



CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO

Ref. no.: 74-0644

Dossier: 02-4-40060

RAPPORT

BEREKENING VAN STALEN LIGGERS
EN BESPREKING VAN KOELSYSTEMEN
VOOR HANGDEKKEN VAN TUNNELOVENS

door

J.H. van der Velden

Datum : februari 1974

Bestemd voor: De Nederlandse Grofkeramische Industrie

SAMENVATTING

In het rapport worden enige algemene richtlijnen uitgewerkt voor de berekening van stalen liggers voor hangdekken van tunnelovens. Bijzondere aandacht wordt besteed aan de invloed van temperatuurverschillen in de hoogterichting van de liggers op de profielkeuze .

Er wordt een formule geïntroduceerd, die het mogelijk maakt bij de keuze van het staalprofiel rekening te houden met de bedoelde temperatuurverschillen.

Tenslotte worden een aantal eisen besproken waaraan een goed koelsysteem voor hangdekken moet voldoen.

Met het rapport wordt beoogd een bijdrage te leveren tot een betere ontwerpbevoegd van tunnelovens voor de grofkeramische industrie.

INHOUDSOPGAVE

	<u>blz.</u>
<u>SAMENVATTING</u>	2
1. <u>PROBLEEMSTELLING</u>	4
2. <u>DE KLASSIEKE METHODE TER BEREKENING VAN STALEN LIGGERS</u>	5
3. <u>LIGGERBEREKENING BIJ AANWEZIGHEID VAN TEMPERATUURGRADIËNTEN IN HET BALKSTAAL</u>	7
4. <u>REKENVOORBEELDEN</u>	9
5. <u>BEPERKING VAN TEMPERATUURVERSCHILLEN IN DE LIGGERS VAN HANGDEKKEN</u>	11
 <u>BIJLAGE 01</u>	
 <u>BEREKENING VAN LIGGERS BIJ AANWEZIGHEID VAN EEN TEMPERATUURVERSCHIL OVER DE HOOGTE VAN DE LIGGER</u>	 15

1. PROBLEEMSTELLING

De profielkeuze van stalen liggers uit balkstaal Fe 37 IPE voor hangdekken van tunnelovens voor keramische produkten geschiedt in het algemeen door de klassieke controle van de sterkte en de stijfheid van het betreffende balkstaal.

De sterkteberekening vindt plaats door de vaststelling van het minimaal vereiste weerstandsmoment tegen buiging van het profiel. Een sterkteberekening op afschuiving is meestal niet relevant.

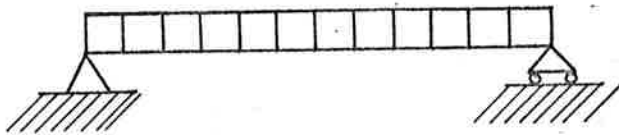
Bij de stijfheidsberekening wordt de minimaal vereiste waarde van het lineair traagheidsmoment vastgesteld.

Bij de inbedrijfstelling van een brede tunneloven werd door ons echter een ernstige doorbuiging van het hangdek geconstateerd, die niet toegeschreven kon worden aan een foutieve sterkte- en stijfheidsberekening als hierboven bedoeld of aan een overschrijding van het maximaal toelaatbare temperatuur-niveau van de liggers. De doorbuiging hier bleek veroorzaakt te worden door temperatuurverschillen in de hoogterichting van de liggers. Deze temperatuurverschillen waren te wijten aan het gebrekkige koelsysteem van het hangdek

Gezien de toenemende belangstelling voor met een hangdek uitgeruste brede tunnelovens worden in dit rapport enige algemene richtlijnen uitgewerkt voor de profielkeuze van de liggers voor hangdekken en voor het ontwerp van koel-systemen voor hangdekken.

2. DE KLASSIEKE METHODE TER BEREKENING VAN STALEN LIGGERS

Bij gebruik van bouwstaal Fe 37 gelden voor het hieronder geschetste belastingsgeval, de navolgende aan de vakliteratuur ontleende formules:



$$W = \frac{8,93}{s} \cdot q \cdot l^2 \quad (1)$$

$$\text{bij } f = \frac{1}{8}: I = \frac{49,6}{e} \cdot q \cdot l^3 \quad (2a)$$

$$\text{bij } f = \frac{1}{6}: I = \frac{37,2}{e} \cdot q \cdot l^3 \quad (2b)$$

$$\text{bij } f = \frac{1}{4}: I = \frac{24,8}{e} \cdot q \cdot l^3 \quad (2c)$$

$$f = \frac{6,2}{e} \cdot \frac{q \cdot l^4}{I} \quad (3)$$

Hierin is:

W	= weerstandsmoment tegen buiging	[cm ³]
q	= belasting van de ligger	[tf/m]
l	= overspanning	[m]
s	= temperatuurcoëfficiënt voor de maximaal toelaatbare buigspanning $\bar{\sigma}_{bo}$ (dimensieloos)	
f	= doorbuiging in het midden van de ligger	[cm]
I	= lineair traagheidsmoment	[cm ⁴]
e	= temperatuurcoëfficiënt voor de elasticiteitsmodulus E_o (dimensieloos)	

De bovenstaande formules zijn gebaseerd op het gebruik van staal met een elasticiteitsmodulus E_o van $2,10 \cdot 10^6$ kgf/cm² en een maximaal toelaatbare buigspanning $\bar{\sigma}_{bo}$ van 1400 kgf/cm² bij een temperatuur van 25 °C. Bij deze temperatuur

zijn de coëfficiënten e en s gelijk aan 1.

Voor andere temperaturen θ zijn de getalwaarden van e en s in onderstaande tabel weergegeven. De coëfficiënten zijn geschat aan de hand van schaarse gegevens in de vakliteratuur.

temperatuur θ °C	$E_{\theta} = e \cdot E_0$	$\bar{\sigma}_{b\theta} = s \cdot \bar{\sigma}_{b0}$
	e	s
25	1,00	1,00
75	0,99	0,96
125	0,98	0,93
175	0,97	0,88
225	0,95	0,82
275	0,93	0,76
325	0,91	0,69
375	0,88	0,61

De controle op sterkte en stijfheid van een profiel op een temperatuurniveau van 225 °C biedt in het algemeen een voor de industriële praktijk voldoende grote veiligheidsmarge. e is daarbij 0,95 en s : 0,82.

Voor de overspanning neemt men de afstand tussen de middens van de oplegplaten, hetgeen in de tunnelovenbouw overeenkomt met de inwendige ovenbreedte + 0,25 m. Het traagheidsmoment van het balkstaal IPE kieze men bij voorkeur zodanig, dat de doorbuiging $f \leq \frac{1}{8}$.

3. LIGGERBEREKENING BIJ AANWEZIGHEID VAN TEMPERATUURGRADIËNTEN IN HET BALKSTAAL

De voor de ophanging van het hangdek gebruikte staalprofielen dragen aan de bovenzijde in het algemeen een loopvloer, bestaande uit circa 80 mm dikke betonplaten. De ruimte tussen deze betonplaten en de bovenkant van het hangdek wordt gebruikt voor het transport van lucht, die de door het hangdek afgegeven warmte afvoert.

De bovenkant van het hangdek bezit afhankelijk van het toegepaste koelstelsel en de kwaliteit van de warmte-isolatie bij een oventemperatuur van bijvoorbeeld 1100 °C meestal nog een relatief hoge gemiddelde temperatuur van 175 +/- 50 °C.

Verschillen in temperatuur en daardoor verschillen in thermische uitzetting van het staal aan de bovenkant en aan de onderkant van het profiel zijn daarbij onvermijdelijk.

Als gevolg daarvan trekken de liggers enigszins krom. De kromtrekking is meestal niet volledig reversibel. Door het moeilijk voorspelbare temperatuurverloop in de liggers kan de kromtrekking niet nauwkeurig worden berekend. Dit laatste is wel het geval, wanneer men eenvoudigheidshalve aanneemt, dat het temperatuurverloop in de hoogterichting van de liggers lineair is. In bijlage 01 is deze berekening uitgevoerd.

Wanneer men in de gevonden formule 10 voor a: $12 \cdot 10^{-6}$ invult en de notatie in overeenstemming brengt met die uit paragraaf 2, wordt de formule voor de thermische doorzakking z van liggers:

$$z = \frac{0,15 l^2 (\theta_2 - \theta_1)}{h} \quad (4)$$

Hierin is:

z	= thermische doorzakking	[cm]
l	= overspanning	[m]
$(\theta_2 - \theta_1)$	=temperatuurverschil over ligger	[°C]
h	= hoogte van de ligger	[mm]

Wanneer men een thermische doorzakking z (in cm) zou willen accepteren gelijk aan $\frac{1}{4}$, wordt de minimum toelaatbare liggerhoogte h_{\min} in mm.

$$h_{\min} = 0,6 \text{ l}(\theta_2 - \theta_1) \quad (5)$$

Ofschoon de formules 4 en 5 strikt genomen alleen gelden bij een lineair verloop van de temperatuur in de hoogterichting van de ligger, zijn ze toch van waarde voor de industriële praktijk, wanneer men in de keuze van de getalwaarde voor $(\theta_2 - \theta_1)$ de kwaliteit en de betrouwbaarheid van het toe te passen hangdekkoeelsysteem tot uitdrukking brengt.

Voor een van een goed koelsysteem voorzien hangdek zal de getalwaarde in de normale bedrijfssituatie naar schatting op ongeveer 75°C gesteld kunnen worden.

Rekening houdende met storingen in de stroomvoorziening van de ventilatoren van het koelsysteem, kieze men voor $(\theta_2 - \theta_1)$ veiligheidshalve bij een goed koelsysteem voor een traditioneel hangdek een waarde van 100°C .

Uiteraard wordt hierbij verondersteld, dat onmiddellijk na de stroomuitval maatregelen worden getroffen, die de hangdekkoeeling veilig stellen.

Op de voorwaarden waaraan een goed koelsysteem ter beperking van de temperatuurverschillen in de liggers dient te voldoen, wordt in paragraaf 5 nog nader ingegaan.

Bij gebrekkig werkende koelsystemen kunnen belangrijk hogere temperatuurverschillen dan 100°C optreden. Wanneer voor $(\theta_2 - \theta_1)$ een rekenwaarde van 100 wordt gekozen, wordt de formule voor de minimum toepasbare liggerhoogte:

$$h_{\min} = 60 \text{ l} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

4. REKENVOORBEELDEN

Hieronder wordt aan de hand van twee rekenvoorbeelden de betekenis van de doorbuiging door thermische oorzaken toegelicht.

De voorbeelden hebben betrekking op hangdekken voor een 5,1 meter en een 7,5 meter brede tunneloven.

De hartafstanden van de toe te passen Fe 37-IPE-liggers zijn op grond van de gekozen stookrij-afstanden van 1,35 m in de stookzone achtereenvolgens 750, 600, 750 mm. Het hangdek weegt geheel compleet, doch exclusief de stalen liggers 740 kgf/m^2 . De vloerlast wordt op 400 kgf/m^2 gesteld. De totale last per m^2 hangdek bedraagt dan 1140 kgf/m^2 . Een extra belasting van de liggers als gevolg van drukverschillen tussen de ovenruimte en de omgeving wordt verwaarloosd.

Per balk en per meter balklengte is de belasting

$$\frac{1,35}{2} \cdot 1140 = 770 \text{ kgf/m.}$$

Het balkgewicht wordt ruim geschat op 80 kgf/m , zodat de belasting per strekkende meter balk op $0,85 \text{ tf/m}$ komt. De in rekening te brengen overspanning wordt respectievelijk $5,35 \text{ m}$ en $7,75 \text{ m}$. De toelaatbare doorbuiging als gevolg van de mechanische belasting van de liggers wordt gesteld op $f = \frac{1}{8}$. Voor het maximum temperatuurniveau wordt een waarde van $225 \text{ }^\circ\text{C}$ aangenomen. De maximum toelaatbare doorbuiging als gevolg van temperatuurverschillen in de liggers, tot een rekenwaarde van $100 \text{ }^\circ\text{C}$, wordt op $z = \frac{1}{4}$ gesteld.

Toepassing van de formules 1, 2a, 3, 4 en 6 levert de op bladzijde 10 vermelde resultaten op met betrekking tot de keuze van de profielen en de te verwachten doorbuigingen.

Uit het overzicht op bladzijde 10 blijkt, dat de mogelijke doorbuiging door thermische oorzaken bepalend kan zijn voor de keuze van het liggerprofiel.

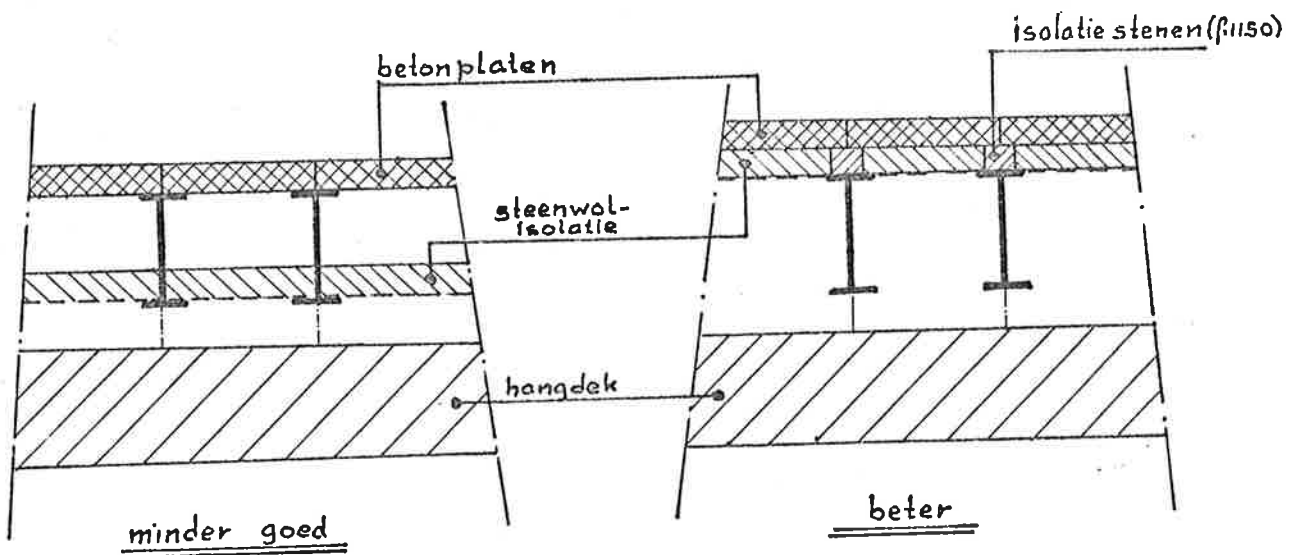
De voorkeur voor opengewerkte I-profielen (dat zijn I-profielen waarin zich zeskantige openingen bevinden) vloeit voort uit de overweging, dat bij toepassing hiervan een betere koeling van het hangdek kan worden gerealiseerd en bovendien een lichter profiel wordt verkregen.

Ovenbreedte		5,1 m	7,5 m
sterkte	W in cm ³	265	556
	W-keuze in cm ³	324 (IPE 240)	557 (IPE 300)
stijfheid	I in cm ⁴	6796	20658
	I-keuze in cm ⁴	8356 (IPE 300)	23130 (IPE 400)
thermische doorbuiging	h _{min} in mm	321	465
	h-keuze in mm	330 (IPE 330)	500 (IPE 500)
P R O F I E L K E U Z E		IPE 330, dan wel een opengewerkt I-profiel ter hoogte van minimaal 325 mm	IPE 500, bij voorkeur een opengewerkt I-profiel ter hoogte van minimaal 465 mm.
werkelijke doorbuiging:		voor IPE 330 (I=11770)	voor IPE-500 (I=48200)
- mechanisch		3,9 mm	4,2 mm
- thermisch (max.)		13,0 mm	18,0 mm
- totaal		16,9 mm	22,2 mm

5. BEPERKING VAN TEMPERATUURVERSCHILLEN IN DE LIGGERS VAN HANGDEKKEN

De in het voorgaande zo'n belangrijke rol spelende verschillen in temperatuur tussen de bovenkant en de onderkant van liggers voor hangdekken zullen kleiner zijn, naarmate de oppervlaktetemperatuur van de bovenzijde van het hangdek lager is en de loopvloer boven de staalprofielen een betere warmte-isolatie bezit.

Ten aanzien van de warmte-isolatie van de loopvloer wordt opgemerkt, dat men in de praktijk ter vermindering van de oppervlaktetemperatuur van de loopvloer wel steenwoldekens toepast, die op een stalen vlechtwerk op de onderflenzen van het balkstaal IPE worden gelegd. Hierdoor wordt het ontstaan van een temperatuurgradiënt in de hoogterichting van de liggers in de hand gewerkt. Het ware beter, indien de loopvloerisolatie boven het profielstaal werd aangebracht. Zie figuur.



Aangezien in de ruimte onder de loopvloer in vele gevallen een (overigens zo klein mogelijk te kiezen) onderdruk ten opzichte van de bedrijfsruimte heerst, is een goede lektheid van de loopvloer van belang. Door lekkage van koude lucht in het koelsysteem via de naden bij de flenzen wordt de temperatuurgradiënt in de liggers versterkt.

De oppervlaktetemperatuur van de bovenzijde van het hangdek zal bij een gegeven ovenruimtetemperatuur lager zijn, naarmate:

- de warmte-isolatie van het hangdek beter is;
- de warmte-afvoer door middel van koellucht beter functioneert;
- het hangdek beter lekdicht is;
- de drukverschillen tussen de ovenruimte en de ruimte boven het hangdek kleiner zijn en naarmate zij beter kunnen worden beheerst.

De specificatie van de warmte-isolatie van het hangdek als zodanig blijft hier buiten beschouwing. Opgemerkt wordt echter dat zich bij toepassing van chamotte-hangstenen plaatselijk grote verschillen in het warmtegeleidingsvermogen van het hangdek voordoen, die bij een aantal hangdekconstructies tot een extra sterke verhitting van de onderflenzen van het IPE-staal leiden en de temperatuurgradiënt in de hoogterichting van het profiel versterken. Uit de tabel in paragraaf 3 en de rekenvoorbeelden in paragraaf 4 blijkt, dat de absolute hoogte van het temperatuurniveau niet zo'n grote invloed op de profielkeuze heeft als wel wordt gemeend.

De warmte-afvoer door middel van koellucht zal beter functioneren, naarmate er bij het ontwerp van het koelsysteem beter op wordt gelet, dat de koellucht in voldoende grote hoeveelheden, gelijkmatig verdeeld langs de te koelen oppervlakken stroomt.

Ten aanzien van de gewenste lekdichtheid van het hangdek wordt opgemerkt, dat constructeurs van hangdekken geacht mogen worden over kwantitatieve gegevens te beschikken van de lekdichtheid van hun ontwerpen. Toepassing van een deklaag van aluminiumfolie zal de lekdichtheid ten goede kunnen komen. De lekkage van hangdekken is een vaak voorkomend euvel, dat bijzondere zorg vereist bij het ontwerp van koelsystemen. De lekkage veroorzaakt in de eerste plaats een verhoging van het warmteverbruik van de oven. Verder bevordert een lekkage het ontstaan van temperatuurgradiënten in de liggers. Tenslotte kan door lekkages in het hangdek ernstige schade toegebracht worden aan de kwaliteit van het te bakken produkt.

De grootte van de lekkage is niet alleen afhankelijk van de lekdichtheid van het hangdek, maar vooral ook van het drukverschil over de constructie. De lekkage vindt in het algemeen plaats via nauwe spleten en poriën in het hangdek. Wanneer

in de ruimte boven het hangdek een onderdruk heerst ten opzichte van het drukniveau ter plaatse in de ovenruimte, zal de hoeveelheid door de nauwe spleten per tijdseenheid weglekkend heet gas rechtevenredig zijn met het drukverschil over het hangdek.

Indien men in de praktijk een dergelijke lekkage constateert, poogt men soms de koeling van het staalwerk veilig te stellen, door een sterkere afzuiging van koellucht zonder dat men tot een gelijktijdige vergroting van de toevoeropeningen voor deze lucht overgaat. De onderdruk boven het hangdek wordt in dat geval groter. Aangezien de hoeveelheid uit de bedrijfsruimte aangezogen koellucht echter slechts rechtevenredig is met de wortel uit het drukverschil tussen bedrijfsruimte en de ruimte boven het hangdek, heeft deze handelwijze meestal een negatief effect.

Alleen door verruiming van de luchttoevoermogelijkheden, dan wel door toepassing van ventilatoren die koellucht in de ruimte boven het hangdek blazen en daarbij de druk van de lucht in het koelsysteem opvoeren, kan de lekkage worden verminderd en kan de te hoog opgelopen oppervlaktetemperatuur aan de bovenkant van het hangdek worden verlaagd.

In dit verband is het ook van belang, dat de passage van de lucht onder de liggers door, niet met groot drukverlies gepaard gaat. Bij het hangdekontwerp dient gezorgd te worden voor ruime luchtdoorgangen. Bij toepassing van hoge profielen verdient het aanbeveling deze van grote gaten te voorzien.

De druk van de koellucht mag evenmin belangrijk hoger zijn dan de druk onder het hangdek, aangezien daardoor de oppervlaktetemperatuur van de onderkant van het hangdek wordt verlaagd. Dit kan met name in de koelzone tot koelscheurvorming leiden en in de sinterzone tot een verstoring van de ruimtelijke temperatuurlijkmatigheid. Grotere drukverschillen over het hangdek dan 1,5 mm wk moeten ook bij toepassing van degelijke constructies worden vermeden.

Bij het ontwerpen van koelsystemen voor hangdekken is een volkomen drukgelijkheid aan beide zijden van het hangdek op iedere plaats in de oven meestal niet realiseerbaar.

In de sinterzone dient de drukgelijkheid in ieder geval met de grootst mogelijke zorg te worden nagestreefd.

In de koelzone is enige lekkage uit de ovenruimte naar het hangdekkoeelsysteem te verkiezen boven een lekkage in tegengestelde richting.

In de opwarmzone van de oven geniet enige lekkage vanuit het koelsysteem naar de ovenruimte de voorkeur boven een lekkage in tegengestelde richting.

Men voorkomt dan namelijk aantasting van het staalwerk door corrosieve gassen en verontreiniging van koellucht.

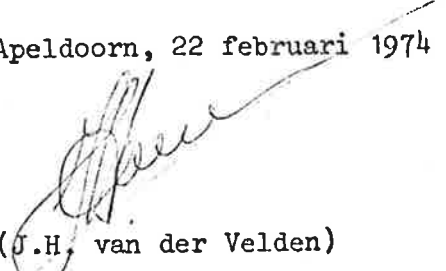
Ook zal het binnendringen van een weinig koude lucht via het plafond in veel gevallen de temperatuurverdeling in de hoogterichting van de ovenlading in de opwarmzone ten goede komen.

Een controle- en instelmogelijkheid van het drukverschil over het hangdek, alsmede een controle op de temperatuur boven het hangdek is in elke ovenzone onontbeerlijk.

Bij het ontwerp van het koelsysteem dient bovendien rekening gehouden te worden met het uitvallen van de stroomvoorziening van de koelluchtventilatoren. Door het installeren van een noodstroomaggregaat, dan wel door te voorzien in de mogelijkheid van een natuurlijke koeling van het hangdek aan de hand van nauwkeurige instructies, kan schade aan de hangdekconstructie door stroomuitval worden voorkomen.

Het bovenstaande beoogt een bijdrage te zijn tot een betere ontwerp-bewaking van koelsystemen voor hangdekken van tunnelovens.

Apeldoorn, 22 februari 1974



(J.H. van der Velden)

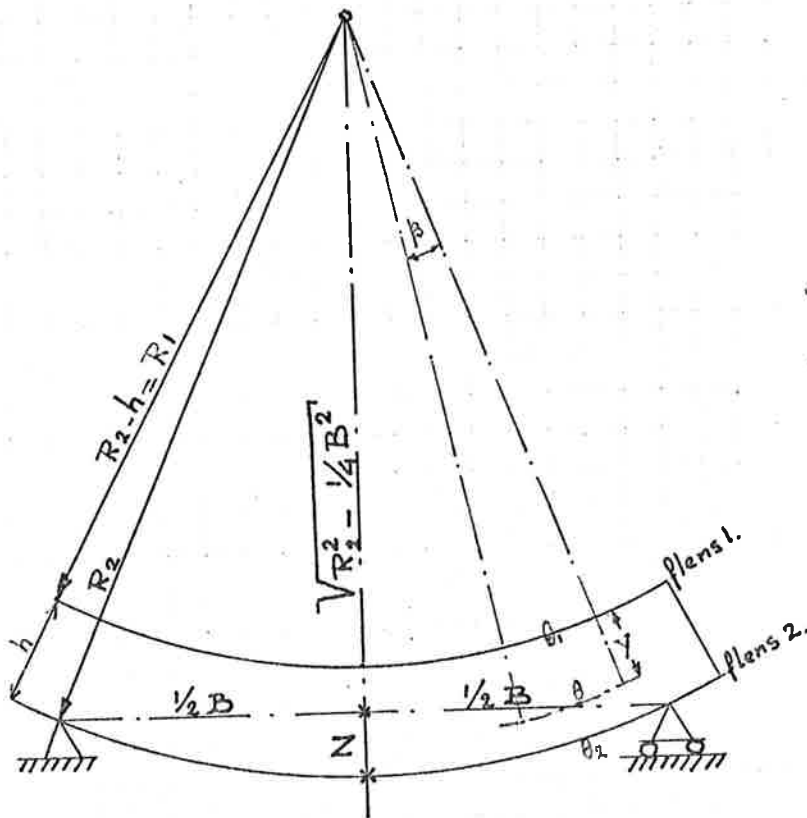
Afdeling Warmte- en Koudetechniek

BIJLAGE 01

BEREKENING VAN LIGGERS BIJ AANWEZIGHEID VAN EEN TEMPERATUURVERSCHIL OVER DE HOOGTE VAN DE LIGGER

GEGEVEN

Een horizontale IPE-ligger met een hoogte h , rust op twee steunpunten op een afstand B . Bij een voor alle delen van de ligger geldende temperatuur θ_1 is de ligger volkomen recht. De doorbuiging van het profiel als gevolg van een mechanische belasting blijft buiten beschouwing. Verondersteld wordt, dat in de hoogterichting van het profiel en geldend voor de volle lengte een rechtlijnig temperatuurverloop ontstaat, waarbij de temperatuur van flens 1: θ_1 blijft, maar de temperatuur van flens 2 oploopt tot θ_2 .



GEVRAAGD

De doorzakking z van de ligger ten opzichte van de koorde tussen de steunpunten, als gevolg van de verschillen in lineaire uitzetting van vezels van de ligger op afstanden y van flens 1.

OPLOSSING (Zie figuur)

Een willekeurig gekozen lengte-element van een vezel ter hoogte van flens 1, zal als gevolg van de uitzetting van de andere vezels kromtrekken en over een

sectorhoek β een kromtestraal R_1 vertonen. De lengte van de bedoelde vezel zal daarbij niet veranderen; Zij is gelijk aan $\frac{\pi \cdot \beta}{180} \cdot R_1$. Een vezel op een afstand y van flens 1 met een temperatuur θ en een kromtestraal R zal dan een lengte bezitten van $\frac{\pi \cdot \beta}{180} \cdot R$. De verlenging Δl bedraagt:

$$\Delta l = \frac{\pi \cdot \beta}{180} (R - R_1) = \frac{\pi \cdot \beta}{180} \cdot y \quad (1)$$

De verlenging van de betreffende vezel als gevolg van de thermische uitzetting is:

$$\Delta l = \frac{\pi \cdot \beta}{180} \cdot R_1 \cdot a \cdot (\theta - \theta_1) \quad (2)$$

Hierin is a de lineaire uitzettingscoëfficiënt van het staal = $12 \cdot 10^{-6} \cdot (^\circ\text{C}^{-1})$. Bij het veronderstelde lineaire verloop van de temperatuur over de hoogte van de ligger geldt:

$$(\theta - \theta_1) = G \cdot y \quad (3)$$

Substitutie van formule 3 in formule 2 levert op:

$$\Delta l = \frac{\pi \cdot \beta}{180} \cdot R_1 \cdot a \cdot G \cdot y \quad (4)$$

Voor een spanningsvrije kromtrekking van de ligger moet de verlenging Δl bedoeld in formule 1 voor iedere waarde van y gelijk zijn aan de verlenging Δl uit formule 4. Hieraan wordt voldaan bij:

$$R_1 = \frac{1}{a \cdot G} \quad (5)$$

De doorzakking z is volgens Pythagoras:

$$z = R_2 - \sqrt{R_2^2 - \frac{1}{4} B^2} \quad \text{of,}$$
$$z = R_2 - R_2 \sqrt{1 - \frac{B^2}{4R_2^2}}$$

Hiervoor mag als benadering geschreven worden:

$$z = R_2 - R_2 \cdot \left(1 - \frac{B^2}{8R_2^2}\right) \quad \text{of}$$
$$z = \frac{B^2}{8R_2} \quad (6)$$

Voor R_2 geldt:

$$R_2 = R_1 + h = \frac{1 + a \cdot G \cdot h}{a \cdot G} \quad (7)$$

Substitutie van formule 7 in formule 6 geeft:

$$z = \frac{B^2 \cdot a \cdot G}{8(1 + a \cdot G \cdot h)} \quad (8)$$

Bij een liggerhoogte h en een temperatuurverschil $(\theta_2 - \theta_1)$ tussen de flenzen 2 en 1 geldt op grond van formule 3:

$$G = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{h} \quad (9)$$

Substitutie van formule 9 in formule 8 geeft:

$$z = \frac{B^2 \cdot a \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{8 h \{1 + a(\theta_2 - \theta_1)\}}$$

De term $a \cdot (\theta_2 - \theta_1)$ is verwaarloosbaar klein ten opzichte van 1. Derhalve geldt met voldoende nauwkeurigheid voor de doorzakking z :

$$z = \frac{B^2 \cdot a \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{8 \cdot h} \quad (10)$$