pm \Delta Q_{\text{lager}})$
- Tillförsel
 - Människor, djur, växter, produkter
 - Apparater
 - Solinstrålning
 - Värmeanläggning
- Bortförsel och förluster
 - Transmission genom klimatskärmen
 - Ventilation
 - Kylning



$$P_{\text{fri}} + P_{\text{till}} + P_{\text{app}} = P_{\text{trans}} + P_{\text{vent}}$$

Klimatskärm

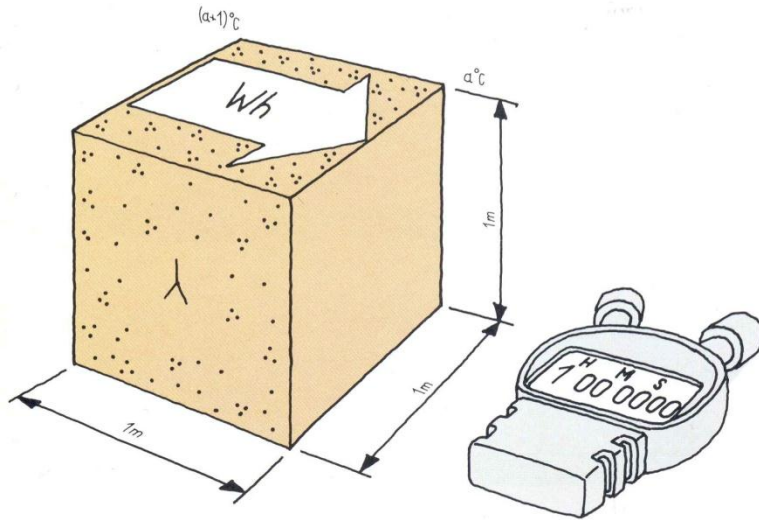


Värmetransport eller värmetransmission

- Ledning (konduktion)
- Strålning
- Konvektion
 - Egenkonvektion
 - Påtvingad konvektion

Värmetransport orsakas av temperaturskillnader

Värmekonduktivitet (λ -värde)



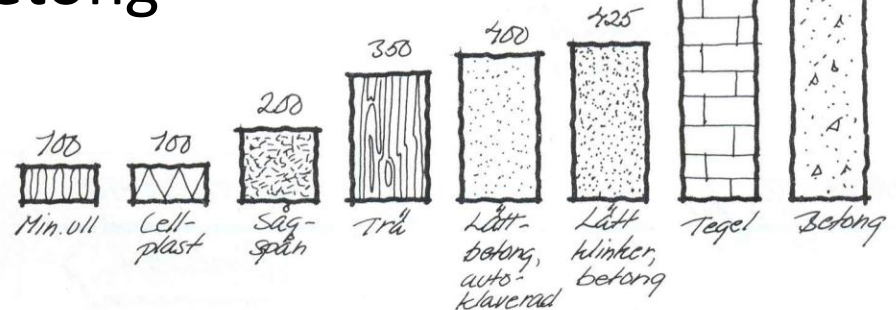
- Värmekonduktivitet (λ)
 - $[\text{W/m}, ^\circ\text{C}; \text{W/m}, \text{K}]$
 - Den värmemängd (Wh) per timme (h) som passerar ett 1 m tjockt skikt med ytan 1 m^2 när temperaturskillnaden är $1 ^\circ\text{C}$
 - Ju lägre värde desto bättre isolering.
 - Exempel på värden för olika material finns i tabellverk och datablad.

- **Materialgenskap**
- Lägst värmekonduktivitet hos isolermaterial

Värmeisoleringsförmåga

Lika isolerförmåga hos materialskikt av olika tjocklekar:

- 100 mm mineralull
- 100 mm cellplast
- 200 mm sågspån
- 300 mm trä
- 400 mm lättbetong
- 425 mm lättklinkerbetong
- 1750 mm tegel
- 3100 mm betong



Isolermaterial

Exempel på isolermaterial:

- Mineralull - glasull eller stenu
- Cellplast
 - expanderad styrencellplast (EPS) t.ex Frigolit
 - extruderad styrencellplast (XPS) t.ex ecoprim
 - uretancellplast (PUR), karbamidcellplast
- Lättklinker (Leca)
- Träull
- Kork
- Cellglas
- Sågspån, kutterspån, halm, torv, masugnsslagg, etc

→ VärmeIsolerMaterialkontrollen

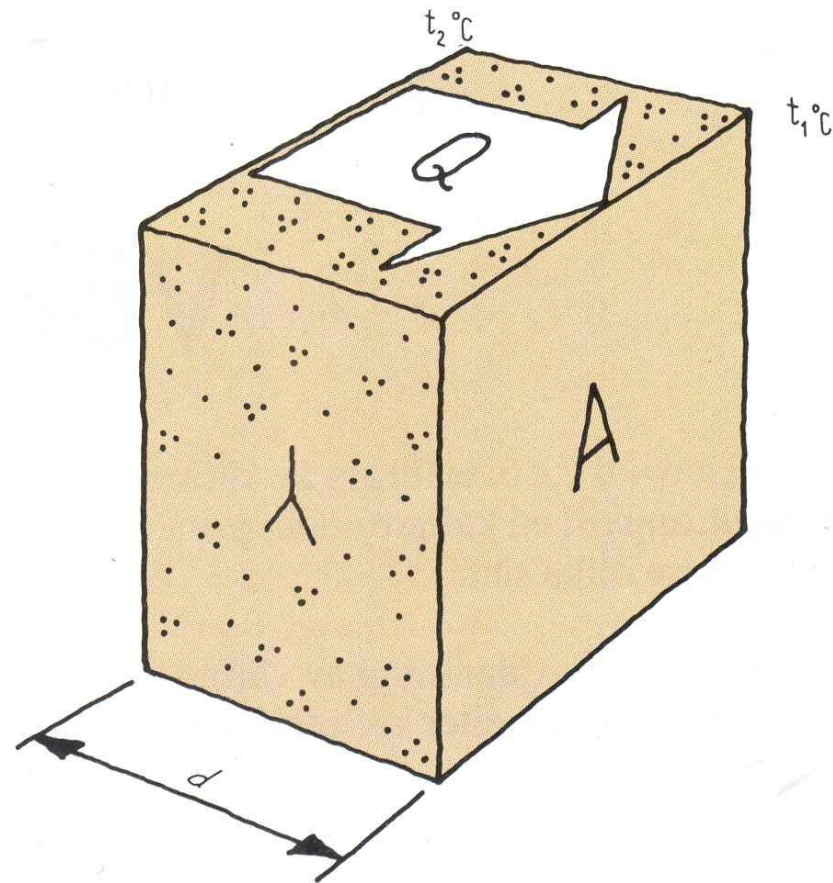
VIM-märkt produkt => klassad produkt, λ_{kl}

VIM-märke för isolerprodukter innebär att de är kontrollerade av stiftelsen Värmeisolermaterialkontrollen (godkänd tillverkningskontroll)



För icke VIM-kontrollerade isolermaterial skall väsentligt sämre (högre) λ -värde användas vid beräkning av U-värde.

Värmemotstånd



- Värmemotstånd (R)
 - $R_p = d/\lambda_p = \delta/\lambda_p$
 - $[m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}; m^2 \text{ K}/\text{W}]$
 - **egenskap hos ett materialskikt**
- Ex. 120 mm mineralull
 - $R_p = 0,120/0,036 =$
 $= 3,33 m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$

OBS. För vissa typer av skikt finns R_p -värden i tabeller.

Värmegenomgångskoefficient

- Värmegenomgångskoefficient (U)
 - $[W/m^2 \text{ } ^\circ C; W/m^2 K]$
- Egenskap hos **konstruktionen**
- $U_p = 1/R_T (+ \Delta U_g + \Delta U_k + \Delta U_f + \Delta u_w)$
 - där $R_T = R_{si} + d_1/\lambda_{p1} + \dots + R_{p1} + \dots + R_{se}$
med $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ C/W$ och $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ C/W$ (ytterväggar)
 - Värden på $\Delta U_g + \Delta U_k + \Delta U_f + \Delta u_w$ finns i tabellsamlingar

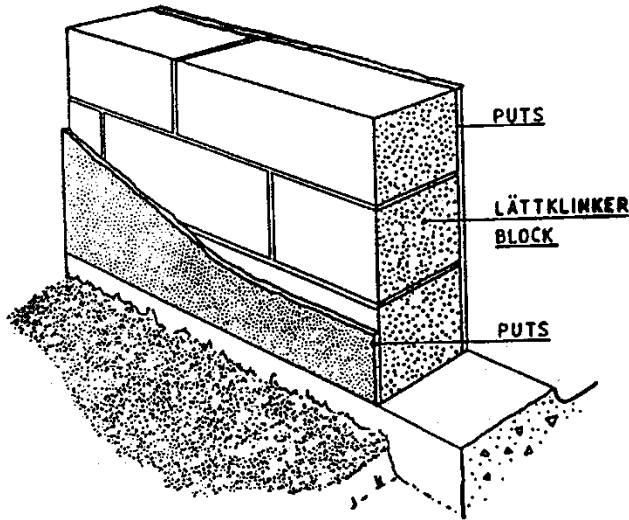
Värmeövergångsmotstånden R_{si} och R_{se}

- R_{si} är det inre och R_{se} det yttre värmeövergångsmotståndet. EN SS-ISO 6946 anger följande värden i $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$:
 - Väggar: $R_{si}=0,13$ $R_{se}=0,04$
 - Tak: $R_{si}=0,10$ $R_{se}=0,04$
 - Golv: $R_{si}=0,17$ $R_{se}=0,04$

Se även tabellsamlingar.

Exempel: Putsad lättklinkervägg

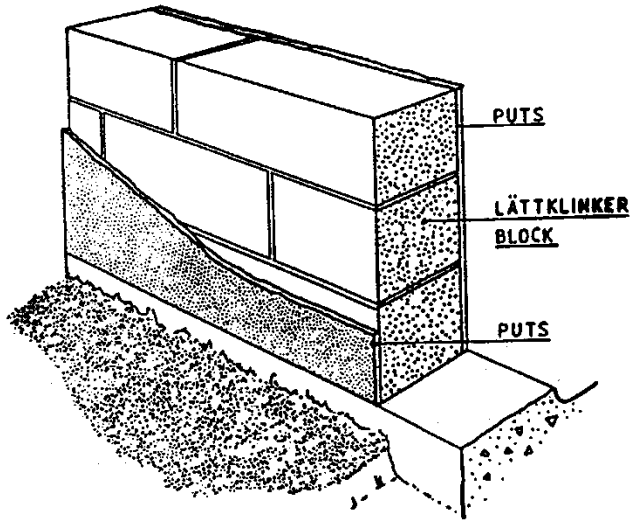
Beräkna U-värde för väggen



Material	d (m)	λ (W/m,° C)	R (m ² °C/W)
Ute, R _{se}	-	-	
Puts, kalkcement	0,015		
Lättklinker, murverk	0,290		
Puts, kalkcement	0,015		
Inne, R _{si}	-	-	
Summa, R _T			

$$U_p = ?$$

Svar:

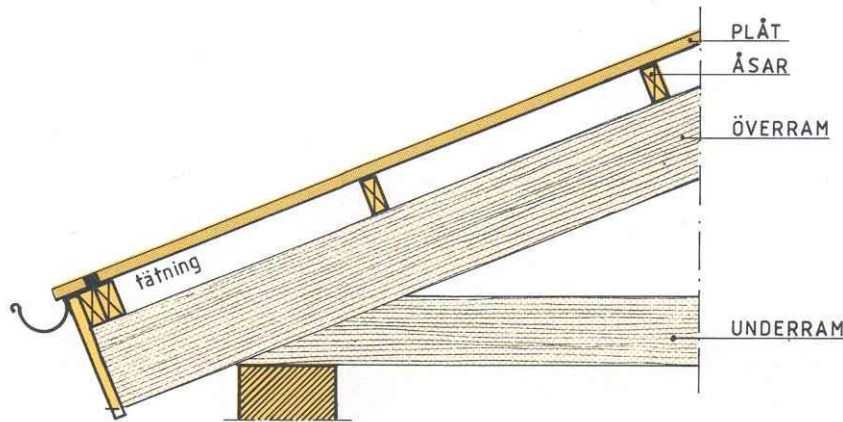


Material	d (m)	λ (W/m,° C)	R (m ² °C/W)
Ute, R _{se}	-	-	0,04
Puts, kalkcement	0,015	1,00	0,015
Lättklinker, murverk	0,290	0,33	0,879
Puts, kalkcement	0,015	1,00	0,015
Inne, R _{si}	-	-	<u>0,13</u>
Summa, R _T			1,079

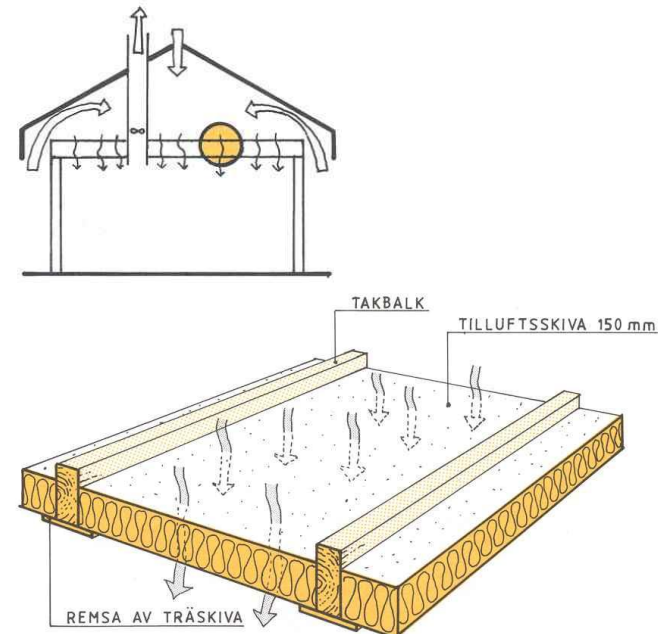
$$U = 1/R_T = 1/1,079 = 0,93 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_p = 0,93 + \Delta U_g = 0,93 + 0,02 = 0,95 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Värmeflöde genom tak

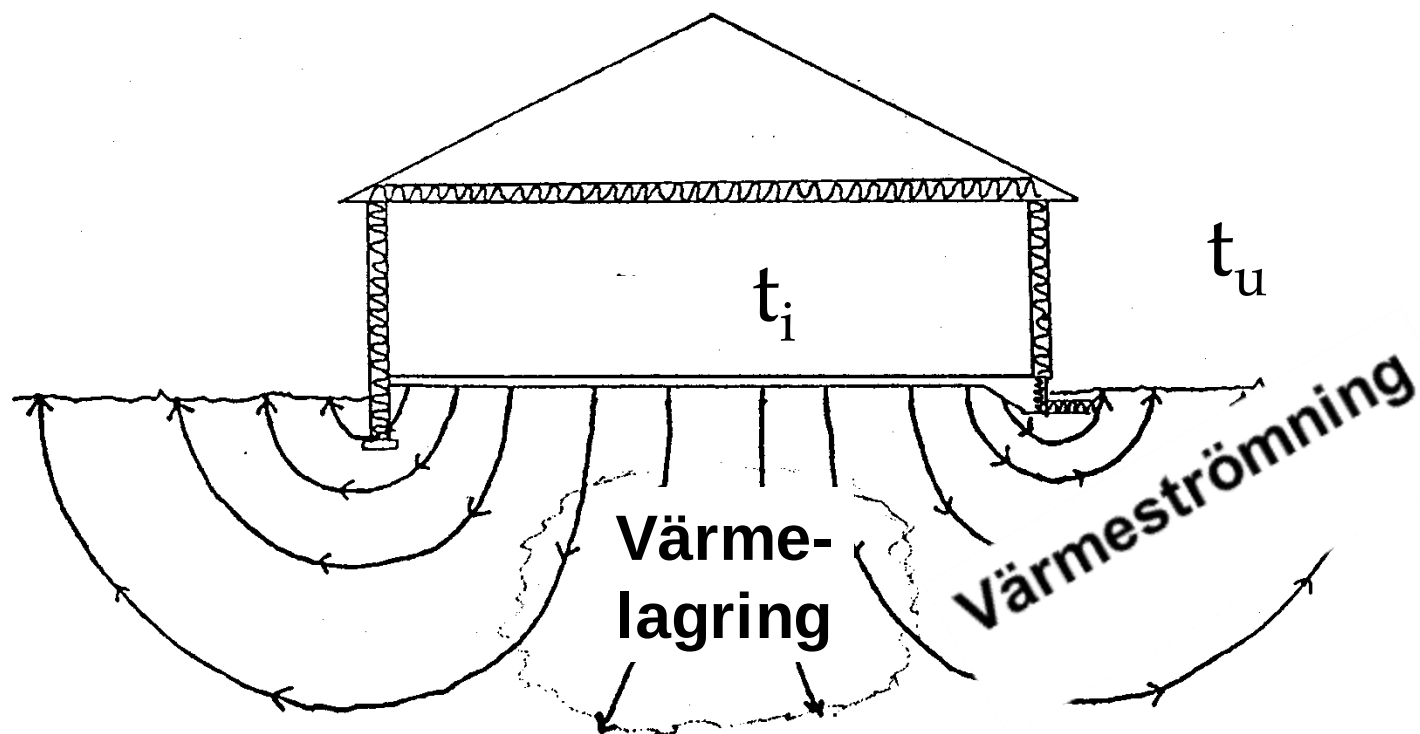


Ingen värme beräknas gå mot luftströmmen genom ett **tilluftstak**.



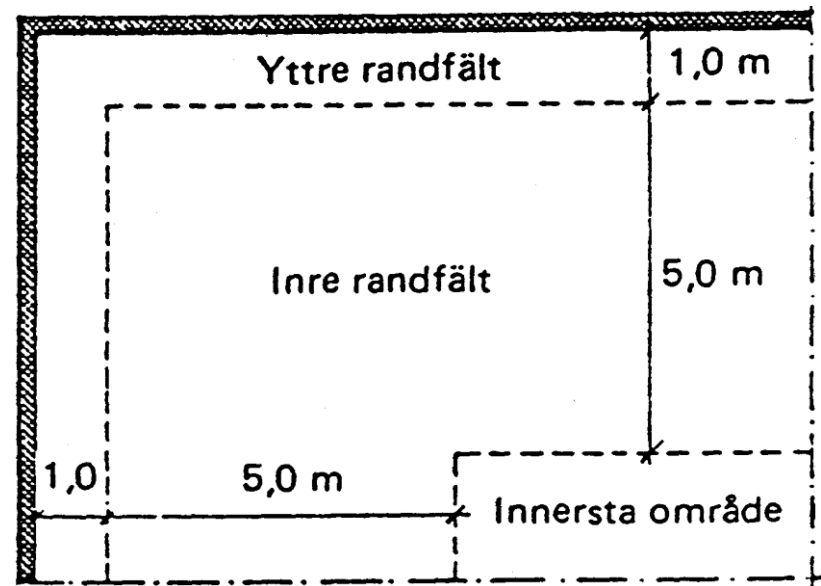
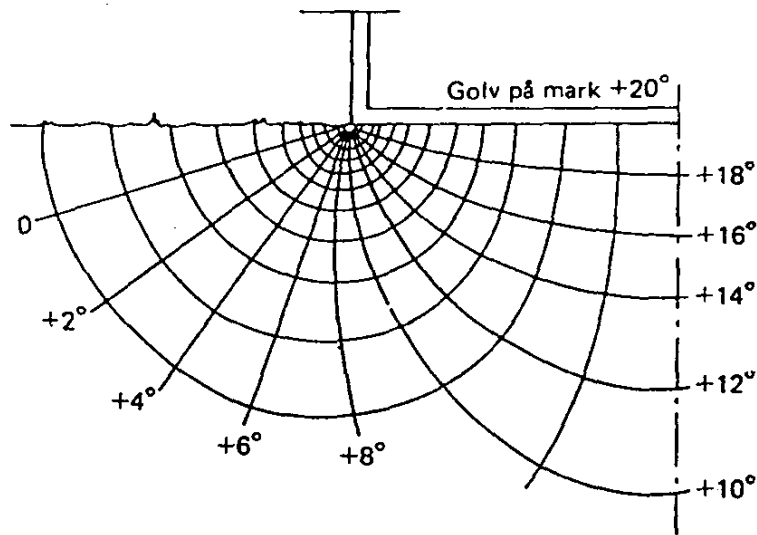
Värmemotstånd = värmemotståndet i bjälklaget inkl. isolering + takkonstruktionens värmemotstånd enligt tabell + R_{si} + R_{se}

Värmeflöde genom golv och mark



Värmeflöde genom golv

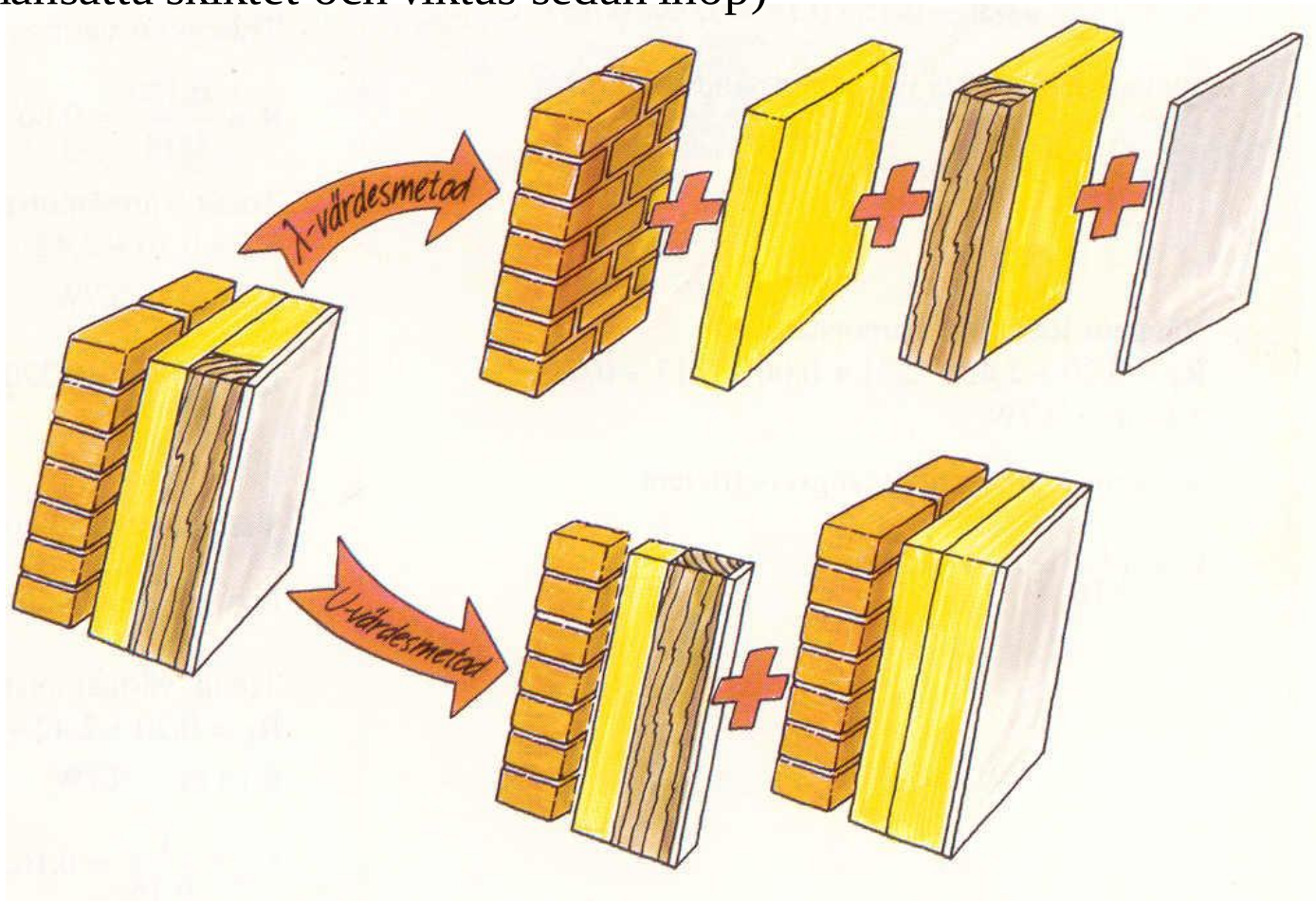
- Totala värmemotståndet, R_T i golvkonstruktionen olika fält beräknas genom att summera värmemotstånden hos golvet, inkl. ev. isolering + dräneringsskikt ($0,20 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) + jordens värmemotstånd (tabell) + R_{si} + R_{se}
- Eventuell markisolering utanför byggnaden antas endast påverka yttre randfältet.



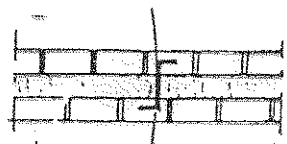
U-värde, sammansatta skikt

U-värdet kan beräknas på två sätt:

- λ -värdesmetoden (ett viktat λ -värde beräknas för det sammansatta skiktet)
- U-värdesmetoden (ett U-värde beräknas för respektive konstruktionsdel i det sammansatta skiktet och viktas sedan ihop)



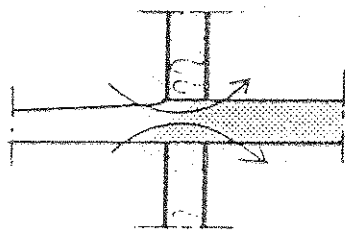
Exempel på köldbryggor



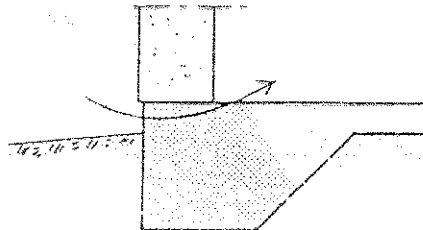
Skalmur med kramlor



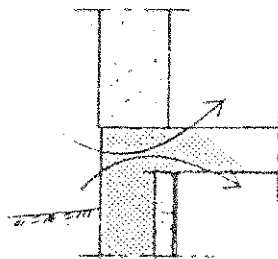
Stålpelare i yttervägg



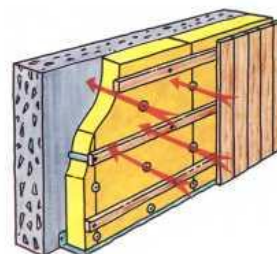
Utkragad balkongplatta



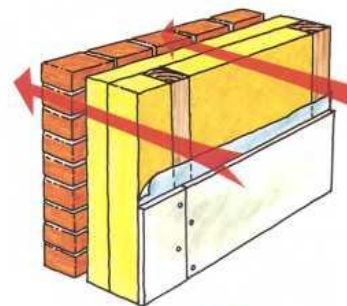
Kantförstyvad platta på mark



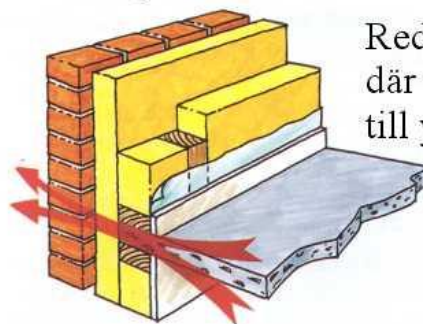
Invändigt isolerad grundmur



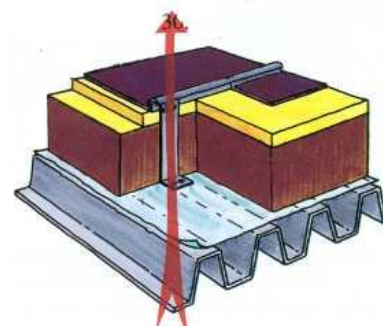
Normal infästning av en fasadskiva ger försumbara köldbryggor.



Träreglar i isolerskikt, ΔU_k



Reducerad köldbrygga där bjälklaget ansluter till ytterväggen.



Stålinfästning genom isolerskiktet

Köldbryggor

- Köldbryggor som kan försummas
 - t.ex. spik och skruv som håller ytskiktet på plats.
- Köldbryggor som ingår i beräkning av R_T
 - t.ex. balkar och reglar (av trä eller plåt) i isolerskiktet.
- Köldbryggor som ingår i beräkning av U_p
 - t.ex. murkramlor som ger korrektionen ΔU_f .
- Andra köldbryggor (som är svåra att beräkna)
 - t.ex. kantbalkar vid platta på mark, utkragade balkongplattor, metallpartier i och fönster, dörrar och portar, genomföringar för el, vatten och VVS, balkar/pelare av betong eller stål i fasadliv, samt väggar och bjälklag till utfackningsväggar.

Temperaturdifferens över ett materialskikt

Temperaturskillnaden över ett materialskikt (med värmemotstånd R_n) kan beräknas med hjälp av uttrycket:

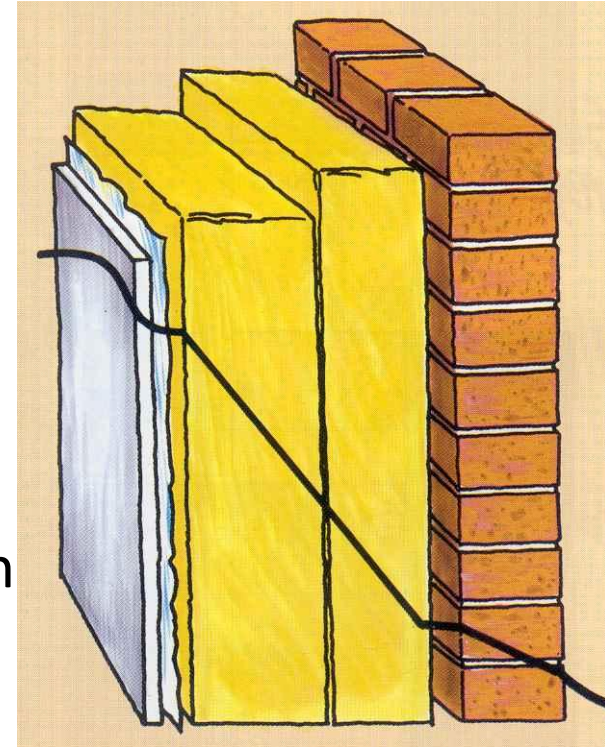
$$\Delta t_n = \frac{R_n}{R_T} (t_i - t_u)$$

t_i : inomhustemperatur

t_u : utomhustemperatur

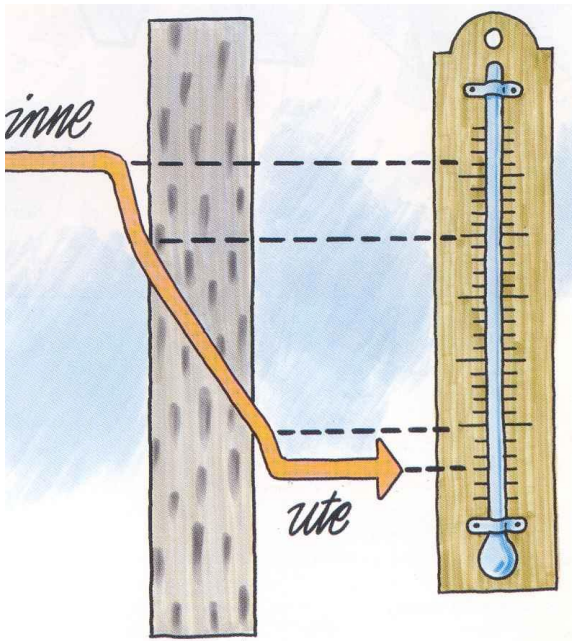
R_n : värmemotståndet för skiktet

R_T : värmemotståndet för hela byggnadsdelen



Formeln kan även användas för beräkning av temperaturskillnad orsakad av värmeövergångsmotstånden R_{si} och R_{se} och därmed väggytans temperatur.

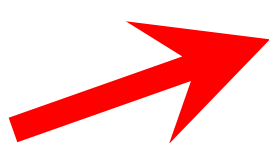
Temperatur på väggyta



Dåligt isolerad vägg med varmt fuktigt inneklimat kan leda till kondens på väggarna vintertid.

Fukt uppträder först vid köldbryggor och i hörn.

Följande formel kan härledas för beräkning av väggytans temperatur:


$$t_{yi} = t_i - (R_{si} * (t_i - t_u) / R_T)$$

Beräkningen förutsätter att stabila temperaturförhållanden uppkommit.

Ytkondens

$$\text{Relativ fuktighet: } RF = \varphi = \frac{x}{x_m} = \frac{p_v}{p_m}$$

X : aktuell ånghalt (kg H₂O/kg luft; g H₂O/kg luft)

X_m : mättnadsånghalt (kg H₂O/kg luft; g H₂O/kg luft)

p_v : vattenångans aktuella tryck (Pa)

p_m : vattenångans mättnadstryck (Pa)

Väggens yttemperatur på insidan:

$$t_{yi} = t_i - (R_{si} * (t_i - t_u) / R_T)$$

Ytkondens uppstår om ytans temperatur är lägre än kondenseringstemperaturen för den aktuella luften

Luftens mättnadsvärden och densitet vid olika temperaturer

Temperatur, t , °C	Vatteninnehåll x , g/kg	Densitet, ρ , kg/m ³
-15	1,03	1,38
-14	1,13	1,37
-13	1,24	1,37
-12	1,35	1,36
-11	1,48	1,36
-10	1,62	1,35
-9	1,77	1,35
-8	1,93	1,34
-7	2,11	1,34
-6	2,30	1,33
-5	2,50	1,33
-4	2,73	1,32
-3	2,98	1,32
-2	3,24	1,31
-1	3,52	1,30
0	3,83	1,29
+1	4,12	1,28
+2	4,42	1,28
+3	4,75	1,27
+4	5,10	1,27
+5	5,47	1,26
+6	5,86	1,26
+7	6,30	1,25
+8	6,74	1,25
+9	7,23	1,24
+10	7,74	1,24
+11	8,27	1,23
+12	8,85	1,23
+13	9,45	1,22
+14	10,10	1,22
+15	10,79	1,21
+16	11,50	1,21
+17	12,30	1,20
+18	13,12	1,20
+19	14,00	1,19
+20	14,88	1,19

Ytkondens, exempel

Uppstår kondens på insidan av en yttervägg med $U_p = 0,8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ då utetemperaturen är $-15 \text{ } ^\circ\text{C}$, innetemperaturen är $+10 \text{ } ^\circ\text{C}$ och relativa luftfuktigheten inomhus 90%?

Ytkondens, exempel

Uppstår kondens på insidan av en yttervägg med $U_p = 0,8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ då utetemperaturen är $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, innetemperaturen är $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ och relativa luftfuktigheten inomhus 90%?

Svar:

$$R_T = 1/U_p = 1/0,8 = 1,25 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

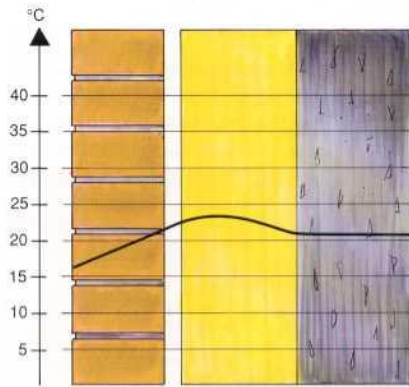
$$t_{yi} = t_i - (R_{si} * (t_i - t_u) / R_T) = 10 - (0,13(10 + 15)/1,25) = 7,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Vatteninnehållet i luften: 90% av mättnadsmängden, dvs $0,90 * 7,74 = 6,97 \text{ g vatten/kg luft}$

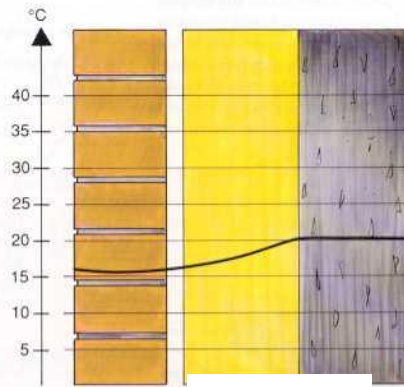
Men luft med temperaturen $7,4 \text{ }^\circ\text{C}$ kan maximalt hålla $6,48 \text{ g vatten/kg luft}$ (interpolering i tabellen).

Således får man kondens på väggens insida.

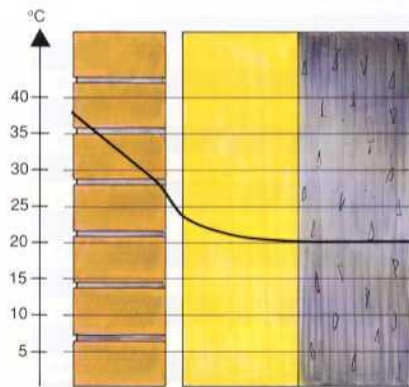
Temperaturfördelning vid icke stationära förhållanden.



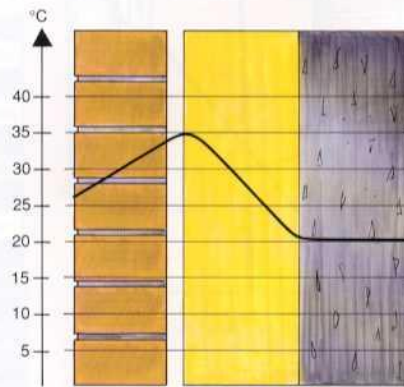
Kl. 06.00



Kl. 09.00



Kl. 12.00



Kl. 18.00

Temperaturfördelningen i en vägg (sydfasad i södra Sverige) bestående av:

150 mm betong
150 mm mineralull
120 mm tegel

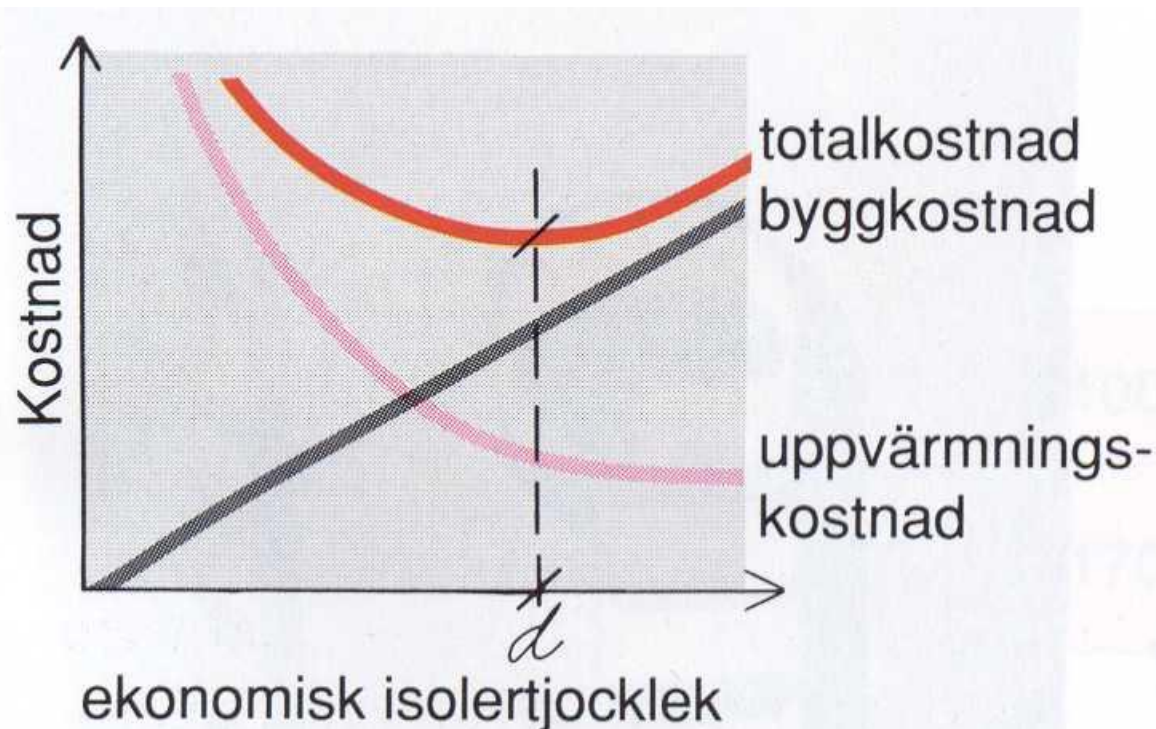
Temperatursvängningarna har beräknats med dator.

Källa: Gullfiber AB.

Ekonomisk isolertjocklek

- Mer isolering ökar byggkostnaden
- Mer isolering minskar uppvärmningskostnaden.

Den optimala isolertjockleken påverkas dessutom av investeringsräntan och energiprisets förväntade utveckling.

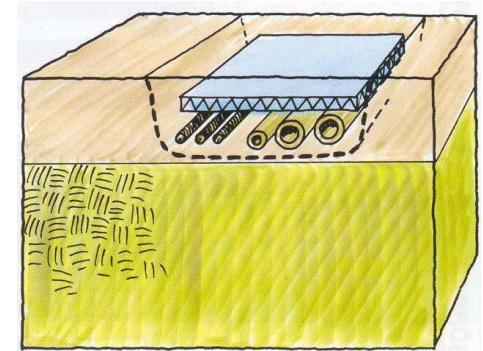
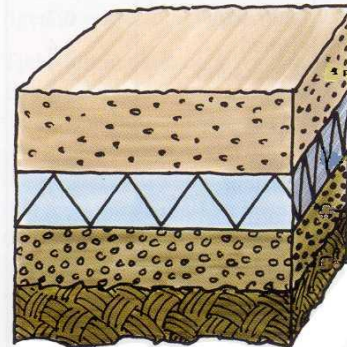
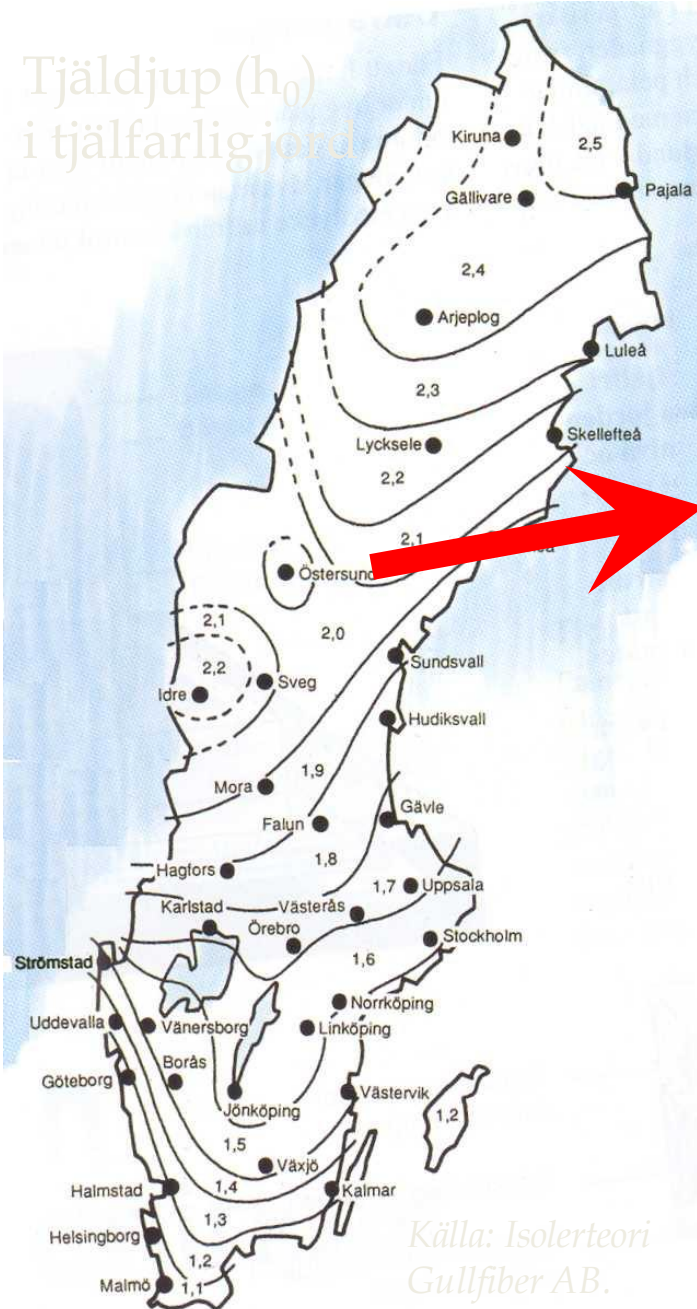


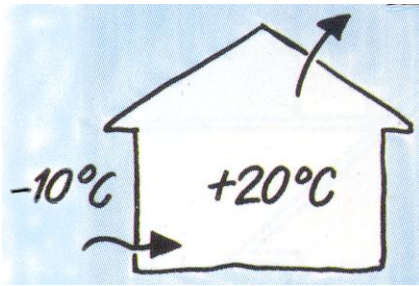
Tjaldjup (h_0)
i tjälfarlig jord

Tjälisolering

Åtgärder vid risk för tjälskador:

- Byt ut tjälfarlig jordart
- Sänk grundvattennivån
- Grundlägg på frostfritt djup
- Lägg värmeisolering i marken.





Värmebalans

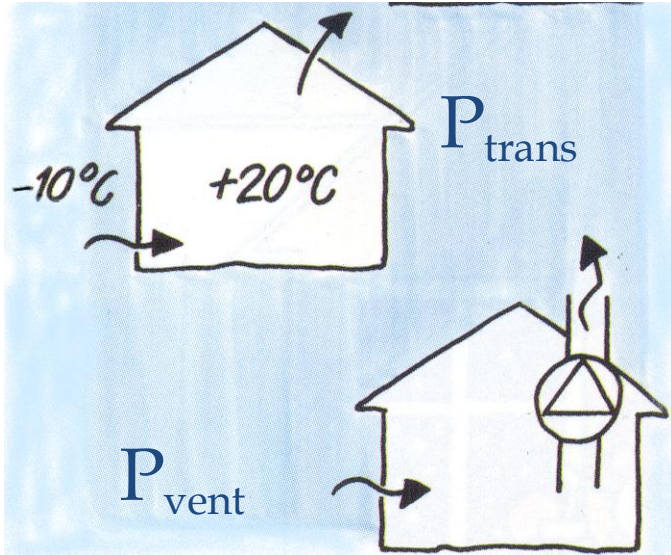
- **Värmetillförsel**

- Djur, växter, produkter
- Människor
- Tilläggsvärme
- Belysning
- Maskiner
- Solinstrålning
- m.m.

- **Värmeförluster**

- Ventilation
 - kontrollerad
 - ofrivillig
- Transmission
 - förluster genom klimatskärm
- Kylning, varmvatten, m.m.

Värmebalansberäkning



- $Q_{\text{tillf}} = Q_{\text{bortf}} (\pm \Delta Q_{\text{lager}})$

- **Tillförsel**

- Djur, människor, växter (P_{fri})
- Apparater (P_{app})
- Värmeanläggning (P_{till})
- Solinstrålning (P_{sol})

- **Bortförsel**

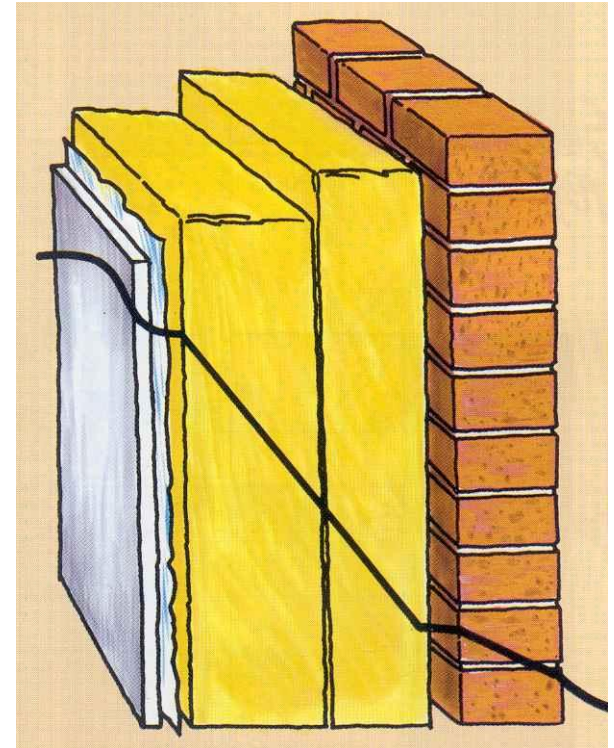
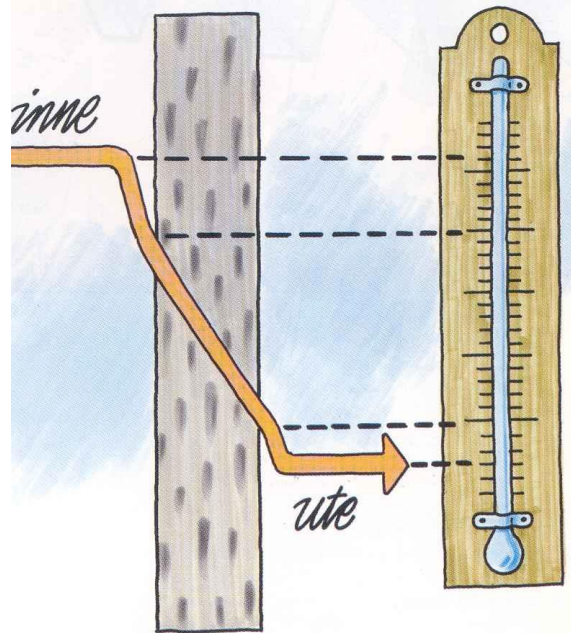
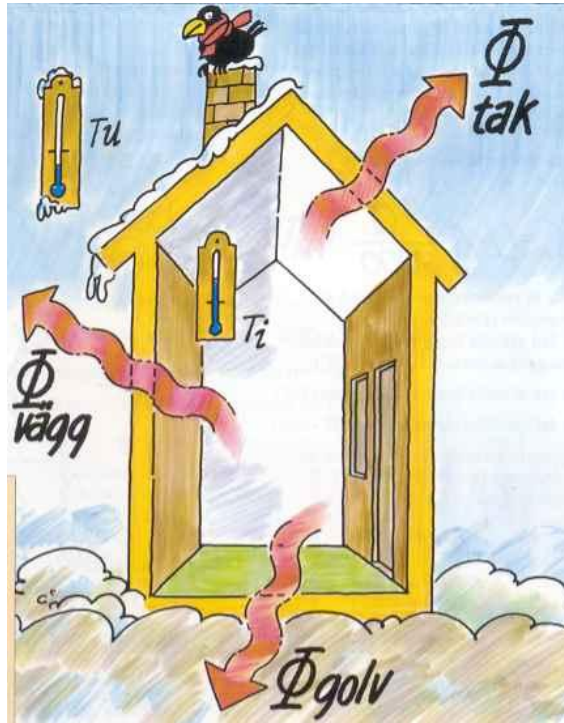
- Transmission genom klimatskärmen (P_{trans})
- Ventilation (P_{vent})

$$P_{\text{vent}} = q_{\text{min}} \cdot c_p \cdot \Delta t$$

Värmebalans:

$$P_{\text{fri}} + P_{\text{app}} + P_{\text{till}} + P_{\text{sol}} = P_{\text{trans}} + P_{\text{vent}}$$

Totala transmissionsförluster genom klimatskärmen



$$P_{\text{trans}} = \sum A_i \cdot U_i \cdot \Delta t_i$$

Exempel Värmebalans

$$P_{\text{fri}} + P_{\text{app}} + P_{\text{till}} + P_{\text{sol}} = P_{\text{trans}} + P_{\text{vent}}$$

$$P_{\text{trans}} = \sum A_i \cdot U_i \cdot \Delta t_i$$

$$P_{\text{vent}} = q_{\text{min}} \cdot c_p \cdot \Delta t$$

C_p : Luftens värmekapacitivitet ($\text{Wh}/\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$).
Praktiskt tillämpbart värde vid rumstemperatur är:
 $0,33 \text{ Wh}/\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Exempel Värmebalans

Beräkna värmebalansen i ett lagerhus för 300 ton potatis.

Byggnadens storlek: 10 x 20 m, 4 m takhöjd, en port 4 x 4 m.

Dimensionerande innetemperatur: +3°C; Dimensionerande utetemperatur: -14°C.

U-värden: Tak 0,2 W/m²,°C; Yttervägg 0,40 W/m²,°C; Port 1,0 W/m²,°C, värmeförluster genom golv kan försummas.

Ventilationsförluster under vintern reduceras till minsta möjliga, dock får man räkna med ca 0,1 omsättning per timme på hela lagrets volym.

Potatisens värmeproduktion antas vara 10 W/ton.

Värmebalansberäkning

Beräkning på värmebalans-blankett:

1. Värmetillförsel

$$t_i (^{\circ}\text{C}) = +3 \quad t_u (^{\circ}\text{C}) = -14 \quad \Delta t = 17$$

Djur, produkter, app.	Min vent (m3/tim)	Max vent (m3/tim)	Värmeavgivning
Slag	Antal	Summa	Summa
Potatis	300 t	80	10
			3000
Summa	q _{min} 80	q _{max}	P _w 3000

W

Värmetillförsel, P_w

$$3000 \text{ W}$$

2. Värmeförluster

Ventilationsförluster, P_{vent} =

$$q \cdot 0.33 \cdot \Delta t = 80 \cdot 0.33 \cdot 17 = 449 \text{ W}$$

Transmissionsförluster, P_{trans}

Byggnadsdel	Antal	m²/st	A (m²)	U (W/m²/C)	A · U
Yttervägg brutto			240		
Fönster					
Dörrar					
Portar	1	16	16	1,0	1,0
Gavelspets					
Yttervägg nedre					
Yttervägg netto			224	0,40	90
Innertak			200	0,20	40
Golv					0
Summa					146
Vägg mot varmt utrymme					

Transmissionsförluster P_{trans} = Δt · Σ (A · U)

$$\Delta t \quad \Sigma (A \cdot U) = 17 \cdot 146 = 2482 \text{ W}$$

Annan temperaturskillnad mot varmt utrymme

$$+69 \text{ W}$$

Värmebalans: P_w - P_{vent} - P_{trans}

Man har alltså ett litet värmeöverskott på 69 W, vilket i praktiken innebär värmebalans.