

# CHALMERS



## Konstruktion av askficka för sodapanna

Design of ash hopper for recovery boiler

### **Examensarbete, maskiningenjör**

Magnus Ericsson

Albin Hedman

Johan Norberg

Avdelningen för oförstörande provning

Institutionen för material- och tillverkningsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2011

Rapport nr. 61-2011

# Förord

Denna rapport redovisar ett examensarbete utfört på METSO POWER under våren 2011. Arbetet är gjort i slutet av årskurs 3 på maskiningenjörsprogrammet vid Chalmers tekniska högskola.

Arbetet omfattar dimensionering och konstruktion av askfickor, en del på sodapannor där aska insamlas. Arbetet innefattar också framtagning av ett verktyg (exceldokument) som vid konstruktion av dessa automatiskt beräknar och dimensionerar, efter givna indata.

Vi vill tacka Håkan Wirdelius som varit vår handledare från Chalmers sida. Ingenjörerna Peder Elden och Ronnie Riedel som gett oss hjälp på Metso, samt alla där som varit inkluderade i vårt projekt. Peter Bövik som hjälpt oss med diverse beräkning och Christer Hedman för support i excel-programmering.

# Sammanfattning

Metso Power vill sänka ingenjörstimmar vid konstruktion av askfickor till pannor. Detta genom ett standardiseringsverktyg för konstruktion av dessa. Då varje uppsamlingsficka för aska görs individuellt resulterar detta i långa konstruktionstider samt många konstruktionslösningar.

Arbetet är främst inriktat på askfickor för sodapannor vid massabruk, där askan är av värde för bruket.

Verktyget utformades som ett Excel-program, med tillhörande manual som underlättar konstruktörens arbete vid konstruktion och dimensionering. Krav och önskemål har undersökts och viktats. Utifrån detta har en konstruktionsmodell för olika storlekar och temperaturer tagits fram. Konstruktionsmodellen utgörs av större delen vertikala IPE-balkar, horisontella HEA balkar samt både vertikala och horisontella plattjärn.

Då lastfall och konstruktioner varit relativt komplexa, har approximationer varit nödvändiga för att möjliggöra beräkningar för hand. Resultaten från dessa har sedan jämförts med resultat från SolidWorks, där beräkningar gjorts utan förenklingar och med verklighetsenliga randvillkor.

Ett viktigt delresultat var att en stor del av dimensioneringen sker med avseende på spänning, vilket reviderade kraven som ställs på en askficka.

Då samspel mellan balkar spelar stor roll, går inte dimensionerade värden att se som definitiva utan bör verifieras. Svårigheter att tolka resultat från FEM-modeller har också bidragit till att vissa eventuella korrektionsfaktorer har utelämnats.

# Summary

Metso Power wishes to decrease the engineering work hours when constructing ash pockets for recovery boilers. Each and every ash pocket is constructed individually. This results in long construction hours and many different construction models. Therefore, a standard tool for construction of these is desired.

This project will foremost point at ash pockets for recovery boilers used for paper milling, where the ash itself has a value for the process.

The tool desired was created as an excel program, with attached manuals to help the engineer during the construction. Requirements and preferences has been studied and weighted. From this, a construction model for different sizes and temperatures has been created. The construction model is built up by vertical IPE-beams, two horizontal HEA-beams and a grid of flat bars.

Because the loads and constructions are quite complicated, approximations where required for the manual calculations. The results from those calculations were then compared to the results from SolidWorks, where no approximations are made.

An important side result was that the most of all design work should be done regarding to stress, rather than deflection, which changed the requirements for the ash pocket.

The interaction between different beams plays a huge role. Therefore the construction data cannot be taken as absolute fact and needs to be verified. Difficulties in reading the results from the FEM-models have resulted in omission of some correction factors.

# Innehåll

1. Inledning .....	1
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Syfte .....	3
1.3 Avgränsningar.....	4
1.4 Precisering av frågeställningen.....	4
2. Teoretisk referensram .....	5
2.1 Fast inspänd plåt - platteori .....	5
2.2 Balkutböjning.....	5
2.3 Spänning balkar .....	6
2.4 FEM.....	6
3. Metod .....	8
4. Dimensionering av askficka.....	9
4.1 Krav och önskemål.....	9
4.2 Randvillkor för askfickans infästningspunkter.....	10
4.3 Randvillkor balkar.....	11
4.4 Randvillkor fri plåtyta och plattjärn.....	12
4.5 Konstruktionsmodeller och laster .....	13
4.6 Konstruktionsmodeller .....	18
4.6.1 Modell 1 .....	18
4.6.2 Modell 2 .....	19
4.6.3 Modell 1 – största delen kraftiga balkar vertikalt.....	19
4.6.4 Modell 2 - största delen kraftiga balkar horisontellt.....	23
4.7 Val av konstruktionsmodell.....	24
4.8 Vidareutveckling av vald modell .....	25
4.8.1 Dimensionering plattjärn.....	25
4.8.2 Ökat avstånd mellan plattjärn.....	29

4.8.3 Dimensionering av tvärgående stag.....	30
4.9 FEM-modellering av tillämpad konstruktion .....	32
4.9.1 Uppbyggnad och villkor.....	33
4.9.2 Analys av utböjning .....	34
4.9.3 Analys av spänning.....	37
4.10 Kontroll av spänningar .....	38
4.10.1 Spänning plattjärn.....	38
4.10.2 Beräkning av yttroghets och böjmoment för IPE och HEA-balk.....	39
4.10.3 Spänning vertikal balk .....	40
4.10.4 Spänning i horisontell balk.....	41
4.10.5 Analys av spänningsresultat .....	42
4.10.6 Kontroll av spänning i askfickans infästningspunkter. ....	44
5. Slutsats .....	47
6. Ekvationer .....	49
Referenser .....	52
Appendix.....	53
Appendix I .....	i
Appendix 2.....	iii
Appendix 3.....	vi
Appendix 4.....	viii
Appendix 5.....	ix
Appendix 6.....	x
Appendix 7.....	xi
Appendix 8.....	xii
Appendix 9.....	xiv
Appendix 10.....	xv

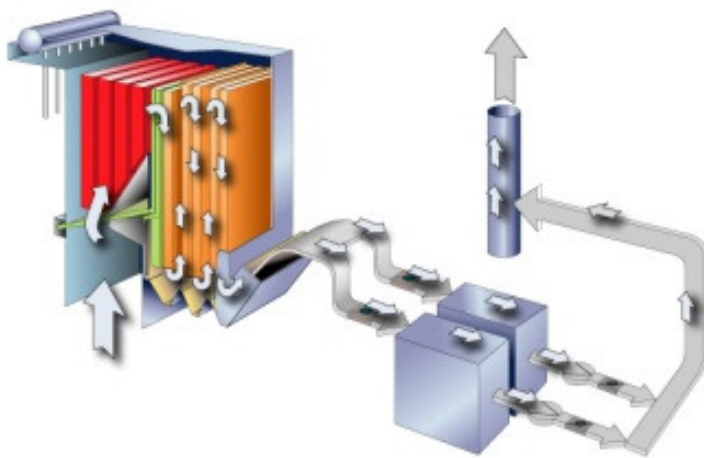
# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund

Metso Power bygger och konstruerar pannor både för användning inom kraftindustrin och inom massaindustrin. Andra centrala affärsområden utgörs av service och underhåll, både av egna, men också konkurrenters produkter. De två panntypernas konstruktion varierar och bränsletypen spelar då en avgörande roll.

Då temperaturutvidgningen är stor i pannor tillämpas i huvudsak två konstruktioner. En stående panna som kan utvidgas uppåt, samt en hängande konstruktion där utvidgning sker nedåt. Kapacitetskraven är ofta stora vilket resulterar i stora pannor upp till 60 meter höga och 20 meter breda, där den hängande konstruktionen är att föredra för större pannor då de annars kan kollapsa under sin egen vikt.

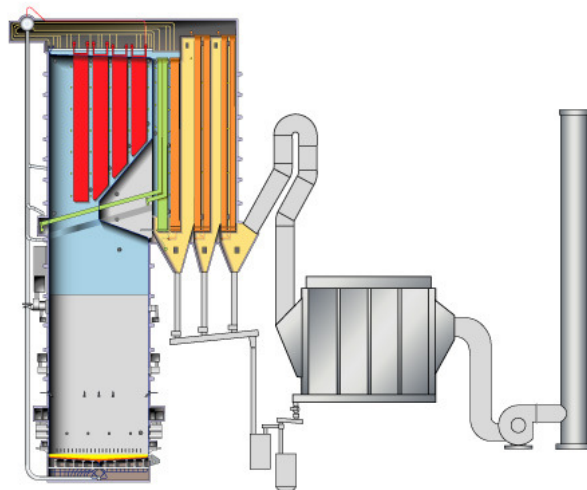
Förbränningen sker med hjälp av värme, bränsle och syre i form av luft som trycksätts med hjälp av fläktar. Värme utvinns med hjälp konventionell ångprocess från den rökgas som bildas vid förbränningen. Rökgasens temperatur avtar sedan kontinuerligt för att slutligen passera genom elektrofilter där de sista partiklarna fångas upp (Se fig. 1.1).



*Fig. 1.1, Rökgasens väg genom pannan[7]*

För kraftindustri tillverkas tre olika pannor, mottryckspanna (el och fjärrvärme), ångpanna (enbart elproduktion) och hetvattenpanna (enbart fjärrvärme). I dessa pannor förbränns gas, olja och i allt större utsträckning sopor. Den del av utloppet från en panna som samlar upp delar av den aska som bildas, kallas för askficka. Utformningen av pannans värmeupptagande del (den del av pannan som askfickan är fäst under) är ofta kvadratiska vilket leder till pyramidformade askfickor.

Inom massaindustrin används sodapannor vid förbränning av lut och kemikalier utvinns. Lutten kommer från en process där träfibrer kokas. Då beläggningen som blir kvar efter lutförbränningen fortfarande är rik på kemikalier konstrueras pannorna i syfte att tillvarata densamma. Detta sker genom att askan fångas upp i uppsamlingsfickor och transporteras sedan bort med hjälp av kedjetransportör till en mixertank (se fig. 1.2). Där tillsätts askan till svartluten som återigen förbränns.

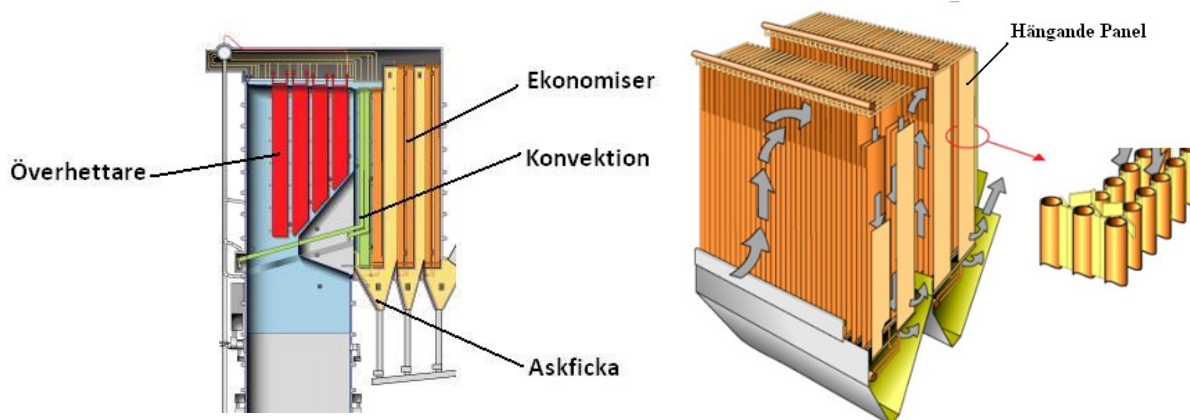


*Fig. 1.2, Aska skiljs från rökgas innan filter och transporteras till Mixertank [7]*

Dagens konkurrens inom massindustri är hög, bland annat från Sydamerika, varför man vill effektivisera processen. Detta möjliggörs genom att man tillvaratar den energi som finns i ångan genom exempelvis elproduktion. För att ta till vara den värme som bildas vid lutförbränningen, kyls rökgaserna genom konvektion och till viss del strålning. Vatten/vattenånga cirkulerar i något som kallas panel som hänger i pannans värmeupptagande del. Vattnet förvärms i *Ekonomiser* och *Konvektor* för att sedan värmas ovanför eldstaden i en



så kallad *Överhettare*. Då pannans värmeupptagande del är rektangulära i dessa pannor, resulterar detta i avlånga askfickor (se figur 1.3).



*Fig. 1.3, Visar konvektor, överhettare, ekonomiser och askficka [7]*

Metso vill ha en kortare konstruktionstid och har därför tagit fram standardiseringsverktyg för vissa konstruktioner som återkommer i varje panna. Då en eller flera askfickor tillverkas till varje panna, vore det önskvärt med ett verktyg för konstruktion av dessa. Varje uppsamlingsficka för aska som konstrueras görs individuellt, vilket resulterar i långa konstruktionstider samt många olika konstruktionslösningar.

## 1.2 Syfte

Metso har sedan tidigare tagit fram ett Excel-program som hjälper konstruktören att dimensionera balkar och plåtklädsel för pannans paneler. Syftet med detta arbete är att ta fram ett motsvarande verktyg (i form av datorprogram) för konstruktören, med tillhörande manual, som underlättar konstruktionsarbetet av askfickor. Programmet skall vara utformat i Excel enligt Metsos önskemål och ska vara baserat på en eller flera konstruktioner. Metso har också uttryckt önskemål om att programvaran skall innefatta alla befintliga konstruktioner för samtliga askfickor.

## 1.3 Avgränsningar

Arbetet kommer i mån av tid även omfatta askfickor för pannor avsedda för kraft och för sopförbränning. Konstruktion och dimensionering kommer att göras för det material som Metso idag använder sig av vid konstruktion av askfickor. Konstruktionen ska vara en grundkonstruktion och inte innefatta detaljerade konstruktionsbeskrivningar (t.ex. placering av manluckor och liknande). Vi försummar utvidgningen på grund av temperatur. Konstruktion och dimensionering kommer inte heller ta hänsyn till laster som uppstår på grund av hastiga temperaturväxlingar då detta inte anses vara ett specifikt problem för själva askfickan.

## 1.4 Precisering av frågeställningen

Med denna bakgrund fanns det en rad viktiga frågor och som behövde besvaras:

- Vilka krav och önskemål ställs det för askfickor?
- Vilka lastfall och temperaturer utsätts askfickorna för?
- Vilka randvillkor gäller för askfickorna?
- Vilken konstruktionsmodell är lämplig ur material och tillverkningsperspektiv?
- Behövs det en typ av konstruktion eller flera då storleken på pannan varierar?
- Vad ska programmet bygga på för något underlag, hur tillförlitligt är detta/dessa underlag?
- Hur ska gränssnittet se ut för programmet och hur ska manualen vara utformad?

## 2. Teoretisk referensram

Konstruktioner där tunnare material stagas för högre hållfasthet är vanligt och används idag överallt. Vi har i vårt arbete använt oss av en rad teoretiska referenser inom hållfasthetsläran med avseende på balkutböjning, fast inspänd plåt och FEM-modellering. Många beräkningar avser yttröghet och uppkommen spänningskoncentration på balkar och plåt, eftersom dessa ofta är sökta storheter vid dimensioneringen. I de flesta uträkningar har elementarfall använts, där förenklingar varit nödvändiga. T.ex. egenvikten har i flertalet fall försumrats. Dessa förenklingar avspeglas dock i framtagna korrektionsfaktorer, då fem-beräkningarna inte berörs av detta.

### 2.1 Fast inspänd plåt - platteori

Vi har valt att använda oss av elementarfall för fast inspänd plåt [1]. Elementarfallet bygger på beräkningar med finita differensapproximationer och numeriska lösningar. Dessa lösningar är beroende av materialkonstanter, där den mest betydande är Poissons konstant (tvärkontraktionstalet). Denna konstant beskriver hur ett material reagerar på tryck och dragspänningar och ger tabellvärden som används i elementarfallet. Eftersom detta tal varierar beroende på material kan felmarginaler uppstå men bör inte överskrida sju till åtta procent, i extremfall uppemot 15 procent.

### 2.2 Balkutböjning

Vi har i våra beräkningar för balkutböjning använt oss av elementarfall enligt [2]. Detta är rimligt eftersom vi vid dimensioneringen av balkar befinner oss inom det elastiska området. Elementarfallen bygger på den så kallade elastiska linjens differentialekvation. Denna ekvation integreras fyra gånger stegvis, varvid randvillkor i form av ”fritt upplagd” eller ”fast inspänd” specificeras, varvid våra erhållna elementarfall fås. I övriga hållfasthetsberäkningar har vi använt oss av tillgänglig kurslitteratur i ämnet.

De randvillkor som använts i handberäkningarna har varit ”fritt upplagd” och ”fast inspänd”. Skillnaden på dessa är att när infästningspunkten är helt stum (fast inspänd) kan också moment upptas. Vi har med andra ord inte beräknat hur stort vridmotståndet varit i varje infästningspunkt, utan enbart när vi varit tveksamma gällande val av randvillkor. Vi har också

förenklat våra beräkningar genom att exkludera knäckning som ett möjligt fall. All dimensionering efter utböjning görs med avseende på yttröghet.

## 2.3 Spänning balkar

Beräkningar av spänningar har utförts [2] med avseende på normalspänning. I de fall där böjande moment varit stor har detta tagits med. Beräkningar har sedan jämförts med framtagen von Mises-spänning i SolidWorks.

## 2.4 FEM

Finita elementmetoden är idag en väletablerad numerisk metod för att hitta approximativa lösningar till partiella differentialekvationer. Dessa ekvationer kan sällan ges en analytisk lösning och då oftast i mycket förenklade fall och geometrier.

Metoden går till så att den verkliga geometrin delas upp i flera mindre element (finita element), som sitter ihop med varandra i s.k. noder. Elementen kan beroende på lösningsmetodik utgöras av geometrier som trianglar, fyrhörningar eller prismor [4]. SolidWorks fem-modul använder sig av tetraeder för solider (3d), trianglar (2d) för skalparter och något de benämner ”balkelement” för balkar (1d). Element och noder tillsammans kallas mesh (nät) [5]. Eftersom antalet obekanta variabler tenderar att bli väldigt högt, talar utvecklingen vad avser datorkapaciteten för metodens framväxt. Alltmer avancerade problem går numer att lösa med FEM.

En lokal interpolation sker i varje element. För detta krävs, beroende på problem, ett antal frihetsgrader i noderna, som alltså är de storheter som krävs för att beskriva ett systems tillstånd i en viss situation. Alla elementen är sammankopplade med noder, och bildar på så vis hela strukturen. Med inspänningar, laster och randvillkor bildar detta ett enda stort ekvationssystem där de obekanta storheterna som efterfrågas kan lösas ut.

Det finns variationer av denna numeriska metod som kan ge bättre noggrannhet genom att t.ex. minska elementens storlek (d.v.s. öka antalet element) i områden där detta är relevant. Denna metod kallas också h-metoden, medans P-metoden behåller samma elementstorlek (och antal) men istället ökar gradtalet för ekvationerna som beskriver varje element, vilket också ger ökad noggrannhet. SolidWorks tillämpar bägge metoderna.

Vid numerisk lösning av partiella differentialekvationer är det mest väsentliga att finna stabila och tillräckligt bra approximativa lösningar. Om dessa inte är stabila kan fel från indata förstöras vilket leder till felaktiga svar [4].

### 3. Metod

Genom att undersöka vilka krav och önskemål som ställs, kan man bestämma sig för vilken konstruktion som är lämplig för askfickor. När konstruktionsmodeller är bestämda så sällas dessa mot krav och önskemål där de önskemål som väger högt är tillverkningsfördelar samt ekonomiska aspekter. Valet görs också med hjälp av handberäkningar av balkvikt. En viss ledning av konstruktionsmodeller finns i Metsos befintliga ritningsunderlag. Dimensionering sker med hjälp av hållfasthetsberäkningar för hand. Ofta blir förenkling av lastfall nödvändig för att kunna lösas med handberäkningar.

De dimensioneringar som har beräknats med förenklingar jämförs sedan utan förenklingar med SolidWorks, som utför modellering med hjälp av Finita elementmetoden. Då många konstruktionsmodeller varit komplexa har ett begränsat antal askfickor skapats i CAD. Men även delmoment (t.ex. elementarfall för balkutböjning) har verifierats med fem-modeller. Utifrån dessa har sedan ett samband mellan resultaten tagits fram. De olika resultaten jämförs därefter och korrektionsfaktorer tas fram för de förenklade handberäkningarna. Verktøget utgörs således av ett program som bygger på de förenklade handberäkningarna (baserade på idealiserade fall) med korrektionsfaktorer som tagits fram med hjälp av FEM-modelleringen.

## 4. Dimensionering av askficka

### 4.1 Krav och önskemål

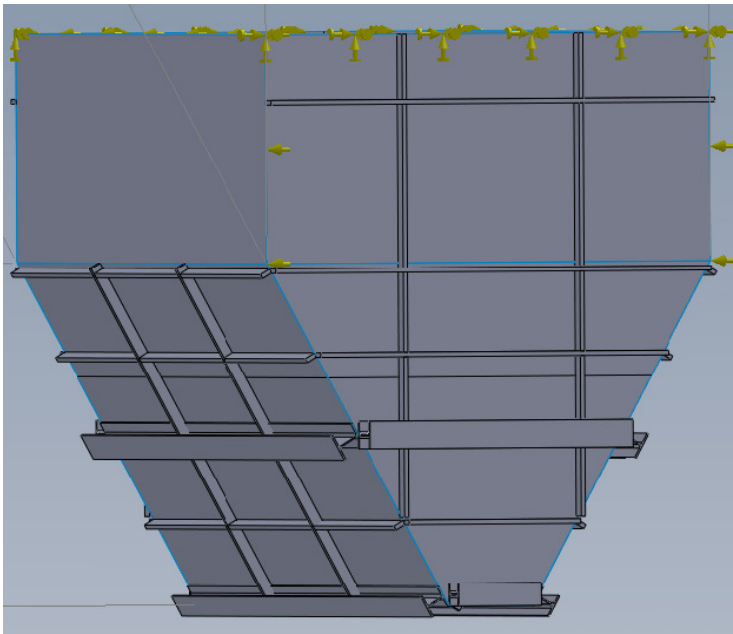
Metso ställer följande krav vid konstruktion av askfickor:

- Minsta accepterade fallvinkeln i askfickan är  $60^\circ$ .
- I mindre ytor, det vill säga lokalt, accepterar man större utbuktningar och man vill här enbart dimensionera efter tillåten spänning i materialet. Större ytor eller balkar, det vill säga globalt, dimensioneras efter utböjning.
- Minsta accepterade plåttjocklek är fem millimeter.
- Minsta tillåtna globala utböjning är  $L/500=0,2\%$
- Den dimensionering som sker med avseende på spänningskoncentrationer sker med en säkerhetsfaktor 1,5.
- Balkar som används ska finnas i underleverantören Tibnors sortiment och plåten ska vara tryckkärlsstål P235GH.
- Vid de temperaturer där krypning uppkommer i materialet ska dimensionering ske med avseende på 100 000 h livslängd.
- Balkarna måste vara mindre eller lika med balktypen HEA 450
- Val av konstruktion skall vara av en sådan karaktär att ekonomiska aspekter tagits i beaktande.

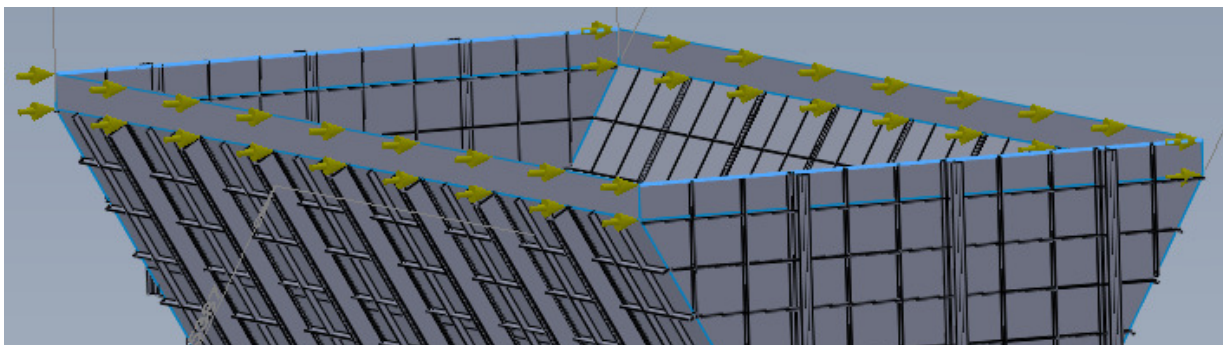
Metso önskar också att antal invändiga stag begränsas. Den slutliga lösningen på konstruktion skall kunna tillämpas på alla befintliga storlekar av askfickor. Då temperaturen av rökgaserna avtar under sin väg genom pannan, vill man dessutom ha askfickorna dimensionerade efter två olika temperaturer,  $300^\circ\text{C}$  och  $450^\circ\text{C}$ .

## 4.2 Randvillkor för askfickans infästningspunkter

Ovandelen av askfickans gavlar svetsas fast i pannans rökgaskanaler (se fig. 4.1) och dessa betraktas därför som fast inspända. Ovan delen av askfickans långsida kan vid enskilda fall vara svetsad på samma sätt som gavlarna och skulle då kunna betraktas som fast inspänd. Men eftersom långsidan oftast enbart får stöd av en intilliggande askficka har vi valt att betrakta dessa som endast låsta i normalriktningen (se fig. 4.2).



*Fig. 4.1, De lodräta väggarna ovan askfickan simulerar rökgaskanalen där askfickan är fäst*

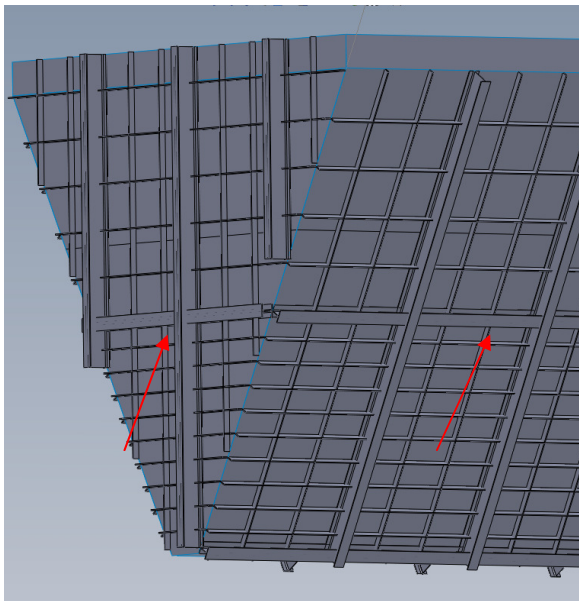


*Fig. 4.2, Askfickans övre långsidor är låsta i normalriktningen, se pilar*

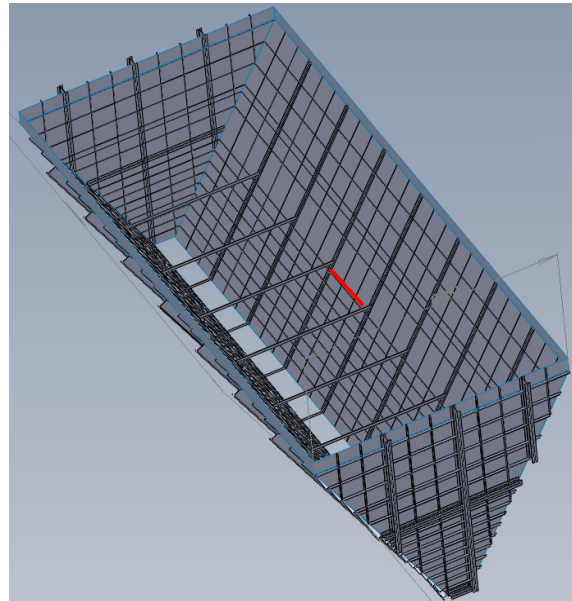


### 4.3 Randvillkor balkar

Balkar som horisontellt stagar mot global utböjning betraktas som fritt upplagda eller fast inspända beroende på om de är tvärstagade eller inte. Detta eftersom de enbart kan betraktas som fast inspända om motsvarande HEA-balk på gaveln är lika lång (vilket inte är fallet, se fig. 4.3). Emellertid finns här ofta ett betydande moment som måste adresseras av modellen då dess inverkan kan antas vara betydande. Den del av balken som är placerad mellan innerstagen utgör längden för dimensionering (fig. 4.4) Dessa betraktas som fast inspända då detta uppskattas vara det mest realistiska.



*Fig. 4.3, Horisontella HEA-balkar på lång, och kortsida*



*Fig. 4.4, Visar horisontell stagad balk.*

Vertikala balkar som stagar mot global utböjning betraktas som fritt upplagda. Då dessa ofta fästs i kraftiga horisontella balkar undersöktes hur stort vridmotståndet är i den största HEA-balken vid 300°C och 450°C. Skjuvspänningen fås som [2]:

$$\tau = \frac{M_v}{W_v} \quad (4.1)$$

$M_v$  löses ut enligt

$$M_v = \tau * W_v$$

Där skjivspänningen fås som [8]  $0,6 * \sigma_{ma,300^{\circ}C}$

$M_v$  är det vridande moment som lasten, i form av den vertikala balken, ger upphov till.

$W_V$  är vridmotståndet i infästningsbalken och fås given ur balkleverantörens katalog.

Med insatta värden  $\sigma_{ma,300^{\circ}C} = 153 \text{ MPa}$ ,  $W_V = 117 * 10^{-6} \text{ m}^3$

$$M_{v,max} = 0,6 * 153 * 117 = 10740,6 \text{ [Nm]}$$

Som jämförelse beräknades hur stort moment detta motsvarar i en konstruktion. Enligt Metso tillverkas askfickor med en höjd upp till 7m. Momentet i en sådan askficka med enbart lufttryck skulle bli [2]:

$$M = \frac{Q_i L}{12} \tag{4.2}$$

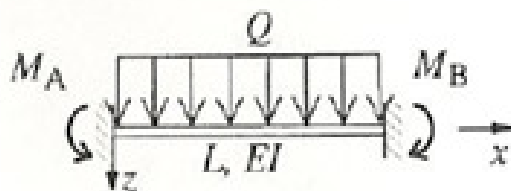


Fig. 4.5, Elementarfall fast inspänd balk [2]

$$M = \frac{8700 * 2,4 * 7}{12} = 12180 \text{ Nm}$$

Då lufttrycket inte utgör en stor last i förhållande till laster från aska får vertikala kraftiga balkar ses som fritt upplagda.

## 4.4 Randvillkor fri plåtyta och plattjärn

All plåtyta som är inramad med balk eller plattjärn och som håller sig inom kravet för utböjning betraktar vi som fast inspänd. Plattjärnen som ”ramar in” den inspända plåtrutan mellan de kraftigare balkarna betraktas också som fast inspända. Detta då de utgör ett litet vridande moment på de kraftigare balkarna samt att de är jämt utspridda i horisontalled. Detta innebär att den större balken inte vrider sig då den utsätts för lika stor kraft på bägge sidor.

## 4.5 Konstruktionsmodeller och laster

Enligt Metso ska en askficka dimensioneras så att denna klarar följande två extrema lastfall.

1/ Asktransportör har havererat under drift och askfickan fylls till två tredjedelar innan rökgaserna drar med sig askan vidare (detta är ett fenomen som uppstår när askfickan fyllts till just ungefär två tredjedelar). I detta läge utsätts askfickan för lasten från askan, samt ett växlande luftryck från rökgasfläktarna. Då pannan är i drift råder en driftstemperatur uppemot 450°C.

2/ Pannan inte i drift, dvs. driftstopp pågår. Asktransportör stoppas samtidigt som förbränningsprocessen varvid askfickan fylls till hälften av aska från tillhörande rökgaskanaler. Under driftstoppet är det vanligt att man spolrar pannan med vatten och askan blötläggs. Askfickan utsätts då för en förhöjd konstant last (högre densitet på askan) än vid drift, men med den lägre temperaturen 20° C och utan övertryck från rökgasfläktarna.

Då askfickan ska hålla för bägge lastfallen måste den dimensioneras för det största lastfallet. Det som skiljer sig åt från de båda fallen är mängden aska, askans densitet, last från rökgasfläktar samt E-modulen som är temperaturberoende. E-modulen påverkar utböjningen och den tillåtna spänningskoncentrationen.

För att bestämma nödvändigt avstånd mellan balkar används som tidigare nämnts, elementarfall för fast inspänd plåt. Tillåten spänning för det valda materialet erhålls från dokument på Metso [7].

Då temperaturen ändras från 20°C till 300°C ändras tillåtna spänningen  $\sigma_{max}$  från 235 MPa till 153 MPa [6]. Om askan betraktas som en fluid, är den utbredda kraft som verkar på plåtytan alltid direkt proportionell mot höjden [3]

$$Q_{aska} = \rho * g * h \quad (4.3)$$

Den nivå som askan har, mäts alltid mot nedhängande panel (bild 1.3 illustrerar nedhängande panel). Då den utbredda last som verkar på plåtytan inte blir konstant ändras den inspända plåtytan beroende på konstruktionsmodell.

Lastfallen för minsta inspända plåtytan blir enligt följande:

## Lastfall stopp

Kall aska 20°C,  $\sigma_{\max}=235$  Mpa,  $\rho=1400$  kg/m<sup>3</sup>, fylld till halva höjden till panel.

## Lastfall drift

Varm aska 300°C,  $\sigma_{\max}=153$  Mpa,  $\rho=600$  kg/m<sup>3</sup>, fylld till  $\frac{2}{3}$  av höjden till panel, samt en utbredd last från det maximala lufttrycket från rökgasfläktarna 8700 Pa som verkar vid drift.

Ur [1] fås följande elementarfall (se fig. 4.6) för en fast inspänd plåtyta.

$$\sigma_{\max} = \frac{\beta_1 * q * b^2}{t^2} \quad (4.4)$$

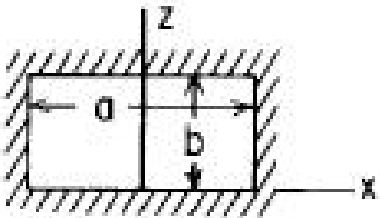


Fig. 4.6, illustrerar minsta inspända plåtyta [1]

Där  $q$  är trycket från den utbredda lasten,  $t$  är plåttjockleken,  $b$  är höjden på den inspända plåtrutan och  $\beta$  är en materialkonstant (tabell 4.1) som är beroende av förhållandet mellan bredden ( $a$ ) och höjden på den fast inspända plåten.

$a/b$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	$\infty$
$\beta_1$	0.3078	0.3834	0.4356	0.4680	0.4872	0.4974	0.5000
$\beta_2$	0.1386	0.1794	0.2094	0.2286	0.2406	0.2472	0.2500
$\alpha$	0.0138	0.0188	0.0226	0.0251	0.0267	0.0277	0.0284

Tabell 4.1 [1]

Detta elementarfall behandlar enbart bredd–höjd förhållanden mellan 1,0 och 2,0 med god tillförlitlighet.

Den största spänningen uppkommer på långsidan av en fast inspända plåtyta [1]. Eftersom vi avser att staga vår plåt med balkar där vi vill ha så stort avstånd mellan dessa som möjligt, löser vi ut längden på långsidan ( $a=2b$ ). Då den inspända plåtytan måste hålla för våra krav,

medför detta att vi dimensionerar efter det lastfall som ger oss den minsta långsidan i en fast inspänd plåtruta.

Plåthöjden  $b$  löses ur ekvation (4.4) enligt

$$b = \left( \frac{\sigma_{max} * t^2}{\beta_1 * q} \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

Enligt tidigare mäts askans höjd mot den nedhängande panelen, denna höjd kallas i fortsättning för  $h_{panel}$ .

De båda lasterna skiljer sig enligt ekvation (4.3) som

$$q_{aska, varm} = 600 * 9,81 * \frac{2}{3} * h_{panel} \text{ [Pa]} \text{ och}$$

$$q_{aska, kall} = 1400 * 9,81 * \frac{1}{2} * h_{panel} \text{ [Pa]}$$

Förhållandet mellan trycket från kall respektive varma aska fås som

$$q_{aska, varm} = \frac{4}{7} q_{aska, kall}$$

Vid jämförelse av hur temperaturen påverkar tillåtna spänningen får man förhållandet

$$\sigma_{max, kall} = 2,217 * \sigma_{max, varm}$$

Då plåttjocklek och materialkonstanter samt förhållandet  $\frac{a}{b} = 2$  är lika för bägge lastfallen, påverkar dessa inte vilket av fallen som skall dimensioneras efter.

Ekvation (4.4) efter att man strukit de faktorer som inte påverkas, ser ut enligt:

### **Lastfall drift**

$$b_{drift} = \frac{\sigma_{max, varm}}{q_{aska, varm} + q_{\overtryck}}$$

### **Lastfall stopp**

$$b_{stopp} = \frac{\sigma_{max, kall}}{q_{aska, kall}}$$

Då dimensionering sker efter den minsta accepterade längden jämförs  $b_{drift}$  och  $b_{stopp}$ . Ett antagande tas att vi dimensionerar efter  $b_{drift}$  vilket därpå kontrolleras och bekräftas korrekt [Appendix 1]

$b_{drift} < b_{kall} \rightarrow$  att vi dimensionerar efter  $b_{drift}$  då denna blir lägst vid 300°C och således även när temperaturen ökar till 450°C . I fortsättningen betecknas  $b_{drift}$  enbart som  $b$ .

Enligt tidigare ekvation (4.4) fås höjden ( $b$ ) av plåtrutan

Där

$\beta_1$  för förhållandet  $a/b = 2,0$  då detta största avstånd mellan grövre balkar fås ur tabell 4.1.

$$q = q_{aska} + q_{lufttryck} = \rho * g * h_{panel} + 8700 \quad (4.5)$$

$\sigma_{max}$  enl [7].

För att ta reda på hur väl den handberäknade plåtrutan överensstämde med FEM-analys, gjordes sex modeller av inspända ytor för tre storlekar och tryck, med två temperaturfall för varje storlek (se tabell 4.2). Dessa modellerades med randvillkoren fast inspända utan rotation och translation (se fig. 4.7).

Temperatur	Plåtyta	$\sigma$ handberäkning	$\sigma$ FEM	Faktor
300°C	462 * 924 mm <sup>2</sup>	153 MPa	130 MPa	1,177
	550 * 1100 mm <sup>2</sup>	153 MPa	133 MPa	1,150
	726 * 1450 mm <sup>2</sup>	153 MPa	135 MPa	1,133
450°	309 * 619 mm <sup>2</sup>	69 MPa	61 MPa	1,131
	369 * 739 mm <sup>2</sup>	69 MPa	60 MPa	1,150
	487 * 975 mm <sup>2</sup>	69 MPa	60 MPa	1,150

Tabell 4.2

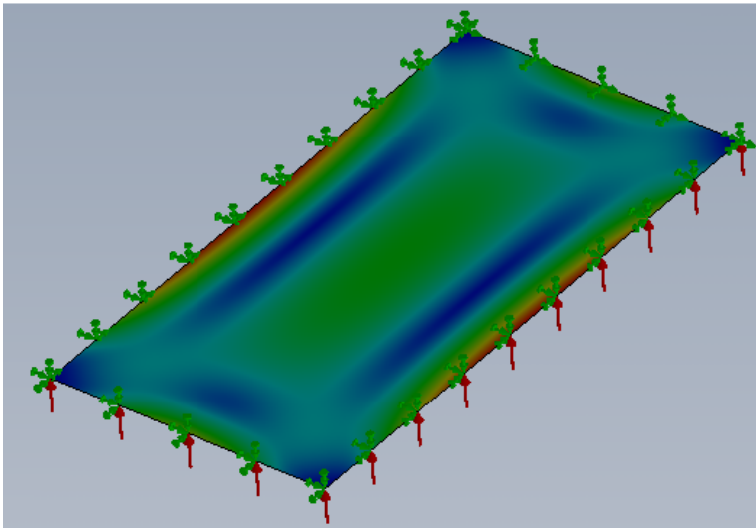


Fig. 4.7, minsta inspända plåtyta

FEM-resultatet skilde sig mellan 13 och 17,7 procent vilket kan tyckas märkligt då förenklingar i handberäkningarna inte tillämpats här. Som nämns i kapitlet teoretisk referensram så baseras elementarfallet delvis på materialkonstanten  $\beta_1$  och har en sällsynt felmarginal på 15 procent vid höga tryck. Då extrema temperaturer råder, tolkas detta som att vi får en felberäkning i våra handberäkningar och väljer i fortsättningen att ta med en korrektionsfaktor 1,13 när plåtytan dimensioneras i ekvation (4.4) enligt:

$$b = \left( \frac{1,13 * \sigma_{max} * t^2}{\beta_1 * q} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

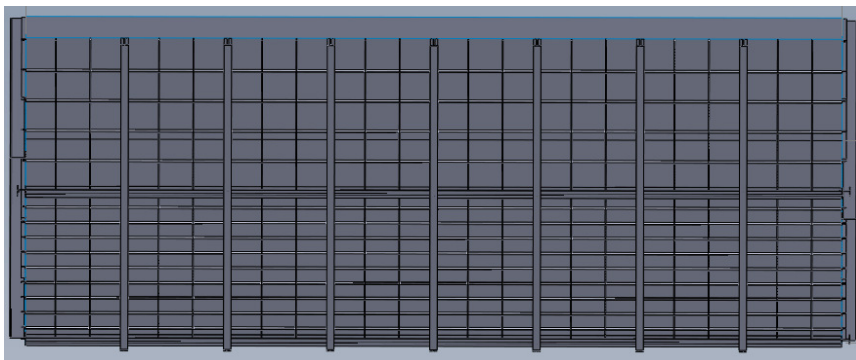
## 4.6 Konstruktionsmodeller

Då den fast inspända plåtrutan behöver vara inspänd mellan balkar (minst i form av plattjärn), samt att större askfickor med stor säkerhet behöver större balkar än plattjärn, valde vi mellan två konstruktioner; största delen kraftig balk horisontellt och största delen kraftig balk vertikalt. Beräkningar gjordes för bedömning av åtgång i antal kilo balk för de olika modellerna. Detta har endast beräknats för grövre balk och inte för plattjärn. Detta eftersom vi bedömt att de olika modellerna inte skiljer sig särskilt mycket åt med avseende på plattjärn. Vid beräkning av balkkilon för konstruktionsmodellerna, undersöktes två olika storlekar på askficka för respektive modell.

Då askfickan utsätts för hög last längst ner, har vi valt att konstruera med en grövre horisontell balk där. Allmänt gäller vid dimensionering efter max utböjning att denna ger en balk som av tillverkningsmässiga skäl styr efterföljande val av balkdimensioner på övriga sidor.

### 4.6.1 Modell 1

Vertikalt placerad kraftig balk, där den fast inspända plåtrutan placeras horisontellt i syfte att minimera antalet grövre balkar. Plåtrutan spänns sedan in med plattjärn. Nackdel med denna konstruktion är att enbart avståndet mellan plattjärnen kan ökas i höjdlid, då de kraftiga balkarna styrs av den nederst placerade plåtrutan (se fig. 4.8).



*Fig. 4.8, stående balkkonstruktion*



#### 4.6.2 Modell 2

Kraftig liggande balk, där den rektangulära fast inspända plåtrutan placeras i horisontellt läge i syfte att minimera antalet grövre balkar. Plåtrutan spänns sedan in med hjälp av plattjärn (se fig. 4.9). Fördelen med denna modell är att man kan låta plåtrutan öka med höjden och därigenom öka avståndet mellan de grövre balkarna.



*Fig. 4.9, liggande balk-konstruktion sett framifrån*

Vid jämförelse blev det uppenbart att större askfickor översteg den största önskade dimensionen på balk i modell 1. Vi har därför i vissa av våra konstruktionsmodeller valt att placera tvärstag mellan horisontella balkar i modellen med kraftigare vertikala balk för att komma ner i balkdimensioner. Som en arbetshypotes har vi valt att placera stående balkar med avståndet tre plåtrutor (se fig. 4.8), vilket innebär att de mindre askfickorna kan sakna kraftigare vertikala balkar. Efter diskussion med Metso framkom att detta kunde utgöra ett genomgående koncept.

#### 4.6.3 Modell 1 – största delen kraftiga balkar vertikalt

På grund av högt tryck nertill på askfickorna väljs att placera en tvärstagad HEA-balk här. Enligt våra randvillkor utgör intilliggande askfickor ett fritt upplagt stöd i askfickans ovkant. Detta randvillkor ser vi som något tveksamt och väljer därför att avlasta med ännu en horisontellt placerad HEA-balk, mitt emellan övre och nedre stödpunkter (dvs. på halva askfickans höjd). Denna balk benämns vidare som ”övre”. Denna är tvärstagad (med innerstag) på måttet tre plåtrutor. Denna placering av balken medför att de stående balkarna kan vara betydligt mindre. Placeringen är även fördelaktig ur beräkningssynpunkt.

Dimensioneringen sker efter balkarna (nedre och övre horisontell HEA-balk) på askfickans långsida då avståndet mellan infästningspunkterna här är längst på grund av fallvinkeln (se fig. 4.10), samt att trycket från askan är högst i nedre delen. Vi låter sedan gavlarna förstärkas på samma sätt och konstruktionen blir då något överdimensionerad. Då trycket från askan avtar med höjden kan avståndet mellan plattjärnen öka med höjden i denna modell.

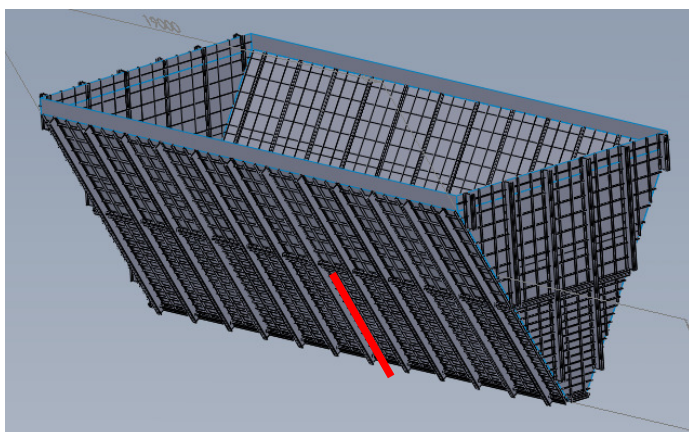


Fig. 4.10, längst avstånd mellan fästpunkter och högst tryck på HEA-balk uppstår på framsidans nedre del

Då vi relativt snart insåg att vikt och hållfasthet inte följde varandra valde vi att plocka bort 2/3 av de vertikala balkarna och i stället dimensionera upp kvarvarande stående balkar samt plattjärn (vilket gav den slutgiltiga konstruktionen som ses i fig. 4.8 och 4.10)

### Dimensionering vertikal balk

Vid dimensionering av stående balk används randvillkoret fritt upplagd. Då en konstant last samt en avtagande last påverkar balken (se fig. 4.11 & 4.12) måste två elementarfall superponeras.

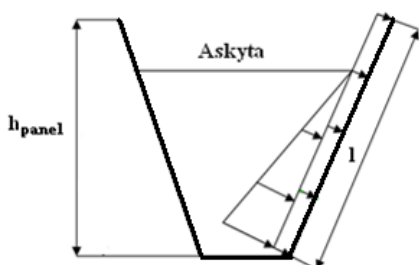


Fig. 4.11, visar asktryck och luftryck

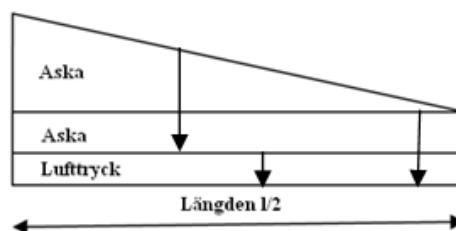


Fig. 4.12, visar uppdelning av avtagande och icke avtagande last, observera längden l/2

Ask och lufttrycket resulterar i rektangellasten Q och triangellasten P.

$$Q = \left( q_{luft} + \rho g \left( h_{aska} - \frac{h_{panel}}{2} \right) \right) A \quad (4.7)$$

$$P = \frac{\rho g h_{aska}}{4} A \quad (4.8)$$

Lasterna  $Q_i$  och  $P_i$  härleds i [Appendix 5]

Där  $h_{aska} = \frac{2}{3} h_{panel}$ ,  $A = 3a * l/2$

Elementarfall [2] superponeras (se fig. 4.13).

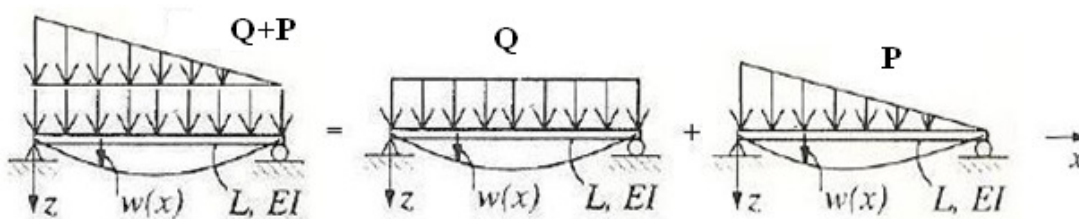


Fig. 4.13, superponering av elementarfall [2]

$$\begin{aligned} w(x) &= \frac{L^3}{EI} \left( \frac{Q}{24} \left( \frac{x^4}{L^4} - 2 \frac{x^3}{L^3} + \frac{x}{L} \right) + \frac{P}{180} \left( 3 \frac{x^5}{L^5} - 10 \frac{x^3}{L^3} + 7 \frac{x}{L} \right) \right) = \\ &= \frac{QL^3}{24EI} \left( \frac{x^4}{L^4} - 2 \frac{x^3}{L^3} + \frac{x}{L} \right) + \frac{PL^3}{180EI} \left( 3 \frac{x^5}{L^5} - 10 \frac{x^3}{L^3} + 7 \frac{x}{L} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Där  $L = l/2$  (se figur 4.11 och 4.12)

För att studera var max utböjning sker deriveras ekvationen med avseende på x

$$w'(x) = \frac{L^3}{EI} \left( \frac{Q}{24} \left( 4 \frac{x^3}{L^4} - 6 \frac{x^2}{L^3} + \frac{1}{L} \right) + \frac{P}{180} \left( 15 \frac{x^4}{L^5} - 30 \frac{x^2}{L^3} + \frac{7}{L} \right) \right) \quad (4.10)$$

Denna ekvation löses numeriskt i Excel inom vårt intervall L.

Villkoret för max utböjning ( $L/500$ ) sätts in och yttröghetsmomentet löses ut ur ekv. (4.9)

$$w(x) = \frac{L}{500} \rightarrow I = \frac{500L^2}{E} \left( \frac{Q}{24} \left( \frac{x^4}{L^4} - 2 \frac{x^3}{L^3} + \frac{x}{L} \right) + \frac{P}{180} \left( 3 \frac{x^5}{L^5} - 10 \frac{x^3}{L^3} + 7 \frac{x}{L} \right) \right) \quad (4.11)$$

När yttröghetsmomentet är känt kan balk väljas ur befintligt standardsortiment.

### Dimensionering horisontell HEA-balk

Balkarna tvärstagas c-c 3 liggande plåtrutor och betraktas som fast inspända, lasten fås som

Superponering av följande elementarfall [2] (se fig. 4.14):

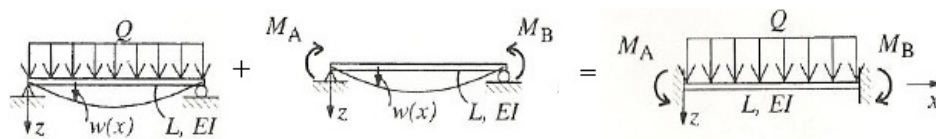


Fig. 4.14, superponering av elementarfall för fritt upplagd balk [2]

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5QL^3}{384EI} + \frac{L^2}{6EI} \left( M_A \left( 2 \frac{x}{L} - 3 \frac{x^2}{L^2} + \frac{x^3}{L^3} \right) + M_B \left( \frac{x}{L} - \frac{x^3}{L^3} \right) \right) = \frac{5QL^3}{384EI} - \frac{QL^3}{96EI} = \frac{QL^3}{384EI} \quad (4.12)$$

Där momentet fås enligt ekvation (4.2)

$$M_A = M_B = \frac{QL}{12} \text{ i detta fall } -\frac{QL}{12} \text{ då momenten är motriktade i elementarfallet}$$

Lasterna  $Q_i$  härleds i [Appendix 4] där  $A_{yta}$  är den yta som som balk ska ta upp last för.

$$A_{yta, nedre} = \frac{l}{2} * 3a$$

$$A_{yta, nedre} = \frac{l}{4} * 3a$$

Utböjningskravet  $L/500$  sätts in i ekvation (4.12) och yttröghetsmomentet löses ut.

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{L}{500} = \frac{QL^3}{384EI} \rightarrow I = \frac{125QL^2}{96E} \quad (4.13)$$

#### 4.6.4 Modell 2 - största delen kraftiga balkar horisontellt

Den här modellen har likt den vertikala modellen en balk längst ner som är tvärstaggad med avståndet c-c tre liggande plåtrutor (sex stående), detta är inte alltid nödvändigt men ger en rättvisare jämförelse modellerna emellan. Övriga horisontella balkar tvärstaggas inte, då de bär lasten för mindre ytor.

#### Dimensionering av horisontella HEA-balkar

Nedersta balken dimensioneras enligt ekvation (4.13) där  $L = 6b$

Där  $A_{yta}$  är den yta som varje balk ska ta upp last för.

$$A_{yta, nedre} = \frac{a}{2} * 6b$$

Lasten  $Q_i$  härleds i [Appendix 4]

Övriga balkar som inte staggas dimensioneras som fritt upplagda (se fig. 4.15) enligt [2]

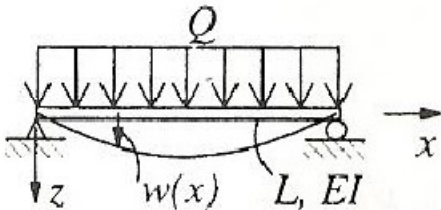


Fig. 4.15, elementarfall fritt upplagd balk [2]

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5Q_i L^2}{384EI} \quad (4.14)$$

Där  $L$  = hela askfickans längd

Då lasten avtar i höjddled fås  $Q$  som

$$Q = (q_{luft} + \rho g h_{aska}) A_{yta} \quad (4.15)$$

Där

$$A_{yta} = L * a_i$$

## 4.7 Val av konstruktionsmodell

När vi valt konstruktionsmodell har vi enbart tagit hänsyn till massan för grövre balk. Vi har räknat med våra uppskattade randvillkor och efter val av balk räknat ut antal meter på följande askfickas långsida. Då förhållandet mellan längden på balkar och lasten som dessa ska ta upp ändras med askfickans längd och höjd, gjordes förenklade beräkningar av balkmassan på två olika storlekar av askfickor (se tabell 4.3).

Typ av askficka $h * L$ [m]	Massa Modell 1[kg]	Massa modell 2 [kg]
4 * 4	730,4	711,1
4 * 8	2299,2	3 226,4

Tabell 4.3

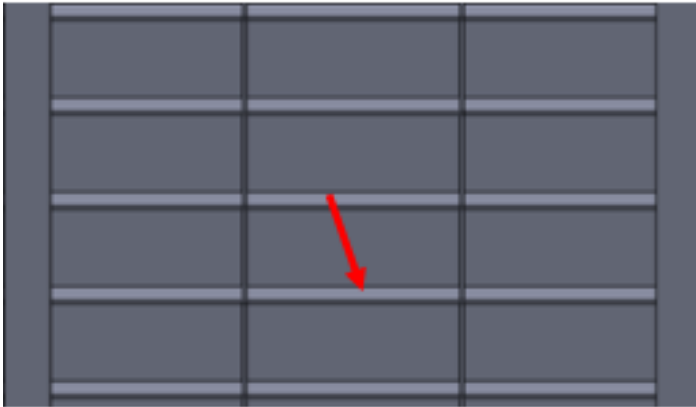
Som synes är modell 1 är 3% tyngre än modell 2 vid samma längd höjd förhållande och 29% lättare vid dubbel längd mot höjd. Av dessa approximationer är  $L/h=2$  förhållandet det som är mest likt sodapannans utformning på askficka och även det som skiljer sig mest i vikt. Vi väljer därför konstruktionen enligt modell 1, där största delen grövre balk är placerad vertikalt.

Då konstruktionen stagas och balktyperna är samma för alla storlekar, väljer vi att ha endast en konstruktionsmodell. Detta innebär att de minsta askfickorna ibland blir något överdimensionerade då de exempelvis blir konstruerade med horisontell balk av typen HEA. Då dessa askfickor inte är vanliga är fördelen med en konstruktionsmodell övervägande.

## 4.8 Vidareutveckling av vald modell

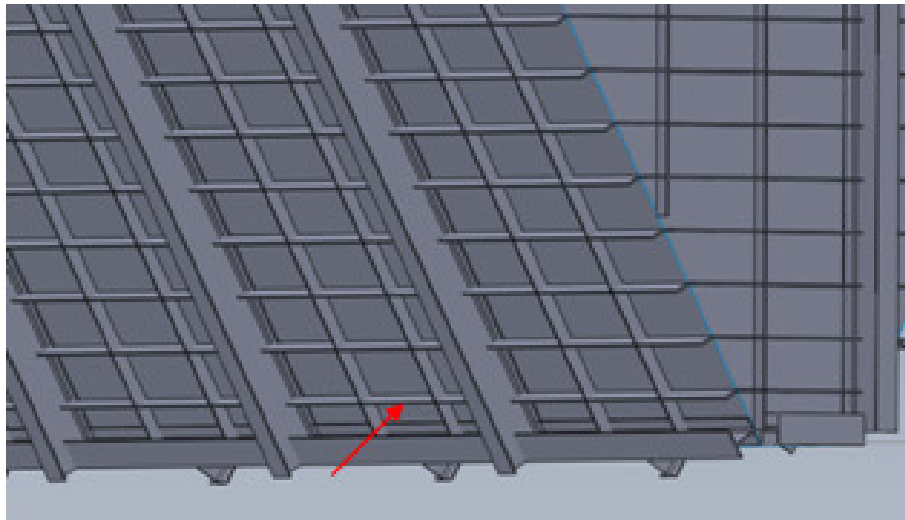
### 4.8.1 Dimensionering plattjärn

Plattjärnen dimensioneras för utböjning och betraktas som fast inspända. Maximal utböjning sker på mitten ( $L/2$ ), (se fig. 4.16).



*Fig. 4.16, maximal utböjning vid  $L/2$*

De största krafterna ett plattjärn utsätts för är längst ner i askfickan, således den första raden med horisontella plattjärn (se fig. 4.17).



*Fig. 4.17, största kraften uppstår på nedersta plattjärnsraden*

Nödvändigt ytttröghetsmomentet fås ur ekvation (4.15) där  $Q$  fås ur (4.17) där  $A = 3a * b$

### Ytttröghetsmoment plattjärn

Ytttröghetsmomentet för rektangulärt tvärsnitt beräknas [2] med avseende på  $y$ -axeln då vi enbart är intresserade av ytttröghetsmoment i en riktning. (se fig. 4.18)

$$I_y = \frac{BH^3}{12} \quad (4.16)$$

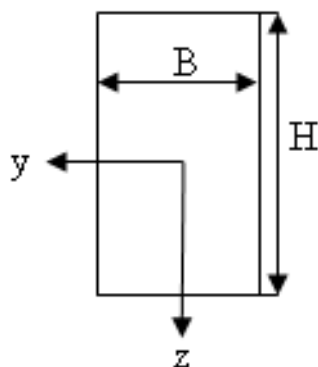


Fig. 4.18, tvärsnitt plattjärn

Vi har i våra handberäkningar valt att ta med det ytttröghetsmoment som den 5 mm tjocka plåten bidrar med när vi dimensionerar våra plattjärn. Plattjärn och plåt utgör då en T-balk (se fig. 4.19). Ytttrögheten beräknas med hänsyn till tvärsnittet som delas upp i två rektangulära tvärsnitt och sedan bestäms med avseende på ”tyngdpunkten” med hjälp av *Steiners sats* [2].

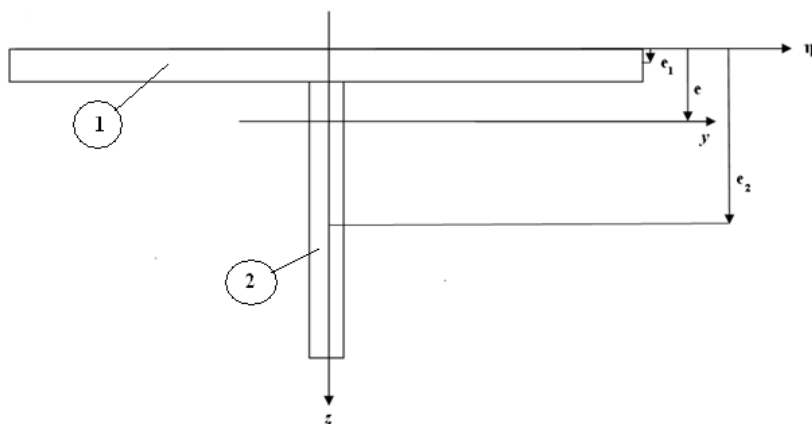


Fig. 4.19, tvärsnitt t-balk



Yttröghetsmomenten för de rektangulära tvärsnitten används för att bestämma yttröghetsmomentet i vårt T-formade tvärsnitt:

*Steiners sats:*

$$I_{\eta} = I_y + e^2 * A \quad (4.17)$$

Där I är yttröghetsmoment på respektive axel

Arean är respektive dels Area

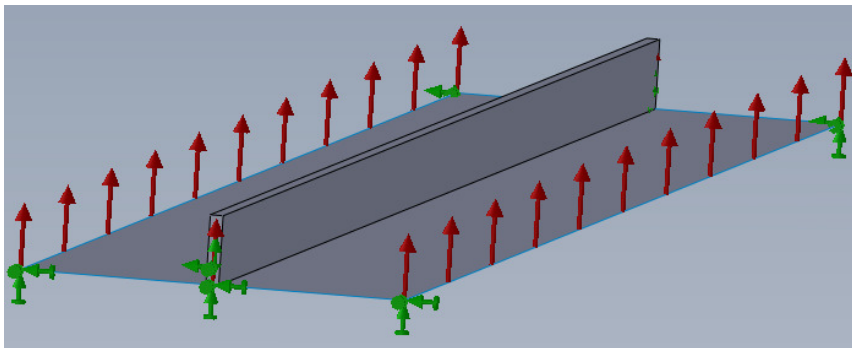
$$e \text{ definieras som } e = \frac{A_1 * e_1 + A_2 * e_2}{A_1 + A_2} \quad (4.18)$$

där  $e_i$  är avståndet från axeln  $\eta$  till respektive dels tyngdpunkt

$$I_{y,total} = (I_{y,1} + (e - e_1)^2 * A_1) + (I_{y,2} + (e - e_2)^2 * A_2) \quad (4.19)$$

För beteckningar se [Appendix 2]

För att jämföra vårt beräknade yttröghetsmoment med FEM-modellering, gjordes sex modeller av inspända plattjärn på plåt, för tre storlekar och tryck, med två temperaturfall för varje storlek. Dessa modellerades med randvillkoren fast inspända utan rotation och translation (se fig. 4.20).



*Fig. 4.20, fast inspönt (gröna pilar) plattjärn med utbredd trycklast (röda pilar)*

Modellen är uppbyggd genom att ett plattjärn är fäst mot en plåtyta. Inspänningen verkar på ytans kortsidor och plattjärnets ändar. Den utbredda lasten verkar på hela plåtytan. Konvergens undersöktes och anses som godkänd (se diagram 4.1)

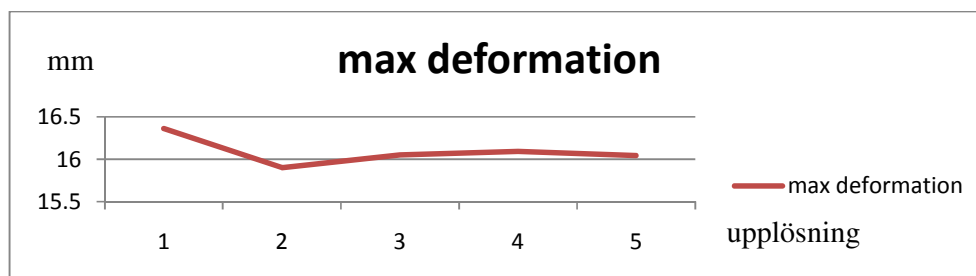


Diagram 4.1, Visar konvergens för plattjärnets utböjning

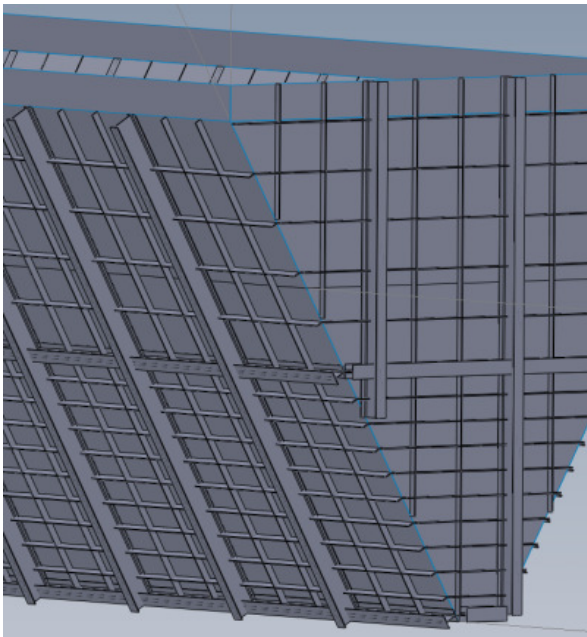
Våra resultat visar att utböjningen skiljer sig med en faktor  $\approx 1,1 - 1,3$  (se tabell 4.4). Dessa faktorer kan inte förklaras då förenklingar inte är gjorda för detta fall. Vi väljer vidare att utelämna denna faktor.

Resultat utböjning [mm]					
Temperatur	Längd [mm]	Dimension plattjärn	Handberäknad Utböjning	FEM-modellerad Utböjning	Faktor
300°C	1263	15*100	6,58	7,50	1,140
	2870	15*80	5,57	5,30	1,142
	5,169*12	15*80	4,64	5,40	1,156
	2405		4,67	6,40	1,149
450°C	2544	5*80	4,81	5,60	1,164
	1928	3*80	3,41	4,16	1,224
	1615	15*40	2,79	3,50	1,254

Tabell 4.4

#### 4.8.2 Ökat avstånd mellan plattjärn.

Som tidigare nämnts, är trycket från askan beroende av höjden aska i själva askfickan. Detta resulterar i att minsta fast inspända plåtruta kan ökas då trycket avtar. I vår valda modell är tre plåtrutor horisontellt inramade av de kraftigare vertikala balkarna (se fig. 4.21). Varje rutas höjd kan ökas då trycket avtar, men av tillverkningsmässiga skäl har vi valt att använda oss av två mått på höjd varav det ena fås efter trycket längst ner i askfickan. Det andra bestämdes som det dubbla måttet av det första, det vill säga att den liggande plåtrutans höjd dubblas (se fig. 4.21).



*Fig. 4.21, plåtrutans höjd kan efter en viss höjd fördubblas*

Sedan tidigare har plåtrutans höjd  $b$  och dess bredd  $a$  på grund av avståndet mellan grövre balkar bestämts som  $a=2b$ . Ur tabell fås värdet på konstanten  $\beta_1$  till 0,4974 . Det vi nu söker är för vilket tryck som  $a=b$ , med det då ändrade värdet på konstanten  $\beta_1$  till 0,3078 (se tidigare redovisad tabell 4.1) . Detta ger två olika tryck. Högsta tillåtna trycket kan bestämmas enligt ekvation (4.4) . Det högsta tillåtna trycket (som ger när plåtytan kan dubbleras) bestäms också [Appendix 2] och följande resultat fås:

Plåtrutans höjd  $b$  kan fördubblas efter  $0,4l + 0,682 m$

### 4.8.3 Dimensionering av tvärgående stag

De tvärgående stag (innerstag) som binder ihop askfickans långsidor är dimensionerade efter uppkommen spänningskoncentration på grund av stångkraften  $N$ , som uppkommer då askfickans långsidor buktar ut och böjande moment fås genom infästningens vridning. Dessa tvärgående stag är placerade parallellt med gavlarna inne i askfickan (se fig. 4.22). Vi har valt dessa stag som plattjärn då dessa har fördelen att de är smala och inte stoppar aska, samt är fördelaktiga ur svetsaspekter. Tjockleken på plattjärn bör inte väljas under 5 mm [7].

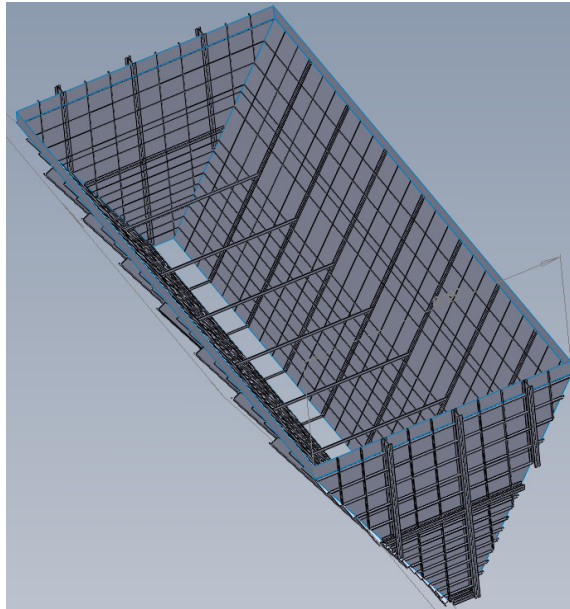


Fig. 4.22, tvärgående stag

Stagen dimensioneras för spänning. De belastas med en normalkraft och böjande moment då HEA-balken vrider sig enligt randvillkor. Definitionen för normalspänning [2] :

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_b} \quad (4.20)$$

Där  $N$  är normalkraft,  $A$  är stagets tvärsnittsarea,  $\sigma$  är tillåten spänning vid specifik temperatur och  $W_b$  är böjmotstånd. Då böjande momentet  $M$  (vridningen i HEA-balken) är svårt att beräkna, försummas HEA-balkens vridmotstånd och en mindre approximation av lasten ovanför HEA-balken görs.

**Övre staget:**

$$N_{\text{övre}} = \left( (q_{\text{luft}} + \rho g \left( h_{\text{aska}} - \frac{h_{\text{panel}}}{4} \right) * \frac{1}{2} \right) A_{\text{yta,övre}} \sin(\alpha) \quad (4.21)$$

Där

$$A_{\text{yta,övre}} = \frac{l}{2} * 3a$$

$N_{\text{övre}}$  fås som  $Q_i$  i [Appendix 4]

Böjande moment som ekvation (4.2)

Där

$$Q_i = (P + Q - (P_2 + Q_2))$$

$$L = l/2$$

Krafterna  $Q_i$  och  $P_i$  härleds i [Appendix 5] och [Appendix 6]

**Nedre staget:**

$$N_{\text{nedre}} = \left( \left( q_{\text{luft}} + \frac{\rho g h_{\text{panel}}}{4} * \frac{1}{2} + \rho g \left( h_{\text{aska}} - \frac{h_{\text{panel}}}{4} \right) \right) A_{\text{yta,nedre}} \right) \sin(\alpha) \quad (4.22)$$

Där

$$A_{\text{yta,nedre}} = \frac{l}{4} * 3a$$

$N_{\text{nedre}}$  fås som  $Q_i$  i [Appendix 4]

Böjande moment fås enligt ekvation (4.2)

Där

$$Q_i = (Q + P) \text{ för härledning se [Appendix 5]}$$

$$L = l/2$$

Böjmotståndet för bägge stagen fås som

$$W_b = \frac{I_y}{|z|_{max}} \quad (4.23)$$

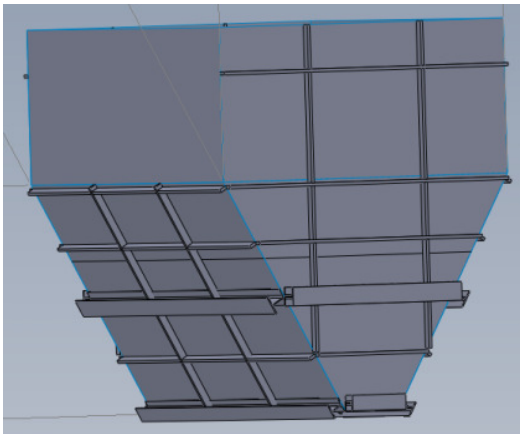
Där

$$I_y \text{ fås ur ekvation (4.18) och } |z|_{max} = \frac{H}{2}$$

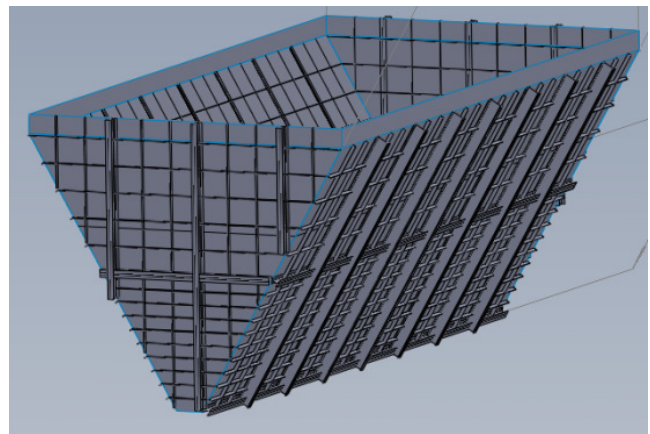
Där H är plattjárnets höjd.

## 4.9 FEM-modellering av tillämpad konstruktion

Ekvationer för balkar och inspända plåtytor samt korrektionsfaktorer har tagits fram. Nu återstår att modellera och analysera effekter då dessa byggs ihop enligt vår valda konstruktion. De askfickor som valdes för modellering var två extremfall i fråga om storlek. En liten med totala höjden 1,5 m, längden 2,5 m (se fig. 4.23) och en stor med höjden 7 m och längden 19 m (se fig. 4.24). Dessa modellerades med balkar och plåtytor för de två temperaturerna 300°C och 450°C.



*Fig. 4.23, askficka med bredd x längd 1,5x2.m*



*Fig. 4.24, askficka med bredd x längd 7x19m*

#### 4.9.1 Uppbyggnad och villkor

Modellerna som byggts upp är skalmodeller, balkar som används är hämtade ur balksortiment från underleverantörer och finns som tillval i SolidWorks. Materialdata för tryckkärlsplåt samt balkar hämtas ur standardtabell [7] och dess egenskaper tilldelas. Modellerna simulerar hela askfickor. De randvillkor som används vid simuleringar är verklighetseniga.

Assemblin består av fyra väggbitar, som fästs i varandra och bildar askfickans väggstruktur. Balkar och plattjärn har lagts till och svetsats fast på plåtarna och i varandra. Detta sker med ”contact sets” i SolidWorks, vilket i vårt fall binder ytor och balkar med varandra fullständigt, precis som när plåtar och balkar svetsas.

De krafter som verkar på modellen är övertryck, askvikten och gravitation. Lasten från askan har delats upp i två olika krafter i fem-modellen. Dels den kraft som linjärt ökar och verkar på askfickans väggar, dels den kraft som motsvaras av en askpelare rakt ovanför själva botten på askfickan. Den ram av ytor upptill på fickan (där inspänningsvillkoren är placerade) simulerar rökgaskanal samt intilliggande askficka. Askfickan svetsas ihop med rökgaskanalen i gavlarna medans långsidorna vanligtvis enbart får stöd i dess normalriktning. Kortsidorna är däremot fast inspända i alla led (se fig. 4.25).

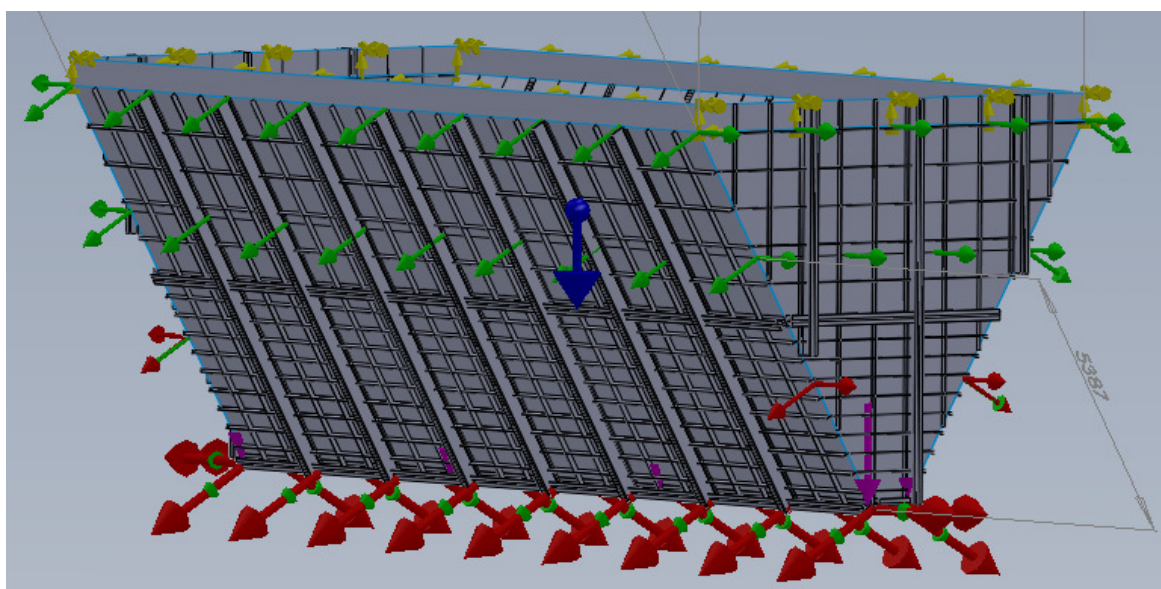


Fig. 4.25, inspänning (gula pilar), askpelare (lila pilar), lufttryck (gröna pilar), asktryck (röda pilar), gravitation (blå pil)

#### 4.9.2 Analys av utböjning

Modelleringarna av deformation (se fig. 4.26) är gjorda i SolidWorks högsta upplösning för elementantal. Konvergens kontrollerades för en 1,5x2,5m askficka [Appendix 7] och ses som representativ för de mindre modellerna.

Då samtliga balkar som finns i underleverantörens sortiment inte finns representerade i SolidWorks, är inte alltid de modellerade balkarna desamma som de handberäknade. Vi väljer därför att beräkna och jämföra utböjningen med de modellerade balkarnas storlek. I samtliga handberäkningar har deformation på grund av egenvikt försumrats. Följande resultat erhöles för utböjning (se tabell 4.5-4.8).

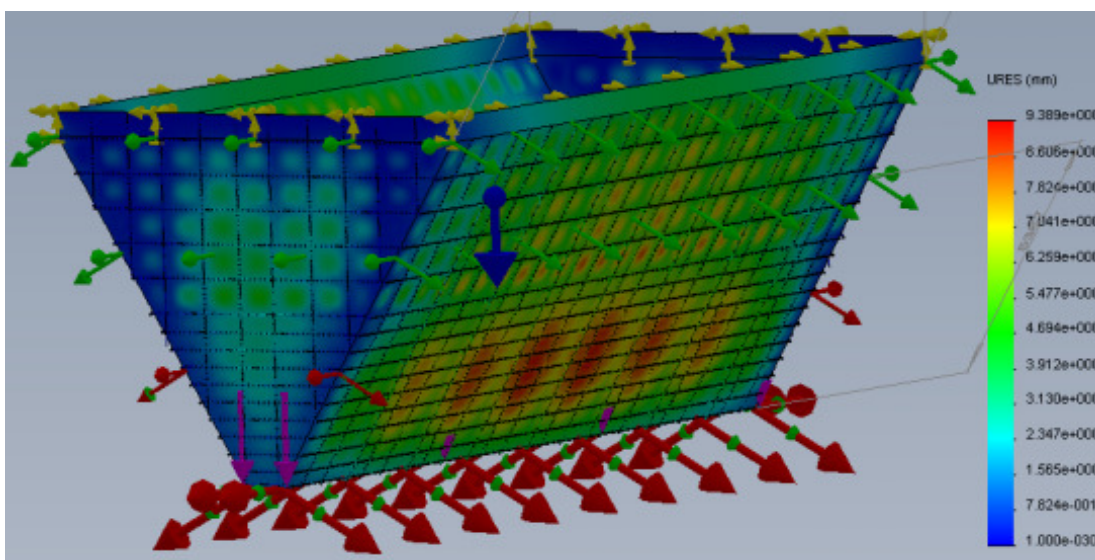


Fig. 4.26, visar deformationsbild för askficka med bredd x höjd = 7x19m



Vi ser i vår analys att utböjningen skiljer sig mot beräknade värden. Faktorerna förekommer med värden från 1,35 till 2,0 (se tabell 4.5). Att utböjningen skiljer sig kan ev. förklaras med att T-profilernas långsidor sitter ihop. Då alla plattjärn logiskt böjer ut lika mycket, bidrar dessa till minskad maximal utböjning. Faktorer får här ses som oregelbundna och en trovärdig utvärdering är då svår att göra. Om faktorerna skall beaktas, bör dessa väljas konservativt. Samspelseffekter på plattjärn anses låga.

<b>Utböjning plattjärn [mm]</b>				
Storlek askficka [m]	$l * b * h$ [mm] för plattjärn samt temperatur	Handberäknad	FEM-modellerad	Faktor
1,5*2,5	2500 * 80 * 3 300 <sup>0</sup>	4,08	2,47	1,65
7*19	2,405 * 100 * 15 300 <sup>0</sup>	3,82	2,83	1,35
1,5*2,5	2500 * 80 * 3 450 <sup>0</sup>	3,07	1,53	2,00
7*19	1615 * 80 * 5 450 <sup>0</sup>	2,66	1,61	1,65

Tabell 4.5

Vid vertikal balk får faktorerna ses som höga (se tabell 4.6). Att utböjningen är lägre i de modellerade fallen beror till stor del på att randvillkoret fritt upplagd använts i handberäkningarna. Ett betydande moment tas upp i övre infästning vilket dämpar utböjningen. Samspelseffekter har utelämnats och påverkar utböjning och variation. En konservativ faktor bör väljas, då stor skillnad mellan handberäkning och modellering råder.

<b>Utböjning vertikal balk [mm]</b>				
Storlek askficka [m]	$l/2$ för balk [m] samt balktyp och temperaturer	Handberäknad	FEM-modellerad	Faktor
1,5*2,5 vertikal balk utgå	-	-	-	
7*19	4,04, IPE 360 300 <sup>0</sup> C	7,18	2,10	3,42
1,5*2,5 vertikal balk utgå	-	-	-	
7*19	4,04 IPE 330,450 <sup>0</sup> C	7,26	1,88	3,86

Tabell 4.6

Vid analys för horisontell övre balk verkar faktorer för små askfickor rimliga med avseende på tidigare förenklingar där fast inspanning kan ifrågasättas. För större askfickor kan faktorerna vara mycket missvisande, särskilt för storleken 7\*19 m, vid 300°C. Stagen i modellerna beter sig märkligt. Hög spänning verkar uppkomma dels på grund av moment i stagen, men även på grund av normalkraft vilket är till följd deformation. Då stagen ger efter bidrar detta till låg utböjning i HEA-balken. Ingen tolkning av resultaten görs och faktorer bör utelämnas. Här råder stor påverkan av samspel mellan valda balkar. Väljer man att lita på modeller för små askfickor kan den mest konservativa faktorn tas med (se tabell 4.7).

<b>Utböjning horisontell balk övre [mm]</b>					
Storlek askficka [m]	$l$ för balk samt balktyp och temperaturer	Handberäknad	FEM-modellerad	Faktor	
1,5*2,5 300°	2500 HEA 120	0,83	1,06	1,49	
7*19 300°	2405 HEA 200	0,89	0,020	44,5	
1,5*2,5 450°	2500 HEA 120	0,90	1,13	1,25	
7*19 450°	1615 HEA 160	0,43	0,07	6,14	

Tabell 4.7

Vid analys av horisontell nedre balk känns faktorerna för mindre askfickor rimliga med avseende på approximationer av bland annat randvillkor. Vid större askfickor uppstår problem med tidigare nämnda tvärstag. Samspelseffekter mellan balkar är troligen stor. Faktorer utelämnas på grund av osäkerhet.

<b>Utböjning horisontell balk nedre [mm]</b>					
Storlek askficka [m] samt temperatur	$l$ [mm] för balk samt balktyp	Handberäknad	FEM-modellerad	Faktor	
1,5*2,5 300°C	2500 HEA 120	0,92	1,16	1,26	
7*19 300°C	2405 HEA 200	0,80	0,013	61,5	
1,5*2,5 450°C	2500 HEA 120	1,02	1,25	1,25	
7*19 450°C	1615 HEA 180	0,63	0,0089	71,6	

Tabell 4.8

### 4.9.3 Analys av spänning

Spänningsanalys gjordes av samtliga modellerade askfickor. Konvergenskontroll gjordes för en askficka av storleken 1,5\*2,5m vid temperaturen 300°C [Appendix 7] och ses som representativ för denna storlek av askficka. I denna analys såg vi spänningar som översteg tillåtna värden i såväl plåt som balkar (se fig. 4.27 och 4.28). Dessa uppkom särskilt i större askfickor. En förklaring kan vara att de minsta modellerade askfickornas balkar inte kommer upp i sin fulla längd. Dessa spänningar verifierades senare med handberäkningar.

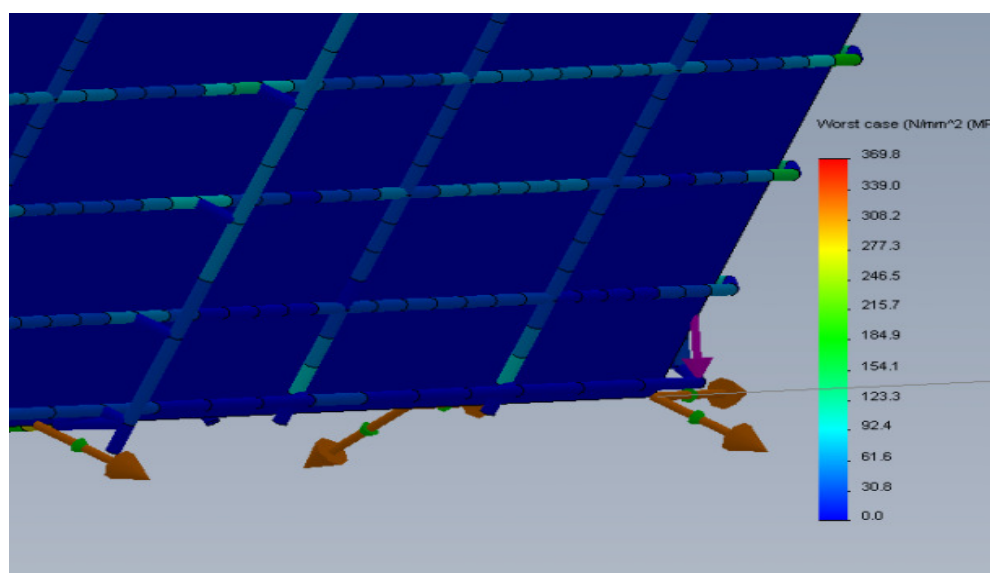


Fig. 4.27, spänning i balkar och plattjärn

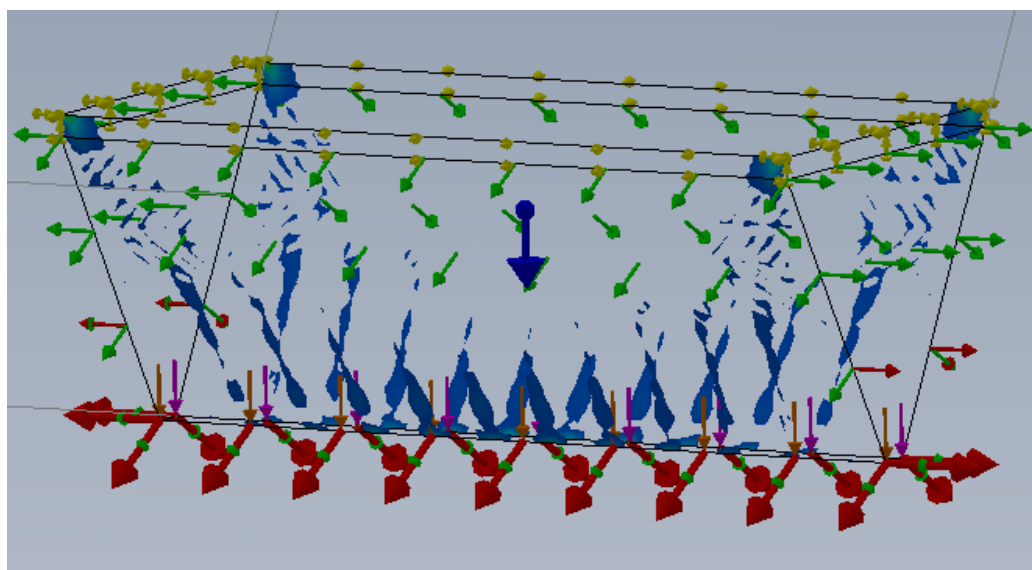


Fig. 4.28, visar spänningen i plåten med funktionen ISO-clipping i SolidWorks. Enbart den spänning som överskrider max tillåtna visas.

Detta medför att man inte alltid kan dimensionera balkar efter kravet på utböjning  $L/500$  utan dimensionering efter maximal tillåten spänning kan vara nödvändig. Eftersom utböjningskravet därmed i många fall skärpts är eventuellt tidigare framtagna faktorer för utböjning inte väsentliga då dessa bidrar till högre spänning. Handberäkningar ger spänningar enligt följande avsnitt.

## 4.10 Kontroll av spänningar

### 4.10.1 Spänning plattjärn

Normalspänningen i plattjärnen försummas, hänsyn tas endast till spänning på grund av moment. Formel fås enligt [2]:

$$\sigma = \frac{M}{W_b} \quad (4.24)$$

Där  $M$  är det böjande momentet. Då plattjärn betraktas som fast inspända i detta fall, uppkommer maximalt moment vid dess ytterändar. Böjande moment fås ur ekvation (4.2) där  $L=3a$ ,  $Q_i$  fås ur ekvation (4.15) och böjmotståndet  $W_b$  enligt ekvation (4.23)

$I_y$  fås ur ekvation (4.19) Där  $|z|_{max}$  är största avståndet (se fig. 4.29) till det sammanfogade plattjärnet och plåtens tyngdpunkt. Detta fås som:

$$|z|_{max} = t + H - e \quad (4.25)$$

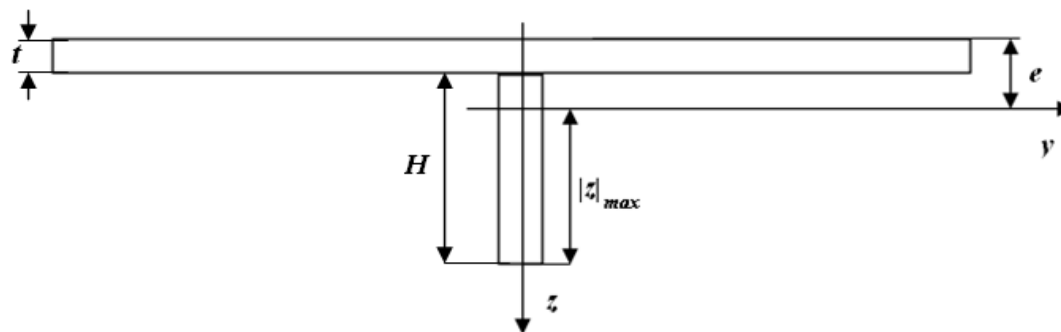


Fig. 4.29, tvärnsnitt där formfaktorn beskrivs.

#### 4.10.2 Beräkning av yttröghets- och böjmoment för IPE och HEA-balk

Yttröghetsmomentet fås (se fig. 4.30) med ekvation (4.18) där  $I$  är yttröghetsmoment på respektive axel och  $A_i$  är respektive dels Area

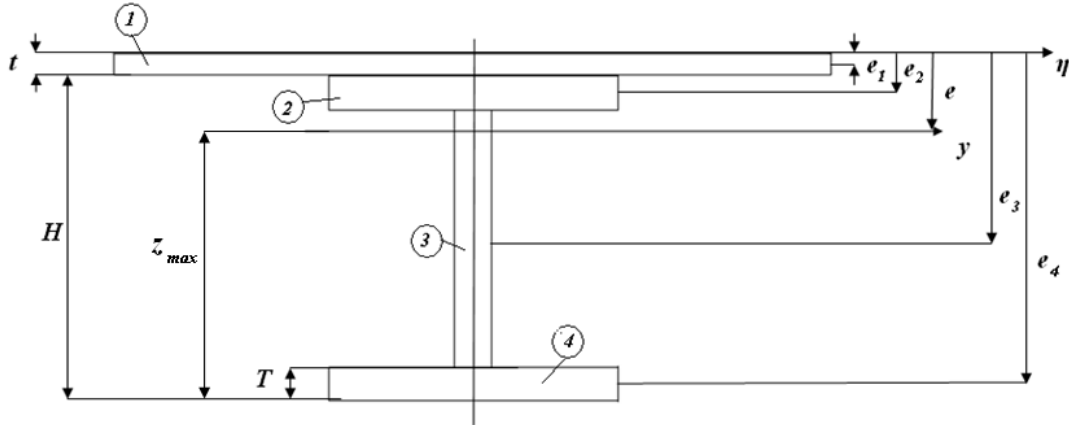


Fig. 4.30, steiners sats ger yttröghetsmomentet

$e$  definieras som

$$e = \frac{A_1 \cdot e_1 + A_2 \cdot e_2 + A_3 \cdot e_3 + A_4 \cdot e_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \quad (4.26)$$

där  $e_i$  är avståndet från axeln  $\eta$  till respektive dels tyngdpunkt.

$$I_{y,total} = (I_{y,1} + (e - e_1)^2 \cdot A_1) + (I_{y,2} + (e - e_2)^2 \cdot A_2) + (I_{y,3} + (e - e_3)^2 \cdot A_3) + (I_{y,4} + (e - e_4)^2 \cdot A_4) \quad (4.27)$$

$z_{max}$  fås ur ekvation (4.25) med mått enligt (fig. 4.30)

Ovanstående har använts för kontroll av spänning. Vid dimensionering av kraftigare balkar med hjälp av exceldokumentet, väljer vi att inte ta med normalkraftens påverkan. Beräkning av  $W_b$  enligt ovan utelämnas och plåtens påverkan av  $z_{max}$  och yttröghetsmoment försummas. Då underleverantören anger  $W_b$  för balken, reduceras inparametrarna i programmet. Faktor från FEM-analysen får då kompensera detta. Böjmomentet löses ur ekvation (4.24).

### 4.10.3 Spänning vertikal balk

De vertikala balkarna är infästa i horisontella HEA-balkar och enligt tidigare beräkningar är momentet lågt i infästningarna. Detta bekräftas av våra FEM-modeller där största spänningen uppstår i mitten (se fig. 4.31).

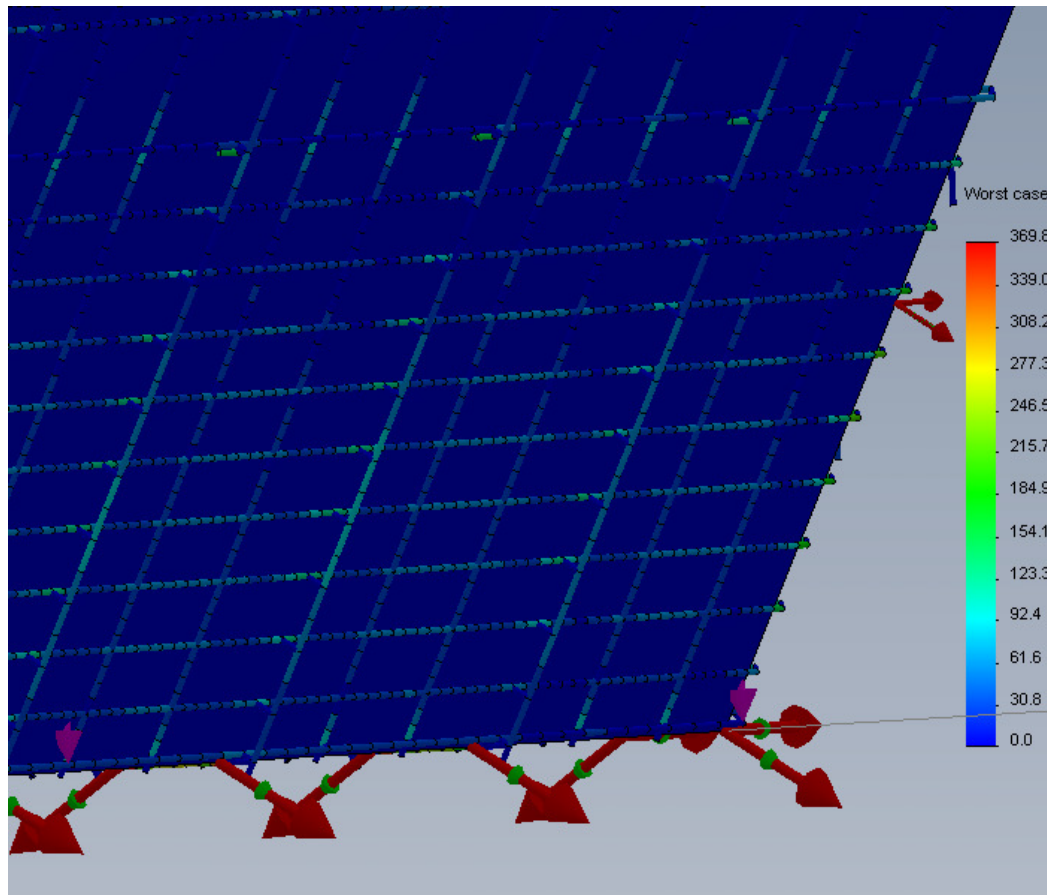


Fig. 4.31, spänningarna störst i mitten av de vertikala balkarna

Spänningskoncentrationen fås ur ekvation (4.20)

Böjande momentet  $M$  vid halva balklängden hämtas ur [2], för härledning se [Appendix 3]

$$M = EIw''\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{qL^2}{8} = -\frac{QL}{8} \quad (4.28)$$

Där  $L$  fås som  $l/2$  enligt tidigare

$Q$  fås som summan av last från lufttryck och aska. Ekvation (4.7) och (4.8) ger

$$Q = \left( (q_{luft} + \rho g (h_{aska} - \frac{h_{panel}}{2})) + \frac{\rho g h_{aska}}{4} \right) A \quad (4.29)$$

Där  $A = 3a * l/2$

Lastern  $Q_i$  härleds i [Appendix 5]

Normalkraften utgörs av askan som belastar asktransportören samt egenvikten.

Asktransportörens vikt försummas.

$$N = \left( ((\rho * g * l * \sin \alpha + q_{luft}) A_{del\ av\ transportör} + g * g_{katalog} * \frac{l}{2}) / \sin \alpha \right) \quad (4.30)$$

där

$g_{katalog}$  är balkens vikt/m

$$A_{del\ av\ transportör} = \frac{Transportörsbredd}{2} * 3a$$

$A_{balk}$  fås ur balkens geometri

Ovanstående har använts för kontroll av spänning. Vid dimensionering av kraftigare balkar med hjälp av exceldokumentet, väljer vi att inte ta med normalkraftens påverkan. Beräkning av  $W_b$  enligt ovan utelämnas och plåtens påverkan av  $z_{max}$  och yttröghetsmoment försummas. Då underleverantören anger  $W_b$  för balken, reduceras inparametrarna i programmet. Faktor från FEM-analysen får då kompensera detta. Böjmomentet löses ur ekvation (4.24).

#### 4.10.4 Spänning i horisontell balk

Horisontella balkar ses ur spänningssynpunkt som fast inspända. Detta är konservativt då de sannolikt kan röra sig lite. FEM-modellerna visar dock att spänningskoncentrationen är högst i infästningspunkterna. Spänning som uppstår på grund av normalkraft försummas.

Spänningen fås som ekvation (4.24)

Där böjande moment fås ur (4.2) där lasten  $Q_i$  härleds i [Appendix 4] där  $L = 3a$

Yttröghetsmomentet fås ur ekvation (4.27) för HEA-balk och  $W_p$  ur ekvation (4.23)

#### 4.10.5 Analys av spänningsresultat

Modelleringarna är gjorda i SolidWorks högsta upplösning. Balkarna som analyseras är samma som vid utböjning, det vill säga att inga nya dimensioneringar har gjorts för spänning. Handberäkningar har gjorts för de balkar som använts i SolidWorks. Dessa jämförs sedan varvid resultatet analyserades (se tabell 4.9-4.12). En viktig slutsats som framkommit efter modellering, var att samspel mellan valda balkar verkar spela en avgörande roll.

För spänning i plattjärnen var faktorer är oregelbundna (se tabell 4.9). Spänning skiljer sig mycket från handberäknat värde i askficka av storleken 1,5\*2,5m. Kontroll av denna beräkning har noggrant genomförts men inte gett någon direkt förklaring. Möjligt är att plattjärnet inte utsätts för trycket längst ner i en mindre askficka då plattjärnet placeras långt upp på grund av storlek på minsta inspända plåtyta. Samspel mellan balkar och storlekar på askfickor påverkar också troligen mycket. På grund osäkerheten i detta bör bättre analyser göras.

Spänning plattjärn MPa				
Storlek askficka [m]	$l * b * h$ [mm] för plattjärn, samtliga askfickor och temperaturer	Handberäknad	FEM-modellerad	Faktor
1,5*2,5	2500 * 80 * 3 300 <sup>0</sup>	709	160	4,43
7*19	2,405 * 100 * 15 300 <sup>0</sup>	155	214	0,72
1,5*2,5	2500 * 80 * 3 450 <sup>0</sup>	500	150	3,33
7*19	1615 * 80 * 5 450 <sup>0</sup>	199	280	0,71

Tabell 4.9



För spänning i vertikal balk var faktorer också oregelbundna (se tabell 4.10). Samspel har mycket stor inverkan på spänningen då dessa balkars infästning är tvärstagad. Approximation med försummad normalkraft bidrar inte till stora variationer då denna är samma för bägge fallen. Bättre analys med planerade försök bör göras.

<b>Spänning vertikal balk MPa</b>				
Storlek askficka [m]	$l/2$ för balk [m] samt balktyp och temperaturer	Handberäknad	FEM-modell	Faktor
1,5*2,5 vertikal balk utgår	-	-	-	
7*19	4,04, IPE 360 300°C	120	95	1,26
1,5*2,5 vertikal balk utgår	-	-	-	
7*19	4,04 IPE 330,450° C	67	79	0,85

Tabell 4.10

För spänning i horisontell balk behöver bättre analyser göras. Samspel mellan balkar verkar även här spela en avgörande roll. Att faktorn är större för askfickor av dimensionen 7\*19m förklaras av tidigare nämnda problem.

<b>Spänning horisontell balk övre MPa</b>				
Storlek askficka [m]	$l$ för balk samt balktyp och temperaturer	Handberäknad	FEM-modellerad	Faktor
1,5*2,5 300°	2500 HEA 120	44,8	45	1,00
7*19 300°	2405 HEA 200	86,6	45	1,92
1,5*2,5 450°	2500 HEA 120	46,5	45	1,03
7*19 450°	1615 HEA 160	86,6	40	2,17

Tabell 4.11

Spänning i horisontella balkar var inget undantag (se tabell 4.12). Stort samspel råder och analys med planerade försök bör göras. Tidigare problem med stag bidrar till osäkerhet.

Spänning horisontell balk undre MPa					
Storlek askficka [m] samt temperatur	$l$ [mm] för balk samt balktyp	Handberäknad	FEM-modellerad	Faktor	
1,5*2,5 300°C	2500 HEA 120	42	70	0,60	
7*19 300°C	2405 HEA 200	78	80	0,98	
1,5*2,5 450°C	2500 HEA 120	43	70	0,61	
7*19 450°C	1615 HEA 180	40	35	1,14	

Tabell 4.12

### Spänning i plåt

I våra modelleringar uppstod höga spänningskoncentrationer i balkar och i plåt. Spänningen i plåt var högst vid infästningarna i vertikal IPE-balk. Denna uppstod på grund av att plattjärnen böjde ut med hög spänning som följd, då balkar dimensionerades efter utböjning. Att spänningarna uppstod i plåtens kortsida beror på att plattjärnen dimensioneras efter horisontella plattjärn vilket medför att vertikala plattjärn är förhållandevis liten. Då hänsyn till spänning tas vid dimensionering av balkar, innebär detta att denna minskar väsentligt i plåten. Då minsta inspända plåtruta verifierades mot FEM-modell i ett tidigt skede ses ingen anledning till att ändra dimensionering av dessa.

#### 4.10.6 Kontroll av spänning i askfickans infästningspunkter.

Spänningen som finns representerad i infästningspunkterna är normalspänning och fås ur ekvation (4.22) där  $A$  är tvärsnittsarean för balkarna och plåt i infästningspunkterna.  $N$  är kraften som utgörs av lasten från aska, lufttryck samt egenvikten av askfickan. Då egenvikten är svår att beräkna blir det här nödvändigt att göra en viss konservativ approximation.

Samtliga längder av balkar multipliceras med balks massa/m. Askans vikt fås som:

$$V * \rho$$

$$\rho_{\text{kall aska}} = 1400$$

$$\rho_{\text{varm aska}} = 600$$

Volymen beräknas enligt askfickans geometri (se bild 4.32)

$$m_{\text{kall aska}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(B-c-TB)h_{\text{panel}}}{2} + TB * h_{\text{panel}} + \frac{c * h_{\text{panel}}}{2} \right] * L * 1400 \quad (4.31)$$

$$m_{\text{varm aska}} = \frac{2}{3} \left[ \frac{(B-c-TB)h_{\text{panel}}}{2} + TB * h_{\text{panel}} + \frac{c * h_{\text{panel}}}{2} \right] * L * 600 \quad (4.32)$$

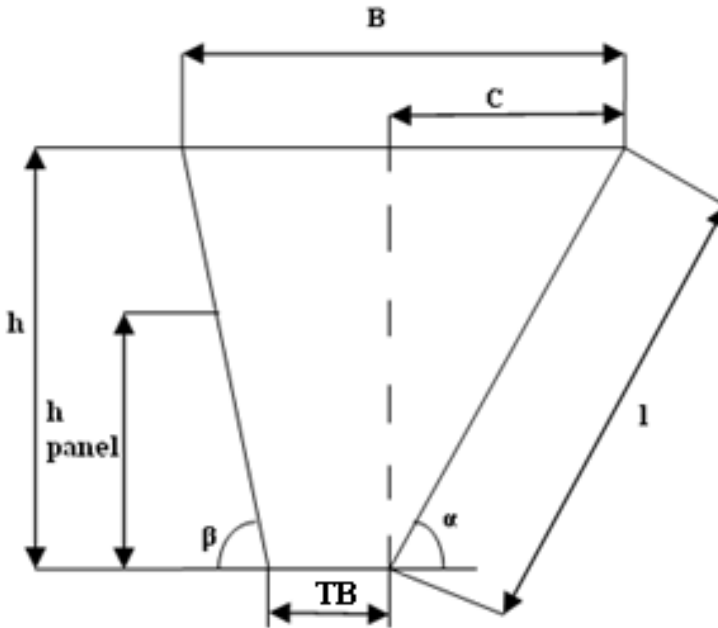


Fig. 4.32, askfickans geometri vid beräkning av volym

Där  $c = \frac{h}{\tan \alpha}$

$L =$  askfickans längd

Egenvikten fås som  $\sum$  balk +  $\sum$  plåt där balkarnas vikt per meter fås ur

underleverantörens katalog och betecknas som  $m_i$

### Horisontella balkar

$$\text{Horisontell}_{\text{övre}} = 2 \left[ B - \frac{h}{2} * \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) + L \right] * m_i \quad (4.33)$$

$$\text{Horisontell}_{\text{nedre}} = 2[TB + L] * m_i \quad (4.34)$$

### Vertikala balkar

$$\left(\frac{L}{3a} * \frac{h}{\sin\alpha} + 2 \frac{2*B*h}{3a} + \frac{h}{\sin\beta} * \frac{L}{3a}\right) * m_i \quad (4.35)$$

### Plattjärn

$$Vertikala = \frac{2}{3a} \left(\frac{h}{\sin\alpha} * L + \frac{h}{\sin\beta} * L + 2B * h\right) * m_i \quad (4.36)$$

$$Horisontella = \left(\frac{0,4 * \frac{h}{\sin\alpha} + 0,7}{b} + \frac{0,6 * \frac{h}{\sin\alpha} - 0,7}{2b}\right) (2L + 2B) * m_i \quad (4.37)$$

### Plåt

$$Plåt = \left(\frac{(B-c-TB)h}{2} + TB * h + \frac{c*h}{2} + \frac{h}{\sin\alpha} * L + \frac{h}{\sin} * L\right) \rho_{tryckkärlstål} \quad (4.38)$$

## 5. Slutsats

Konstruktion och dimensionering av askficka går att optimera mycket där tidsramen varit en klar begränsning. Då avancerade lastfall och konstruktioner ska göras är FEM-analys ett bra verktyg att komplettera med. Gällande de krav man dimensionerar mot, är det viktigt att dessa nogra undersöks.

Ett Excel-program har framtagits som hjälper konstruktören att konstruera och dimensionera askfickor för Metsos samtliga storlekar på sodapannor. Verktøget är baserat på beräkningar efter den konstruktionsmodell som framtagits. Programmets gränssnitt [Appendix 9] är utformat enkelt och användarvänligt. Manual för programmet består av text samt figurer [Appendix 10].

Då approximationer gjorts vid handberäkningar och då randvillkor inte alltid fullständigt överensstämmt med verkligheten, kan resultat i vissa delar ifrågasättas. Omfattande FEM-modellering har dock utförts och resultaten analyserats. Dessa har gjorts med hög anknytning till verkliga lastfall och randvillkor.

Storleken på askfickor varierar mycket, där längden kan vara 3 till 19m och höjden ca 2 till 7m. De fem-analyser som gjorts, har varit för minsta respektive största existerande askficka, vid temperaturerna 300°C och 450°C. Fallvinkeln har varit 60° i alla modeller. De faktorer som har tagits fram, har varit de som ger det mest konservativa dimensioneringen.

Konvergens har undersökts för de mindre askfickor som modellerats. En tolkning av dessa är att de "börjat" konvergera, men att resultatet är något osäkert. Värt att notera är dock att konvergenskurvan svänger inom ett relativt snävt värdesintervall. I övrigt har fem-modellerna varit osäkra i den bemärkelsen att små ändringar eller inställningar ibland gett stora skillnader i resultat. Datorkapaciteten har också varit ett hinder då de största askfickorna tar väldigt lång tid att köra och programmet överbelastas. När detta sker, går programmet mycket sakta och buggar uppkommer, vilket försvårar arbetet och ökar osäkerheten i resultaten.

Samtliga askfickor som modellerats har varit symmetriska vilket inte alltid stämmer överens med verkligheten. I vald konstruktionsmodell kan problem uppstå då kraven för balkar reviderats. Detta problem innebär att vissa askfickor kan kräva för stora plattjärn. Dessa behöver då ersättas med vinkeljärn eller T-balk. Då samspelseffekter av valda balkar,

temperaturer och storlek på askficka inte har undersökts bör man se de utparametrar programmet levererar som en grundlig dimensionering.

I våra modeller uppkom problemet med samspel, särskilt i de modeller som var stagade inuti, då stagen ”slöt cirkeln”. Spänning uppstod i stagen på grund av att HEA-balkarna vred sig. Dessa påverkas i sin tur av ett vridande moment som utgörs av lasten som bärs upp av IPE-balkar samt plattjärn och plåt. Dessa påverkas i sin tur av randvillkor där HEA-balkar ingår. Då samspelseffekter påverkar dimensionering av samtliga balkar bör dessa undersökas för att få tillförlitlighet i verktyget. Detta bör göras med så kallad försöksplanering [6], se [appendix 8] där försök reduceras med hjälp av generatorer.

Hur större modeller konvergerar är önskvärt då upplösningens påverkan inte har undersökts för dessa på grund av långa körningstider och ibland tveksamma resultatbilder. Önskvärt är också att kontrollera att även balkar dimensioneras efter lastfall drift, vilket ses som troligt.

## 6. Ekvationer

$$\tau = \frac{M_v}{W_V} \quad (4.1)$$

$$M = \frac{Q_i L}{12} \quad (4.2)$$

$$Q_{aska} = \rho * g * h \quad (4.3)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\beta_1 * q * b^2}{t^2} \quad (4.4)$$

$$q = q_{aska} + q_{lufttryck} = \rho * g * h_{panel} + 8700 \quad (4.5)$$

$$b = \left( \frac{1,12 * \sigma_{max} * t^2}{\beta_1 * q} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

$$Q = \left( q_{luft} + \rho g \left( h_{aska} - \frac{h_{panel}}{2} \right) \right) A \quad (4.7)$$

$$P = \frac{\rho g h_{aska}}{4} A \quad (4.8)$$

$$w(x) = \frac{QL^3}{24EI} \left( \frac{x^4}{L^4} - 2 \frac{x^3}{L^3} + \frac{x}{L} \right) + \frac{PL^3}{180EI} \left( 3 \frac{x^5}{L^5} - 10 \frac{x^3}{L^3} + 7 \frac{x}{L} \right) \quad (4.9)$$

$$w'(x) = \frac{L^3}{EI} \left( \frac{Q}{24} \left( 4 \frac{x^3}{L^4} - 6 \frac{x^2}{L^3} + \frac{1}{L} \right) + \frac{P}{180} \left( 15 \frac{x^4}{L^5} - 30 \frac{x^2}{L^3} + \frac{7}{L} \right) \right) \quad (4.10)$$

$$w(x) = \frac{L}{500} \rightarrow I = \frac{500L^2}{E} \left( \frac{Q}{24} \left( \frac{x^4}{L^4} - 2 \frac{x^3}{L^3} + \frac{x}{L} \right) + \frac{P}{180} \left( 3 \frac{x^5}{L^5} - 10 \frac{x^3}{L^3} + 7 \frac{x}{L} \right) \right) \quad (4.11)$$

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{QL^3}{384EI} \quad (4.12)$$

$$I = \frac{125QL^2}{96E} \quad (4.13)$$

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5Q_i L^2}{384EI} \quad (4.14)$$

$$Q = \left( q_{luft} + \rho g h_{aska} \right) A_{yta} \quad (4.15)$$

$$I_y = \frac{BH^3}{12} \quad (4.16)$$

$$I_\eta = I_y + e^2 * A \quad (4.17)$$

$$e = \frac{A_1 * e_1 + A_2 * e_2}{A_1 + A_2} \quad (4.18)$$

$$I_{y,total} = (I_{y,1} + (e - e_1)^2 * A_1) + (I_{y,2} + (e - e_2)^2 * A_2) \quad (4.19)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_b} \quad (4.20)$$

$$N_{\ddot{ov}vre} = \left( \left( q_{luft} + \rho g \left( h_{aska} - \frac{h_{panel}}{4} \right) * \frac{1}{2} \right) A_{yta,\ddot{ov}vre} \right) \sin(\alpha) \quad (4.21)$$

$$N_{nedre} = \left( \left( q_{luft} + \frac{\rho g h_{panel}}{4} * \frac{1}{2} + \rho g \left( h_{aska} - \frac{h_{panel}}{4} \right) \right) A_{yta,nedre} \right) \sin(\alpha) \quad (4.22)$$

$$W_b = \frac{I_y}{|z|_{max}} \quad (4.23)$$

$$\sigma = \frac{M}{W_b} \quad (4.24)$$

$$|z|_{max} = t + H - e \quad (4.25)$$

$$e = \frac{A_1 * e_1 + A_2 * e_2 + A_3 * e_3 + A_4 * e_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \quad (4.26)$$

$$I_{y,total} = (I_{y,1} + (e - e_1)^2 * A_1) + (I_{y,2} + (e - e_2)^2 * A_2) + (I_{y,3} + (e - e_3)^2 * A_3) + (I_{y,4} + (e - e_4)^2 * A_4) \quad (4.27)$$

$$M = EIw'' \left( \frac{L}{2} \right) = -\frac{qL^2}{8} = -\frac{QL}{8} \quad (4.28)$$

$$Q = \left( \left( q_{luft} + \rho g \left( h_{aska} - \frac{h_{panel}}{2} \right) \right) + \frac{\rho g h_{aska}}{4} \right) A \quad (4.29)$$

$$N = \left( ((\rho * g * l * \sin \alpha + q_{luft}) A_{del av transportör} + g * g_{katalog} * \frac{l}{2}) / \sin \alpha \right) \quad (4.30)$$

$$m_{kallaska} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(B-c-TB)h_{panel}}{2} + TB * h_{panel} + \frac{c * h_{panel}}{2} \right] * L * 1400 \quad (4.31)$$

$$m_{varmaska} = \frac{2}{3} \left[ \frac{(B-c-TB)h_{panel}}{2} + TB * h_{panel} + \frac{c * h_{panel}}{2} \right] * L * 600 \quad (4.32)$$

$$Horisontell_{\ddot{ov}vre} = 2 \left[ B - \frac{h}{2} * \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) + L \right] * m_i \quad (4.33)$$

$$Horisontell_{nedre} = 2[TB + L] * m_i \quad (4.34)$$



$$\left(\frac{L}{3a} * \frac{h}{\sin\alpha} + 2 \frac{2*B*h}{3a} + \frac{h}{\sin\beta} * \frac{L}{3a}\right) * m_i \quad (4.35)$$

$$Vertikala = \frac{2}{3a} \left(\frac{h}{\sin\alpha} * L + \frac{h}{\sin\beta} * L + 2B * h\right) * m_i \quad (4.36)$$

$$Horisontella = \left(\frac{0,4*\frac{h}{\sin\alpha}+0,7}{b} + \frac{0,6*\frac{h}{\sin\alpha}-0,7}{2b}\right) (2L + 2B) * m_i \quad (4.37)$$

$$Plåt = \left(\frac{(B-c-TB)h}{2} + TB * h + \frac{c*h}{2} + \frac{h}{\sin\alpha} * L + \frac{h}{\sin} * L\right) \rho_{tryckkärlstål} \quad (4.38)$$

# Referenser

## Beräkning

- [1] Young, W. C., Roark, J. R., Budynas, G. R. (2001) *Roark's Formulas for Stress and Strain*. Upplaga 7. New York: McGraw-Hill.
- [2] Dahlberg, T. (2008) *Teknisk hållfasthetslära*. Upplaga 3:7. Malmö: Studentlitteratur.
- [3] Grahn, R., Jansson, P (1995) *Statik*. Studentlitteratur.

## FEM

- [4] (2011) Index of /bertil/Kurser/Common/FEMgk/Notes  
<http://dixon.hh.se/bertil/Kurser/Common/FEMgk/Notes/>  
(15-Nov-2010 14:51)
- [5] (2011) *2011 SolidWorks Help, SolidWorks Simulation Fundamentals*.  
[http://help.solidworks.com/2011/English/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Fundamentals/ID\\_COSMOS\\_Works\\_Fundamentals.html?id=73bdc9df81b74870a6089975167908e7#Pg0](http://help.solidworks.com/2011/English/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Fundamentals/ID_COSMOS_Works_Fundamentals.html?id=73bdc9df81b74870a6089975167908e7#Pg0)  
(2011-05-29)

## Övrigt

- [6] Dahlbom, U. (2003) *Försöksplanering Faktor försök*. Göteborg: HB Matematiklitteratur.
- [7] Metso Power
- [8] Lönnelid, S., Norberg, R. (1991) *Formelsamling för teknologi och konstruktion m.*  
Stockholm: **Stiftelsen Kompendieutgivningen.**

# Appendix

## Appendix I

Jämförelse spänning efter lastfall.

Väljer vi att lösa ut  $b$  elementarfallet enligt

$$b = \left( \frac{\sigma_{max} * t^2}{\beta_1 * q} \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

Enligt tidigare mäts askans höjd mot den nedhängande panelen, denna höjd kallas i fortsättning för  $h_{panel}$ .

De båda lasterna skiljer sig enligt

$$q_{aska, varm} = 600 * 9,81 * \frac{2}{3} * h_{panel} \text{ [Pa]} \text{ och}$$

$$q_{aska, kall} = 1400 * 9,81 * \frac{1}{2} * h_{panel} \text{ [Pa]}$$

Förhållandet mellan trycket från kall respektive varma aska fås som

$$q_{aska, varm} = \frac{4}{7} q_{aska, kall}$$

Vid jämförelse av hur temperaturen påverkar tillåtna spänningen får man förhållandet

$$\sigma_{max, kall} = 2,217 * \sigma_{max, varm}$$

Då plåttjocklek och materialkonstanter samt förhållandet  $\frac{a}{b} = 2$  är lika för bägge lastfallen påverkar dessa inte vilket lastfall man ska dimensionera efter.

Skillnaderna i lastfallen som dimensionerar minsta långsidan  $b$  efter att man strukit de faktorer som inte påverkas.

### Lastfall drift

$$b_{drift} = \frac{\sigma_{max, varm}}{q_{aska, varm} + q_{övertryck}}$$

### Lastfall stopp

$$b_{stopp} = \frac{\sigma_{max, kall}}{q_{aska, kall}}$$

Då dimensionering sker efter den minsta accepterade längden jämförs  $b_{drift}$  och  $b_{stopp}$ . Ett antagande tas att vi dimensionerar efter  $b_{drift}$  och kontrolleras enligt

$$\frac{\sigma_{max,varm}}{q_{aska,varm} + q_{\overtryck}} < \frac{\sigma_{max,kall}}{q_{aska,kall}} \quad \left\{ \text{d\AA } q_{aska,varm} = \frac{4}{7} q_{aska,kall} \text{ och } \sigma_{max,kall} = 2,217 * \right.$$

$$\left. \sigma_{max,varm} \right\}$$

$$\frac{\sigma_{max,varm}}{q_{aska,varm} + q_{\overtryck}} < \frac{4 * 2,217 * \sigma_{max,varm}}{7 * q_{aska,varm}} \quad \text{f\AA}rkortning med \sigma_{max,varm} \text{ och } q_{aska,varm} \text{ ger}$$

$$\frac{1}{1 + \frac{q_{\overtryck}}{q_{aska,varm}}} < \frac{4 * 2,217}{7} \quad \left\{ \text{d\AA } q_{aska,varm} = 600 * 9,81 * \frac{2}{3} * h_{panel} \text{ [Pa]} \text{ och } q_{\overtryck} = \right.$$

$$\left. 8700 \text{ [Pa]} \right\}$$

$$\frac{1}{1 + \frac{8700}{600 * 9,81 * \frac{2}{3} * h_{panel}}} < 1,267 \quad \rightarrow \text{ att vi dimensionerar efter } b_{drift} \text{ d\AA} \text{ denna blir l\AA}gst vid$$

300°C och s\AA}ledes \AA}ven n\AA}r temperaturen \AA}kar till 450 °C . I forts\AA}ttningen betecknas  $b_{drift}$  enbart som b.

## Appendix 2

Yttröghetsmoment plattjärn.

Yttröghetsmomentet för rektangulärt tvärsnitt hämtas ur [2] och beräknas med avseende på y-axeln då vi enbart är intresserade av yttröghetsmoment i en riktning. (se fig. A1)

$$I_y = \frac{BH^3}{12} \quad (4.17)$$

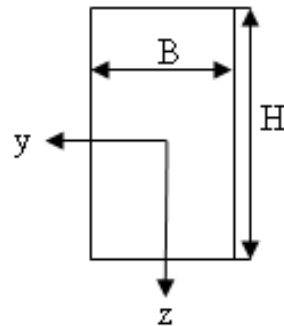


Fig. A1, tvärsnitt plattjärn

Vi har valt att i våra handberäkningar valt att ta med det yttröghetsmoment som den 5 mm tjocka plåten bidrar med när vi dimensionerar våra plattjärn, plattjärn och plåt utgör då en T-balk (se fig. A2). Yttrögheten beräknas med hänsyn till tvärsnittet som delas upp i två rektangulära tvärsnitt och bestäms sedan med avseende på ”tyngdpunkten” med hjälp av Steiners sats.

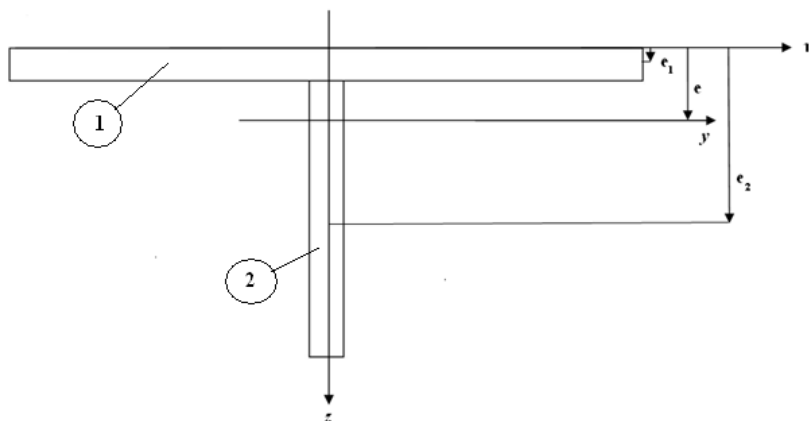


Fig. A2, tvärsnitt t-balk

Yttröghetsmomentet för ett rektangulärt tvärsnitt används för att bestämma yttröghetsmomentet i vårt T-formade tvärsnitt med hjälp av *Steiners sats* [2].

$$\text{Steiners sats: } I_{\eta} = I_y + e^2 * A \quad (4.17)$$

Där I är yttröghetsmoment på respektive axel

Arean är respektive dels Area

$$e \text{ definieras som } e = \frac{A_1 * e_1 + A_2 * e_2}{A_1 + A_2} \quad (4.18)$$

där  $e_i$  är avståndet från axeln  $\eta$  till respektive dels tyngdpunkt

$$I_{y,total} = (I_{y,1} + (e - e_1)^2 * A_1) + (I_{y,2} + (e - e_2)^2 * A_2) \quad (4.19)$$

Med erhållna beteckningar fås

$$e = \frac{b * t * \frac{t}{2} + \left(t + \frac{H}{2}\right) * B * H}{t * b + B * H}$$

$$I_1 = \frac{b * t^3}{12} + \left[ \left( e - \frac{t}{2} \right)^2 * t * b \right]$$

$$I_2 = \frac{B * H^3}{12} + \left[ \left( e - \left( \frac{H}{2} + t \right) \right)^2 * B * H \right]$$

Sedan tidigare har plåtrutans höjd  $b$  och dess bredd  $a$  på grund av avståndet mellan grövre balkar bestämts som  $a=2b$  vilket vi ur tabell fått värdet på konstanten  $\beta_1$  till 0,4974 . Det vi nu söker är för vilket tryck  $a=b$  med den då ändrade värdet på konstanten  $\beta_1$  till 0,3078 (se tidigare redovisad tabell 4.1) . Detta ger två olika tryck. Högsta tillåtna trycket kan bestämmas enligt ekvation (4.4)

$$q = \frac{\sigma_{max} * t^2}{\beta_1 * b^2}$$

Sedan tidigare har vi erhållit  $b$  och  $a=2*b$ , där  $\beta=0,4974$  enligt

$$b = \left( \frac{\sigma_{max} * t^2}{\beta_1 * q} \right)^{1/2}$$

$$a = 2 \left( \frac{\sigma_{max} * t^2}{\beta_1 * q} \right)^{1/2}$$

Vi söker trycket då nya kvadratiska plåtrutans höjd  $b$  är lika stor som gamla plåtrutans  $a$ , vilket även ger  $\beta_1=0,3078$  som insätts i ekvation (1) ger  $q_{fördubbling}$  enligt

$$q_{fördubbling} = \frac{\sigma_{max} * t^2}{0,3078 * b^2}$$

$$q_{fördubbling} = \frac{\sigma_{max} * t^2}{0,3078 * \frac{4 * \sigma_{max} * t^2}{0,4974 * q}} \quad \text{som efter förkortning ger}$$

$$q_{fördubbling} = 0,4q$$

Trycket  $q$  utgörs av trycket från askan samt luftrycket 8700 Pa från rökgasfläktarna fås trycket

$$q_{fördubbling} = 0,4 * \rho * g * h_{panel} + 3480 \text{ Pa}$$

Vi söker på vilken längd detta sker.

Dimensionering sker enligt tidigare för drift där askans densitet är  $600 \text{ kg/m}^3$ , Luftrycket 3480 Pa motsvarar då här trycket för aska motsvarande 0,591 m enligt

$$q_{fördubbling, luftryck} = 3480 = \rho * g * h \rightarrow h = \frac{3480}{600 * 9,81} = 0,591 \text{ m}$$

den trubbigaste fallvinkeln på askfickan som accepteras är  $60^\circ$ . Detta ger att höjden 0,591 m motsvarar 0,682 m i längdled enligt

$$längden = \frac{0,591}{\sin 60^\circ} = 0,682 \text{ m}$$

$$q_{fördubbling, askans tryck} = \rho * g * 0,4 * h_{panel}$$

Då  $h_{panel}$  och längden  $l$  på askfickans långsida är direkt proportionell mot varandra sker detta på  $0,4 * l$ .

Detta innebär att plåtrutans höjd  $b$  kan fördubblas efter  $0,4 * l + 0,682 \text{ m}$ .



### Appendix 3

Spänning fritt upplagd balk.

Då vissa balkar ses som fritt upplagda fås böjmomentet i dessa med hjälp av elastiska linjens differentialekvation [2].

$$\{EI(x)w''(x)\}' = q(x)$$

Där  $q(x)$  är den utbredda linjelasten.

Då  $EI$  är konstant fås:  $w''''(x) = q(x)$

Homogena lösningen erhålls genom integrering i fyra steg:

$$EIw'''(x) = qx + C_1$$

$$EIw''(x) = q\frac{x^2}{2} + C_1x + C_2$$

$$EIw'(x) = q\frac{x^3}{6} + C_1\frac{x^2}{2} + C_2x + C_3$$

$$EIw(x) = q\frac{x^4}{24} + C_1\frac{x^3}{6} + C_2\frac{x^2}{2} + C_3x + C_4$$

Där böjmomentet fås som andraderivatatan. Randvillkor för fritt upplagd balk

$$w(x) = 0$$

$$w(L) = 0$$

$$-EIw''(0) = M(0) = 0$$

$$-EIw''(L) = M(L) = 0$$

Konstanterna  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  och  $C_4$  blir med givna randvillkor

$$w''(0) = C_2 \quad \rightarrow \quad C_2 = 0$$

$$w''(L) = q\frac{L^2}{2} + C_1L = 0 \quad \rightarrow \quad C_1 = -\frac{qL}{2}$$

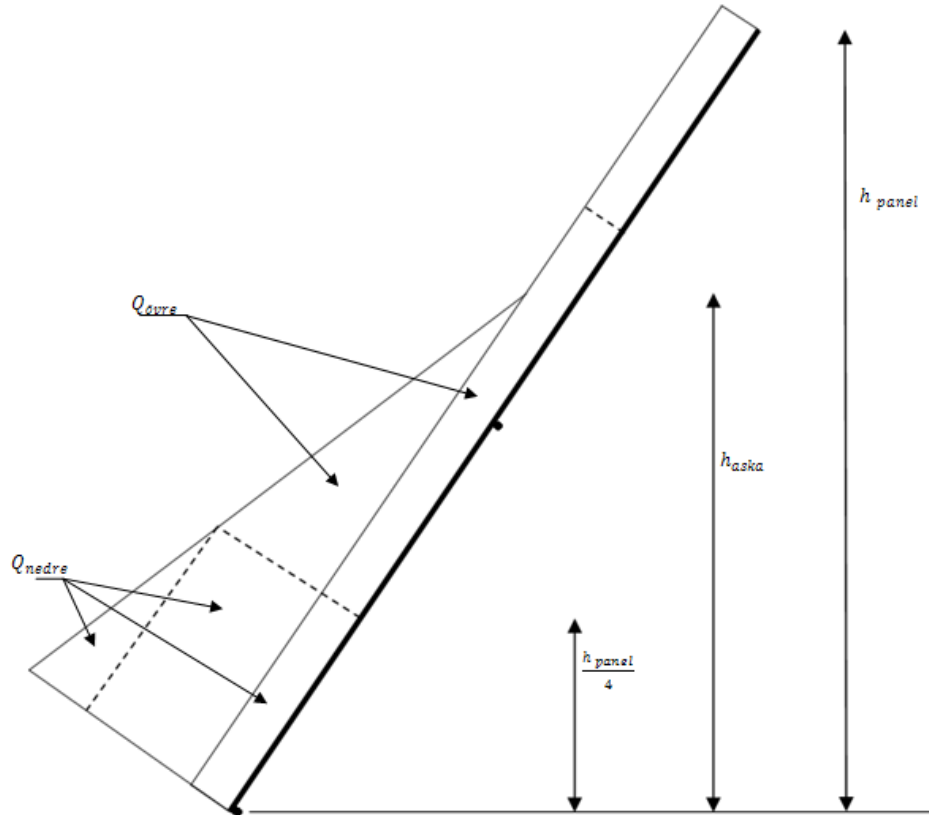
$$w(0) = C_4 = 0 \quad \rightarrow \quad C_4 = 0$$

$$dw(L) = \frac{qL^4}{24} - \frac{qL^4}{12} + C_3 L = 0 \quad \rightarrow \quad C_3 = \frac{qL^3}{24}$$

Böjande momentet M fås som  $EIw''\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{qL^2}{8}$

## Appendix 4

Last på grund av aska och lufttryck.

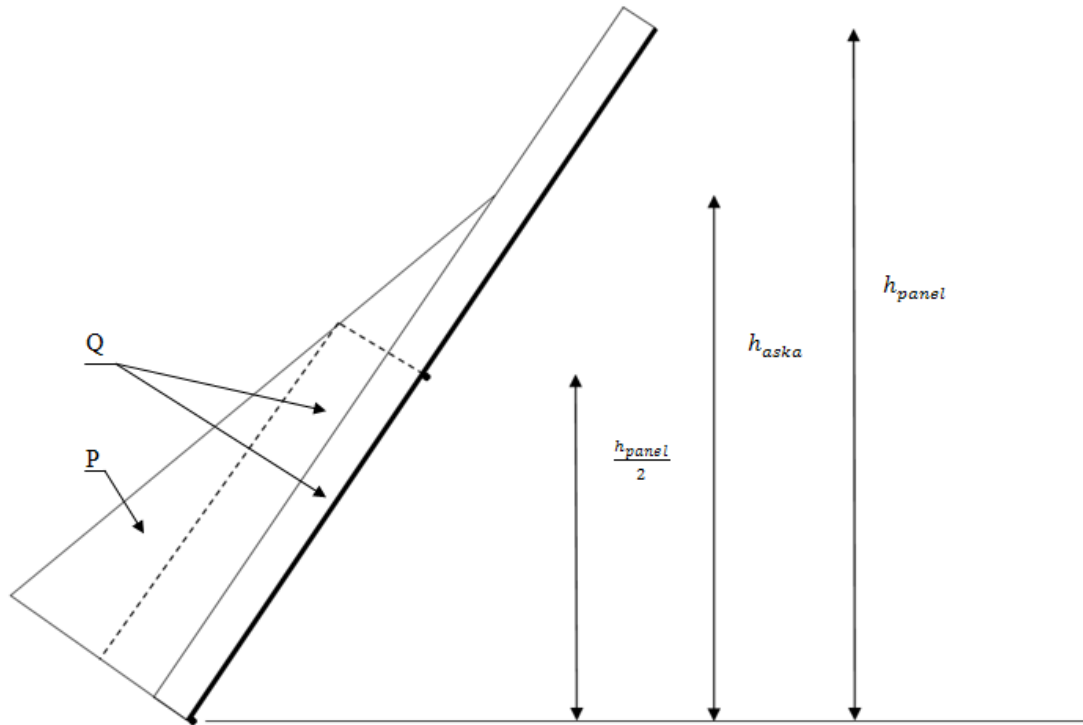


$$Q_{\text{ovre}} = \left( q_{\text{luft}} + \rho g \left( h_{\text{aska}} - \frac{h_{\text{panel}}}{4} \right) * \frac{1}{2} \right) A_{\text{ovre}}$$

$$Q_{\text{nedre}} = \left( q_{\text{luft}} + \frac{1}{2} \rho g \frac{h_{\text{panel}}}{4} + \rho g \left( h_{\text{aska}} - \frac{h_{\text{panel}}}{4} \right) \right) A_{\text{nedre}}$$

## Appendix 5

Last på grund av aska och lufttryck.

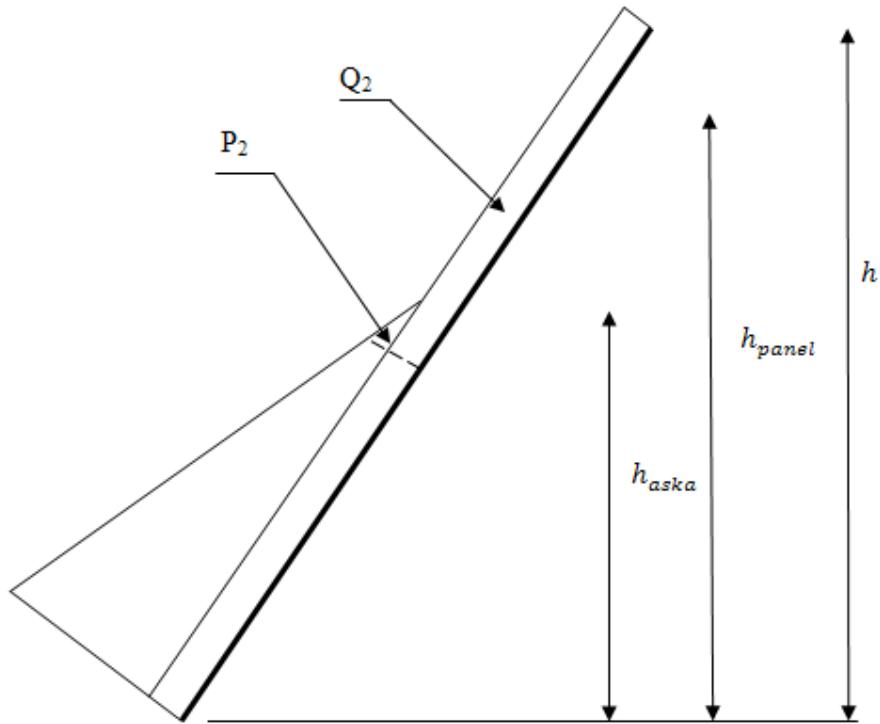


$$P = \frac{1}{2} \rho g \left( \frac{h_{panel}}{2} \right) A$$

$$Q = \left( q_{luft} + \rho g \left( h_{aska} - \frac{h_{panel}}{2} \right) \right) A$$

## Appendix 6

Last på grund aska och lufttryck.

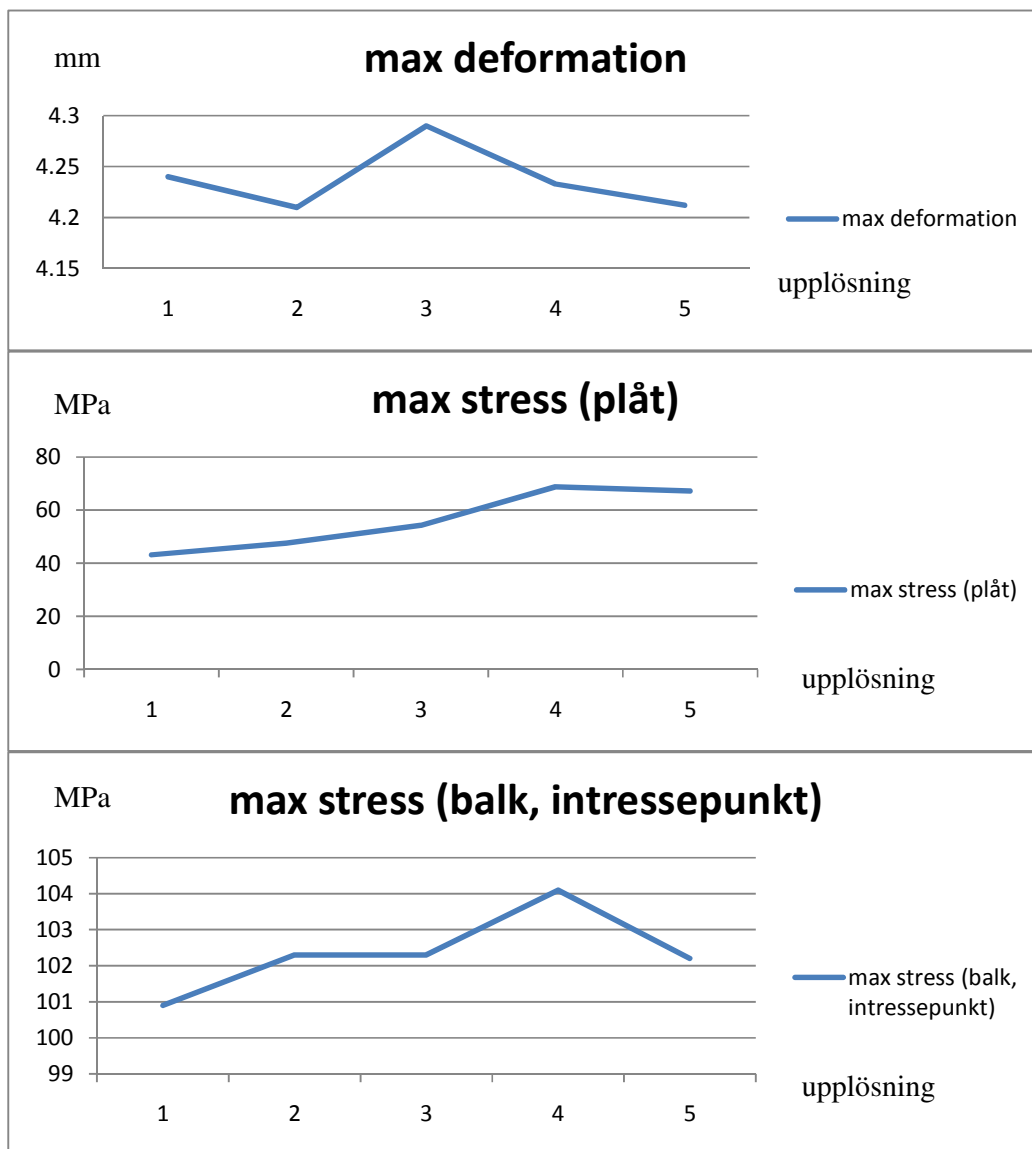


$$P_2 = \left( h_{aska} - \frac{h}{2} \right) * \frac{1}{2} \rho g \left( \frac{h_{aska} - \frac{h}{2}}{\sin \alpha} \right) * 3a$$

$$Q_2 = q_{luft} \frac{l}{4} 3a$$

## Appendix 7

Konvergens för en mindre askfickorna (1,5x2,5m) som modellerades kontrollerades med fem olika inställningar för elementantal (där 1=minsta antalet element och 5=max antal element). Utfallen för 300°C illustreras i följande diagram och får ses som representativ för askfickor av denna storlek:



Som kan utläsas av diagrammen är konvergens inte självklar. En tolkning är ändå att eftersom resultatvärdenas riktningskoefficient ändrar tecken och kurvan planar av, så ligger målvärdet inom rimliga gränser för elementantalet som motsvaras av värdet 5 (som är det elementantal vi använt oss av).

## Appendix 8

I våra modeller uppkom problemet med samspel, särskilt i de som var stagade, då stagen ”slöt cirkeln”. Spänning i stagen på grund av att HEA-balkarna vred sig, dessa påverkas i sin tur av ett vridande moment som utgörs av lasten som bärs upp av IPE-balkar samt plattjärn och plåt, dessa påverkas i sin tur av randvillkor där HEA-balkar ingår.

Då samspelseffekter påverkar dimensionering av samtliga balkar bör dessa undersökas för att få tillförlitlighet i verktyget samt ta reda på signifikanta effekter. Detta bör göras med så kallad försöksplanering[6], en klar fördel i Metsos fall är att hänsyn till störningar inte behöver tas då det rör sig om modelleringar. Att enbart variera en faktor i taget kan/bör ge mycket missvisande resultat. Förslag på signifikanta faktorer visas nedan.

- A HEA-balk övre
- B HEA-balk nedre
- C Stag nedre
- D Stag övre
- E IPE-balk
- F Plattjärn

Dessa undersöks för låg (-) och hög(+) nivå (storlek i detta fall) vilket resulterar i  $2^6 = 64$  försök med avseende på spänningskoncentrationer, där en matris bör sättas upp för viktning ur ekonomiskt och tillverkningsmässiga aspekter. Det bör beaktas att om ytterligare en faktor kommer in exempelvis temperatur, storlek på askficka eller förhållande mellan långsidor, gavel och höjd resulterar detta i 128 försök.

Vill man reducera antal försök kan detta göras med en så kallad generator, man får då inte fullständig upplösning. Enklare sällning görs för att ta reda på vilka samspelseffekter som har liten inverkan (oftast mångfaktorsamspel). Man får en generator för varje reducering som sedan används för att få fram reducerade icke-modellerade värden. En sådan fås för ett betydligt mindre trefaktorförsök ( $2^3 = 8$ ) enligt nedan.

Nr	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Y=σ
1	-	-	-	+	+	+	-	Y <sub>1</sub>
2	+	-	-	-	-	+	+	Y <sub>2</sub>
3	-	+	-	-	+	-	+	Y <sub>3</sub>
4	+	+	-	+	-	-	-	Y <sub>4</sub>
5	-	-	+	+	-	-	+	Y <sub>5</sub>
6	+	-	+	-	+	-	-	Y <sub>6</sub>
7	-	+	+	-	-	+	-	Y <sub>7</sub>
8	+	+	+	+	+	+	+	Y <sub>8</sub>

En effekt som antas vara låg väljs. Tar man bort samspelet ABC så reduceras matrisen till  $2^{3-1} = 4$  försök

Nr	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Y=σ
2	+	-	-	-	-	+	+	Y <sub>2</sub>
3	-	+	-	-	+	-	+	Y <sub>3</sub>
5	-	-	+	+	-	-	+	Y <sub>5</sub>
8	+	+	+	+	+	+	+	Y <sub>8</sub>

Effekten HEA-balken påverkar med beräknas nu som  $l_A = \frac{Y_2+Y_8}{2} - \frac{Y_3+Y_5}{2}$

Effekten för samspelet BC (HEA-balk och undre stag)  $l_{BC} = \frac{Y_2+Y_8}{2} - \frac{Y_3+Y_5}{2}$

Det vill säga att effekten för A är samma som BC, BC utgör då ett alias till A. Som synes är AB samt BC alias för övriga enskilda faktorer. Man får följande möjliga generatorer A=BC, B=AC och C=AB. Enskilda faktorerers effekt blandas här med samspelta effekter vilket är resultatet av en reduktion från 8 till 4 försök. Då dessa effekter är viktiga bör man inte gå lägre än en upplösning fem. Denna avgörs av hur många alias generatorerna man väljer kan genera.



# Appendix 9

## Programgränssnitt

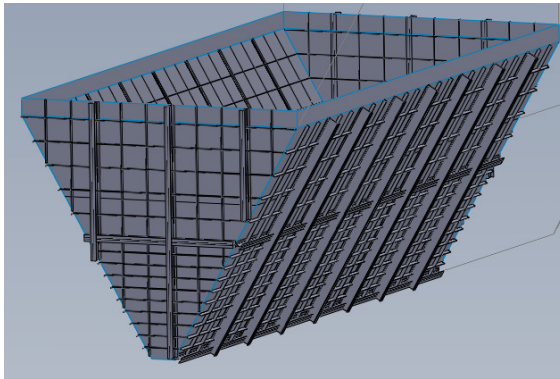
	A	B	C	D	E	F	G	H
6	vinkel $\alpha$ [grader]	60						
7	höjd panel [m]	2,5						
8	bredd transportör (TB) [m]	0,5			sektion 7: Utdata till katalog			
9	utböjningskrav (mågon längd/B9)	600			yttröghetsmoment, I, övre horisontell balk [10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> ]	3172,053455		
10	densitet aska [kg/m <sup>3</sup> ]	600			yttröghetsmoment, I, nedre horisontell balk [10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> ]	2320,331852		
11	tillåten spänning, plåt [Pa]	153000000			yttröghetsmoment, I, vertikal balk [10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> ]	986,4118198		
12	tillåten spänning, balk [Pa]	166000000						
13	plåtjocklek [m]	0,005						
14	E-modul för stål [Pa]	1,85E+11						
15	tryck nu: ctrl+m				Wb (böjmoment) horisontell övre balk [10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> ]	168,1815035		
16					Wb (böjmoment) horisontell nedre balk [10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> ]	123,0234311		
17					Wb (böjmoment) vertikal balk [10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> ]	152,3046082		
18	sektion 2: Utdata							
19								
20	kontroll $\beta$ , KRAV: $\beta \geq 60^\circ$ [grader]	81,13427126	OK!					
21	avstånd mellan horisontella plattjärn dubblas vid [m]:	2,085640646			sektion 8: skriv in katalogvärden här			
22								
23	inspänd plåtöva höjd [m]	0,560524551			vikt per meter, katalog, horisontell balk övre	42,3		
24	inspänd plåtöva bredd [m]	1,121049102			vikt per meter, katalog, horisontell balk nedre	35,5		
25	avstånd mellan vertikal balk [m]	3,363147305			vikt per meter, katalog, vertikal balk	22,4		
26					tvärsnittsarea, katalog, vertikal balk	2848		
27	sektion 3: Utdata baserade på: cell 8							
28								
29	spänning horisontell övre balk	47,84598044	OK!					
30	spänning horisontell nedre balk	46,30813959	OK!		Wb katalog horisontell balk övre	389		
31	spänning vertikal balk	86,88166654	OK!		Wb katalog horisontell balk nedre	294		
32					Wb katalog vertikalbalk	194		
33	spänning gavel, infästning mot panna [MPa]	4,435248846	OK!					
34								
35	sektion 4: Dimensionering plattjärn				sektion 9: Övrig utdata (används endast av programmet/excel-bladet)			
36								
37	bredd plattjärn [m]	0,01			höjd gavel sida / 2	1,732050808		
38	höjd plattjärn [m]	0,2			area påverkan HEA_övre	5,825142006		
39					area påverkan HEA_nedre	2,912571003		
40	I, yttröghetsmoment för plattjärn (med ovan angivna mått) [10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> ]	1893,457843	OK!		kraft, Q ( area påverkan Horisontell_övre)	66409,53144		
41	minsta krävda yttröghetsmoment vid val av plattjärn [10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> ]	333,5197745			kraft, Q ( area påverkan Horisontell_nedre)	48578,04361		
42	spänning i plattjärn (med ovan angivna mått) [MPa]	82,58630336	OK!		kraft, Q (vertikal balk)	56399,0249		
43	tillåten spänning, plattjärn [MPa]	110,6666667						
44								
45	sektion 5: Dimensionering innerstag							
46					kraft, P (vertikal balk)	21451,08544		
47	tvärsnittshöjd, innerstag övre [m]	0,15			kraft på plattjärn [N]	34912,54524		
48	>>> tvärsnittsbredd, innerstag övre [m]	0,021729289			e, plattjärn-plåt	0,04518501		

## Appendix 10

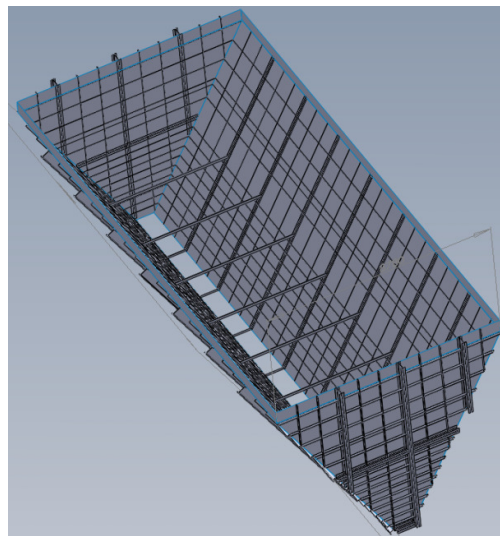
# Användarmanual excelprogram dimensionering

## askficka

Principen för askfickans konstruktion är enligt (figur 1) och (figur 2). Vid varje vertikal balk sätts i regel ett innerstag (se fig 2) i nivå med övre stor horisontell balk. På askfickor av mindre format kan vertikal balk utgå och då även innerstag.



*Fig. 1*



*Fig. 2*

Plattjärn placeras med de mått programmet ger. Observera att avståndet mellan horisontella plattjärn ökar med faktorn två vid ett specifikt avstånd ifrån askfickans botten. Detta avstånd ger programmet. Se avsnitt: Ökat avstånd plattjärn.

**OBS!** Makron behöver vara aktiverade i Excel. Om detta inte är fallet så kommer det upp en varningsskylt när ett makro anropas. Välj då att aktivera makron! Man vet att makron inte är aktiverade om kommandot ctrl+m (se nedan i denna manual) inte får någon effekt.

**OBS 2!** Börja med att kontrollera "Sektion 6: Förinställda indata" (nedan)

## Sektion 1: Indata

bredd, gavel (B) [m]

längd, långsida (L) [m]

höjd, gavel (h) [m]

vinkel  $\alpha$  [grader]

höjd panel [m]

bredd transportör (TB) [m]

utböjningskrav (längden/B9), t.ex. L/500

densitet aska [kg/m<sup>3</sup>]

tillåten spänning, plåt [Pa]

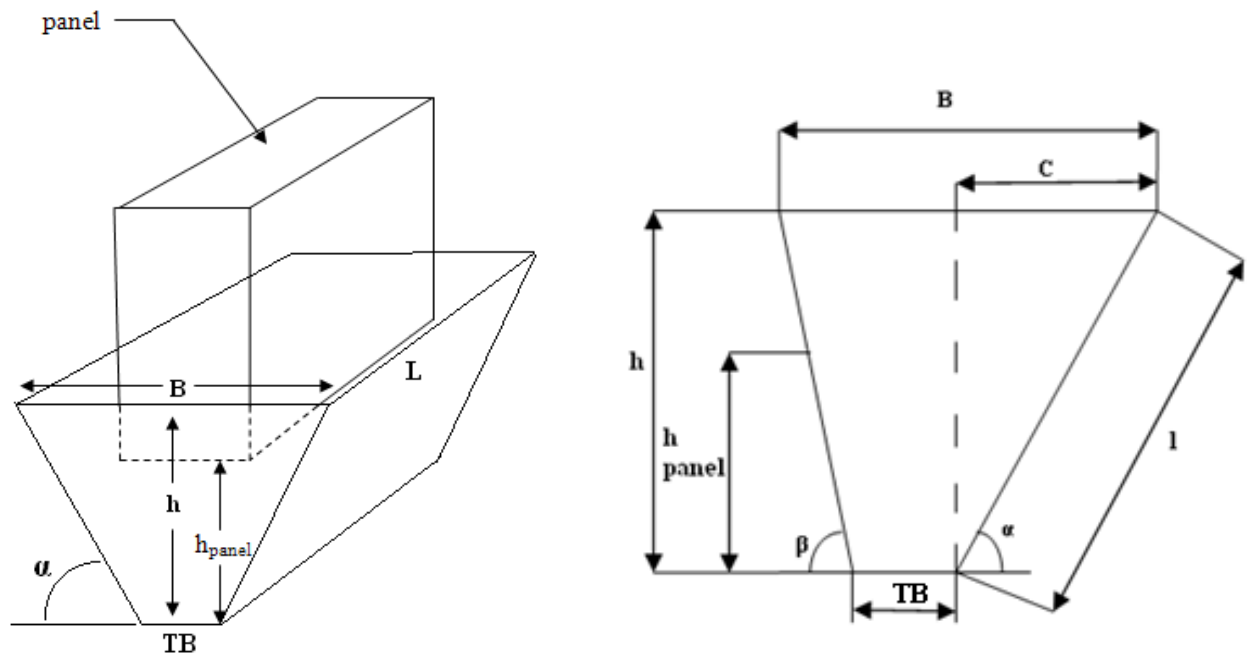
tillåten spänning, balk [Pa]

plåttjocklek [m]

E-modul [Pa]

De uppgifter som står under " Sektion 1: Indata" anges först vid körning av programmet.

Tryck därefter ctrl+m. Observera att E-modul och tillåtna spänningar är olika beroende på vilken temperatur som råder. Tabeller för dessa fås av Metso.



## Sektion 2: utdata

### Vinkeln $\beta$

Programmet ger vinkeln  $\beta$  vilken ej får vara mindre än  $60^\circ$ . Om  $\beta$  är mindre än  $60^\circ$ , är det något med geometrin som inte går ihop, och en eller flera av följande parametrar måste ändras: TB, h, eller vinkeln  $\alpha$ . Programmets utdata: **kontroll  $\beta$ , KRAV:  $\beta \geq 60^\circ$  [grader]**. En varningstext kommer om inte villkoret uppfylls.

### Ökat avstånd plattjärn

Avståndet mellan horisontella plattjärn dubblas efter ett visst avstånd (röd pil i fig. 3) ifrån nedre balk. Detta avstånd ges i programmet som utdata: **avstånd mellan horisontella plattjärn dubblas vid [m]**. Detta sker ofta efter ungefär halva l.

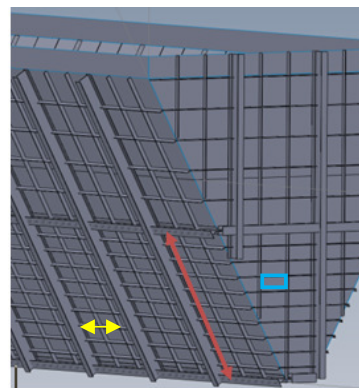


Fig. 3

### Plåtyta

Avståndet a och b för plåtyta. Programmets utdata: **inspänd plåtyta bredd [m]** och **inspänd plåtyta höjd [m]**. Dessa värden anger således avstånd mellan horisontella och vertikala plattjärn. (En "plåtyta" illustreras med blått i fig. 3)

### Avstånd vertikalbalk

Avståndet mellan vertikala balkar är tre "plåtytebredder" (gul pil i fig. 3). Programmets utdata: **avstånd mellan vertikal balk**. Om detta avstånd överstiger askfickans totala längd utgår de vertikala balkarna. Programmet anger om vertikala balkar utgår.

## Sektion 7: utdata till katalog

Programmet ger här yttröghetsmoment  $I$  och böjmotstånd  $W_b$  för samtliga balkar. Välj balkar ur Tibnors katalog. I katalogen benämns  $I$  som  $I_x$  och  $W_b$  som  $W_x$ . **OBS!** Både  $I_x$  och  $W_b$  för de balkar som väljs måste vara större än, eller lika med de värden som anges i sektion 7.

## Sektion 8: skriv in katalogvärdena här

$W_x$  och  $I_x$  som lästes av i katalogen matas in här för varje balk. Läs av och mata även in följande katalogvärden: vikt per meter för samtliga balkar och tvärsnittsarea för vertikal balk.

## Sektion 3: utdata baserade på: sektion 8

Nu kontrolleras spänningen för de valda balkarna. Programmet anger om spänningen är ok eller inte. Detta är enbart en kontroll och alla dessa bör visa "ok" om rätt data angivits hittills. Om något inte anges med "ok" – se över tidigare angivna och dimensionerade värden.

## Sektion 4: dimensionering plattjärn

### Plattjärn

Plattjärnen provas fram "manuellt". Förslag på tvärsnittshöjd och bredd matas in som: **bredd plattjärn** och **höjd plattjärn**. Programmet ger utdatan (under): **yttröghetsmoment för plattjärn (med ovan angivna mått)** och **spänning i plattjärn (med ovan angivna mått)**.

Dessa får ej överstiga utdatan: **minsta krävda yttröghetsmoment plattjärn vid val av plattjärn** och **tillåten spänning plattjärn** (röd text i programmet) . Programmet anger om villkoren uppfylls eller inte. 2 st "ok" = allt är ok!

## **Sektion 5: Dimensionering innerstag**

### **Innerstag**

Innerstagen är plattstänger. Förslag på tvärsnittshöjd matas in i programmet som:

**tvärsnittshöjd, innerstag övre [m]** och **höjd, innerstag nedre [m]**. Programmet ger då

utdatan: >>> **tvärsnittsbredd, innerstag övre [m]** och >>> **bredd, innerstag nedre [m]**.

Observera att dessa inte "kan anges fel", bredden som utmatas anpassas efter höjden och ger därför ett tillräckligt stort plattjärn.

## **Sektion 6: Förinställda indata**

Här kan säkerhetsfaktor, korrektionsfaktorer och trycket ifrån rökgsläktarna ändras vid behov. OBS! Dessa skall vid ändring anges innan första indatan anges!

## **Sektion 9: Övrig utdata**

Detta är olika värden på delberäkningar som programmet använder. Ändra inget i dessa.

## Exempel på användning av programmet:

Dimensionerar en askficka enligt bild:

$$B = 2,7\text{m}$$

$$L = 6\text{m}$$

$$h = 3\text{m}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$h_{\text{panel}} = 2,5\text{m}$$

$$TB = 0,5\text{m}$$

$$\text{densitet aska} = 600\text{ kg/m}^3$$

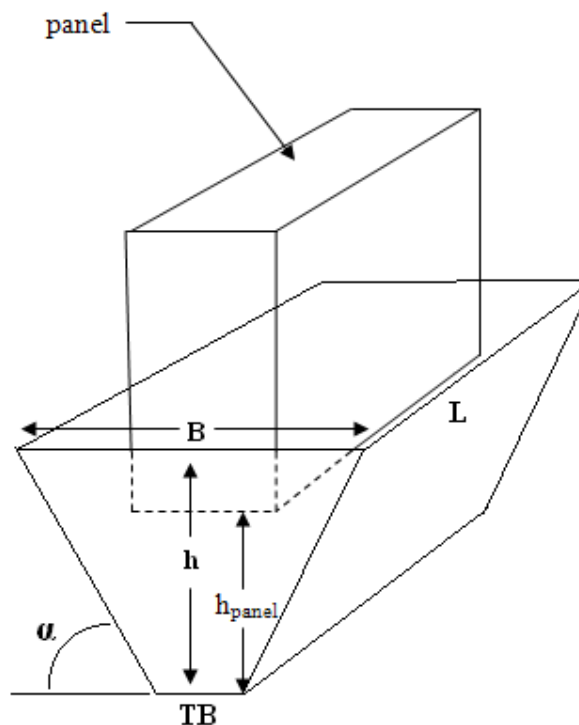
$$\text{utböjningskrav} = 500$$

$$\text{tillåten spänning, plåt} = 153\text{ MPa}$$

$$\text{tillåten spänning, balk} = 166\text{ MPa}$$

$$\text{plåttjocklek} = 0,005\text{m}$$

$$E\text{-modul} = 185\text{ GPa}$$



(0. Vi gör inget med sektion 6 då förinställda värden redan stämmer för detta fall)

1. Skriv in indata (ovan) i programmets del "sektion 1:indata".
2. Utböjningskravet har oftast ett standardvärde på Metso runt  $\text{längd}/500$ . Andra värden kan dock vara aktuella, Metso har isf detta värde.
3. Densiteten för askan i detta exempel  $600\text{kg/m}^3$ .
4. Eftersom askfickan ska sitta på en panna där temperaturen uppgår till  $300^\circ\text{C}$ , så behöver vi ta reda på E-modulen för stålet vid den temperaturen. Denna fås via lista från Metso. I vårt

fall är E-modulen = 185 GPa. OBS! Denna anges i [Pa]. Värdet som skrivs i programmet är alltså 185000000000.

5. "Tillåten spänning, plåt [pa]" och "tillåten spänning, balk [pa]", beror också på temperaturen och behöver nu anges. Dessa finns också på listor som Metso har. I vårt fall så är

Tillåten spänning, plåt [pa] = 153 MPa

Tillåten spänning, balk [pa] = 166 MPa

OBS! Dessa anges i [Pa]. Värdet som skrivs i programmet är alltså 153000000 och 166000000.

6. Tryck nu ctrl+m. Detta är ett snabbkommando för att aktivera ett inbyggt makro (programkod som löser en nödvändig 4e-gradsekvation för att beräkna läge för maximal utböjning i balk)

OBS! Den data som kan komma att hamna i fokus på skärmen vid aktivering av makrot behöver inte röras utan används endast av programmet för att ta fram vidare data.

7. Följande utdata i "sektion 2" skall nu ha fått värden och blir för vårt exempel:

kontroll  $\beta$ , KRAV:  $\beta \geq 60^\circ$  [grader]

81,13427126

avstånd mellan horisontella plattjärn dubblas vid [m]:

2,085640646

inspänd plåtyta höjd [m]

0,560524551

inspänd plåtyta bredd [m]

1,121049102

avstånd mellan vertikal balk [m]

3,363147305



## 8. Vi får följande värden under "sektion 7"

yttröghetsmoment, I, övre horisontell balk [ $10^4 \text{ mm}^4$ ]	3172,053455
yttröghetsmoment, I, nedre horisontell balk [ $10^4 \text{ mm}^4$ ]	2320,331852
yttröghetsmoment, I, vertikal balk [ $10^4 \text{ mm}^4$ ]	986,4118198
Wb (böjmotstånd) horisontell övre balk [ $10^3 \text{ mm}^3$ ]	168,1815035
Wb (böjmotstånd) horisontell nedre balk [ $10^3 \text{ mm}^3$ ]	123,0234311
Wb (böjmotstånd) vertikal balk [ $10^3 \text{ mm}^3$ ]	152,3046082

I detta exempel väljer vi övre horisontell balk som HEA 200, nedre horisontell balk som HEA 180 och stående vertikal balk som IPE 200. Dessa balkar klarar kraven ovan.

## 9. Vi skriver in datan för de valda balkarna under "sektion 8":

vikt per meter, katalog, horisontell balk övre	42,3
vikt per meter, katalog, horisontell balk nedre	35,5
vikt per meter, katalog, vertikal balk	22,4
tvärsnittsarea, katalog, vertikal balk	2848
Wb katalog horisontell balk övre	389
Wb katalog horisontell balk nedre	294
Wb katalog vertikalbalk	194

10. Vi ser i detta exempel 4st "ok" under sektion 3 och går vidare till nästa punkt..

11. Nu skall plattjärn dimensioneras under sektion 4. Vi uppskattar (gissar) att ett 10x100mm plattjärn kommer att vara lagom. Vi skriver in dessa mått i **bredd plattjärn[m]** och **höjd plattjärn [m]**. Vi ser i rutan under att detta kommer att ge ett yttröghetsmoment på  $287 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ . Vi ser också under att detta inte är tillräckligt ( $333 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$  krävs..).

Plattjärnet klarar inte heller kravet om spänningen (cellerna under) och vi ser även här att det inte är tillräckligt stort.

OBS! Både yttröghetsmoments, och spännings-värdena måste vara OK för att plattjärnen ska vara tillräckliga (I regel är det spänningen som är dimensionerande).

Vi väljer istället ett plattjärn 10\*200 som vid samma jämförelse ger OK värden.

bredd plattjärn[m]            0,01

höjd plattjärn [m]            0,2

12. Nu skall stagbalkar dimensioneras i 5. Anger tvärsnittshöjd, stagbalk övre [m] till 0,15m. Vi ser då (i rutan under) att tvärsnittsbredden behöver vara ca 0,022m. Vi väljer således ett 25x150mm plattjärn (som finns i Tibnor-katalogen)

Samma procedur för nedre innerstag.

13. Sektion 9 skall aldrig röras.