

Grundlæggende støberiteknologi: Design og beregning af indløbssystemer til vertikal formning

Af Herbert Wolthorn, STØBERIET

Indledning

Design og beregning af indløbssystemer har altid været en vanskelig opgave, der tidligere hovedsageligt var baseret på støberiteknikerens kundskaber og erfaring. I dag findes forskellige computerbaserede systemer, der ikke alene kan beregne og designe et indløbssystem, men også simulere, hvordan det sandsynligvis kommer til at virke i praksis. Ikke desto mindre er der fortsat brug for at kunne designe og beregne et indløbssystem uden brug af disse computerbaserede programmer. Ikke alene har ikke alle støberier tilgang til disse computerprogrammer, men optimal anvendelse af disse programmer kræver både en teoretisk og praktisk viden om generel indløbsteknik.



Fig. 1: Vertikalt delt støbegods

Et indløbssystem kan være til håndformning eller maskinformning, hvor håndformning kan omfatte alt fra få kilo til mange tons støbevægt. Maskinformning begrænser sig til mere moderate støbevægte, normalt ikke over få hundrede kilo. Håndformning er næsten udelukkende med horisontalt delte forme, mens maskinformning kan være med horisontalt eller vertikalt delte forme (fig. 1). I denne artikel ligger fokus på vertikalt delte forme, men de grundlæggende teorier og praktiske tiltag gælder i stor udstrækning for alle typer indløbssystemer.

Energi i et indløbssystem

Et indløbssystem skal fordele det flydende metal fra en støbekop til et eller flere indløb, hvorfra det strømmer ind i formhulrummet. Dette fordelingsarbejde kræver energi, så der kan opnås et tilstrækkeligt tryk til at presse det smeltede metal ud i alle formhulrummets og eventuelle kernerens udsparinger. Ved trykstøbning fås energien fra et stempel, der trykker smelten i formen. Ved støbning fra toppen af formen opnås energien fra jordens tyngdekraft.

Begrebet energi omfatter forskellige betydninger, men i fysikken betyder det en egenskab til at udføre et stykke arbejde. Energi kan komme fra forskellige kilder, fx solen, atomkraft, olie og batterier, der kan danne hhv. solenergi, kerneenergi, kemisk energi og elektrisk energi.

Den energi, som findes under forskellige former, kan ikke forsvinde, men kan omdannes til en anden form for energi. En vindmølle omdanner således vindenergi til elektrisk energi, som så kan anvendes til en elbil, hvor den elektriske energi omdannes til bevægelsesenergi.

Fig. 2 viser et meget forenklet indløbssystem, hvor metallet hældes fra en støbeske i en støbekop, der via en støbetap er direkte forbundet til formhulrummet. I dette indløbssystem udgør den primære energikilde beliggenhedsenergi, som er den energi, som findes i støbekoppen under påvirkning af jordens tyngdekraft på metalmassen. Når metallet begynder at strømme ned ændres energiformen, da metallet i bunden af formen har en anden beliggenhed end metallet i støbekoppen. Beliggenhedsenergi kaldes også potentiel energi, fordi den altid er potentielt til stede. I et indløbssystem omdannes den potentielle energi i støbekoppen til bevægelsesenergi og tryk.

Hvad der strømnings- og energimæssigt foregår i et sådant enkelt indløbssystem kan vises med et simpelt vandforsøg.

Til forsøget anvendes en vandflaske uden bund, og hvor proppen har et hul. Med en haveslange fyldes flasken, og vandmængden tilpasses således, at der opstår et stabilt vandniveau i flasken (fig. 3). Nu svarer den tilførte vand-

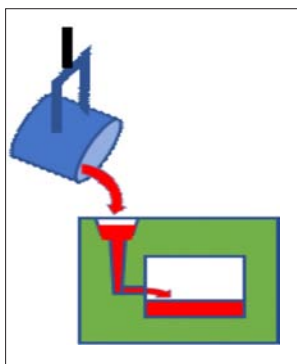


Fig. 2: Forenklet indløbs-system



Fig. 3: Simpelt vandforsøg

mængde fra haveslangen til den udstrømmende mængde fra hullet i proppen. At vandet strømmer ud fra hullet i flasken skyldes, at jordens tyngdekraft tiltrækker vandmassen. Vandet i flasken besidder derfor en potentiel energi. Bemærk at vandniveauet i flasken er stabilt, det vil sige det står stille i overfladen. Vandet der løber ud fra proppen har derimod en hastighed. Dette skyldes, at den potentielle energi er omdannet til bevægelsesenergi.

Nu åbnes vandhanen yderligere således vandet stiger til et nyt stabilt niveau. Da den tilførte vandmængde nu er blevet større må der strømme mere vand ud af proppen. Det kan kun lade sig gøre, fordi vandet har fået en større hastighed. Denne forøgelse af bevægelsesenergi skyldes, at den potentielle energi har ændret sig fra ét beliggenhedsniveau til et højere beliggenhedsniveau.

Den potentielle energi afhænger derfor af højden over et niveau, jordens tyngdekraft og væskens massefylde, og den defineres som ρgh , hvor ρ er væskens massefylde, g er tyngdeacceleration og h væskesøjleens trykhøjde.

I et indløbssystem svarer ρ til metalsmeltens massefylde, g er tyngdeacceleration i Danmark ($9,82 \text{ m/s}^2$) og trykhøjde h er højdeforskellen mellem støbekoppens væskniveau og bunden af indløbssystemet.

Da metallens massefylde for en given legering og tyngdeaccelerationen er konstante i et indløbssystem, kan man kun forøge systemets potentielle energi ved at øge afstanden mellem støbekoppen og bunden af indløbssystemet. Bemærk, at ved samme højde findes mere energi i jern end i aluminium da jern jo har en større massefylde end aluminium.

Vær opmærksom på sammenhængen mellem potentiel energi og tryk. Definitionen for tryk (p) er kraft/areal, der også svarer til $\rho \cdot g \cdot h$. Tryk ved konstant tyngdekraft bliver derfor ligeledes afhængig af massefylde og trykhøjde. Støbekoppens og støbetappens diameter har derfor ingen betydning for trykket. Dette svarer til, at det tryk, der føles på trommehinden 2 meter under vandet er det samme uanset om det opleves i en svømmehal eller en stor sø. Når vandet i flasken eller metallet i et indløbssystem be-

gynder at strømme bliver den potentielle energi omsat til bevægelsesenergi. Denne energi kaldes også kinetiske energi og defineres som $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ hvor m er massen og v er hastigheden. Masse er vægten af det, som strømmer eller bevæger sig. Dette forklarer helt enkelt, hvorfor der er bedre at blive ramt af en flue end af et tog. Hastighedens påvirkning kan dog fornemmes, når man kører på cykel og bliver ramt i hovedet af en flue. Bemærk, at energitilvæksten er proportionalt med massen, men den er proportional med kvadratet af hastigheden. En fordobling af hastigheden betyder således en firdobling af energien.

Vandet i fig. 3 strømmer ud af proppen med en vis hastighed, men på grund af tyngdekraften accelererer vandet fortsat og derfor øges hastigheden jo længere vandet kommer ned. Det er ikke nemt at se den tiltagende hastighedsforøgelse, men kan nemt konstateres med at hæve flaskens afstand til jorden. Da bliver plasket når vandet rammer jorden større.

Energiændringer i et indløbssystem

Et indløbssystem kan betragtes som et rørsystem, hvor der flyder en væske. I sin enkle form består dette rørsystem af en støbetab, en skummerende og indløb. Hvis vi antager at metallet er en ideal væske, det vil sige usammentrykkelig og strømmer uden friktion og hvirveldannelser, gælder kontinuitetsloven og Bernoullis princip i indløbssystemet.

Ifølge Kontinuitetsloven strømmer der lige så meget væske ind i et rør som der strømmer ud, selv om røret har varierende tværsnit. Det vil sige, at $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{konstant}$ (fig. 4), hvor A er et tværsnit i et strømningssystem og v hastigheden i pågældende tværsnit. Når tværsnitarealet bliver mindre bliver hastigheden tilsvarende større.

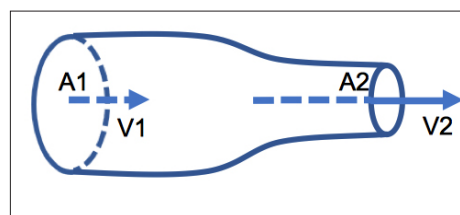


Fig.4: Kontinuitetsprincip

Bernoullis princip er opkaldt efter den nederlandske videnskabsmand Daniel Bernoulli (1700-1782), der opdagede en sammenhæng mellem bevægelse og tryk i en luftmasse, og at summen af trykenergi, kinetisk energi og potentiel energi er konstant.

$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{konstant}$, hvor p er trykenergien et givent sted i væsken, $\frac{1}{2}\rho v^2$ er den kinetiske energi, og ρgh er den potentielle energi

Det vil sige, at energi ikke forsvinder men omdannes til en anden energiform. Den potentielle og kinetiske energi i et indløbssystem er allerede omtalt. Trykenergien svarer i en luftig form til det atmosfæriske tryk.

Bernoullis ligning forklarer, hvorfor vandet kommer læn- gere, når man med fingeren kniber enden af en haveslange lidt sammen. Vand, der kommer ind skal, medmindre det kan ophobe sig et sted, også kunne komme ud, og derfor stiger hastigheden og trykket falder. Når man helt lukker haveslangen med en finger står vandet stille og trykket på fingeren stiger.

Kontinuitetsloven og Bernoullis ligning er baseret på teo- retiske forhold; i virkeligheden findes i et strømningssy- stem altid friktion og muligvis også hvirveldannelse, som nedsætter strømningshastigheden. Dette kan nemt kon- stateres ved at prikke nogle huller i en haveslange, hvor springvandet fra det første hul er betydeligt større end ved et hul længere væk. Lukker man derimod slangen bli- ver trykket i slangen ens, og der sprøjter tilnærmelsesvist lige meget ud af begge huller

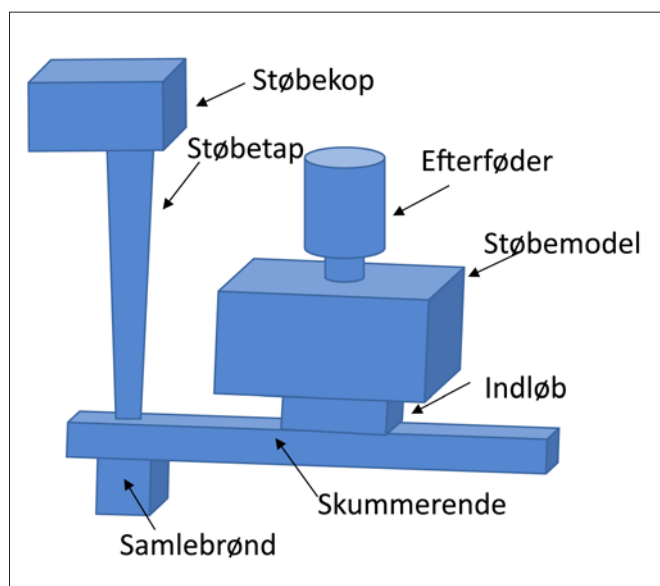


Fig. 5: Indløbssystem

Indløbssystemet

Et indløbssystem kan være så enkelt som en støbekop og støbetap, men normalt består et indløbssystem af flere dele, nemlig en støbekop, en støbetap, en samlebrønd, en skummerende samt indløb. Støbekoppen kaldes sommetider støbesoen, især når den er separat fremstillet og pla- ceres på formen. Støbekoppen er ofte en integreret del af en vertikalt delt form. I det følgende anvendes betegnelse støbekop, hvad enten der er tale om en so eller en kop. Støbetappen kaldes også for nedløbet og skummerenden for fordelingsrenden, især når den placeres opretstående i et vertikalt delt indløbssystem. Fig 5 viser skematisk et indløbssystem til en vertikalt delt form.

I et indløbssystem opstår ligeledes tryktab på grund af friktion og hvirveldannelse. Desuden er der forskel på et fuldt og ikke fuldt indløbssystem. Fig. 6 viser, hvad der sker, når skummerenden ikke holdes fyldt under støbnin- gen. I skummerendens ende bremser metalstrømmen, og strømningshastigheden nærmere sig nul. Trykket stiger

og derfor yder dette indløb mest. Ved det første indløb strømmer metallet fortsat, så trykket her er lavere, og dette indløb yder derfor mindre. Når skummerenden er blevet fyldt under støbningen, er trykket og dermed ind- løbsmængden i alle indløb praktisk talt ens. For at holde hele indløbssystemet fyldt under støbningen og dermed sikre ensartet indstrømning af flydende metal, skal for- holdene mellem støbekop, støbetap, skummerende og indløbenes arealer være afstemte.

Indløbssystemets arealforhold

Ved design og beregning af et indløbssystem tages ud- gangspunktet i systemets mindste tværsnitsareal. Dette såkaldte begrænsende tværsnitsareal eller choke befinder sig ofte i bunden af støbetappen, i indløbet eller et eller andet sted imellem. Indløbssystemet kan derfor sammen- lignedes med et rørsystem med forskellige tværsnitsarealer. Når det begrænsende tværsnitsareal er beregnet, skal den optimale placeringen samt tværsnitarealerne af syste- mets forskellige andre elementer bestemmes.

Indløbssystemet kan designes som et tryksat system eller trykløst system.

Tryksatte systemer har deres mindste tværsnitsareal i indløbet. Indløbene er ofte tynde, som gør det nemmere af fjerne godset fra indløbssystemet. En anden fordel er, at tryksatte systemer normalt er mindre i størrelse og vægt, og derfor forbedrer godsudbyttet. Den største ulempe er, at hastigheden er størst i indløbene.

Trykløse systemer har deres mindste tværsnitsareal i bunden af støbetappen. Fordelen er en reduceret hastig- hed i indløbene, hvilket giver mindre turbulens. Tryk- løse systemer bruges især ved legeringer, som oxideres let. Ulempen er en større risiko for, at slagge og oxider ikke holdes tilbage i indløbssystemet men strømmer med i formhulrummet. Der er dog mulighed for at bygge for- skellige former for slaggefang ind i indløbssystemerne.

Tværsnitsarealet for støbetap, skummerende og indløb benævnes A_s , A_r og A_i og til alle tider har man forsøgt at finde det optimale forhold.

I 1941 blev der taget patent på forholdet $A_s : A_r : A_i = 4 : 3 : 2$. Ideen var at sikre et konstant fuldt indløbssystem, der forhindrer medrivning af slagge, og med en bremsende virkning på metalstrømmen, der skal forhindre form- og kerneskader. Imidlertid er det ikke sikkert, at dette for- hold eller for den sags skyld et hvilket som helst andet forhold alene kan sikre, at systemet kan holdes fuldt un- der hele støbningen. Små ændringer i støbemetode, syste- mets trykhøjde eller friktionstab kan forstyrre balancen.

I et tryksat system anvendes ofte forholdet $A_s : A_r : A_i = 0,8-1,2 : 1-2 : 0,6$ og i et trykløst system $A_s : A_r : A_i = 1 : 1,1 : 1,2$. Som nævnt findes forslag til mange lignende for- hold, men normalt har hvert støberi sine egne erfarings- mæssigt baserede holdninger om de rigtige forhold.

Så længe systemet ikke er helt fyldt er der stor risiko for turbulente strømninger og medrivning af slagger, og derfor foretrækkes et så slankt system som muligt. Når systemet først er fyldt bliver fordelingen mellem de forskellige indløb mere ensartet jo større skummerendens tværsnitareal er. Desuden bliver hastigheden i skummerenden reduceret mere, jo større tværsnitsarealet bliver. Dette giver eventuelle slagger og oxider mulighed for at flyde op og blive tilbageholdt i toppen af skummerenden. I et trykløst system kan indløbene ligge i toppen af en skummerende, og i så fald kan det være vanskeligt at tilbageholde alle slagger effektivt; derfor bliver sådanne indløbssystemer ofte filtreret.

Aspiration i et indløbssystem

Aspiration opstår, når trykket i indløbssystemet bliver mindre end det atmosfæriske tryk og der kan indsuges luft fra formen. Ethvert kornbaseret formmateriale har en vis luftighed, som gør at gasser og dampe fra metalstrømmen kan undslippe gennem formen. Under opvarmning af formen dannes også gasser og dampe fra formens indhold af fugt og organiske bindemidler, og deres tryk kan blive betydeligt højere end det atmosfæriske tryk i systemet. I så fald aspireres formens gasser i indløbssystemet og kan reagere med metalstrømmen og danner oxider og gasbobler.

Når metalstrømmens hastighed tiltager bliver trykket mindre, og risikoen for aspirationen tiltager.

Når et indløbssystem skifter retning eller tværsnit kan væskestrømmen ikke pludselig ændre retning, men forsøger at fortsætte i den oprindelige retning.

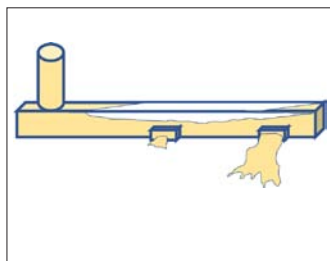


Fig. 6: Uens udstrømning

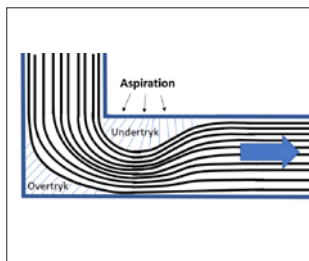


Fig. 7: Vena contracta og aspiration

Fig. 7 viser, hvordan metalstrømmens presses sammen for at kunne skifte retning. Dette forårsager, at metalstrømmen skilles fra siderne. Det mindste tværsnit, som herved opstår, kaldes vena contracta, og her medfører den øgede hastighed et trykfald, som øger risikoen for aspiration.

Turbulente strømninger

Når metallet strømmer, er en del af trykenergien omsat i bevægelsesenergi. Metalstrømmen i indløbssystemet til indløbene opstår derfor som følge af enten tryk- eller bevægelsesenergi. Når metalstrømmens hastighed bliver for stor bliver strømmen turbulent. En turbulent strømning

danner hvirvler, som kan medføre oxiddannelse, slaggeindslutninger og formerosion.

Reynolds tal bruges til at vurdere om en strømning i et rørsystem er laminar eller turbulent. Tallet er opkaldt efter den britiske fysiker Osborne Reynolds (1842-1912). Reynolds tal defineres som $R = \rho \cdot D \cdot v \cdot 1/\eta$, hvor ρ er væskens densitet (ρ), v hastighed og η dynamisk viskositet. D er rørets diameter eller en tilsvarende værdi for andre tværsnit. Turbulens optræder når tallet ligger mellem 2000 og 5000.

Ved hjælp af Reynolds' tal har man beregnet, at turbulente strømningen i indløbssystemer kan undgås, hvis metalhastigheden holdes under en vis værdi. For det fleste metaller ligger den kritiske værdi i området 0,5 – 1 m/s, hvilket kan være vanskeligt at overholde i praksis.

En beregning af Reynolds' tal kan være temmelig kompliceret og kan for den praktiske støberitekniker virke formålsløst. Imidlertid kan det somme tider være gavnligt at beregne Reynolds' tal, fx når der optræder formerosion. Er tallet under 2000 skyldes erosion ikke turbulens men har andre årsager såsom sand med for lavt indhold af bentonit, for stor andel af fint, for varmt sand etc.

Indløbssystemets begrænsende tværsnitsareal

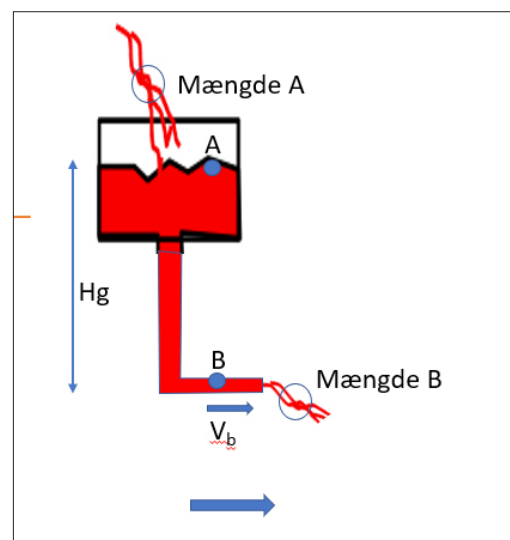


Fig. 8: Forenklet indløbssystem

Fig. 8 viser skematisk et forenklet indløbssystem, hvor det mindste areal findes i indløbet. Dette areal kaldes det begrænsende tværsnitsareal eller choke. Det begrænsende areal kan ligge hvor som helst i systemet og danner grundlaget for alle indløbsberegninger.

Hvis metalniveauet under støbning holdes konstant findes i punkt A trykhøjden H og hastigheden nul (metalniveauet er jo konstant). Trykket i punkt A svarer til det atmosfæriske tryk p_a , og ved anvendelse af Bernoullis ligning fås:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = p_a + 0 + \rho \cdot g \cdot H_B$$

I punkt B er trykhøjden nul, hastigheden v_A og trykket også lig med den atmosfæriske tryk p_a , det vil sige:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = p_a + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_A^2 + 0$$

Da summen er konstant gælder:

$$p_a + \rho \cdot g \cdot H = p_a + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_A^2$$

$$\rho \cdot g \cdot H = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_A^2$$

$$v_A = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Dette er formlen for hastigheden ved frit fald og er kendt som Torricelli's lov, som den italienske fysiker Torricelli fremsatte i 1644. Bemærk at hastigheden kun er afhængig af tyngdekraften (g) og trykhøjden (H) men uafhængig af metallets vægt. Teoretisk er udløbshastigheden derfor ens, uanset om der støbes, stål, jern eller letmetal. Forskellen i praksis skyldes forskellige friktionsværdier metaller imellem.

Torricelli's lov gælder for idealvæsker. På grund af friktions og hvirveldannelser er hastigheden i virkeligheden mindre, og derfor anvendes en dimensionsløs tabsfaktor α . Værdien af α ligger normalt mellem 0,3 - 0,6.

$$\text{Hastigheden bliver således: } v_A = \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Den metalmængde R_A , der hældes fra støbeskeen i støbekoppen er, når der opretholdes et stabilt metalniveau i koppen, den samme, som den metalmængde der strømmer ind i formen og derfor også den samme, der strømmer igennem indløbet ved pkt B (mængde R_B).

Mængde R_B (m^3/s) bestemmes af hastigheden v_A (m/s) og indløbets tværsnitsareal A (m^2).

$$R_B = v_A \cdot A = \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot A$$

Antal m^3 igennem indløbet er volumen $V = \text{mængde} \times \text{tid} = R_B \cdot t$

Volumen er godsvægt (W) / massefylde (ρ)

$$W / \rho = R_B \cdot t = \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot A \cdot t$$

$$A = W / \rho \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot t$$

$$A = \frac{22,6 W}{\rho \cdot t \cdot \alpha \sqrt{H}}$$

$A = \text{mindste tværsnitsareal i } cm^2$

$W = \text{godsvægt i } kg$

$\rho = \text{smeltens massefylde i } g/cm^3$

$t = \text{støbetid i } s$

$\alpha = \text{tabsfaktor}$

$H = \text{gennemsnits trykhøjde i } cm$

Beregning af det begrænsende tværsnitsareal kræver således data for godsvægten, metallets massefylde, støbetid, gennemsnits trykhøjde og en enhedsløs tabsfaktor.

Godsvægten

Godsvægten kan bestemmes efter vejning af gods eller model, ved hjælp af en vægtberegning eller fra tegning eller kundens oplysninger.

Det nemmeste og mest sikre er at veje et emne. Dette forudsætter selvfølgelig, at et sådant findes. Man kan også veje modellen og dividere med modellens massefylde og gange med det pågældende støbematerialets massefylde. Ved vejning medtages også eventuelle kerneanvisere, som selvfølgelig skal fratrækkes.

Man kan også beregne godsvægten, men medmindre der er tale om simple geometrier kan det være en temmelig vanskelig opgave.

Det nemmeste er at gå ud fra en oplyst vægt, enten fra en tegning eller oplysning fra kunden. Vær opmærksom på, at tegningen ofte oplyser vægten af et færdigbearbejdet emne. Kundens oplysninger kan ligeledes være fejlagtige. Når der støbes meget store emner, der repræsenterer en stor værdi, og de vejer mere end der har været metal i støbeskeen, kan en efterfølgende kassation koste dyrt. Ved mindre godsvægte har nogle ikke-fuldstøbte emner mindre økonomisk betydning. Da godsvægten også indgår i priskalkulationen er det også her vigtigt at få en så nøjagtig som mulig godsvægt.

Bemærk, at støbevægten er summen af godsvægten, indløbssystemet og eventuelle efterfødere.

Metallets massefylde

Metallets massefylde burde være kendt, man skal dog huske på at anvende massefylden af det flydende metal, som er forskelligt fra det faste. Fx gælder ca. 6,89 g/cm^3 og 7,3 g/cm^3 for hhv. flydende og fast støbejern.

Støbetiden

Den optimale og korrekte støbetid er ofte vanskelig at bestemme, da den påvirkes af flere faktorer såsom støbemateriale, emnets kompleksitet, formens styrke, taktid, godstykkelser og støbevægt.

Fx støbes SG-jern hurtigere end gråt støbejern og aluminium bronze hurtigere end støbejern.

Komplekst og/eller tyndvægget gods støbes hurtigere end massivt klumpet gods og små emner relativt hurtigere end store emner. Bemærk, at hurtigere her skal forstås som flere kg pr tidsenhed.

Kemisk bundne forme tåler større og længere påvirkning af metalstrømmen end vådsandsforme. Desuden spiller formens kvalitet en afgørende rolle, især ved vådsandsformning. Omhyggelig og løbende kontrol med sandkvaliteten er derfor påkrævet.

Endelig skal der tages hensyn til takttiden. Når en moderne Disa kan producere op til 555 forme i timen og formstrengens transporttid, hvor der ikke kan støbes, er 1-2 sekunder, bliver den maksimale støbetid der er til rådighed i maskinens sekvens ca. 5 sekunder pr. form. Man kan nemt designe et indløbssystem, der kan klare meget kortere støbetider, men i så fald øges risikoen for turbulent strømning og støbefejl betydeligt.

Den valgte støbetid er derfor et kompromis mellem ønsket takttid og godskvalitet.

Der findes flere tabeller og formler til beregning af støbetiden, og disse kan give et fingerpeg om den korrekte tid. Ofte angives en sammenhæng mellem godsvægt og støbetid, fx støbetid = konstant \times roden af godsvægten. I disse formler er roden normalt en kvadrat- eller kubikrod, mens konstanten kan være fra 1,1 til 4. Jo tyndere godset er, desto hurtigere skal der støbes, og jo mindre bliver konstanten. Sådanne formler skal selvfølgelig ikke anvendes kritiskløst.

Almindeligvis har støberiet indsamlet støbetidsdata fra tidligere modeller, og disse danner grundlag for støbetider for nye modeller. Desuden har erfarne metodeteknikere ofte en fingerspidsfølelse af, hvilke tider bestemte emner skal støbes på.

Trykhøjden

Som regel ændrer trykhøjden sig under formfyldningen, og den værdi, som anvendes til beregningen af det begrænsende areal kaldes den effektive eller gennemsnitlige trykhøjde. Fig. 9 viser tre generelle situationer for vandret delte forme, der påvirker trykhøjden, nemlig alt gods i underparten, i overparten eller både i under- og overparten.

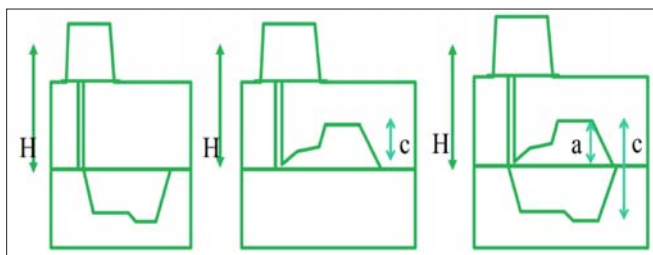


Fig. 9: Trykhøjder afhængig af formhulrummets placering

Ved topfyldning er trykhøjden konstant H under hele formfyldningen. Ved bundstøbning bliver den effektive trykhøjde $H-c/2$ og ved sidestøbning $H-a^2/2c$. Vær opmærksom på, at disse formler kun er tilnærmelser. Fig. 10 viser, hvordan to emner med ens vægt og samme H, a og

c værdier, men med forskellig udformning har forskellige effektive trykhøjder.

I figuren til venstre ligger ca. 2/3 af godsvægten i underparten og under 2/3 af støbetiden er den effektive trykhøjde lig med H mens den under 1/3 af tiden reduceres under fyldning af overparten. I figuren til højre er det omvendt. Her er den effektive trykhøjde H under 1/3 del af støbetiden. Den totale effektive trykhøjde er derfor mindst i figuren til højre.

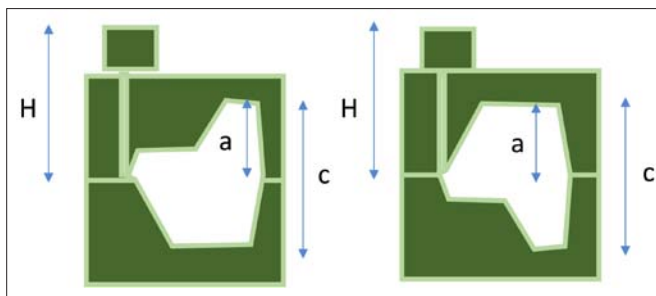


Fig. 10: Vægtfordelingens påvirkning af trykhøjden

Indløbssystemets tabsfaktor

Tabsfaktoren kompenserer for, at strømningshastigheden nedsættes på grund af friktion og hvirveldannelser, men den kan være vanskeligt at bestemme. Der findes mange forslag til bestemmelse af tabsfaktoren, ofte baseret på antal indløb og fordelingskanaler samt deres størrelse, antal retningsændringer i indløbssystemet etc. Herudover har metallets temperatur og kemiske sammensætning også betydning. Koldt metal løber trægere end varmt metal, og metallernes renhed og størkningsmåde har ligeledes betydning.

En fornuftig tabsfaktor kan beregnes ved at måle støbetiden og sammenligne den med den teoretiske støbetid fra indløbsberegningen. Da støbevægt, trykhøjde og metallets densitet er nogenlunde konstant for et givet indløbssystem bliver forholdet mellem støbetid og tabsfaktor konstant, nemlig $t \cdot \alpha = \text{konstant}$. Har man regnet med en støbetid på 10 s og en tabsfaktor $\alpha=0,5$, og er støbetiden i virkeligheden 12 s fås: $10 \cdot 0,5 = 12 \cdot \alpha$ eller $\alpha = 0,4$

Efterhånden får man erfaring for, hvilke tabsfaktorer der anses for at være fornuftige for bestemte indløbsdesign. Værdien af α ligger normalt mellem 0,3 - 0,6. I indløbssystemer med store tværsnitarealer og minimalt antal strømningsændringer kan værdien være så høje som 0,8 - 0,9. Værdien ved Disa-støbning ligger normalt mellem 0,2 og 0,5.

Indløbssystemets elementer

Til et indløbssystem kan der stilles forskellige krav, f.eks.:

- Formen fyldes så hurtigt som muligt
- Så lav som mulig hastighed i indløbene
- Formen fyldes med rent metal

- Optimal varmemfordeling
- Indløbssystemet har minimal vægt og volumen
- Indløbssystemet skal nemt kunne fjernes

Fig. 5 viser indløbssystemets forskellige elementer, som er nødvendige for at kunne opfylde disse krav. Udformningen af disse elementer kan være baseret på standard systemer, generelle regler og erfaringer. Ofte har støberier deres eget og helt unikke design. Da det derfor er næsten umuligt at beskrive alle mulige udformninger samt de tilhørende fordele og ulemper, er der i det følgende kun generelle anvisninger

Støbekoppen

Støbekoppen har flere funktioner. Den gør det muligt at hælde metallet i formen i en uafbrudt strøm og dermed holde indløbssystemet fyldt under støbningen. Desuden kan en støbekop holde slagge og urenheder tilbage. Herudover minimerer koppen metallens faldhøjde fra støbeske til støbetap. Koppen skal fyldes så hurtigt som muligt, og når den under det videre forløb holdes fyldt opretholdes en ensartet trykhøjde. For at undgå hvirveldannelser og for at opnå tilstrækkelig trykhøjde skal soen eller koppen højde være minimalt 3 gange støbetappens diameter. Fig. 11 viser et ønsket strømningsforløb i en støbekop.

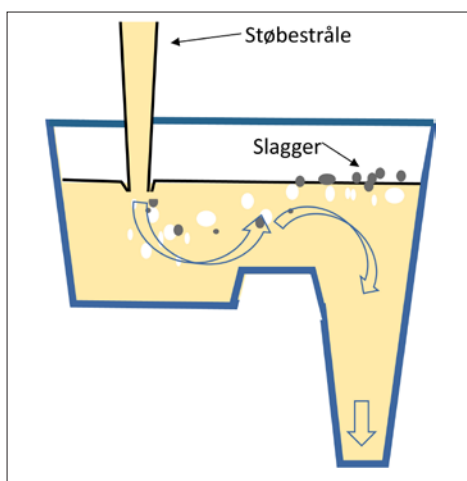


Fig. 11: Støbekop

Det har altid været god latin ikke at støbe direkte i støbetappen. Når metalstrømmen rammer præcist i midten af støbetappen forøges metalstrømmens hastighed, da trykhøjden øges med afstanden fra støbeskeen til tragtten. Desuden føres eventuelle slagge og urenheder direkte ned i formen. Herudover dannes også nemt hvirvler, hvis metalstrømmen rammer tragtens sider.

Imidlertid er flere støberier begyndt at støbe direkte ned i støbetappen. Fordelen er mindre omgangsjern. De nævnte ulemper forsøges elimineret ved anvendelse af renere metal og forbedret indløbsteknik.

Renere metal kan opnås, når der anvendes støbeskeer

eller støbeautomater med bundudløb. I en beholder med bundudløb kan slagge flyde op til overfladen, og risikoen for at de medrives af metalstrømmen og kommer i formen minimeres betydeligt. Med en støbeautomat er det også nemmere at ramme direkte i støbetappen og opnå en hurtig fyldning af tappens. Den minimale forøgelse af trykhøjden forsøges elimineret ved hjælp af et optimeret indløbssystem.

Afgørende vigtigt er, at støbekoppen skal kunne levere den nødvendige mængde metal til indløbssystemet. Hvis koppen udløbsåbning øges bliver metalstrømmens mængde større, og hvis metalniveauet i koppen øges, bliver både metalstrømmens hastigheden og mængde i indløbssystemet større. Koppen udløbsåbning kan dog ikke være større end støbetappens diameter. Der findes flere anvisninger på støbekoppens optimale dimensioner, f.eks. at højden skal være minimalt 3 gange udløbsdiameter, mens arealdimensioner skal være store nok til, at støbeskeens stråle kan ramme koppen uden vanskeligheden. Med en støbeautomat er det nemmere at ramme koppen præcist og støbekoppens areal kan i så fald minimeres betydeligt.

Støbetappen

Støbetappen skaber forbindelsen mellem støbekoppen og skummerenden. På grund af tyngdekraften accelererer metallet og derfor øges hastigheden på sin vej ned i støbetappen. Teoretisk er den friktionsløse faldhastighed $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$. Efter kontinuitetsloven betyder dette, at tværsnitsarealet af væskestrømmen formindskes. Metalstrømmen i en cylindrisk støbetap mister derfor kontakt med siderne og kan give anledning til aspiration og turbulens.

Ud fra strømningsmæssige hensyn bør støbetappens tværsnit følge tværsnittet af en frit faldende væskestråle. Teoretisk bør tappens have parabelformede sider, men i praksis anvendes som oftest en konisk tap med en keglevinkel på 1-3°. En konisk støbetap minimeres ikke alene turbulens og aspiration, men fyldes også hurtigere. Kontakt med siderne øger friktionen og nedsætter derfor strømningshastigheden. Desuden kan man forestille sig, at en støbetap, som hurtigt fyldes og beholder kontakt med formvæggen hurtigere kan danne en tynd størket skal som er mindre modtageligt for optagelse af dampe og gasser.

Vær opmærksom på, at støbetappens tværsnitsareal i et trykløst system er lig med chokens tværsnitsareal. I et tryksat system er støbetappens tværsnitsareal normalt større end indløbenes.

Samlebrønden

Overgangen fra støbetap til skummerende er et kritisk sted i indløbssystemet. Metallet har her sin største hastighed og den momentane retningsændring forårsager en del turbulens.

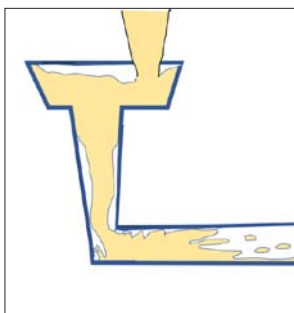


Fig. 12: Uden samlebrønd

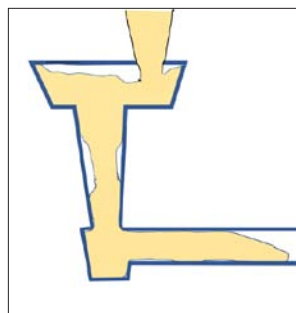


Fig. 13: Med samlebrønd

Fig. 12 viser situationen, når det første metal rammer bunden af støbetappen. Støbetappen er endnu ikke fuld og har muligvis suget luft med sig. Når strålen rammer bunden opstår voldsom turbulens og der kan danne små metalkugler. Disse luftbobler og metalkugler kan være årsag til uønskede indeslutninger i godset.

Utallige ideer for at kunne ændre retning i bunden af en støbetap været forsøgt i praksis, men ingen virker fuldstændigt tilfredsstillende. En blød overgang eliminerer turbulens men reducerer ikke metalstrømmens hastighed og det første metal holdes heller ikke tilbage indtil der er opbygget en effektiv trykhøjde.

For det meste anvendes en eller anden form for samlebrønd. Denne bør have en flad bund så metalstrømmen bremses op og ikke skulper over. Fig. 13 viser princippet i en samlebrønd.

Skummerenden

Skummerenden skal fordele metalstrømmen til de forskellige indløb og samtidigt tilbageholde eventuelle slagter og urenheder. I et vertikalt delt indløbssystem findes ofte opretstående fordelingsrender, som ikke har nogen skumende virkning. Men uanset om der tales om egentlige skumme- eller fordelingsrender skal deres tværsnitarealer sikre, at de holdes fyldt under støbningen. I et tryksat system er rendens tværsnitareale større end indløbenes, så der opbygges hurtigt et modtryk som gør at renden bliver fyldt. Hvis rendens tværsnitareal bliver alt for stort kan det være vanskeligt at holde systemet fyldt og der kan ikke opbygges et tryk. I så fald vil de yderste indløb yde mest. Derfor dimensioneres disse render i et vertikalt delt tryksat system ofte kun 10-20 % større end indløbene.

I et trykløst indløbssystem er renden per definition mindre end indløbet, men større end støbetappens. Ofte anvendes forholdet støbetap : rende : indløb som 1 : 1,1 : 1,2. Der findes dog mange alternative forhold, som åbner indløbssystemet mere op end her angivet.

Når en (skumme)rende forsyner flere indløb kan tværsnitarealet nedtrappes efter hvert indløb. Dette sikrer korrekte strømningforhold og øger desuden udbyttet.

Indløb

Metalstrømmen kommer ind i formhulrummet via et el-

ler flere indløb, og disse kan have utallige udformninger. Generelt anvendes flade indløb, som er nemmere at slå af. Indløbene skal anbringes således, at der opnås en korrekt varmefordeling, at koldløbning undgås og at de er nemme at fjerne.

Strømningsmæssigt skal de dimensioneres så formen fyldes hurtigst muligt med mindst mulig hastighed og med så få godsdefekter til følge som muligt.

Indløb kan placeres i toppen, i siden eller bunden af godset. Når der kun støbes fra oven opnås retningsbestemt varmefordeling mod toppen og dermed gode efterfødningsbetingelser. En ulempe er den voldsomme formfyldning. Støbning fra siden eller bunden giver en roligere indstrømning mens smeltefronten driver gas og damp ud af formen. En ulempe er, at det koldeste jern kommer i toppen af godset og dermed et mindre godt udgangspunkt for efterfødnings til følge. Yderligere mister metallet mere varme, når det gennemløber en længere vej i indløbssystemet. Udbyttet bliver også mindre. Ofte anvendes en kombination af placeringsmulighederne.

Indløb placeres gerne på en bearbejdningsflade, så de ikke behøver at blive slebet ned til godsoverfladen og dermed ødelægger en ellers jomfruelig godsoverflade.

Indløbenes placering skal også sikre, at spinkle godsdele og/eller efterfødere støbes varmt.

Beregningseksempler

I det følgende vises to eksempler på indløbsberegning. I virkeligheden er det næppe så enkelt, ofte monteres mange emner på et modelplan, og disse forsynes med metal via et komplekst indløbssystem. Herudover kan vertikalt delt støbegods støbes fra toppen, fra siden, fra bunden eller en kombination af disse. Indløbssystemet kan også indbefatte filtre og efterfødere, der påvirker formfyldningen. Systemet kan være tryksat, trykløst eller et hybridsystem.

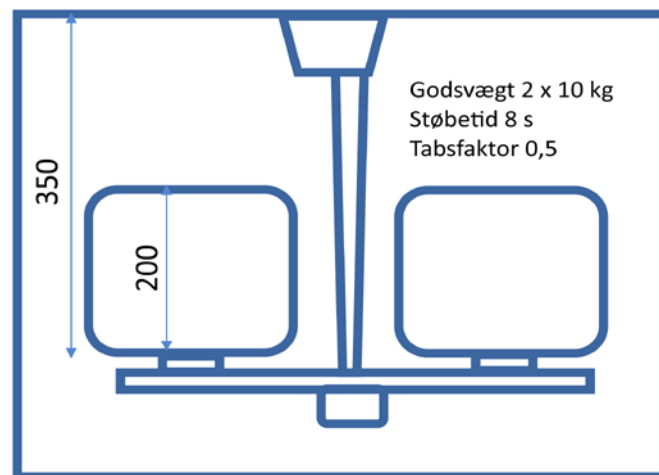


Fig. 14: Bundstøbning, emner i samme niveau

Ikke desto mindre gælder de samme principper for alle typer indløbssystemer. Det begrænsende tværsnitsareal beregnes ud fra den effektive trykhøjde, og det danner grundlaget for alle andre dimensioner i indløbssystemet.

Fig. 14 viser to emner i samme niveau og med bundstøbning. Den effektive trykhøjde $H=350-200/2=250$ mm = 25 cm. Indsnævringsarealet bliver:

$$A = \frac{22,6 \cdot W}{\rho \cdot t \cdot \alpha \cdot \sqrt{H}} = \frac{22,6 \cdot 7}{6,8 \cdot 6 \cdot 0,5 \sqrt{25}} = 3,32 \text{ cm}^2$$

Den teoretiske hastighed af metalstrømmen er $\sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,35} = 2,6$ m/s. I et tryksat system med et friktionstab på 0,5 vil hastigheden i indløbet blive ca. 1,3 m/s og kunne give et voldsomt springvand når det første metal forlader indløbet.

Vælges et trykløst system opnår den højeste hastighed i bunden af støbetappen og hastigheden i indløbet bliver derfor lavere. Hver skummerende bliver $1,1 \times 3,23/2 = 1,83$ cm² og hvert indløb $1,2 \times 3,32/2 = 1,99$ cm²

Når trykhøjden under den videre formfyldning aftager bliver indstrømningshastigheden reduceret. Dette gælder for såvel et tryksat som et trykløst system.

Det viste system har den ulempe, at eventuelle slaggepartikler og oxider, der når indløbene, ikke bliver tilbageholdt.

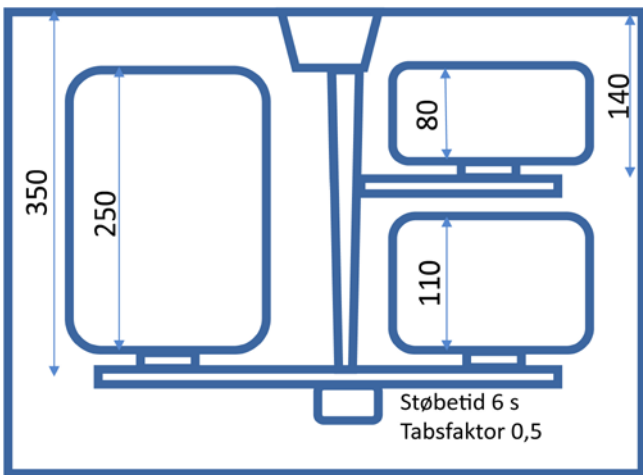


Fig. 15: Bundstøbning, 3 emner i forskellige niveauer

Fig. 15 viser tre emner i forskellige niveauer. Der vælges et trykløst system med det begrænsende areal i bunden af støbetappen.

Emne pos 1 har en effektiv trykhøjde $H=350-250/2=225$ mm = 22,5 cm

Det begrænsende areal for emnet pos 1 bliver:

$$A1 = \frac{22,6 \cdot W}{\rho \cdot t \cdot \alpha \cdot \sqrt{H}} = \frac{22,6 \cdot 7}{6,8 \cdot 6 \cdot 0,5 \sqrt{22,5}} = 1,64 \text{ cm}^2$$

Skummerende $1,1 \times 1,64 = 1,8$ cm² og indløb $1,2 \times 1,64 = 2$ cm².

Emne pos 2 har en effektiv trykhøjde $H=350-110/2=295$ mm = 29,5 cm

$$A2 = \frac{22,6 \cdot W}{\rho \cdot t \cdot \alpha \cdot \sqrt{H}} = \frac{22,6 \cdot 3,3}{6,8 \cdot 6 \cdot 0,5 \sqrt{29,5}} = 0,67 \text{ cm}^2$$

Skummerende $1,1 \times 0,67 = 0,74$ cm² og indløb $1,2 \times 0,67 = 0,81$ cm².

Emne pos 3 har en effektiv trykhøjde $H=140-80/2=100$ mm = 10 cm

$$A3 = \frac{22,6 \cdot W}{\rho \cdot t \cdot \alpha \cdot \sqrt{H}} = \frac{22,6 \cdot 3,3}{6,8 \cdot 6 \cdot 0,5 \sqrt{10}} = 0,8 \text{ cm}^2$$

Skummerende $1,1 \times 0,8 = 0,88$ cm² og indløb $1,2 \times 0,8 = 0,96$ cm².

Støbetappen skal have et tværsnitsareal i bunden på $A1 + A2 = 1,64 \text{ cm}^2 + 0,67 \text{ cm}^2 = 2,31 \text{ cm}^2$

Ved øverste skummerende til pos 3 skal støbetappens tværsnitareal være stor nok til at kunne opretholde et kontinuerligt flow til choken samt et tillæg for arealet A3.

Hvis der vælges en støbetap med en keglevinkel på 2 grader, bliver støbetappens areal ved pos. 3 ca. 4,7 cm²

En kontrolberegning baseret på kontinuitetsloven giver:

Hastigheden i bunden (350 mm) forholder sig til hastigheden ved pos. 3 (140 mm) - bortset fra små friktionsforskelle - som $\sqrt{35} : \sqrt{14} = 1,6$

Støbetappens areal ved pos 3 skal derfor minimalt være 1,6 x større end summen af A1 + A2, dvs. $1,6 \cdot 2,3 = 3,68$ cm²

Hertil lægges arealet til pos 3, så i alt bliver støbetappens areal ved pos 3: $3,68 + 0,8 = 4,48$ cm².

En keglevinkel på 2 grader forhindrer derfor ikke metalflowet, og giver lidt sikkerhed mod for megen opbremsning af flowet.

Oftentimes anvendes standardiserede indløbsdele, og man vælger de dele, der ligger tættest på de beregnede. I så fald bør der ligeledes udføres en kontrolberegning for at sikre at de ønskede tværsnitsforhold overholdes. I modsat fald kan der opstå to forskellige fejlmuligheder.

Fig. 16 viser et system med for små indløb, og dermed bliver tilgang af metallet for stor i forhold til tilstrømningen i formen. Faren er, at støbesoen flyder over, støbereren tror

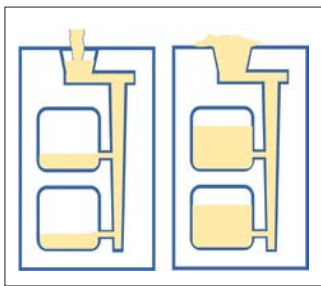


Fig. 16: For små indløb

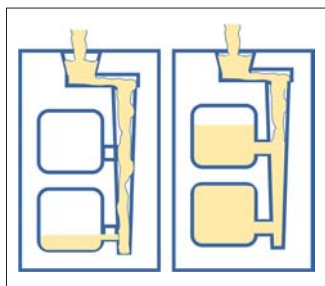


Fig. 17: For store indløb og støbetap

formen er fuld og stopper støbningen og påbegynder støbning af næste form. Når niveauet i soen efterfølgende synker igen kan det værre for sent eller umuligt at efterstøbe.

Fig. 17 viser en situation, hvor indløb og støbetap er for store. Først fyldes det nederste emne og efterfølgende det øverste uden den nødvendige trykhøjde under støbningen. Resultatet er turbulente strømninger og aspiration i støbetappen med risiko for efterfølgende gas- og oxidindslutninger i godset. Desuden forlænges støbetiden og sammen med en mindre effektiv trykhøjde øges risikoen for overfaldeblæsninger og matløbninger.

Sammenfatning

Det grundlæggende i design og beregning af et indløbssystem er enkelt nok. Det vanskelige ligger i at få teorien tilpasset virkeligheden, og dette kræver nogen grundlæggende viden om indløbsberegning og især praktisk erfaring.

I princippet er designet af et indløbssystem til en horisontalt eller vertikalt delt form det samme. Forskellen ligger dels i emnets vægt, dels i antal emner pr form. Et emne, der vejer flere tons stiller andre krav til faktorer såsom støbetid, støbetemperatur og formkvalitet. Støbning af flere små emner i en form stiller krav til ensartet formfyldning, som kan være vanskeligt med indviklede indløbssystemer. Når der tales om massefremstilling spiller kort støbetid og stort udbytte en afgørende rolle.

Det teoretiske grundlag for indløbsberegninger behøver ikke at afholde nogen støberitekniker fra selv at beregne et indløbssystem. Beregning af indløb til vertikalt delte forme er baseret på en simpel formel. For den uøvede

støberitekniker kan det være svært at bestemme den korrekte støbetid og præcise tabsfaktor. Derudover kan det være svært at fastlægge de optimale forhold mellem støbetap, skummerende og indløb, hvorefter den måske vanskeligste opgave er at bestemme, hvor og hvordan indløbene og eventuelle efterfødere skal placeres. Imidlertid gør øvelse mester, og i samarbejde med erfarne støberifolk er design og beregning af et indløbssystem ikke en uoverkommelig opgave.

Ud over at kunne udføre en indløbsberegning er det også nyttigt at kunne efterkontrollere et indløbssystem. Flere typer støbefejl kan skyldes et forkert designet indløbssystem, og det første og nemmeste man kan gøre er at sammenligne systemets dimensioner og de opnåede støbedate med de grundlæggende forudsætninger.

Forfatteren håber med denne artikel at kunne bidrage til en øget interesse i indløbsdesign. I de senere årtier har forskellige computerprogrammer muliggjort simulering af støbning og gjort os klogere på, hvordan formfyldning og størkning foregår i det virtuelle univers. Dette har givet ideer til utraditionelle indløbsteknikker. Spørgsmålet er som altid, om disse utraditionelle metoder er bedre end de godt gennemprøvede, men vores konservatisme bør ikke afholde os fra at overveje disse nye systemer også.

Billedreferencer

Fig 1: Foseco

Litteraturhenvisning

Disa: Gating
 Davies: Støperiteknikk
 E. Diepschlag und J. Czikel: Die Gieß- und Anschnit-
 technik in den Gießereien
 Holzmüller und Kucharcik: Atlas zur Anschnitt- und
 Speisertechnik für Gusseisen
 Meehanite: Gating and feeding Manual
 Ove Hoff: Støberibogen
 Per Larsen: Iron Melt Flow in Thin Walled Sections
 Cast in Vertically Parted Green Sand Moulds
 Stephen I. Karsay: Gating and Risering
 Teknologisk Institut: Indløbs- og efterfødningsystemer