

Grundlæggende støberiteknologi:

Udformning og dimensionering af et horisontalt indløbssystem

Af Herbert Wolthoorn,
redaktør STØBERIET

INDLEDNING

Ved støbning i en støbeform er det indløbssystems vigtigste opgave at gøre det muligt, at strømmen af flydende metal kan føres fra støbeskeen eller en lignende beholder til formhulrummet, fylde det, samt trænge ind i alle hulrummets enkeltheder, før metallet begynder at størkne. Desuden skal indløbssystemet sikre, at formen fyldes med en tilpas lav hastighed så turbulens undgås, samt at slagger og urenheder tilbageholdes i indløbssystemet. Dette betyder, at systemet skal sikre en hurtig men ikke for hurtig støbning. Herudover skal indløbssystemet fordele metallet til de forskellige dele af støbegodset. Det flydende metal omfatter i denne artikel stål-, jern-, aluminium- og kobberlegeringer, og benævnes, hvis ikke andet oplyst, under et som metal eller metallegeringer.

Den optimale kombination af mængden, hastigheden og fordelingen af det indstrømmende metal kan kun styres ved korrekt udformning, dimensionering og placering af indløbssystemets forskellige dele. Udformnings- og dimensioneringsprincipperne benævnes i det følgende som designprincipperne,

Et indløbssystem kan udformes og dimensioneres på mange måder, men et grundlæggende design gælder for de fleste støbemetoder og metallegeringer. Et indløbssystems grundlæggende bestanddele er vist i fig. 1. Støbetappen kaldes også nedløbet, og skummerenden kaldes sommetider fordelingsrenden. Det her viste system er et horisontalt indløbssystem, men designprincipperne gælder i vidt omfang også for vertikale indløbssystemer.

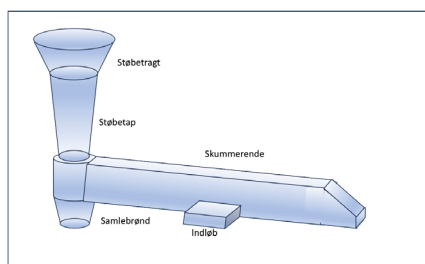


Fig. 1: Principielt horisontalt indløbssystem

Et indløbssystems designprincipper gælder som nævnt for forskellige støbemetoder og metallegeringer, men der kan være stor forskel på de parametre, som anvendes til indløbssystemets design. Generelt har forskellige metallegeringer forskellige egenskaber, for eksempel med hensyn til smeltetemperatur og størkningsforløb, og de har derfor forskellige indflydelser på indløbssystemets design.

I dag findes forskellige softwareprogrammer til beregning og simulering af indløbssystemer, og de kan tilsyneladende anvendes uden forudgående støberiteknisk viden. Om dette er rigtigt eller forkert, så må det trods alt have interesse for enhver støberitekniker at have kendskab til de grundlæggende designprincipper, som disse programmer er baseret på.

Som det vil fremgå i det følgende er de grundlæggende principper simple nok, problemet ligger i at anvende de rigtige beregningsparametre, der gælder for de anvendte metallegeringer og produktionsforholdene i det pågældende støberi.

STØBETRAGTEN OG STØBESOEN

Støbetragten gør det nemmere for støberen at ramme støbetappen. En støbetragt er ofte en integreret del af formen. Ved manuel støbning kan det være svært for støberen at ramme en forholdsvis lille støbetragt samt at holde denne fyldt under hele støbningen. Derfor anvendes ofte en støbeso, som gør det nemmere at opretholde en rolig støbning og en kon-

stant trykhøjde, som bestemmer den mængde flydende metal, som pr. tidsenhed kan føres til formen. En støbeso dimensioneres sædvanligvis ud fra den mængde metal, der skal støbes, dvs. jo større støbevægt, desto større bør støbesoen være. Fig. 2 viser et eksempel på en standard støbeso, hvor dimensionerne er angivet i relation til støbetappens diameter.

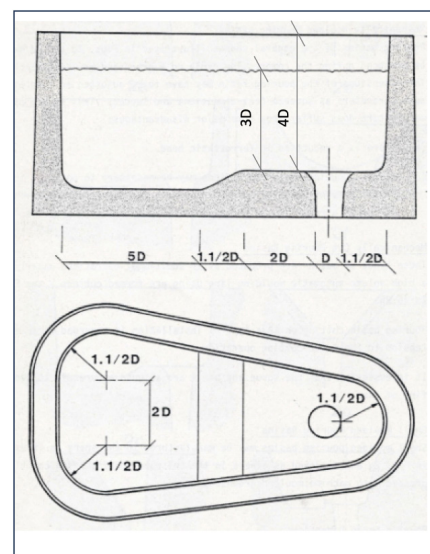


Fig. 2: Standard støbeso

En anden vigtig egenskab af en støbeso er, at den skal kunne holde slagger og urenheder tilbage. En korrekt designet støbeso giver ved korrekt anvendelse en opadgående metalstrøm, som tillader, at slagger udskilles og samler sig på metallens overfalde og ikke føres med i støbetappen og dermed potentielt i formhulrummet (fig. 3). Ved en korrekt anvendelse foregår støbningen foregår på

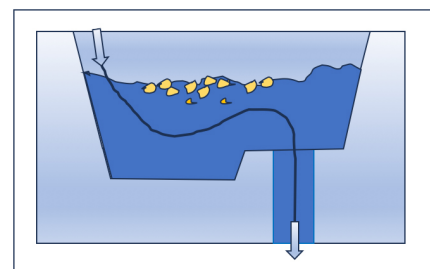


Fig. 3: Metalstrøm i en støbeso

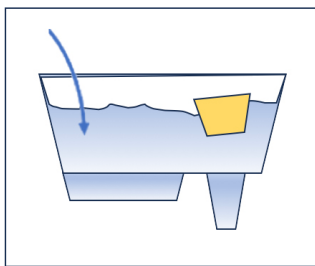


Fig. 4: So med svømmer

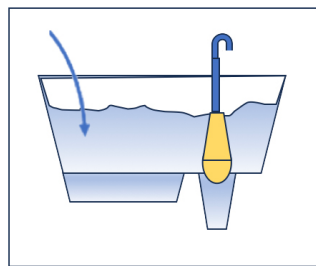


Fig. 5: So med pære

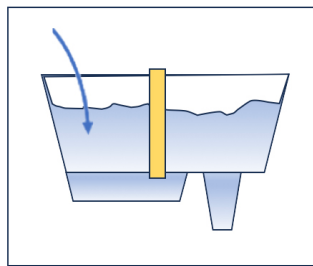


Fig. 6: So med skummekærne

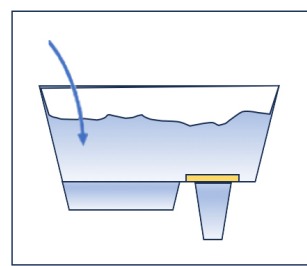


Fig. 7: So med stålplade

tværs af soen, således støbestrålen ikke rammer støbetappen. Man bør også huske, at støbesoen fører al smelten fra støbeskeen til formen, og den skal derfor fremstilles med den største omhu og af gode formmaterialer.

Yderligere slaggeudskillelse kan opnås ved anvendelse af en svømmer (fig. 4), som holdes ned med en jernstang og lukker for støbetappen, indtil soen er næsten fuld og slagger har haft tid til at kunne samle sig i overfladen. Til større soer anvendes ofte en pære (fig. 5), der løftes når soen er næsten fuld. En anden måde at holde slagger tilbage på er ved at indskyde en skummekærne i soen (fig. 6). Støbetappen kan også holdes lukket med en tynd fortinnet stålplade (fig. 7), der efter kort tid opløses af det smeltede metal.

Risikoen for medfølgende slagger fra støbeskeen kan yderligere mindskes ved anvendelse af beholdere, dvs. støbeskeer eller støbeautomater, med bundudløb. I en beholder med bundudløb kan slagger flyde op til beholderens overflade, og risikoen for at slaggerne føres med metalstrømmen ind i formen minimeres betydeligt. Med et bundudløb er det også nemmere at ramme støbekoppen præcist og opnå en hurtig fyldning af støbetappen.

AREALFORHOLD MELLEM STØBETAP, SKUMMERENDE OG INDLØB

Før man kan dimensionere et indløbssystem skal man først overveje, hvorvidt systemet skal være tryksat eller trykløst.

Tryksatte indløbssystemer har deres mindste tværsnitsareal i indløbene. Støbetappen har som udgangspunkt

et lidt større tværsnitsareal end det totale indløbsareal, hvilket medfører, at systemet hurtigt fyldes, og hvis systemet holdes fyldt, kan der oprettholdes et let indvendigt tryk, der kan holde eventuelle slagger og urenheder tilbage i støbetragten. Det allerførste metal kan dog medføre slagger, men pga. metalstrømmens fremdrift (momentum) vil det strømme forbi indløbene og hurtigt fylde renden til et niveau over indløbene så formen fyldes med rent metal fra bunden af renden. Af denne grund placeres indløbene i et tryksat system i bunden af skummerenden.

Under støbningen kan der dog forsæt være slagger, som suges ned i støbetappen, og disse skal holdes tilbage i skummerenden. Det er en kendsgerning, der gælder for alle metaller, at en pludselige nedsættelse af metalstrømmens hastighed medfører, at ikke-metalliske indeslutninger, som har en mindre vægtfylde end metallet, udskilles og stiger op. I en skummerende, der har et større tværsnitsareal end støbetappen nedsættes således metalstrømmens hastighed og gør det muligt for eventuelle slagger og urenheder at stige til skummerendens top, hvor de fastholdes og forhindres i at komme ind i formhulrummet. Tryksatte systemer er således effektive til at holde slagger og urenheder tilbage.

Da systemet nemt holdes fyldt under støbningen bliver risikoen for indsugning af luft og gasser (aspiration) også reduceret.

Tryksatte systemer er normalt mindre i størrelse og vægt, hvilket øger udbyttet, men den største ulempe ved tryksatte systemer er, at hastigheden er størst i indløbene og der-

med større tendens til turbulente strømninger og erosion af forme og kerner. Tryksatte systemer bruges dog ofte til støbejern, og også i mindre omfang til stålstøbning, da disse metaller i modsætning til for eksempel aluminium bedre kan tåle højere indløbshastigheder.

Trykløse systemer har deres mindste tværsnitsareal ved bunden af støbetappen, hvorefter der åbnes mere op mod formhulrummet, fx med forholdet 1 : 1,5 : 2 således smeltens hastighed reduceres mod formhulrummet. Fordelen med en reduceret hastighed er mindre turbulens.

Trykløse systemer bruges især ved legeringer, såsom aluminium- og kobberlegeringer, som oxideres nemt og derfor er ømfindtlige overfor turbulente strømninger.

Desuden bruges trykløse systemer ofte i forbindelse med anvendelse af filtre, hvor det snarere er filtret end indløbssystemet, der holder slagger og urenheder tilbage, mens indløbssystemets primært har den funktion at fordele metallet med tilpas lav hastighed.

Der findes i faglitteraturen mange forskellige forslag til optimale arealforhold, hvoraf nogle er vist i tabel 1. Det kan derfor være vanskeligt at bestemme, hvilket forhold, der er mest optimal til den pågældende opgave, man hvis man anvender et andet forhold med tilfredsstillende resultat, skal man selvfølgelig ikke uden god grund ændre på det.

STØBETAPPEN

Støbetappen skal være korrekt dimensioneret, da den ofte danner grundlaget for alle andre dimen-

Metallegering	Forhold
Gråjern	1 : 1,5 : 0,9 1 : 1,3 : 1 1 : 4 : 4
SG-jern	4 : 8 : 3 1 : 1,8 : 1 1 : 2,5 : 1
Aluminium	1 : 4 : 4 1 : 3 : 3
Aluminiumbrønde	1 : 2 : 4 1 : 3 : 4
Messing	1 : 1 : 2
Stål	1 : 1,5 : 2 1 : 2 : 2 1 : 3 : 3

Tabel 1: Forskellige forslag til areal-forhold

sioner i indløbssystemet. De fleste støbetappe er overdimensionerede, hvilket ikke alene giver dårlig økonomi, men også dårlig kvalitet, fordi fyldning af tappen tager mere tid, og så længe tappen ikke er fyldt, kan der ikke opnås turbulentfri metalstrømning og dermed optimal slaggeudskillelse. En korrekt dimensioneret tap (men også en for lille tap!) fremtræder efter støbning med en fejfri overflade.

Da en metalstrøm i frit fald vil accelerere og derfor blive tyndere, vil dens overflade i en cylindrisk støbetap trække sig væk fra formvæggen. Teoretisk vil metalstrømmen blive en del af en parabel (fig. 8). Dette vil medføre et undertryk i hulrummet mellem metalstrømmen og støbetappens formvæg, og luft og formgasser kan herved suges ind i metalstrømmen. Dette kaldes aspiration. Som det fremgår af fig. 8, giver en cylindrisk støbetap (rød) en større mulighed for aspiration end en konisk støbetap (grøn). En konisk støbetap fyldes også hurtigere, og desuden nedsætter kontakten med siderne strømningshastigheden.

Det er klart, at en støbetap, der præcist følger en frit faldende metalstrøms parabel, en såkaldt strømnetlinet støbetap, vil minimere aspiration maksimalt. Imidlertid er en sådan støbetap vanskeligere at fremstille end en konisk støbetap og desuden mindre fleksibelt ved varierende kassehøjder. Derfor udformes støbetappen almindeligvis som et konisk rør med en keglevinkel på 2-5°.

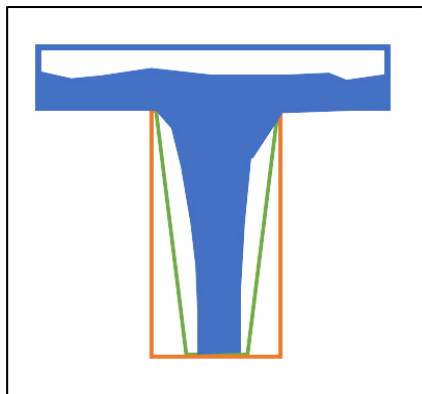


Fig. 8: Frit fald i en støbetap

SAMLEBRØNDEN

Overgangen fra støbetap til skummerende er et kritisk sted i indløbssystemet. Metallet har her sin største hastighed og den momentane retningsændring kan danne turbulens og aspiration. Øverst i fig. 9, vises 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 forslag til, hvordan metalstrømmens retning i bunden af en støbetap kan ændres mere gelinde har været forsøgt i praksis, men intet har virket fuldstændigt tilfredsstillende. En blød overgang eliminerer turbulens men reducerer ikke metalstrømmens hastighed, og indtil der er opbygget en effektiv trykhøjde holdes det første metal heller ikke tilbage.

For det meste anvendes en eller anden form for samlebrønd, også kaldt sprøjtebassin (fig. 9, nederst). Denne bør have en flad bund så metalstrømmen bremses op og ikke skvulper over. Det bør være unødvendigt at påpege, at støbetappen skal placeres lige over brønden og ikke delvist ved siden af, noget som somme tider kan iagttages ved sjusket udført håndformning

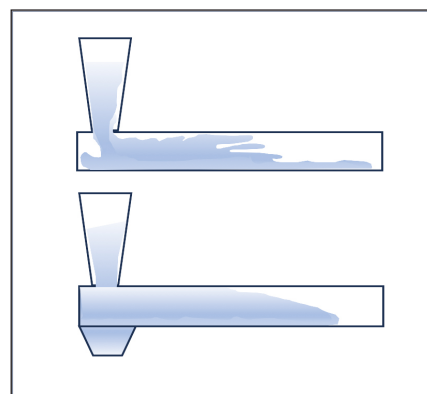


Fig. 9: Støbetap med og uden samlebrønd

SKUMMERENDEN

Skummerenden skal fordele metallet

til de forskellige indløb og samtidigt tilbageholde eventuelle slagge og urenheder. Slaggeudskillelse i skummerenden betinges af smeltens horisontale hastighed og hastigheden af slaggets vertikale opdrift. Tiden til opdrift øges ved nedsat hastighed i skummerenden, og dette kan opnås, hvis rendens tværsnitsareal er større end støbetappens. Skummerendens areal kan være firkantet, trapezformet eller cirkulært.

Skummerender kan ligge i formens under- eller overpart. Hvorvidt en skummerende ligger i under- eller overparten beror hovedsageligt af, om der et tryksat eller trykløst indløbssystem.

I et trykløst indløbssystem ligger renden oftest i underparten og indløbene i overparten, hvilket har det fordel, at renden fyldes før metallet strømmer i indløbene. En fyldt skummerende vil reducere turbulens, og gøre det muligt, at indeslutninger med lav densitet kan flyde op og klæbe sig til rendens sandoverflade. For at minimere risikoen for, at disse slaggepartikler kan komme i indløbene (som jo ligger i toppen af skummerenden) og dermed i fohulrummet, bør indløbene kun overlappende skummerenden så lidt som muligt, det vil sige lidt mere end højden på et indløb.

I et tryksat system er rendens tværsnitsarealet også større end indløb-

benes, så der opbygges hurtigt et modtryk, som gør at renden hurtigt fyldes. Det første og ofte forurenede metal vil strømme til enden af skummerenden, før indløbene fyldes. For at forhindre, at disse urenheder kommer ind i formhulrummet, bør skummerenden fortsætte mindst 10 cm efter det sidste indløb. Når det første jern rammer enden af skummerenden, vil det "folde over" og løbe tilbage. Hvis rendens ende tilspidses, bremses metalstrømmen og modvirker at den "folder over". For at opnå en hurtig stigning af metalniveauet anvendes ofte høje, slanke trapezformede skummerender. Hvis rendens tværsnitsareal bliver alt for stor kan det være vanskeligt at holde systemet fyldt, og der kan ikke opbygges et indvendigt tryk. I så fald vil de yderste indløb yde mest.

Når en skummerende, både i tryksatte og trykløse systemer, forsyner flere indløb, kan tværnitarealet nedtrappes efter hvert indløb. Dette sikrer korrekte strømningsforhold og øger desuden udbyttet.

INDLØBET

Flade indløb er bedre til at forhindre slagge til at komme ind i formen og er nemmere at fjerne end tykke, massive indløb. Indløbene bør placeres vinkelret på skummerenden eller noget skråt bagud i forhold til metalstrømmen.

Ved støbegods, som ikke efterfødes, skal størkningssvindet fordeles jævnt i hele godset, hvilket nemmest opnås, hvis indløb placeres således, at godsets forskellige dele størkner samtidig.

Indløbene bør placeres således, at jern, som afkøles af formvæggen, løber ind i godsets tykkere dele, mens de tynde sektioner fortsat får varmt jern. Dette opnås, hvis indløbene tilsluttes de tyndeste sektioner.

Ved støbegods, som efterfødes, skal der støbes igennem efterføderen tilsluttet de tykkeste sektioner for at opnå retningsbestemt størkning fra de tyndeste sektioner til efterføderen.

For at undgå, at godset slår sig el-

ler revner, skal varmefordeling være ensartet i hele godset.

Udover de støberitekniske forhold skal man også tage hensyn til, at indløb skal kunne fjernes nemt og ikke være til ulempe ved en efterfølgende rensning og bearbejdning, og de må ofte ikke placeres på overflader, som kosmetisk set skal være fejlfrie. Disse kosmetiske hensyn kan somme tider være vanskeligt at overholde på mindre støbegods, hvor placeringsmuligheder i sagens natur er mindre end ved større støbegods.

BEREGNING AF INDLØBSSYSTEMET MINDSTE TVÆRSNIT

Systemets mindste tværsnits- eller indsnævringsareal danner grundlag for beregningerne af indløbssystemets øvrige dimensioner. Til beregning af det mindste tværsnitsareal anvendes ofte følgende formel:

hvor:

$$Ca = \frac{22,6 \times W}{\delta \times \xi \times t \times \sqrt{H}}$$

Ca:	indsnævringsareal i cm ²
W:	støbevægt i kg
δ:	smeltens densitet i gr/cm ³
t:	støbetid i sekunder
ξ:	tabsfaktor
H:	trykhøjde i cm

NB: Det bagvedliggende teoretiske grundlag for formlen kan findes i den støberitekniske faglitteratur eller i STØBERIET nr. 3, september 2021. I den engelske faglitteratur benævnes det mindste tværnit og støbevægten hhv. choke og weight; derfor anvendes her også betegnelser Ca (choke areal) samt W (weight).

Beregningen af det mindste tværnit forudsætter således kendskab til flere faktorer, som kan være mere eller mindre let tilgængelige, men ikke altid nemme at udvælge.

STØBEVÆGTEN

Støbevægten bestemmes ved at lægge vægten af gods, indløbssystem

og eventuelle efterfødere sammen.

Indløbssystemet og efterfødere har normalt forholdsvis enkle geometriske forme, og deres vægte er derfor temmelig nemme at beregne.

Medmindre godset består af simple geometriske forme kan en nøjagtig beregning af godsvægten være vanskeligt. Ofte anvendes vægtopplysninger, der er modtaget fra kunden eller fremgår af tegninger. Vær opmærksom på, at tegninger ofte angiver den bearbejdede eller blot en forkert vægt. Kundens oplysninger behøver heller ikke altid at være helt præcise.

Forkerte vægtopplysninger eller fejl-beregning af støbevægten har jo tiltagende betydning, desto mere godset vejer. Et fejlstøbt emne, der vejer 100 kg er beklageligt men til at leve med; hvis det derimod vejer 2.000 kg eller mere er det nærmest en katastrofe.

DENSITET

Densitet, også kaldet massefylde, er et mål for, hvor tungt et stof er i forhold til sit rumfang, og den defineres som masse pr. volumen, fx gr/cm³.

Densiteten af metallegeringer kan afhængigt af deres sammensætning variere meget. Metallegeringer indeholder forskellige grundstoffer, som har forskellige atommasser, og densiteten af en metallegering påvirkes derfor af kombinationen og koncentrationen af disse grundstoffer. Herudover ændrer densiteten sig med temperaturen i såvel fast som smeltet tilstand.

Oplysninger om metallegeringers densitet kan findes i forskellige tabeller, et eksempel med tilnærmelsesvis værdier er vist i tabel 2. Vær opmærksom på at densiteten i tabellen gælder ved 20°C og et standardatmosfæretryk på 1 atm.

Beregning af indløbssystemets mindste tværnit er baseret metallens strømningsforholdene ved støbning, det vil sige en metallegering på støbetemperatur. Da densiteten falder ved stigende temperatur bør man opti-

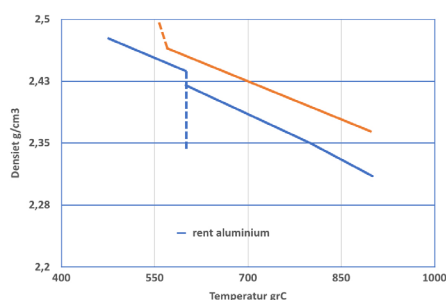
Legering	Densitet g/cm ³
Aluminum, 100 %	2,71
Aluminum, 99 %	2,72
Aluminum, 10 % Si	2,64
Al-Si8Cu3Fe	2,79
Aluminum bronze (3-10% Al)	7,7-8,7
Nikkel-Aluminium-Bronze	7,6
Inconel Ni76Cr18	8,5
Messing	8,5
Bronze (8-14% Sn)	7,4 - 8,9
Gråjern	6,8-7,4
SG-jern	7,2-7,3
Ni-hard	7,6-7,7
Støbestål, C<0,2	7,86
Støbestål, C>0,4	7,84
Støbestål, rustfrit 18Cr8Ni	7,75

Tabel 2: Densitet ved 20 °C og 1 atm.

malt set anvende den densitetsværdi, der gælder ved en temperatur ved legeringens støbetemperatur. Et eksempel på densitetsændringer med stigende temperatur er skematisk vist i fig. 10. Smeltetemperaturen af rent aluminium er ca. 660°C, ved hvilken temperatur densiteten af det smeltede aluminium er ca. 2,4, dvs. ca. 10 % mindre end ved stuetemperatur, hvor densiteten er ca. 2,7.

Det kan være vanskeligt at finde oplysninger om densiteten for enhver tænkelig metallegering ved støbetemperatur som jo også ændrer sig også under støbningen. I givet fald må den kendte densitet ved stuetemperatur reduceres med 5-10 %. Ofte vælges for aluminium baserede legeringer 2,5 g/cm³ og for Fe, Cu og Ni baserede legeringer 7,0 g/cm³.

Fig. 10: Densitet ved forskellige tem-



peraturer for rent og legeret aluminium.

STØBETIDEN

For langsom støbning er uønsket, da metallet kan størkne for tidligt, eller der kan opstå koldløbning i godsets tynde sektioner. Langsom støbning af svært gods fremmer retningsbestemt størkning, hvilket er at foretrække, men den fremmer også den termiske påvirkning af kerne- og formmaterialet og dermed risiko for, at disse nedbrydes for tidligt.

Hurtig støbning vil øge risiko for kerne- og formerosion. Generelt gælder, at hvis form og kerne er stærke og luftige nok, så er hurtig støbning at foretrække. Desuden skal støbetiden helst være kortere end takttiden ved maskinformning. Det vigtigste hensyn der bør tages, er dog metalhastigheden i indløbene. Derfor bør den optimale støbetid være således afpasset, at indløbssystemet kan forsyne indløbene og formhullet med en tilpas høj metalhastighed dog med minimal risiko for turbulente strømninger.

Den optimale støbetid bliver således afhængig af en lang række faktorer såsom støbevægt, materialeegenskaber, godstykkelse samt godsets kompleksitet. Igennem tiderne har man udarbejdet flere formler og kurver til beregning af støbetiden, der dog langtfra altid stemmer overens med praktisk erfaring. Nogle eksempler på disse formler er vist i tabel 3, og det kan ses at støbetiden udregnes på basis af vægt og et mål for godstykkelser. Der findes ligeledes mange kurver, som er udarbejdet efter praktiske erfaringer med forskellige støbelegeringer og godstyper. Eksempler på sådanne kurver er vist i fig. 11 og 12.

Man skal især være opmærksom på, om der er tale om tyndvægget eller svært gods, samt at de fleste metallegeringer kan have vidt forskellige materialeegenskaber med hensyn til størkning og slaggedannelse. Derfor bør disse formler og kurver ikke anvendes kritiskløst, men kun som supplement til egen erfaring. Almindeligvis har hvert støberi sin egen erfaring fra tilsvarende støbningen, og under forudsætning at tiderne er

blevet registreret kan disse erfaringsmæssige støbetider anvendes som udgangspunkt ved nye støbeopgaver. Desuden har erfarne metodeteknikere ofte en fingerspidsfølelse af, hvilke tider bestemte emner skal støbes på.

Metallegering	Støbetid
Aluminium	$1,6 \cdot S \cdot W^{0,4}$
Aluminium	$1,7 \cdot W^{0,5}$
Aluminiumbronze	$1,6 \cdot (s.W)^{0,3}$
Aluminiumbronze	$5 \cdot W^{0,5}$
Gråjern	$4 \cdot W^{0,3}$
Gråjern	$0,32 \cdot s \cdot W^{0,4}$
SG-jern	$1,4 \cdot W^{0,5}$
SG-jern	$0,03 \cdot W + 14$
Støbestål	$0,8 \cdot W^{0,5}$
Støbestål	$1,2 \cdot (s.W)^{0,3}$

Tabel 3: Støbetidsformler. W i kg og s i mm

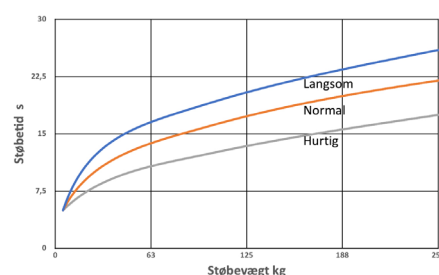


Fig. 11: Støbetider vs støbevægt for gråjern

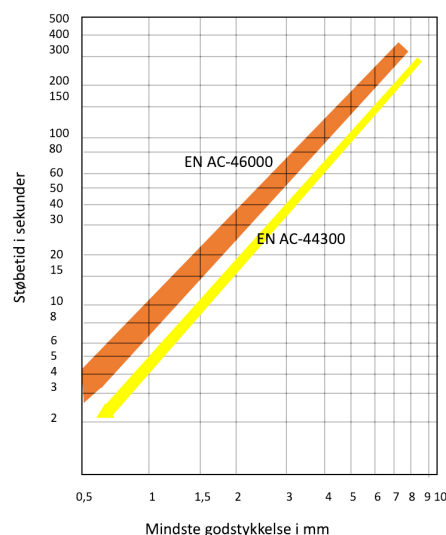


Fig. 12: Støbetider vs godstykkelser for aluminiumlegeringer

TABSFAKTOR

Tabsfaktoren ξ er et mål for den modstand, som smelten møder i indløbssystemet. Den kan variere fra 0,25

til 0,95 og har således væsentlig betydning for det endelige beregningsresultat. Der findes mange forslag til bestemmelse af tabsfaktoren, ofte baseret på antal indløb og fordelingskanaler samt deres størrelse, antal retningsændringer i indløbssystemet etc. I et enkelt indløbssystem som vist i fig. 1 kan der allerede være 5-6 af sådanne forhold at tage hensyn til, så også her har de formler, som findes i litteraturen begrænset interesse eller nytte for den praktiske støberimand. Herudover har metallens 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 metallens densitet er nogenlunde konstant for et givet indløbssystem, bliver forholdet mellem støbetid og tabsfaktor konstant, nemlig $t \times \xi = \text{konstant}$. Har man regnet med en støbetid på 10 s og en tabsfaktor $\alpha=0,5$ og er støbetiden i virkeligheden 12 s fås: $10 \times 0,5 = 12 \times \xi$ eller $\xi = 0,4$. Værdien af ξ ligger som nævnt mellem 0,25 – 0,95. I indløbssystemer med store tværsnitarealer og minimalt antal strømningsændringer kan værdien være så høje som 0,8-0,95. Som udgangspunkt kan værdierne i tabel 4 anvendes. Efterhånden får man erfaring for, hvilke tabsfaktorer der anses for at være fornuftige for bestemte indløbsdesign.

Støbemethode	Tabsfaktor
Topstøbning	0,75
Sidestøbning enkelt indløbssystem	0,65
Sidestøbning kompliceret system	0,55
Bundstøbning	0,45

Tabel 4: Tabsfaktorer i indløbssystemer

TRYKHØJDE

Som regel ændrer trykhøjden sig under formfyldningen, og den værdi, som anvendes til beregningen af det begrænsende areal kaldes den effek-

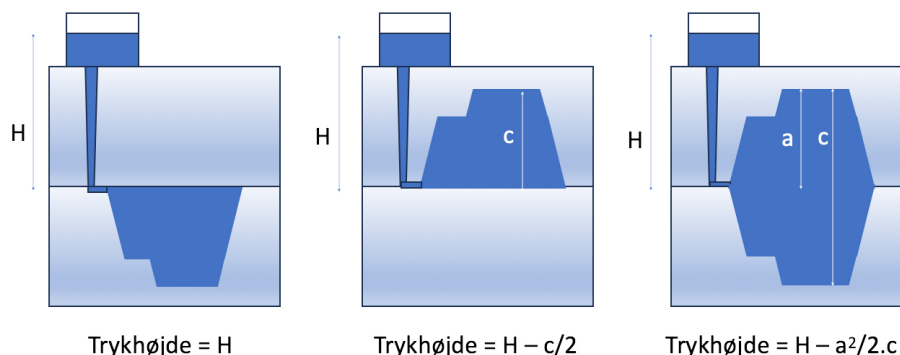


Fig. 13: Trykhøjder afhængig af formhulrummets placering

tive eller gennemsnitlige trykhøjde. Fig. 13 viser tre generelle situationer, der påvirker trykhøjden, nemlig alt gods findes i underparten, i overparten eller både i under- og overparten.

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

Desuden bør det tages i betragtning, at trykhøjden og dermed smeltens strømningshastighed ændres under støbningen. Det er især vigtigt at huske på, at hastigheden i indløbet og dermed den hastighed, hvormed metallet strømmer i formen, i det følgende benævnt (form)indstrømningshastighed, er størst i begyndelsen af støbningen og mindst mod slutningen af støbningen. Derfor bør støbegods, der har tynde sektioner, der fyldes sidst under støbningen, støbes hurtigere eller varmere end mere regulært støbegods.

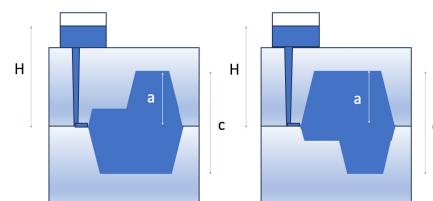


Fig. 14: Trykhøjder afhængig af formhulrummets udformning

HASTIGHED I INDLØBENE

Som tidligere nævnt er hastigheden i indløbene af afgørende betydning, da for høj hastighed medfører turbulente strømninger, som øger den mekaniske og termiske påvirkning på form og kerne. Desuden bliver metaloverfladens oxidhinde ved voldsom turbulens hvirvlet op, hvilket medfører at slagter og oxider blandes op i jernet, og/eller luft eller gas indesluttet. Turbulens er især et problem ved støbning af eksempelvis aluminiumlegeringer, der nemt oxiderer, og hvor forskellen i vægtfylde mellem oxid og smelte er lille, således at adskillelse af oxid og smelte er vanskelig.

Man kan med nogen sikkerhed forudsige, om der i et indløbssystem er tendens til turbulente strømninger når Reynolds tal overstiger en vis værdi. Reynolds tal Re er defineret som $Re = (v \times D_h) / \nu$, og derfor er følgende faktorer afgørende:

- Metallens dynamiske viskositet, ν
- Indløbssystemets hydrauliske diameter, D_h
- Metallens strømningshastighed, v

Metallens dynamiske viskositet er materialeafhængig, og den kan man

ikke gøre ret meget ved. Imidlertid øges metallets dynamiske viskositet med faldende temperatur, så en lavere støbetemperatur kan være med til at reducere risikoen for turbulens. Man kan også sige, at for høj støbetemperatur øger risikoen for turbulens, så det er også i dette henseende vigtigt at overholde støbetemperaturen.

Indløbssystemets tværnsnitsarealer bestemmer den såkaldte hydrauliske diameter D_h , som defineres som $D_h = 4A/O$, hvor A er tværnsnitsarealet og O er omkredsen. Den hydrauliske diameter kan derfor reduceres ved at gøre omkredsen af skummerenden eller indløbet stor i forhold til tværnsnitsarealet. Den hydrauliske diameter for et cirkulært tværnsnit er

$D_h = 4 \cdot \pi d^2 / 4\pi d = d$, for et firkantet tværnsnit $D_h = 4 \cdot a \cdot a / 2(a+a) = a$ og for et rektangulært tværnsnit $D_h = 4 \cdot a \cdot b / 2(a+b) = 2 \cdot a \cdot b / (a+b)$. Som vist i fig. 15 har en cirkel den største hydrauliske diameter i.f.t. et rektangulært tværnsnitsareal. Desuden reduceres den hydrauliske diameter, når rektanget bliver mere fladt, og derfor vælges almindeligvis flade bredde indløb (og for så vidt også fordelingsrender) til aluminium og aluminiumbronz.

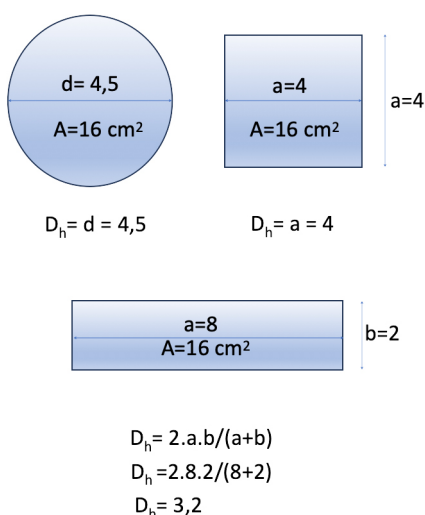


Fig. 15: Hydraulisk diameter for forskellige tværnsnitsarealer

For at minimere risikoen for turbulens anbefales, at smeltens indstrømningshastighed ikke overstiger følgende værdier:

Gråjern:	100 cm/s
SG-jern:	50 - 100 cm/s
Alu-legeringer:	25 - 50 cm/s
Aluminiumbronz:	7,5 - 25 cm/s

Bemærk at de oplyste værdier kun er retningsgivende og ikke i sig selv kan garantere turbulensfri strømning.

Da den metalmenge, der strømmer ind i formen ved konstant smelte-niveau i støbetragten, er den samme, der strømmer igennem det samlede indløbsareal, kan man, når indløbsarealet er beregnet, forholdsvis nemt beregne, hvorvidt de ønskede indstrømningshastigheder overholdes.

Det totale støbte volumen V_t (cm^3) divideret med støbetiden t (s) giver den gennemsnitlige metalmenge Q (cm^3/s), der strømmer igennem indløbsarealet Ca , dvs. $Q = V_t/t$

Indstrømningshastigheden v_i er Q divideret med indløbsarealet Ca , dvs. $v_i = Q/Ca$.

Indstrømningshastigheden bliver således: $v_i = (V_t/t)/Ca = V_t/t \cdot Ca$

For eksempel:

$$V_t = 14.000 \text{ cm}^3$$

$$t = 20 \text{ s}$$

$$Ca = 10 \text{ cm}^2$$

$$v_i = (V_t/t)/Ca = 14.000/(20 \times 10) = 70 \text{ cm/s.}$$

Denne hastighed ville være i orden, hvis metallegeringer var almindeligt gråjern, måske tilladeligt ved støbning af SG-jern, men for hurtigt til aluminium og muligvis alt for hurtigt til aluminiumbronz.

I givet fald bør indløbsarealet øges, men da skal man være opmærksom på, at en forøgelse af indløbsarealet har forskellige konsekvenser, alt afhængig af om der er tale om et tryksat eller trykløst indløbssystem.

Hvis indløbsarealet i et tryksat system øges bliver systemet trykløst. I så fald bør skummerenden tilpasses med et tværnsnitsareal, som er større end indløbsarealet, mens støbetap-

pen beholder sit oprindelige tværnsnitsareal, således at den ønskede støbetid fastholdes.

I et trykløst system har en forøgelse af indløbsarealet ingen umiddelbar betydning, men ved betydelige dimensionsændringer bør hele systemet genvurderes, især de valgte arealforhold og støbetiden. I det følgende gives nogle eksempler, som belyser disse overvejelser nærmere.

Eksempler på indløbsberegninger

Som eksempel beregnes et enkelt indløbssystem til et støbt emne (fig. 16), der støbes i 2 forskellige metallegeringer, nemlig SG-jern og aluminiumbronz.

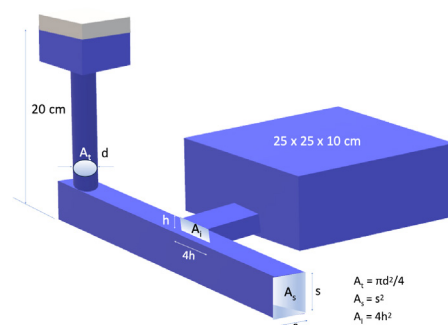


Fig. 16: Emne med indløbssystem

Overparten inkl. støbeso er 20 cm, så den gennemsnitlige trykhøjde $H = 20 - 10/2 = 15 \text{ cm}$.

Som udgangspunkt til beregningen anvendes et fladt rektangulært indløb og en kvadratisk skummerende; disse kan senere efter behov ændres til andre mere realistiske tværnsnitsarealer.

Emnet har et volumen (V) på 6.250 cm^3 , og som densitet vælges: SG-jern $7,2 \text{ gr/cm}^3$ Aluminiumbronz $7,6 \text{ gr/cm}^3$

Godsvægten bliver således hhv. 45 og 47,5 kg.

På nuværende tidspunkt kendes de endelige dimensioner af indløbssystemet ikke, så indtil videre antages, at støbevægten bliver hhv. 46 og 48 kg.

Som støbetid, jvf. tabel 3, for normal støbning vælges:

SG-jern 1,4. $W_{0,5} = 1,4 \times 460,5 = 9,5$ s.

Aluminiumbronzes. $W_{0,5} = 5 \times 480,5 = 34,6$ s.

Som tabsfaktoren vælges 0,6.

Som densitet ved støbetemperatur vælges 7 gr/cm^3 for begge legeringer.

Indløbssystemets mindste tværsnit kan nu beregnes efter:

Emnet i SG-jern:

SG-jern er forholdsvis nemt at støbe og derfor vælges ofte et tryksat system med forholdet $A_t : A_s : A_i = 1 : 1,8 : 1$

Det mindste tværsnit findes således i bunden af støbetappen og er:

$$Ca = 22,6 \times 46 / (7 \times 0,6 \times 9,5 \times 150,5) = 6,73 \text{ cm}^2$$

Indløbsarealet A_i bliver således ligeledes $6,73 \text{ cm}^2 \rightarrow h = (6,73/4)^{1/2} = 1,3 \text{ cm} \rightarrow b = 5,2 \text{ cm}$

Skummerendens areal $A_s = 1,8 \times 6,73 = 12,1 \text{ cm}^2 \rightarrow s = 12,10,5 = 3,5 \text{ cm}$

Støbetappens areal $A_t = 6,73 \text{ cm}^2 \rightarrow d = (6,73 \times 4/\pi)^{0,5} = \varnothing 2,9 \text{ cm}$

Hastighed i indløbene bliver: $v = (V/t)/Ca$.

$$v = 6250 / 9,5 / 6,73 = 97,8 \text{ cm/s.}$$

Denne værdi er måske lige stor nok, selvfølgeligt afhængig af, hvilke kvalitetsmæssige krav, der stilles til støbegodset. Turbulente strømninger i SG-jern øger risikoen for dannelse af dross, og derfor kan man i given situation vælge en maksimal indstrømningshastighed på eksempelvis 75 cm/s , og da bliver indløbsarealet:

$$\begin{aligned} \text{Maksimal indstrømningshastighed} &= 75 \text{ cm/s} = (V/t)/Ca \rightarrow \\ 75 &= (6250/9,5)/Ca \rightarrow Ca = \\ 6250/9,5/75 &= 8,8 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Med så stort et indløbsareal er systemet ikke længere tryksat da en forøgelse af støbetappen samtidigt vil øge den totale mængde metal pr. tidsenhed og dermed også hastigheden i indløbene.

Da man primært anvendes tryksatte systemer for at holde eventuelle slagge tilbage, kan løsningen her være at anvende et filtreret trykløst system. Her udnyttes fordelene af systemets mindre tendens til turbulente strømninger og filterets evne til at tilbageholde slagge.

Et forslag til et filtreret trykløst system er vist i fig. 17.

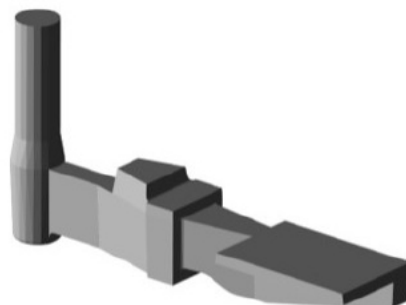


Fig. 17: Filtrert indløbssystem (Foseco)

Et trykløst system åbner sig mod indløbene, så med et indløbsareal på $8,8 \text{ cm}^2$ og en støbetap på $6,73 \text{ cm}^2$ bliver forholdet $1 : 1,3$. Skummerendens areal skal så være et sted imellem, for eksempel med forholdet $1,2 = 8,1 \text{ cm}^2$.

Der findes også en anden måde, hvorpå indstrømningshastigheden kan kontrolleres på, nemlig på følgende måde.

I bunden af støbetappen har metallet en teoretisk hastighed på $v_t = (2gH)^{0,5}$, det vil sige $(2 \times 980 \times H)^{0,5} = 44,3 \times (H)^{0,5}$, det vil sige $44,3 \times (15)^{0,5} = 172 \text{ cm/s}$. Som tommelfingerregel tabes halvdelen af denne hastighed i indløbssystemet, det vil sige at indstrømningshastigheden bliver $172/2 = 86 \text{ cm/s}$ og med et forhold mellem støbetap og indløb på $1 : 1,3$ bliver hastigheden således ca. $86/1,3 = 66 \text{ cm/s}$.

Man bør dog hele tiden huske på, at alle beregninger i første omgang delvist er baseret på antagelser, og desuden er indstrømningshastigheden størst i begyndelsen af støbningen og derfor er større end den beregnede gennemsnitshastighed. Derfor kan der i virkeligheden være områder i godset, hvor metallets hastighed vil være betydelig større end beregnet.

EMNET I ALUMINIUMBRONZE:

Aluminiumbronzes er en stærkt oxiderende støbelegering, og derfor anvendes almindeligvis et trykløst system, fx med arealforholdet $A_t : A_s : A_i = 1 : 3 : 4$

Det mindste tværsnit i støbetappens bund bliver således:

$$Ca = 22,6 \times 48 / (7 \times 0,6 \times 34,6 \times 150,5) = 1,93 \text{ cm}^2$$

Indløbsarealet A_i er $4 \times 1,93 = 7,72 \text{ cm}^2 \rightarrow h = (7,72/4)^{0,5} = 1,4 \text{ cm} \rightarrow b = 5,6 \text{ cm}$

Skummerendens areal $A_s = 3 \times 1,93 = 5,79 \text{ cm}^2 \rightarrow s = 5,40,5 = 2,4 \text{ cm}$

Støbetappens areal $A_t = 1,93 \text{ cm}^2 \rightarrow d = (1,93 \times 4/\pi)^{0,5} = 1,6 \text{ cm}$

Hastighed i indløbene bliver: $v = (V/t)/Ca = 6.250/34,6 \times 7,72 = 24 \text{ cm/s}$.

Denne indstrømningshastighed er muligvis for stor til at kunne støbe fejlfri aluminiumbronzes. Ved bundstøbning og med store krav til overfladekvaliteten vælges ofte en maksimal indstrømningshastighed på ikke mere end $7,5 \text{ cm/s}$ mens der ved sidestøbning kan vælges en højere værdi.

Vælges eksempelvis en hastighed på 15 cm/s fås:

$$\begin{aligned} v &= (V/t)/Ca \rightarrow 15 = (6.250/34,6)/Ca \rightarrow \\ Ca &= 6.250 / (34,6 \times 15) = 12,1 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Støbetappen og indløbet bliver da hhv. $1,9$ og $12,1 \text{ cm}^2$, og arealforholdet $1 : 6,4$. Skummerendens areal kan forsat være $2,4 \text{ cm}^2$ og dermed bliver

arealforholdet $A_t : A_s : A_i = 1 : 1,3 : 6,4$.

En alternativ beregning til aluminium-bronze er baseret på at holde indstrømningshastigheden i begyndelsen af støbningen på maksimalt 7,5 cm/s.

Her beregnes støbetiden ligeledes kun ud fra vægten, dvs. $t = 5 \times W_{0,5} = 5 \times 480,5 = 34,6$ s.

Indløbsarealet beregnes ud fra den støbte metalmasse Q som er $48 / 34,6 = 1,39$ kg/s.

Ud fra den kendsgerning, at indstrømningshastighed er størst i begyndelsen anvendes en initialfyldningsmængde (Q_i) som er 50 procent større, dvs. $Q_i = 1,5 \times 1,39 = 2,09$ kg/s.

Nu beregnes indløbsarealet ved at gange Q_i med faktor 20,26 dvs. $2,09 \times 20,26 = 42,3$ cm².

Denne værdi er således betydeligt større end ved den traditionelle beregning, men det bør ihukommes, at den alternative beregningsmåde er baseret på en maksimal indstrømningshastighed på 7,5 cm/s i begyndelsen af støbningen, hvor hastigheden er maksimal.

Den alternative beregning anbefaler en skummerende med et areal, der er $0,5 \times$ indløbsarealet, dvs. 21 cm².

Støbetappen bestemmes vha. det på

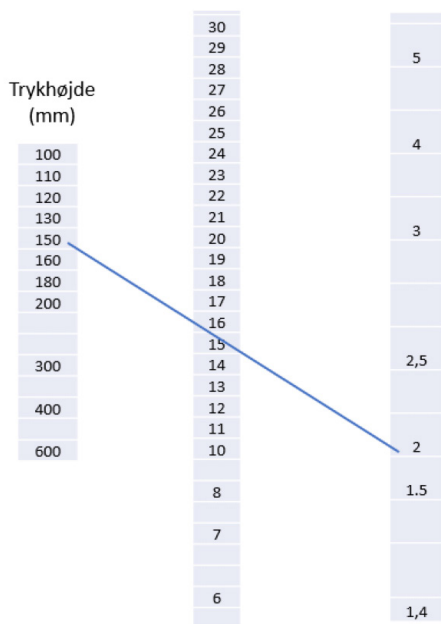


Fig. 18: Nomogram til bestemmelse af støbetappens diameter

fig. 18 viste nomogram og har i bunden sit mindste tværsnitsareal på $\varnothing 15$ mm ($=1,8$ cm²). Her er der altså god overensstemmelse med den traditionelle beregning. Det endelige arealforhold bliver således ca. $1 : 12 : 24$

Dimensioneringsforskelle af de forskellige systemdesign er vist skematisk i fig. 19. Det fremgår tydeligt, at samme støbevægt men forskellige materialer samt forskellige beregningsmetoder kan resultere i vidt forskellige design. Man bør dog huske på, at et indløbssystem alene ikke kan garantere et godt støberesultat. Intet indløbssystem kan ikke forhindre støbevrag, når der anvendes dårlig praksis såsom malpropere forme, kerner med stort indhold af fugt og gasdannede bindemidler, urent metal, fejlanalyser, mangelfuld afslagning, forkert støbetemperatur og afbrudt støbning.

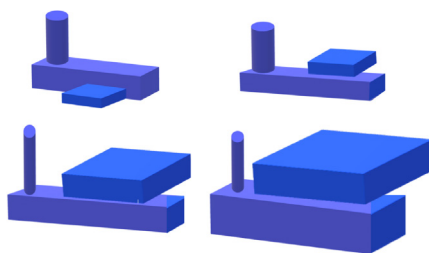


Fig. 19: Dimensioneringsforskelle af forskellige systemdesign

SAMMENFATNING

Ved støbning skal et indløbssystem sikre, at det flydende metal fordeles korrekt til formhulrummets forskellige områder, samtidigt med at eventuelle slagter og urenheder holdes tilbage. Indstrømningshastigheden skal være tilpas langsomt således turbulente strømninger undgås, dog ikke så langsomt, at metallet størkner for tidligt.

Et indløbssystem kan udformes på mange måder, men dets grundlæggende designprincipper gælder for de fleste støbemetoder og metallegeringer.

For at kunne dimensioneres indløbssystemets forskellige dele er det nødvendigt at beregne systemets mindste tværsnitsareal, som, afhængig af om systemet eller tryksat eller

trykløst, kan placeres i indløbet eller støbetappen.

Den teoretiske beregningsmetode er baseret på støbevægt, smeltens densitet, støbetiden, friktionstab i systemet samt trykhøjden. Disse faktorer er ikke altid nemme at bestemme.

Der findes i faglitteraturen mange forskellige tabeller og formler, som giver forslag til beregning eller udvælgelse af disse faktorer. Disse forslag skal man dog ikke anvende kritikløst men kun betragte som retningsgivende.

Ved dimensionering af systemet er det afgørende vigtigt at kontrollere at metalstrømmens indløbshastighed ikke er for stor, og ofte må systemet ændres væsentlig. Der er også stor forskel på om der anvendes et tryksat eller trykløst indløbssystem, og derfor kan der være væsentlige designforskelle mellem ens emner støbt i forskellige metaller.

Til trods for alle tilgængelige teoretiske anvisninger og avanceret design- og simuleringssoftware er det vigtigt at huske på, at intet kan erstatte logisk tænkning og den fagtekniske viden og erfaring, som man, som erfaren støber, er i besiddelse af.

REFERENCER:

- E. Diepschlag-Die Giess- und Anschnittechnik in den Giessereien
- Giesserei Lexikon
- Great Britain. Ministry of Defence. Ship Department Publication 18 . Design and manufacture of nickel-aluminium-bronze sand castings
- Holzmüller und Kucharcik-Atlas zur Anschnitt-und Speisertechnik für Gusseisen
- Meehanite-Gating and Feeding Manual
- Stephan Karsay – Ductile Iron III
- Suschil and Plutshack-Gating Design
- Sv. Hegel og Fr. Volk- Støberibogen II
- Victor de lange Davies- Indløbsteknik