

Kompendium / Høgskolen i Gjøvik, 2012 nr. 5

# Aluminium

Henning Johansen

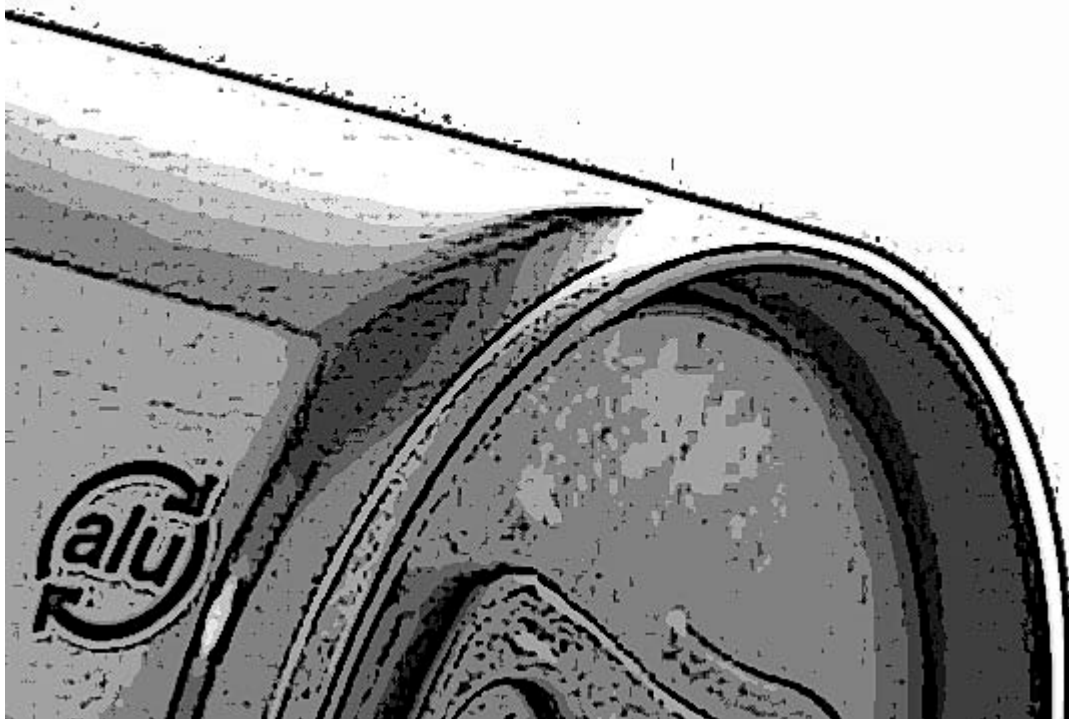


Gjøvik 2012

ISSN: 1503-3708

# ***Aluminium***

---



*Henning Johansen*

	side:
INNHOLD	2
FORORD	3
1 INNLEDNING	4
1.1 Aluminium egenskaper på to minutter	4
1.2 Materialet aluminium	5
2 FREMSTILLING OG ANVENDELSE AV ALUMINIUM	6
2.1 Produksjonsprosess	6
2.2 Anvendelse	8
3 EGENSKAPER, FORDELER OG ULEMPER	10
3.1 Sammenligning av egenskaper	10
3.2 Fordeler og ulemper	11
4 ALUMINIUM OG ALUMINIUMLEGERINGER	12
4.1 Aluminiums oppbygging	12
4.2 Legeringselementer i aluminiumlegeringer	13
4.3 Herding av aluminiumlegeringer	15
4.3.1 Herding ved kaldbearbeiding	15
4.3.2 Herding ved legering	16
4.3.3 Herding ved legering og varmebehandling	16
5 KLASSIFISERING AV ALUMINIUMLEGERINGER	21
6 NYERE LEGERINGER OG KOMPOSITTER	28
7 PROSESSRUTER	29
7.1 Valsing og forming av plater og bånd	30
7.2 Ekstrudering og bearbeiding av profiler, rør og stenger	30
7.3 Stykkstøping	33
8 REFERANSER	34

## FORORD

Dette kompendium er beregnet på personer som er fortrolig med grunnleggende materiallære og som ønsker å få en grunnleggende innføring i aluminium Al, og Al-legeringer som er den mest anvendte gruppen av lettmetaller. Det er skrevet ut i fra en serie med forelesninger, først for sveiseteknisk personell på kurs holdt av Teknologisk Institutt og senere i forelesninger for bachelorstudenter i Materiallære ved Høgskolen i Gjøvik. Det er lagt stor vekt på gode illustrasjoner og kortfattet tekst.

Som mål har dette kompendium å gi en kort innføring om aluminium og aluminium-legeringer. Hvordan aluminium fremstilles og hva som er anvendelsesområdene. Viktige egenskaper med fordeler og ulemper, hvordan aluminium er bygd opp, legeringselementer som benyttes og hvordan vi kan bedre styrke-egenskapene avhengig av type legering med forskjellige typer herdeprosesser. De vanligste måtene å klassifisere Al og Al-legeringer etter europeiske og amerikanske stadarder. Vi ser også på noen nyere legeringer og eksemper på Al-kompositter. Vi avslutter med å se på de vanligste prosessrutene som benyttes for Al og Al-legeringer, valsing, ekstrudering og støping.

Forfatteren var tidligere ansatt som bl.a. seksjonsleder ved Teknologisk Institutt, avd. for materialteknologi i Oslo, og er nå førsteamanuensis i materialteknologi ved Høgskolen i Gjøvik.

# 1 INNLEDNING

## 1.1 Aluminium egenskaper på to minutter

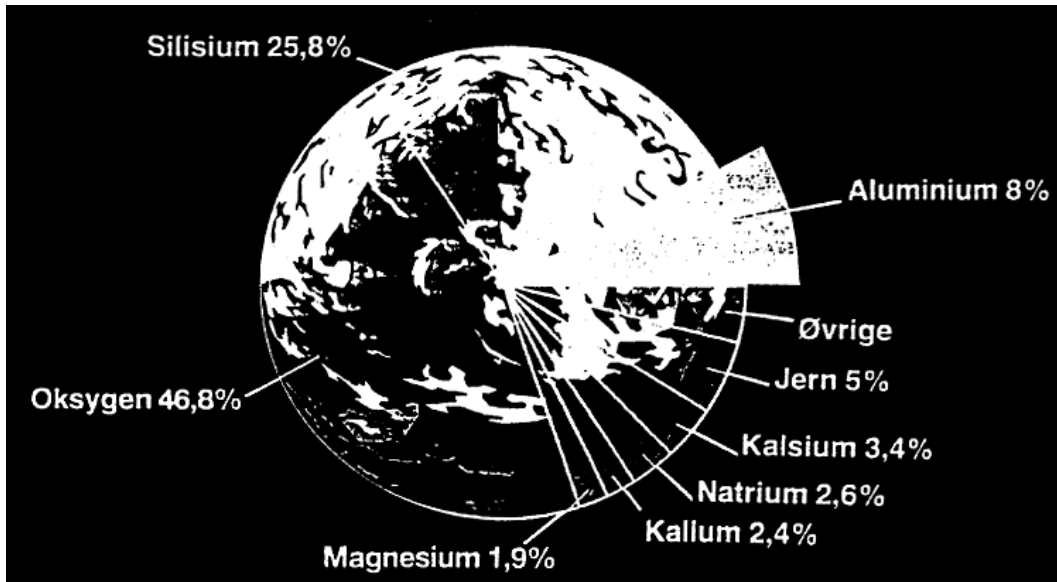
Vekt:	Vekten til aluminium er $2,7\text{kg/dm}^3$ , ca. en tredjedel av stålets vekt.
Styrke:	Aluminium er sterkt i forhold til sin vekt, sammenlignet med andre materialer. Aluminiumlegeringer har en strekkfasthet på mellom 70 og $700\text{N/mm}^2$ . De vanligste legeringene for ekstrudering ligger mellom 150 og $300\text{N/mm}^2$ . Aluminium blir ikke sprøtt ved lave temperaturer, slik som de fleste ståltyper blir. Tvert imot blir materialet seigere og styrken økes. Ved høye temperaturer reduseres styrken. I konstruksjoner med konstante temperaturer over $100^\circ\text{C}$ må vi ta hensyn til dette forholdet.
Lengdeutvidelse:	Sammenlignet med andre materialer utvider aluminium seg mye når temperaturen stiger. En 10m lang Al-stang vil bli 1cm lenger når temperaturen endres fra $-20$ til $+20^\circ\text{C}$ . En tilsvarende jernstang vil bare bli 0,5cm lenger. Aluminiums lengdeutvidelseskoeffisient er $24 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ .
Formbarhet:	Foruten at aluminium kan ekstruderes kan det valsnes i så vel varm som kald tilstand.
Bearbeiding:	Aluminium er enkelt å bearbeide ved hjelp av de fleste bearbeidingsmetoder: Skjærende bearbeiding, fresing, boring, kapping, stansing og bøyning. Energiforbruket ved bearbeiding er lavt.
Sammenføring:	Funksjoner for sammenføring bygges ofte inn i profilen. Utover dette kan man sammenføre aluminium ved hjelp av velkjente teknikker som bl.a. sveising, FSW, lodding, liming og nagling.
Ledeevne:	Aluminium leder varme og elektrisitet svært godt. En aluminiumsleder veier ca. halvparten så mye som en kobberleder med samme overføringskapasitet.
Refleksivitet:	Aluminium har god evne til å reflektere så vel synlig lys som varmestråling. Aluminium kan f.eks. benyttes som reflektor i lysarmaturer, mens et annet bruksområde er aluminiumstepper som brukes til å holde skadde personer varme.
Avskjerming:	Tette bokser i aluminium stenger ute eller skjerner effektivt mot elektromagnetisk stråling.
Korrosjon:	Som de fleste andre metaller danner aluminium i kontakt med oksygenet i luften et svært tynt oksidlag på kun noen hundredels $\mu\text{m}$ . ( $1\mu\text{m}$ er 1 tusendels millimeter). Laget er tett og gir svært god beskyttelse mot korrosjon. Skades oksidlaget, gjendannes det spontant. Ved anodisering økes oksidlagets tykkelse, og den naturlige korrosjonsbeskyttelsen forsterkes. Aluminium har god korrosjonsmotstand i normale og lett sure miljøer. Som en følge av dette benyttes ofte aluminium i konstruksjoner brukt i sjøvann.
Ikke-magnetisk:	Aluminium er et ikke-magnetisk materiale. Denne egenskapen utnyttes bl.a. ved gjenvinning, hvor jernskrot etter fragmentering utskilles gjennom magnetseparering.
Ugiftig:	Nest etter oksygen og silisium er aluminium det vanligste materialet i jordskorpen. Aluminiumforbindelser forekommer derfor praktisk talt i alt som omgir oss - også i det vi spiser og drikker.

(10)

## 1.2 Materialet aluminium

Aluminium inngår i gruppen lettmetaller sammen med magnesium og titan. Det er det letteste etter magnesium og det mest brukte.

Aluminium er det mest utbredte metall i naturen og utgjør ca. 8% av jordskorpas masse.



Figur 1.1

Aluminium utgjør ca. 8% av jordskorpas masse. (Skandaluminium)

Siden aluminium forekommer i form av veldig stabile oksygenforbindelser, tok det lang tid før vi ble i stand til å fremstille selve grunnmetallet. Det skjedde første gang i 1824 i laboratoriet til dansken H.C. Ørsted. En viss kommersiell produksjon kom i gang, men selv 50år etter var aluminium dyrere og mer ettertraktet enn gull.

Gjennombruddet kom først i 1886. Da oppfant amerikaneren C. M. Hall og franskmannen P. L. T. Heroult, uavhengig av hverandre, en metode for fremstilling av aluminium ved hjelp av smelteelektrolyse. Metoden baserer seg på bruk av aluminiumoksid som igjen er fremstilt av bauxitt. Selv om det er skjedd forbedringer i løpet av de siste hundre årene, er det fortsatt den samme metoden som brukes i dag til industriell fremstilling av metallet aluminium.

Produksjonen av aluminium har hatt en kraftig vekst de siste hundre årene. Spesielt har veksten i forbruket de siste 40årene vært dramatisk.

Aluminium er et verdifullt lettvektsmateriale p.g.a. lav vekt og god styrke, resirkulerbarhet, korrosjonsbestandighet, holdbarhet, formbarhet og ledningsevne. På grunn av denne enestående kombinasjonen av egenskaper, øker bruken av aluminium i dagens produkter. Et eksempel på dette er innen transport. Vi kan ikke fly, reise med hurtigtog, med raske og lette biler eller med hurtigferje uten dette materialet.

## 2 FREMSTILLING OG ANVENDELSE AV ALUMINIUM

### 2.1 Produksjonsprosess

Aluminium kan produseres via to forskjellige ruter:

- 1 Primær aluminiumproduksjon fra malm
- 2 Resirkulert aluminium fra prosessavfall og brukte aluminiumprodukter

Produksjon av primær aluminium består av tre trinn:

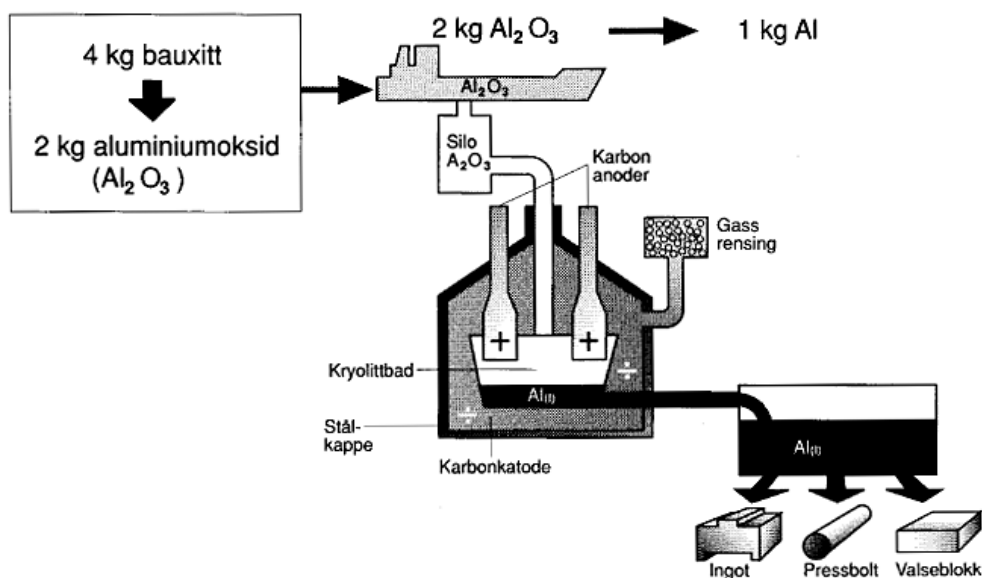
- a) Bauxitt gruvedrift
- b) Leirjord- (alumina) produksjon
- c) Elektrolyse.



Figur 2.1  
Aluminium smelte. (1)

Bauxitt, malmen må bearbejdes til ren aluminiumoksid (alumina, leirjord) før den kan bli omdannet til aluminium ved elektrolyse. Dette oppnåes ved bruk av en kjemisk prosess, Bayer, i leirjord-raffinerier. Sluttproduktet, aluminiumoksid,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , er et fint kornet hvitt pulver. Fire kg av bauxitt kreves for å produsere to kg aluminiumoksid som igjen gir en kg primæraluminiumen.

### Oksidproduksjon      Elektrolyse      Legering og støping

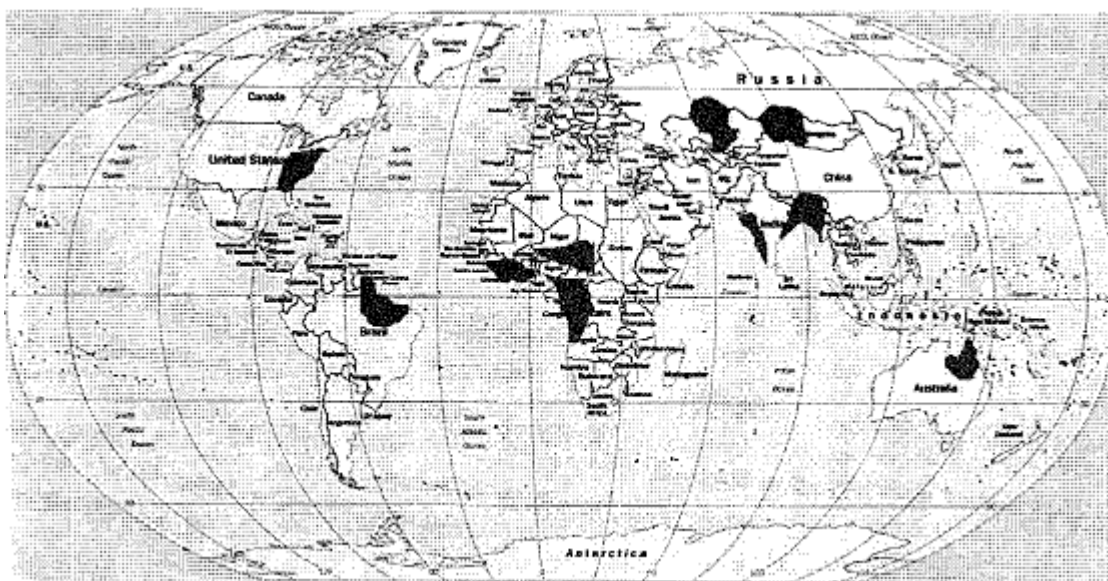


Figur 2.2  
Fremstilling av 1 kg aluminium. (2)

Aluminium krever betydelige energimengder ved førstegangs fremstilling. Det går med ca. 12 - 14 KWh for å fremstille 1kg ren aluminium i elektrolyseprosessen. På grunn av det lave smeltepunktet (ca. 660°C) krever omsmelting bare 5% av den opprinnelige energitilførselen. Dette stimulerer til gjenbruk og gjør det økonomisk interessant å etablere effektive resirkuleringssystemer for aluminium. Tilsvarende tall for stål er ca. halvparten.

I Norden fremstilles primæraluminium ved bruk av vannkraft. Mesteparten av denne aluminiumen sendes ut i verden for videre foredling. Det vil i realiteten si at vi lagrer og eksporterer energi til områder hvor energifremstilling bare er mulig ved hjelp av fossilt brennstoff. Dette er viktig ut fra et globalt miljøperspektiv.

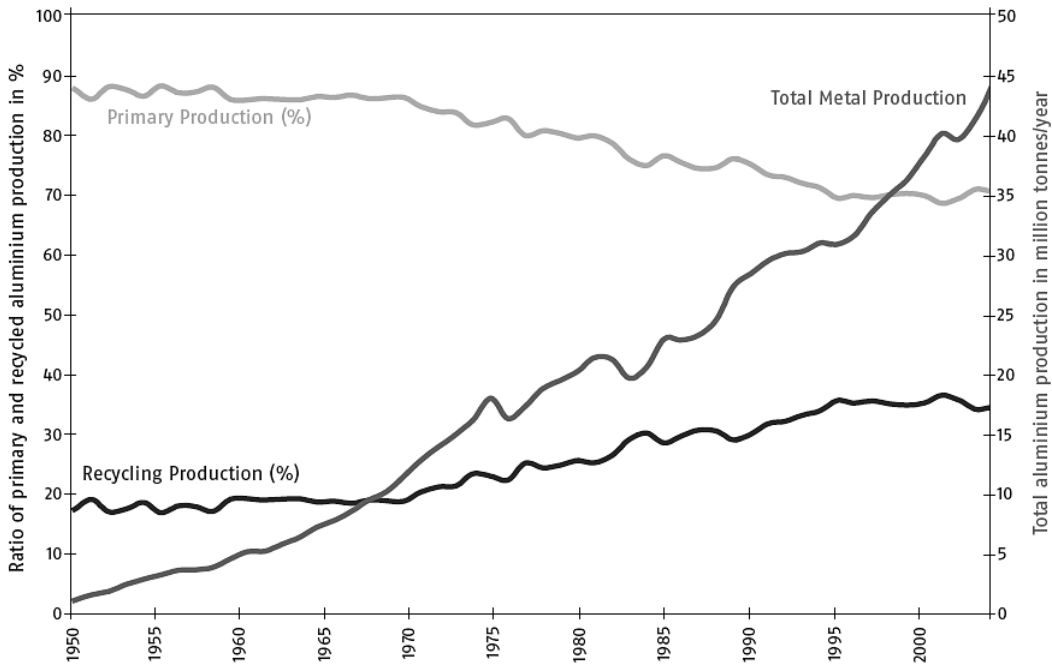
Figuren under viser forekomst av bauxitt globalt.



*Figur 2.3*  
*Forekomst av bauxitt globalt. (3)*

Figuren på neste side viser global fordeling av produksjon av resirkulert og primær aluminium, samt total aluminium produksjon.





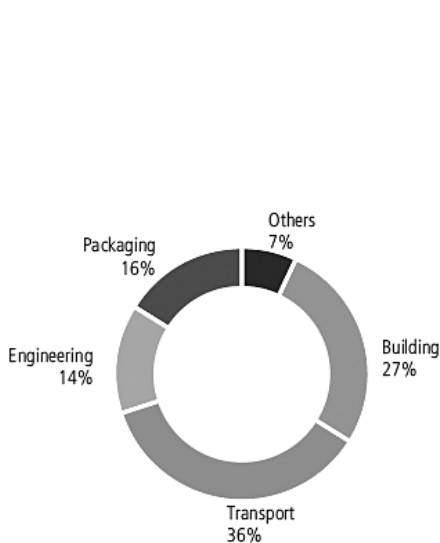
Figur 2.4

Global fordeling av produksjon av resirkulert og primær aluminium i % (venstre skala) og total aluminium produksjon i millioner tonn/år (høyre skala). (4)

Over en tredel av verdensproduksjonen er resirkulert metall. Økende bruk av aluminium, økende miljøbevissthet og nye teknologiske muligheter, gjør at vi venter en kraftig vekst av mengden resirkulert aluminium i årene fremover.

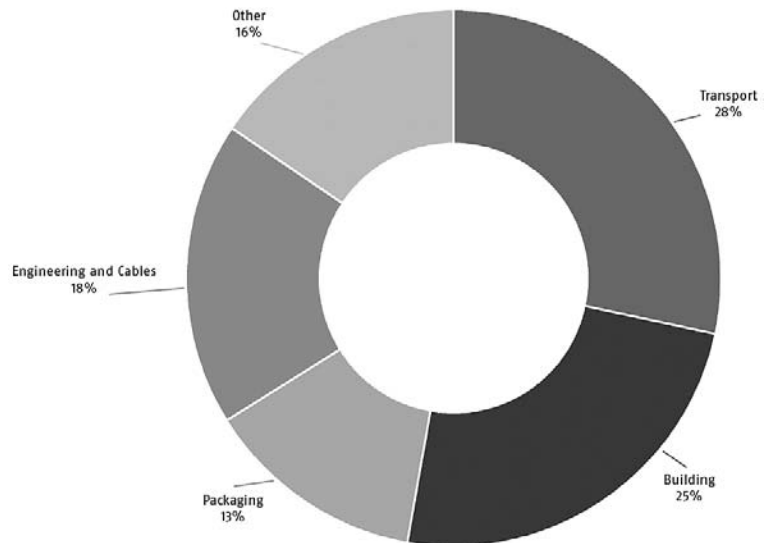
## 2.2 Anvendelse

Figurene under viser sluttbruker markedet for aluminium produkter i vest Europa og globalt.



Figur 2.5a

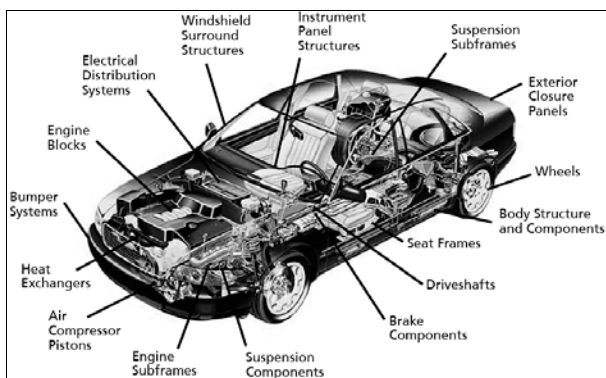
Sluttbruker markedet i Vest-Europa for aluminium produkter (2005). (1)



Figur 2.5b

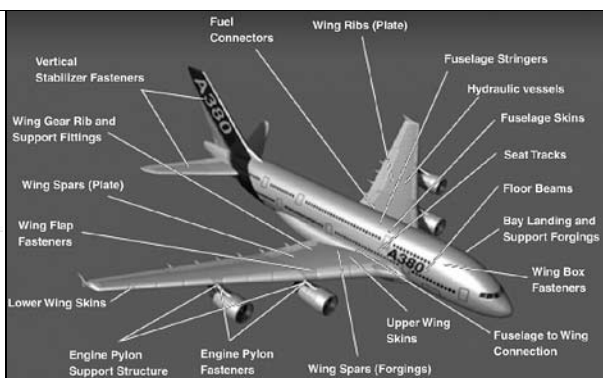
Sluttbruker markedet globalt for aluminium produkter (2004). (4)

Bildene under viser noen eksempler på produkter hvor en stor del av aluminium benyttes.



aluminium in cars, EAA

[http://www.eaa.net/eea/downloads/Aluminium\\_in\\_cars\\_Sept2007.pdf](http://www.eaa.net/eea/downloads/Aluminium_in_cars_Sept2007.pdf)



Airbus 380, Alcoa

<http://www.alcoa.com/aerospace/en/applications.asp>



boats <http://www.alcan.com/>



cans <http://www.world-aluminium.org/>



buildings



bicycle

<http://www.alcoa.com/global/en/home.asp#>



buses

<http://www.designinsite.dk/htmls/inspmat.htm>

Figur 2.6  
Noen eksempler på anvendelse av aluminium. (26.02.08)

### 3 EGENSKAPER, FORDELER OG ULEMPER

#### 3.1 Sammenligning av egenskaper

Tabellen under viser en sammenligning mellom noen egenskaper og priser på halvfabrikata i forhold til vanlig konstruksjonsstål. Stålprisen er satt til 1,0. Som vi ser, kommer lettmetallene gunstigere ut når prisene pr. volumenhet legges til grunn. Husk at metallpriser varierer med tiden og type halvfabrikata.

Egenskap:		Materiale:			
		Mg	Al	Ti	Fe
Tetthet	[kg/dm <sup>3</sup> ]	1,74	2,7	4,51	7,87
Elastisitetsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]	45.000	70.000	120.000	210.000
Smeltepunkt	[°C]	650	660	1670	1535
Gitterstruktur ved 20°C		tettpakket heksagonal	kubisk flatesentrert	tettpakket heksagonal	kubisk romsentrert
Spesifikk varmekapasitet	[J/kg°C]	1030	900	528	440
Varmekonduktivitet	[W/m°C]	159	210	17	76
Lengdeutvidelseskoeffisient	[x10 <sup>-4</sup> /°C]	26,1	24	8,9	12
Relativ kost på vektbasis	[forholdstall]	7,5	3,7	9,0	1,0
Relativ kost på volumbasis	[forholdstall]	1,7	1,3	5,2	1,0

Journal of Metals, 54 (2002) 42–48 og Steel World, 2 (1997) 59.

Tabell 3.1

Sammenligning av egenskaper mellom lettmetallene Mg, Al og Ti med Fe (jern, stål), samt prisen på halvfabrikata (forholdstall)

Den neste tabellen viser noen forholdstall mellom aluminium og stål. Aluminium er ofte et alternativt materialvalg til stål.

Fysikalske egenskaper	Forhold Al : stål
Vekt (tetthet)	1 : 3
Smeltetemperatur	1 : 2
Smeltetemperatur oksid	1,3 : 1
Elektrisk ledningsevne	4,5 : 1
Varmeledningsevne	4 : 1
Varmekapasitet	2 : 1
Smeltevarme	3 : 1
Utvidelseskoeffisient	2 : 1
Elastisitetsmodul	1 : 3

Tabell 3.2

Noen forholdstall mellom aluminium og stål.

## 3.2 Fordeler og ulemper

Under er det listet opp de viktigste fordeler og ulemper ved å benytte aluminium.

### Fordeler:

Egenskap	Kommentar
▫ Høy styrke	Dette er avhengig av type legering og leveringstilstand.
▫ Lav vekt	Sett i forhold til stål.
▫ Fritt for sprøbruddproblemer	Dette gjelder alle materialer med kubisk flatesentrert gitterstruktur, som Al
▫ Høy korrosjonsmotstandsevne	Dette gjelder med valg av riktig legering og i forhold til strål. Det dannes et oksidskikt på overflaten som beskytter materialet mot korrosjon.
▫ Stor dimensjonsnøyaktighet	
▫ Pent utseende	Dette er avhengig av overflatebehandling og smak.
▫ Pressbart, knabart	Avhengig av legering og temperatur.
▫ Høy elektrisk ledeevne	
▫ Høy varmeledeevne	
▫ Umagnetisk	

### Ulemper:

Egenskap	Kommentar
▪ Lav elastisitetsmodul	Sett i forhold til styrken og i forhold til stål.
▪ Temperaturfølsomhet	Sett i forhold til brann og sveisvarme.
▪ Relativt høy materialpris pr. kg	Sett i forhold til stål.
▪ Lav utmattingsfasthet	Al har ikke en utmattingsgrense som stål.

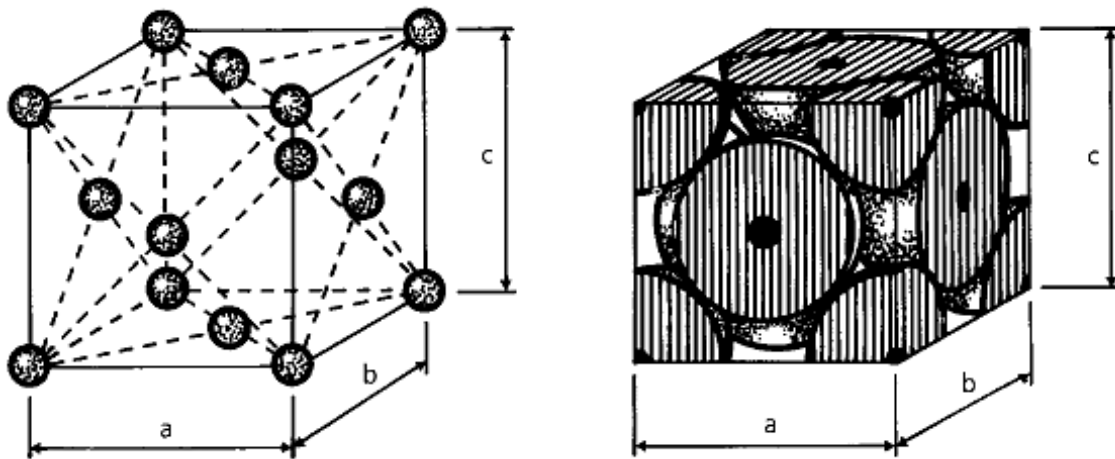
### Mindre ulemper:

Egenskap	Kommentar
◦ Materialet må hentes fra andre steder	Fra pressverk og valseverk. Dette gjelder også stål.
◦ Delvis bundne former	
◦ Liten egendemping ved svingninger	
◦ Deformasjonsmykhet i forhold til bæreevne	
◦ Lav brudd-deformasjon for hørfaste legeringer	
◦ Stor varmeutvidelseskoeffisient	

## 4 ALUMINIUM OG ALUMINIUMLEGERINGER

### 4.1 Aluminiums oppbygging

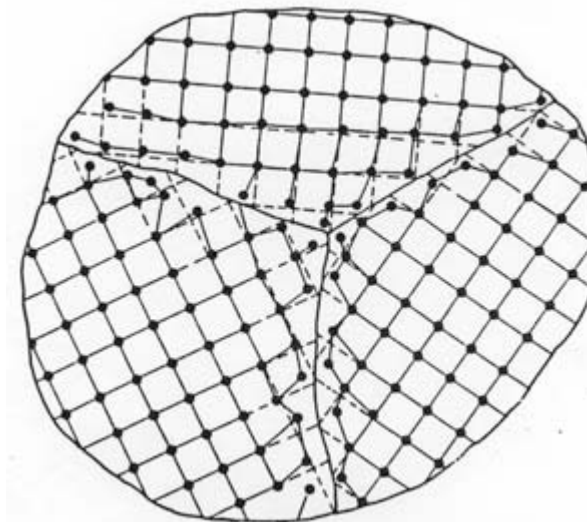
Aluminium er et krystallinsk materiale som andre metaller. Atomene er ordnet i et tredimensjonalt mønster, en gitterstruktur. Aluminium har kubisk flatesentrert gitterstruktur (face centered cubic structure). Figuren under viser en enhetscelle.



Figur 4.1

Kubisk flatesentrert enhetscelle i aluminium. sidekantene  $a=b=c$ . (5)

Et stort antall atomer i et regelbundet mønster danner krystallkorn. Innenfor hvert korn har alle atomene samme orientering. Atomgitter (krystallkorn) møtes i kornrensene. Se figur under.



Figur 4.2

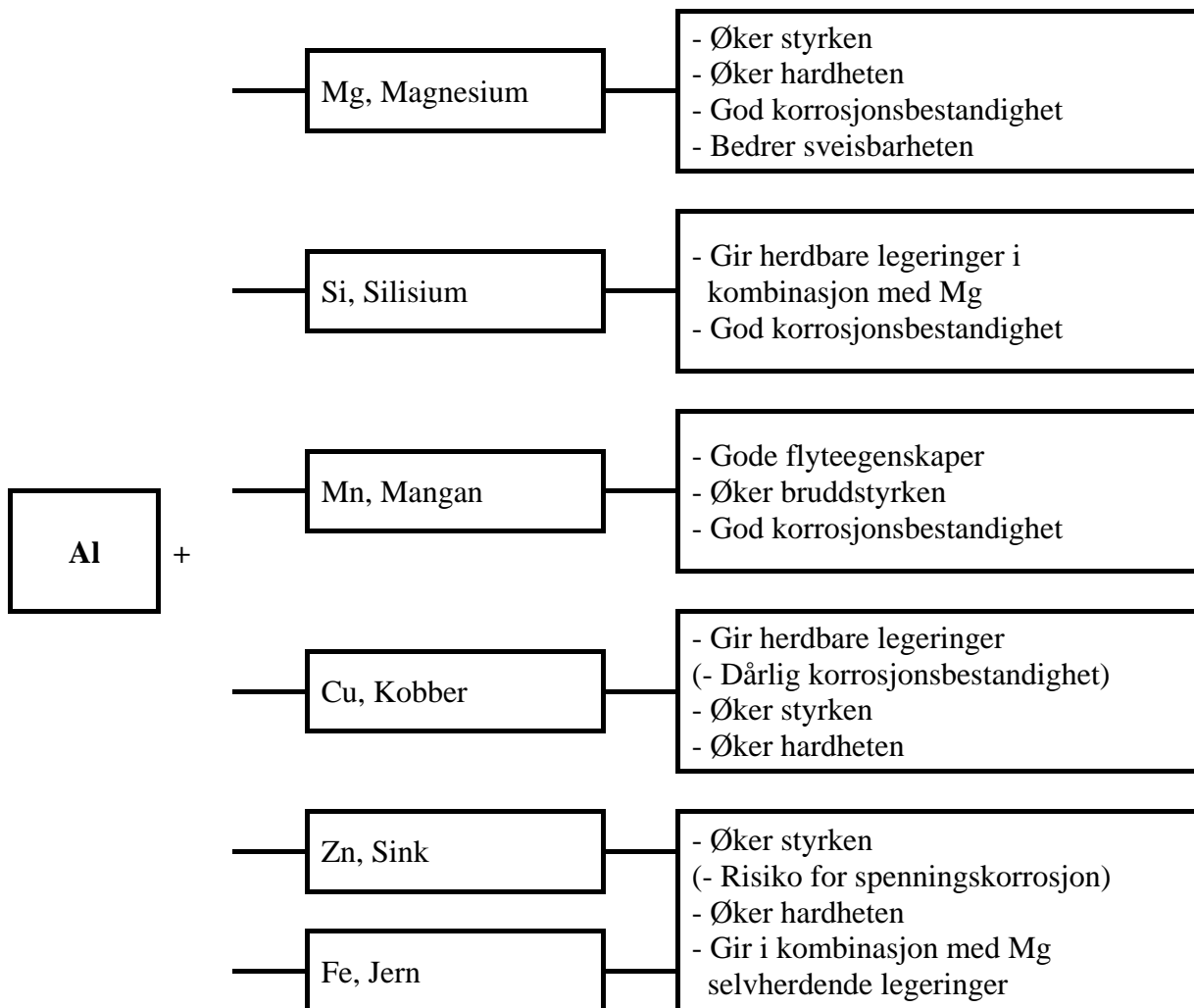
Korngranseområdet forstørret. Tre krystallkorn møtes. Innenfor hvert korn er det lik orientering av atomene. I kornrensene blir det stor uorden i gitterstrukturen.

## 4.2 Legeringselementer i aluminiumlegeringer

De viktigste legeringselementene vi benytter til å gi aluminium ønskede egenskaper er magnesium (Mg), silisium (Si), mangan (Mn), kobber (Cu) og sink (Zn).

Jern (Fe) inngår i alle kommersielle legeringer med fra 0,1 til 0,4% vekt. Fe-innholdet kan betraktes som en forurensning i metallet og kommer fra råstoffene (aluminiumoksid) gjennom elektrolyseprosessen. I noen tilfeller utnyttes Fe til å gi metallet spesielle egenskaper (for eksempel egenskaper i aluminiumfolie).

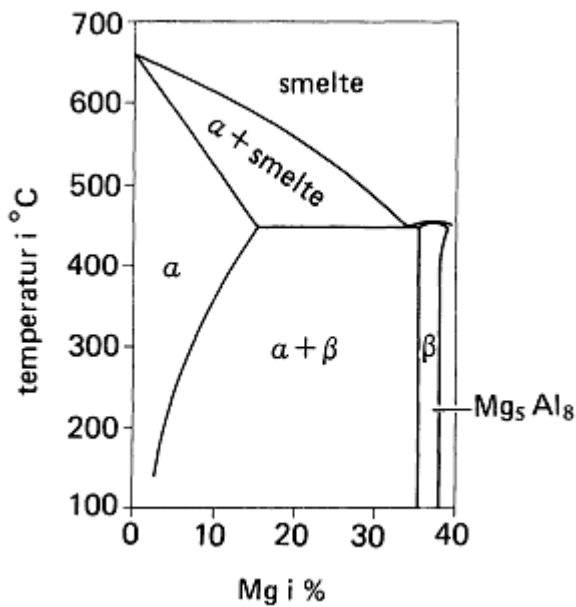
Figuren under viser egenskaper som oppnås ved bruk av forskjellige legeringselementer.



Figur 4.3

De viktigste legeringselementene i aluminium og hvilke egenskaper de gir legeringene. (Skanaluminium)

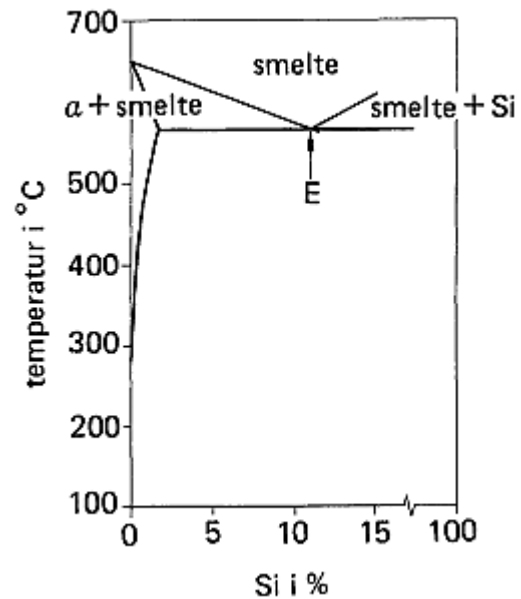
De neste figurene viser fasediagrammer til noen av de viktigste legeringene.



Figur 4.4

Aluminium, Al - magnesium, Mg. (6)

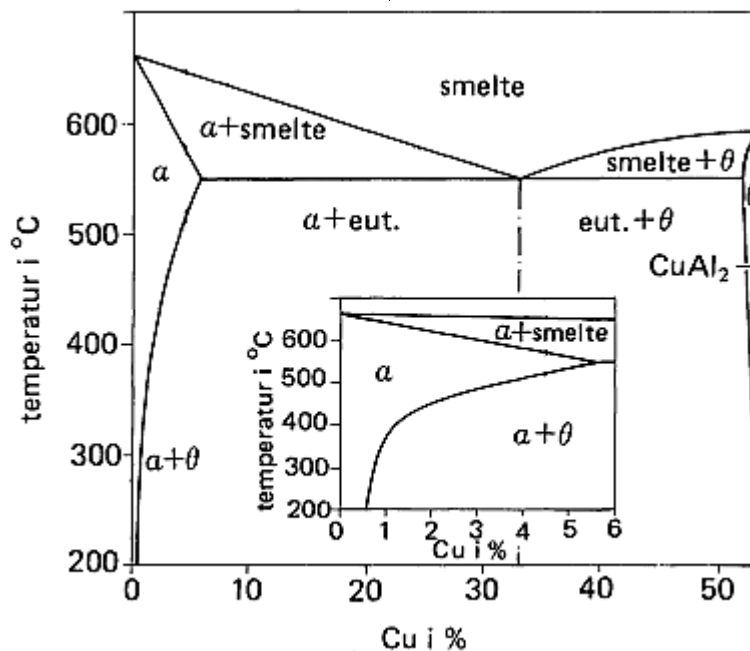
Mg-innhold holdes vanligvis under 5 - 6% for å unngå det harde og sprø eutektikum, Al-Mg<sub>5</sub>Al<sub>8</sub>. Legeringene egner seg for plastisk bearbeiding og egner seg for støping med små mengder silisium, Si, tilsatt.



Figur 4.5

Aluminium, Al - silisium, Si.  
 $\alpha$  = blandkrystaller(6)

Kommersielle legeringer kan inneholde 5 - 25% Si. De fleste er undereutektiske med Si-innhold 7 - 12%.

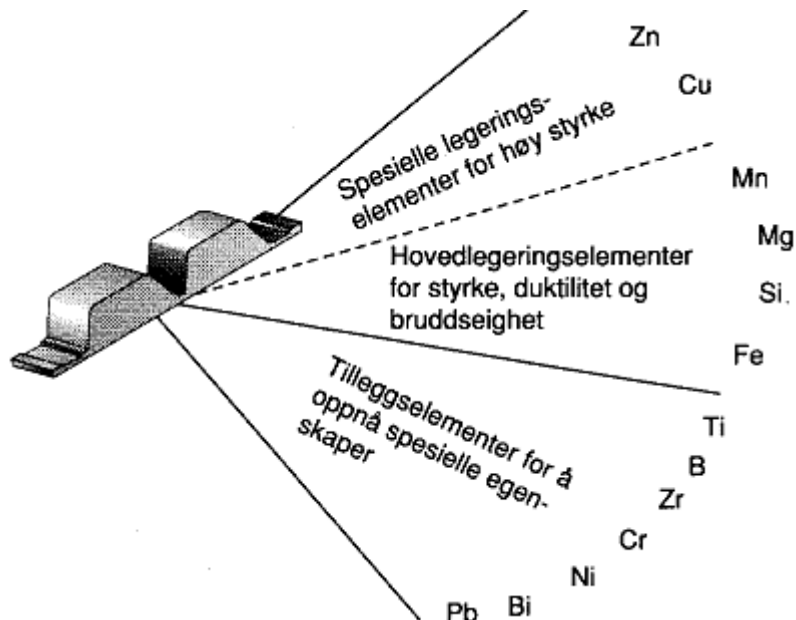


Figur 4.6

Aluminium, Al - kobber, Cu. (6)

Cu danner blandkrystaller,  $\alpha$ , med Al opp til 5,7%. Ved større Cu-innhold opptrer eutektikum, Al-CuAl<sub>2</sub>, som normalt legger seg på korngrensene og gjør legeringen sprø. I legeringer som skal formes plastisk begrenses Cu-innholdet til 5%. Høyere Cu-innhold benyttes i støpelegeringer.

Andre legeringselementer som benyttes i kombinasjon med en eller flere av hovedlegeringselementene, er bismut (Bi), bor (B), krom (Cr), bly (Pb), nikkel (Ni), titan (Ti) og zirkonium (Zr). Disse brukes i små mengder (vanligvis < 0,1% vekt) for å ”skreddersy” legeringens egenskaper for spesielle formål som støpbarhet, maskinerbarhet, varmekfasthet, korrosjonsfasthet og bruddseighet.



Figur 4.7  
Legeringselementer benyttet i aluminiumlegeringer. (2)

Etter anvendelse skiller vi mellom plastiske legeringer og støpelegeringer. Plastiske legeringer anvendes for smiing, ekstruderte profiler samt for plater, bånd og folie. Støpelegeringer anvendes for i smeltet tilstand å helles i en form.

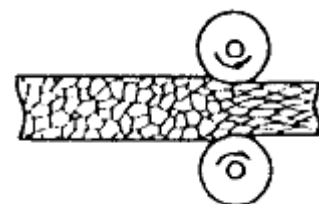
### 4.3 Herding av aluminiumlegeringer

Aluminiumlegeringer kan herdes på forskjellige måter, avhengig av legeringsinnhold. Herdemetodene kan deles i tre typer:

1. Herding ved kaldbearbeiding
2. Herding ved legering
3. Herding ved legering og varmebehandling

#### 4.3.1 Herding ved kaldbearbeiding

Kaldbearbeiding vil si at materialet formes i kald tilstand, f.eks. ved kaldvalsing. Når materialet kalddeformeres, blir krystallene forlenget i deformasjonsretningen. Dette medfører at hardheten og styrken øker.



Figur 4.8  
Kaldvalsing. (7)



Denne metoden brukes mest for ren-aluminium eller aluminiumlegeringer som ikke kan herdes ved varmebehandling. De leveres som 1/4-hard, 1/2-hard, 3/4-hard eller hard tilstand. Hardheten øker ved økende kalddeformasjonsgrad (dvs. hvor mye tverrsnittet er redusert ved kalddeformasjon)

Fra mykglødet til hard tilstand vil hardheten og styrken kunne økes med 50-100%.

#### 4.3.2 Herding ved legering

Selv de legeringene som ikke herdes ved varmebehandling får økt styrke/hardhet ved legering av Mg, Mn eller Si.

Tabellen under viser et eksempel skal på hvordan styrken og hardheten øker med økende innhold av magnesium (mykglødet tilstand):

Betegnelse	Legeringsinnhold	Flytegrense [N/mm <sup>2</sup> ]	Hardhet Vickers [HV]
AlMg 2	2,0% Mg	160-210	45-55
AlMg 2,5	2,5% Mg	180-210	50
AlMg 5	4,9% Mg	240	60

Tabell 4.1

Eksempel på hvordan styrke og hardhet varier i en AlMg legering med økende Mg-innhold.  
(7)

#### 4.3.3 Herding ved legering og varmebehandling

Størst styrke får de legeringene som kan herdes ved varmebehandling.

Herdemetoden kalles utfellingsherding (også kalt partikkelstyrking eller utfellingsstyrking). Fasthetsegenskapene i mange Al-legeringer kan økes ved varmebehandling, men legeringene må tilfredsstillende to betingelser.

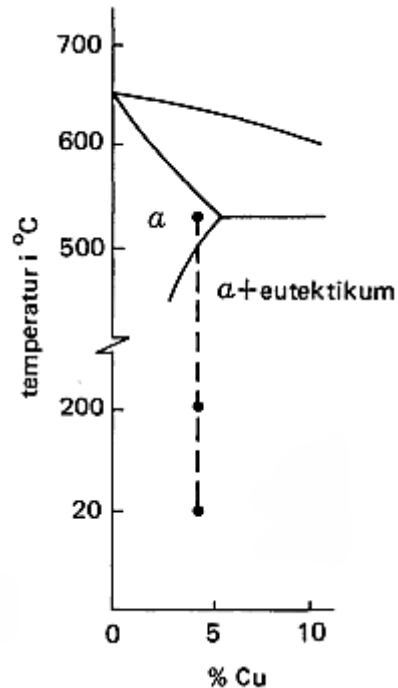
De to betingelsene som må være tilfredsstillt:

1. Løseligheten i fast tilstand må være større ved høy enn ved lav temperatur.

Eksempel på en slik legering er Al-Cu-legeringer. Fasediagrammet for disse legeringene viser at Cu er fullt løselig i Al i legeringer opp til ca. 5 - 6%. En legering med 5% Cu er vist i figuren under. Her er alt Cu løst i Al ved temperaturer over ca. 500°C. Figuren til høyre viser dette.

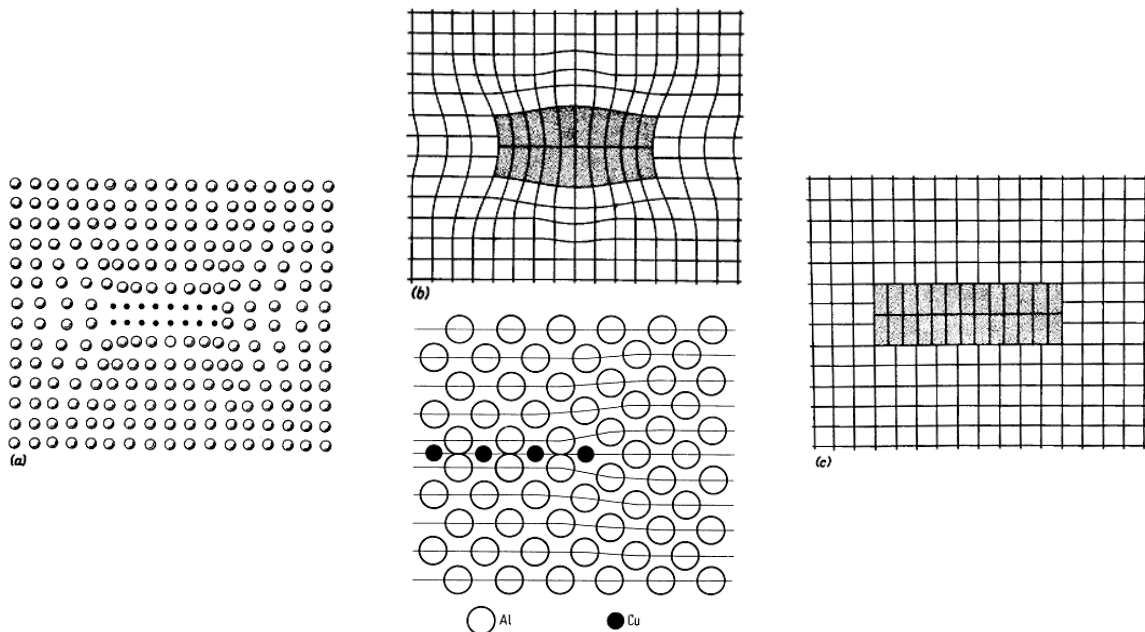
2. Ved varmebehandling (utfellingsherding) må det utfelles en hard koherent (hel eller delvis) utfelling.

På denne måten utvikles det spenningsfelt i et område i gitteret. Dislokasjonsbevegelsene blokkeres og dette fører til høyere fasthetsegenskaper som høyere flytegrense og bruddfasthet. Figuren under viser dette.



Figur 4.9

Cu er fullt løst i Al og danner 100%  $\alpha$ -blandkrystaller ved temperatur over ca. 500°C. (6)



Figur 4.10

Utfellingsherding i Al - Cu legeringer. (6)

- (a) Cu atomene felles ut som plateformede soner med diameter ca. 100Å, koherent (henger sammen med) grunnfasen. (b) Sonen utvides til ca. 1500Å og består av Al - Cu i mengdeforhold svarende til forbindelsen  $\text{CuAl}_2$ . De er koherente med grunnmassen over grunnflatene, men ikke over høyden, og gir maksimal herdevirkning. (c) Sonene løper sammen til  $\text{CuAl}_2$  krystaller uten koherens og dermed liten herdeeffekt.

Selve herdeprosessen foregår i to trinn:

### I Innherding (homogenisering)

Prosesen:

- Oppvarming til temperatur hvor legeringen omdannes til  $\alpha$ -blandkrystaller. Se eksempelet i figuren under med en Al- 4% Cu-legering til ca. 530°C.
- Holdetid for diffusjon så  $\alpha$ -blandkrystaller får tid til å dannes.
- Hurtig avkjøling til værelsestemperatur for å bevare alt som  $\alpha$ -blandkrystaller.

### II Utherding

Prosess:

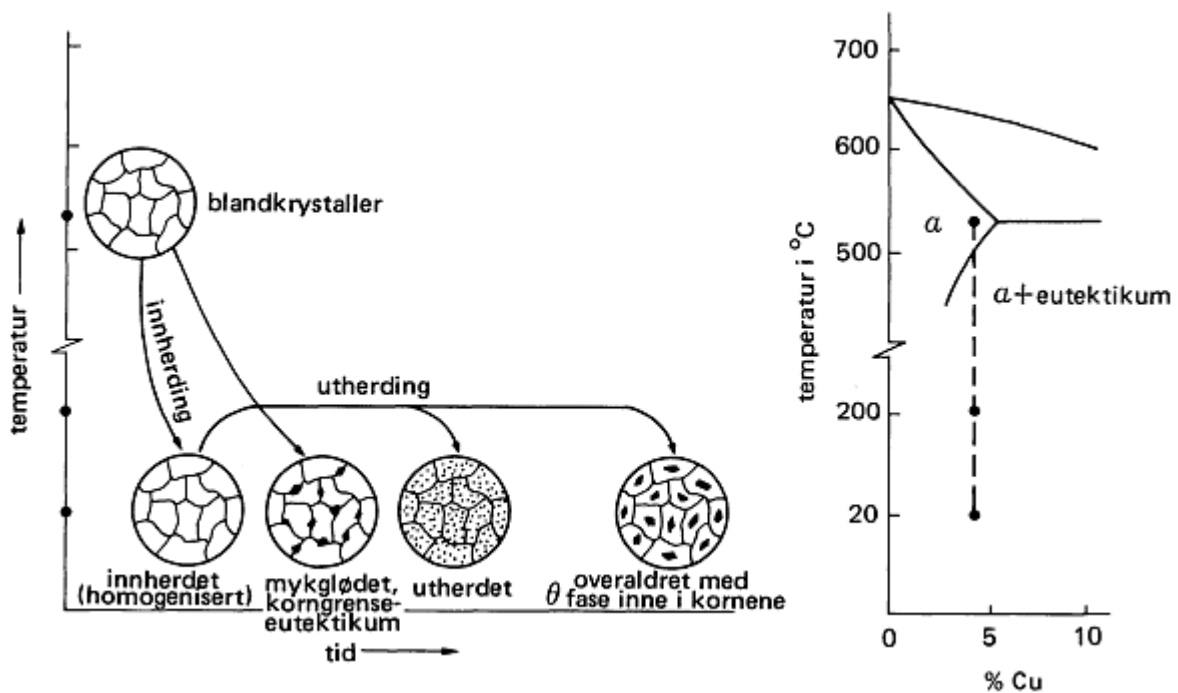
- *Kaldutherding*. Utherding ved værelsestemperatur over lang tid.

eller

- *Varmutherding*. Utherding ved oppvarming og holdetid til temperatur avhengig av type legering.

Ved utherdning skjer det en utfelling av fremmedfase. Kunsten er å stoppe denne prosessen før koherensen brytes. Dette for å hindre overaldret tilstand.

Avkjølingskurven til høyre for innherdingskurven i figuren under gjelder for normal avkjøling i luft og resulterer i mykgløding. Mykgløding gir tilnærmet de samme fasthetsegenskaper som overaldret tilstand.



Figur 4.11

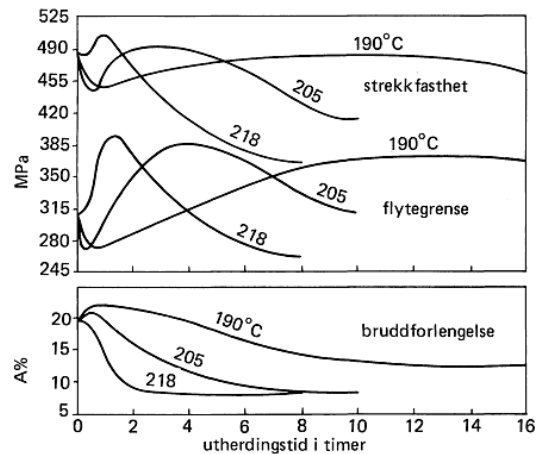
Innherding og utherdning av en Al-legering. Avkjølingskurven til høyre for innherdingskurven gjelder for normal avkjøling i luft og resulterer i mykgløding. Mykgløding gir tilnærmet samme fasthetsegenskaper som overaldret tilstand. (6)

De neste figurene viser noen eksempler på fasthetsverdier og seighet (duktilitet) etter herding ved varmebehandling av legeringen AlCu4Mg2.

Figuren til høyre viser verdier på strekkfasthet, flytegrense og bruddforlengelse, A, ved varmutherding ved tre forskjellige temperaturer for legeringen AlCu4Mg2. Maksimal styrke oppnåes etter en bestemt tid, for så å synke når overaldring setter inn. Størst oppnåelige flytegrense for denne legeringen er 385N/mm<sup>2</sup>. Dette tilsvarer et høyfast C-Mn-stål.

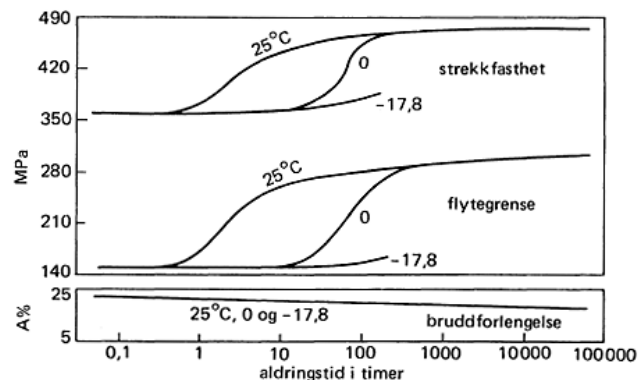
Legeringer av denne typen med Mg = 0,5 - 2% i tillegg til Cu, har markedsbetegnelse duraluminium.

Denne figuren, til høyre, viser kaldutherding av samme legering. Vi kan se at styrkeøkningen er mindre enn det vi kan oppnå med varmutherding.



Figur 4.12

Fasthetsverdier ved varmutherding av legeringen AlCu4Mg2. Legeringen er først kaldutherdet, hvilke forklarer det første fall i styrkeverdiene. (6)



Figur 4.13

Fasthetsverdier ved kaldutherding av legeringen AlCu4Mg2. (6)

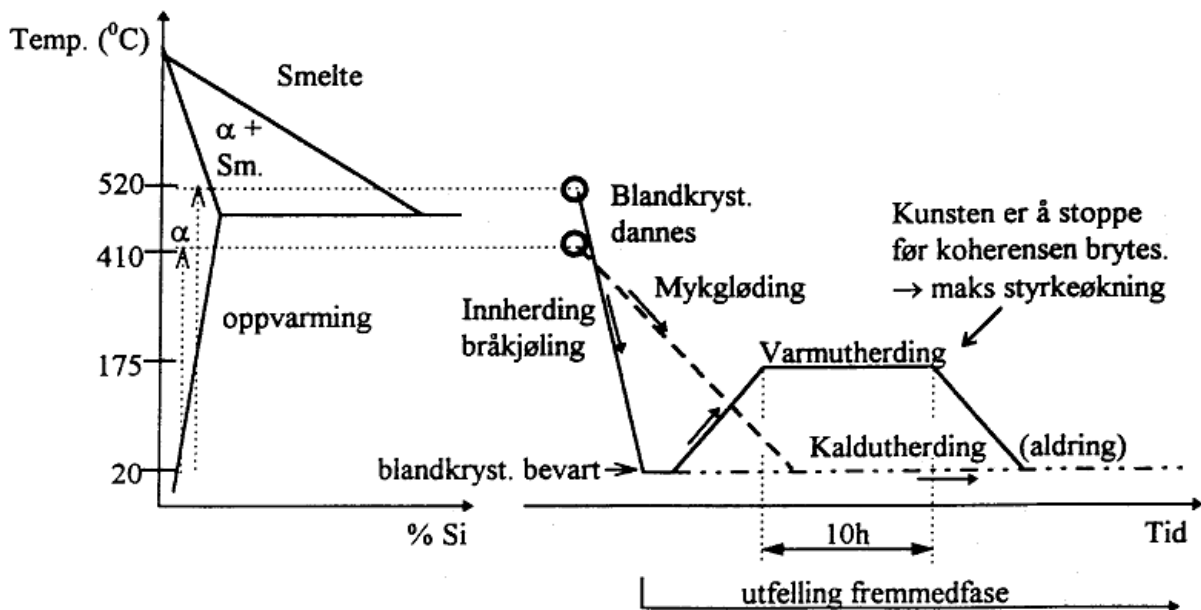
Et annet eksempel på en legering som lar seg herde ved innherding og utherdning er legeringen AlSi1Mg. Tabellen under viser data tatt fra Norsk Standard for denne legeringen.

Legering	Tilstand	Flytegrense $\sigma_{0,2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Bruddfasthet $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	Hardhet Wickers HV
AlSi1Mg	Mykglødet	-	160	33
	Kaldutherdet	110	210	75
	Varmutherdet	260	300	105

Anbefalte temperaturer	Mykgløding ved, °C	410
ved varmebehandling:	Innherding ved (°C)	520
	Varmutherding ved (°C / tid i timer)	175/10

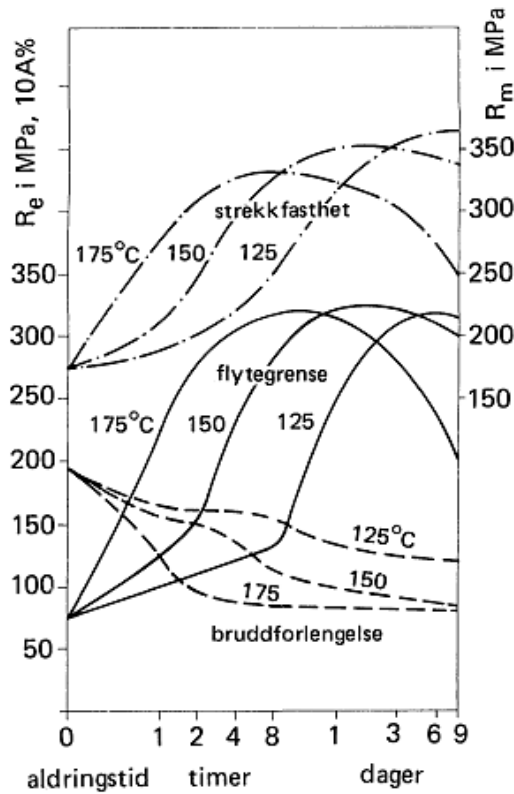
Tabell 4.2  
AlSi1Mg etter Norsk Standard.

Figuren under viser oppvarming og avkjøling av legeringen AlSi1Mg vist i fasediagram til venstre og i temperatur - tid - diagram til høyre.



Figur 4.14  
Innherding, utherdning og mykgløding av AlSi1Mg vist i fasediagram og tid-temperatur-diagram.

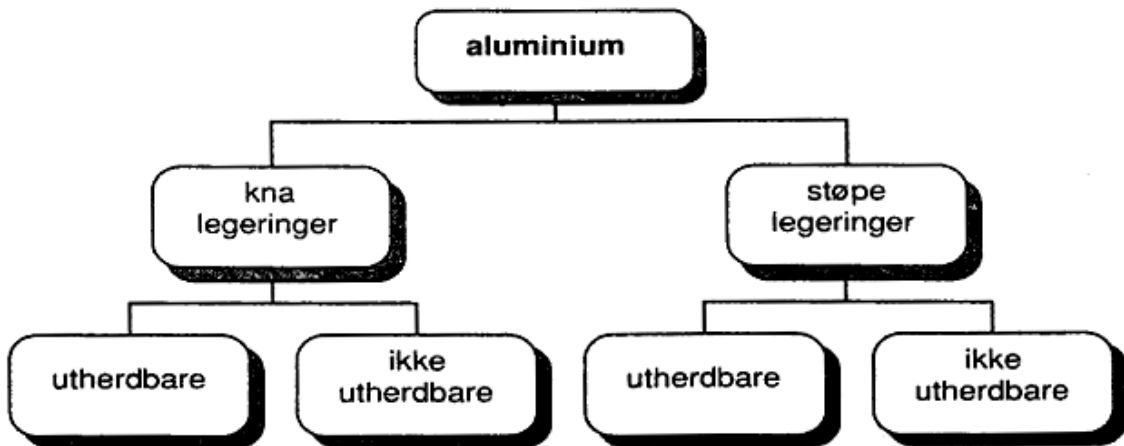
Under er det vist hvordan fasthetsverdiene varierer i en Al-Mg-Si legering ved varmutherding.



Figur 4.15 Fasthetsverdier i en varmutherdet Al-Mg-Si legering. (6)

## 5 KLASSIFISERING AV ALUMINIUMLEGERINGER

Vi skiller mellom kna- og støpelegeringer som vist i figuren under. Disse deles igjen inn i utherdbare og ikke utherdbare legeringer.



Figur 5.1 Grov inndeling av Al-legeringer. (8)

Det finnes en rekke forskjellige systemer for klassifisering av aluminiumlegeringer. Numerisk betegnelse NS-EN 573-1 bygger på et amerikansk system, mens det beskrivende NS-EN 573-2 bygger på den kjemiske sammensetningen. Begge systemene anvendes parallelt. Det numeriske system betraktes som hovedsystem, mens det kjemiske anvendes som tilleggsinformasjon.

American Aluminium Association (AA) er den mest brukte internasjonale standarden. Dessuten benyttes ISO (International Standard Association)-standarden fordi vi kan se direkte fra betegnelsen hvilke hovedbestanddeler i vekt % de enkelte legeringene er sammensatt av. De nye Europeanormene (EN) er også basert på disse to standardene.

Første siffer i betegnelsen klassifiserer legeringene m.h.t. hovedlegeringselement(er). Det skilles mellom plastisk formbare legeringer (wrought alloys) og støpelegeringer (cast alloys).

Etter det numeriske system kan betegnelsen skrives som:

- Plastisk legering : NS-EN AW-5052
- Støpelegering : NS-EN AC-42000

hvor:

NS: Norsk Standard  
EN: Europeisk Standard

A: Aluminium  
W: Plastisk legering (Wrought alloy)  
C: Støpelegering (Cast alloy)

Legeringsnummer:  
- 4 siffer, plastisk legering (eksempel 5052)  
- 5 siffer, støpelegering (eksempel 42000)

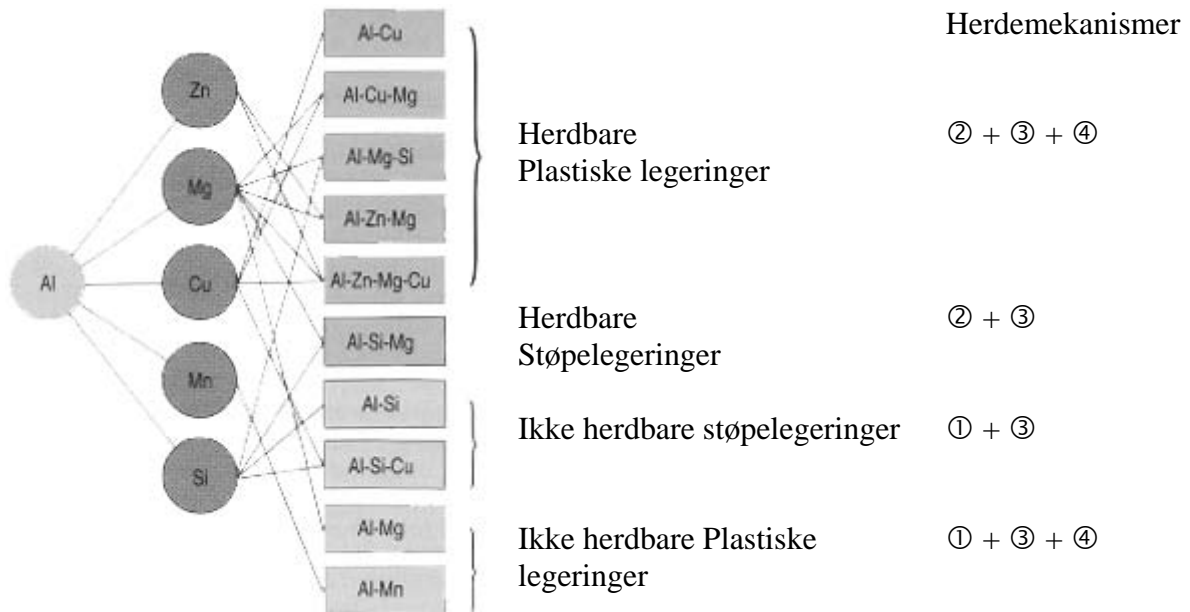
Hovedlegeringselementer for Al-legeringer:

1xxx(x)	ulegert (ren Al)
2xxx(x)	Cu
3xxx(x)	Mn
4xxx(x)	Si
5xxx(x)	Mg
6xxx(x)	Mg + Si
7xxx(x)	Zn
8xxx(x)	andre





Figuren under angir ulike legeringssystemer for aluminium og hvilke mekanismer som gir styrkeøkning til legeringsklassen. Det skiller også mellom ikke herdbare og herdbare legeringer. De ikke herdbare legeringene oppnår sine egenskaper gjennom legeringselementer i løsnings og ulike grader av kalddeformasjon.



Herdemekanismer:  
 ① løsningsstyrking  
 ② partikkelstyrking  
 ③ redusere kornstørrelse  
 ④ deformasjonsstyrking

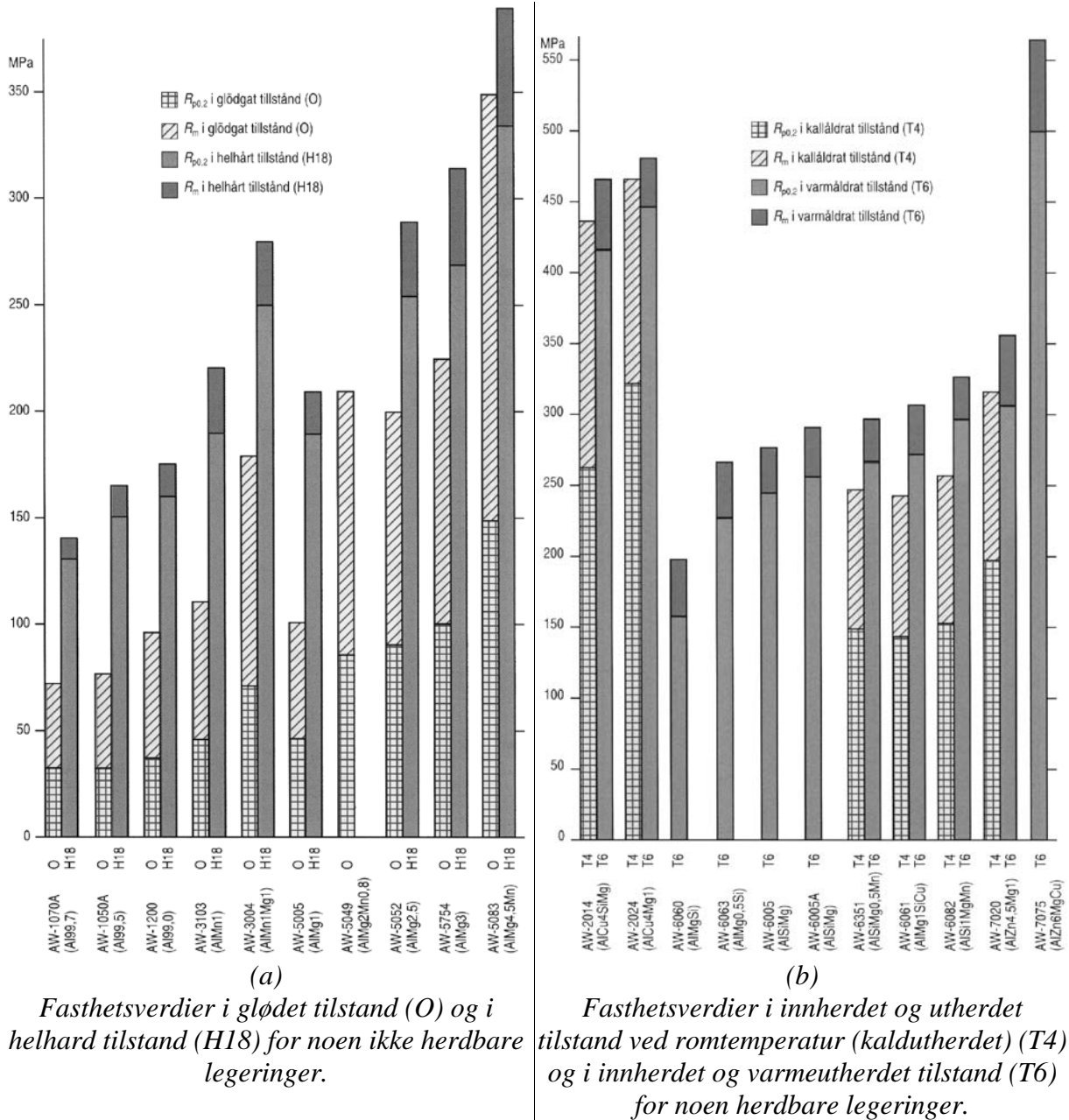
*Figur 5.3*  
*Ulike legeringssystem for aluminium. (3)*

Tabellen under viser leveringstilstander til aluminiumlegeringer. Den angir betegnelsene på standardiserte kombinasjoner av deformasjonsfastnet og gløding. De herdbare legeringene oppnår sine egenskaper i første rekke ved utfelling av partikler fra en innherding- og utherdning prosess. Tabellen angir også betegnelser på standardiserte inn- og utherdingsforløp.

Leveringstilstand: Legering				
xxxx	<b>F</b>	<b>Som produsert</b>		
xxxx	<b>O</b>	<b>Glødet</b>	<b>Dead soft</b> (i.e. fully annealed)	
xxxx	<b>H x x</b>	<b>Deformasjonsfastnet</b>	<b>Strain hardened</b>	ikke herdbare legeringer
		<i>Grad av kalddeformasjon:</i>	<i>Degree of strain hardening:</i>	
	x 2	Kvart hard	1/4 hard	
	4	Halv hard	1/2 hard	
	6	Trekvart hard	3/4 hard	
	8	Fullhardhet	fully hard	
	9	Ekstra hard	extra hard	
		<i>Etterbehandling:</i>	<i>Secondary treatment:</i>	
	1 x	Kun deformasjonsfastnet	Cold worked only (no anneal)	
	2	Deformasjonsfastnet og delvis glødet	Cold worked + partial anneal	
	3	Deformasjonsfastnet og stabilisert ved lavtemperaturbehandling	Cold worked + "stabilised"	
	4		Cold worked + baked	
xxxx	<b>T x</b>	<b>Varmebehandlet</b>	<b>Heat treated</b>	herdbare legeringer  for age hardening alloys
	T 1	Avkjølt fra varmformingstemperatur og kaldtherdet	Cooled from elevated temperature shaping process. Naturally aged to a substantially stable condition	
	T 2	Avkjølt fra varmformingstemperatur kaldbearbeidet og utherdet ved romtemperatur (kaldtherdet)	Cooled from elevated temperature shaping process. Cold worked. Naturally aged	
	T 3	Innherdet, kaldbearbeidet og utherdet ved romtemperatur (kaldtherdet)	Solution heat treated. Cold worked. Naturally aged	
	T 4	Innherdet og utherdet ved romtemperatur (kaldtherdet)	Solution heat treated. Naturally aged	
	T 5	Avkjølt fra varmformingstemperatur og varmeutherdet	Cooled from high temperature shaping. Artificially aged	
	T 6	Innherdet og varmeutherdet	Solution heat treated. Artificially aged	
	T 7	Innherdet og overutherdet	Solution heat treated. Overaged (i.e. beyond maximum strength)	
	T 8	Innherdet, kaldbearbeidet og varmtherdet	Solution heat treated. Cold worked. Artificially aged	
	T 9	Innherdet, varmtherdet og kaldbearbeidet	Solution heat treated. Artificially aged. Cold worked	

Tabell 5.1  
Leveringstilstand til Al-legeringer. (2) og (9)

Figurene under viser fasthetsverdier, flytegrense og strekkfasthet, for noen plastiske legeringer (AW). Det er vist verdier for legeringer i glødet tilstand (O) og i hel-hard tilstand (H18) for noen ikke herdbare legeringer, og i innherdet og utherdet tilstand ved romtemperatur (kaldutherdet) (T4) og i innherdet og varmeutherdet tilstand (T6) for noen herdbare legeringer.



Figur 5.2

Fasthetsverdier i noen plastiske legeringer (AW).

$R_{p0.2}$  = flytegrense og  $R_m$  = strekkfasthet. (3)

Tabellen under viser en oversikt over noen av de vanligste kommersielle legeringene som er tilgjengelig hos alle leverandører. Disse legeringene har mange mye erfaring med, og egenskapene er godt dokumentert. Dette er legeringer som er anbefalt å ta utgangspunkt i når vi for eksempel er i konseptfasen i en produktutviklingsoppgave.





ISO	Europeisk standard	Amerikansk standard	Egenskaper	Anvendelse halvfabrikat
Al99,5 AlMn1 AlMg2,5 AlMg4,5Mn0,7	EN-AW-1050A EN-AW-3103 EN-AW-5052 EN-AW-5083	AA 1050 AA 3103 AA 5052 AA 5083	Plastisk formbare Ikke herdbare	Plater og band
AlMgSi AlSi1MgMn AlSi1Mg AlZn5,5MgCu	EN-AW-6060 EN-AW-6092 EN-AW-6351 EN-AW-7075	AA 6060 AA 6092 AA 6351 AA 7075	Plastisk formbare Herdbare	Profil, rør og bolt
AlSi12 AlSi7Mg AlSi10Mg MgAZ91D	EN-AC-44300 EN-AC-42000	AA A413 AA 356 AA 361	Støpbar, ikke herdbar Støpbar, herdbar	Stykkstøping

*Tabell 5.3*  
*Kommersiell Al-legeringer. (2) og (9)*

Legeringen AlZn5,5MgCu har spesiell høy styrke og benyttes i første rekke i flykonstruksjoner. Høy pris, redusert sveisbarhet og korrosjonsrisiko, gjør at denne legeringen benyttes lite i bygg, til marine anvendelser og transport for øvrig. Blant støpelegeringene kan nevnes magnesiumlegeringen MgAZ9 (9% vekt Al og 1% vekt Zn). Dette er et alternativt lettmetall for støping. Legeringen har lav tetthet, god støpbarhet og god maskinerbarhet.

## 6 NYERE LEGERINGER OG KOMPOSITTER

Nye legeringer og kompositter er under kontinuerlig utvikling. Tabellen under viser noen nyere interessante legeringer og aluminiumbaserte kompositter.

Materialsystem	Prosesser	Typisk(e) produkt(er)	Spesielle egenskaper	Utfordringer
Aluminium-litium legeringer	Vanlige Al-prosesser, men høy reaktivitet av Li krever særlige forholdsregler	Fly- og romfarts-komponenter	Høy styrke, lav tetthet	Kostnader Resirkulering
Laminat AA 7075 Al + aramid (fiber av aromatisk polyamid)	 Tynne (0,2mm) bånd av vekselvis Al og aramid limes sammen	Fly Høykost/høyytelse transport på land, vann og bane	Høy utmattingsfasthet og bruddseighet Lav vekt	Kostnader Resirkulering
Hurtigstørknet Al-legeringer (Fe, Ni, ...)	 Hurtigstørkning til granulat eller bånd som komprimeres	Motor-komponenter	Høy varmefasthet Høy styrke	Kostnader Bearbeiding Resirkulering
Partikkelforsterket aluminium SiC-partikler + Al-Si-Mg-matrix	 Innblanding av partikler i smelte. Deretter vanlige prosesser.	 Skivebrems	Høy slitastyrke God varmefasthet Høy E-modul	Maskinering Resirkulering

Tabell 6.1  
Nye aluminiumlegeringer og kompositter (2)

Med Litium, Li (tetthet  $534\text{kg/m}^3$ ) som legeringselement er det utviklet en ny type flylegering med lavere tetthet, høyere elastisitetsmodul og høyere styrke enn de tradisjonelle flylegeringene. Høye produksjonskostnader vil begrense bruken av disse legeringene til fly, romfart og forsvar.

Ved veldig rask nedkjøling fra smelte til partikler, tråd eller tynne bånd, kan innholdet av visse legeringselementer (Fe, Ni) økes langt utover det som er vanlig. Når slike hurtigstørknede legeringer blir kompaktert og ekstrudert eller smidd, får vi et materiale med høy styrke og svært god varmefasthet. Høye produksjonskostnader vil bare gjøre disse legeringene aktuelle for spesielle anvendelser.

Ved å lage et laminat av en høyfast aluminiumlegering og et polymer (0,3mm AA7075 og 0,2mm aramidepoxy i mange lag) får vi et materiale med forbedret utmattingsfasthet og bruddseighet. Vi får også lavere vekt enn konvensjonelle legeringer.

Det foregår også utvikling av partikkelforsterket aluminium. Partikler av silisiumkarbid(SiC) eller aluminiumoksid ( $Al_2O_3$ ) i størrelse 5-20 $\mu$ m innblandes i smelten (10-25% vol) og støpes ut. Vanlige formingsmetoder som stykkstøping, smiing eller ekstrudering kan benyttes. Høyere elastisitetsmodul, forbedret varmefasthet, økt slitasjemotstand og høyere utmattingsfasthet kan bli resultatet. Prototyper av komponenter og produkter er under utvikling, som f.eks. bremseskiven i figuren.

Det er viktig å understreke at det er de tradisjonelle legeringene som er helt dominerende i praktisk bruk. Utfordringen ligger i å utnytte de muligheter som finnes blant de lett tilgjengelige standardlegeringene ved å finne en riktig kombinasjon av form, legering, prosesser og produksjon for den funksjon produktet eller komponenten skal ha. Det finnes også mange tilfeller der nye legeringer og prosesser har gitt uventede og konkurransesterke løsninger.

## 7 PROSESSRUTER

Fysisk, kjemisk og mekanisk er aluminium et metall som stål, messing, kobber, sink, bly eller titan. Det kan bli smeltet, støp, formet og bearbeidet veldig likt disse metallene og det leder elektrisk strøm. Ofte er det samme utstyret og fabrikkasjonsmetodene brukt som for stål.

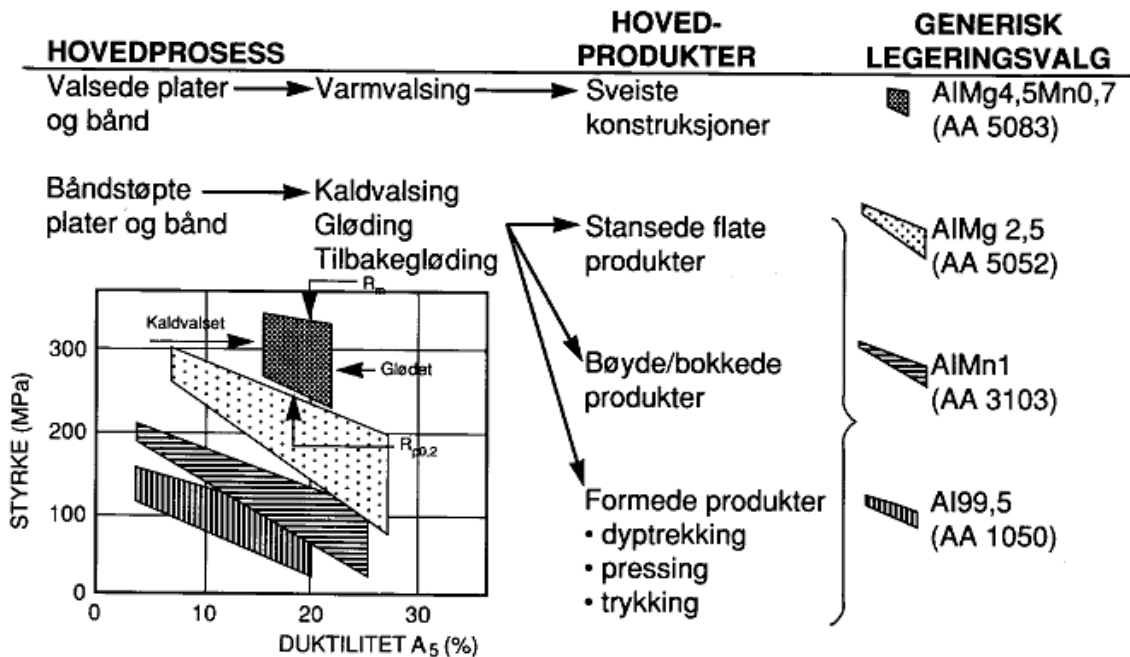
Gjennom forming og varmebehandling skapes produktformer og egenskaper. De viktigste prosessrutene vi benytter for fremstilling av enkeltdeler i aluminium kan inndeles i tre hovedruter:

1. Valsing og forming av plater og bånd
2. Ekstrudering og bearbeiding av profiler, rør og bolt
3. Stykkstøping

Disse rutene inkluderer også varmebehandling og etterfølgende maskinering, sveising og overflatebehandling.

## 7.1 Valsing og forming av plater og bånd

Figuren under viser plateprodukter og generiske (vanlige) platelegeringer.



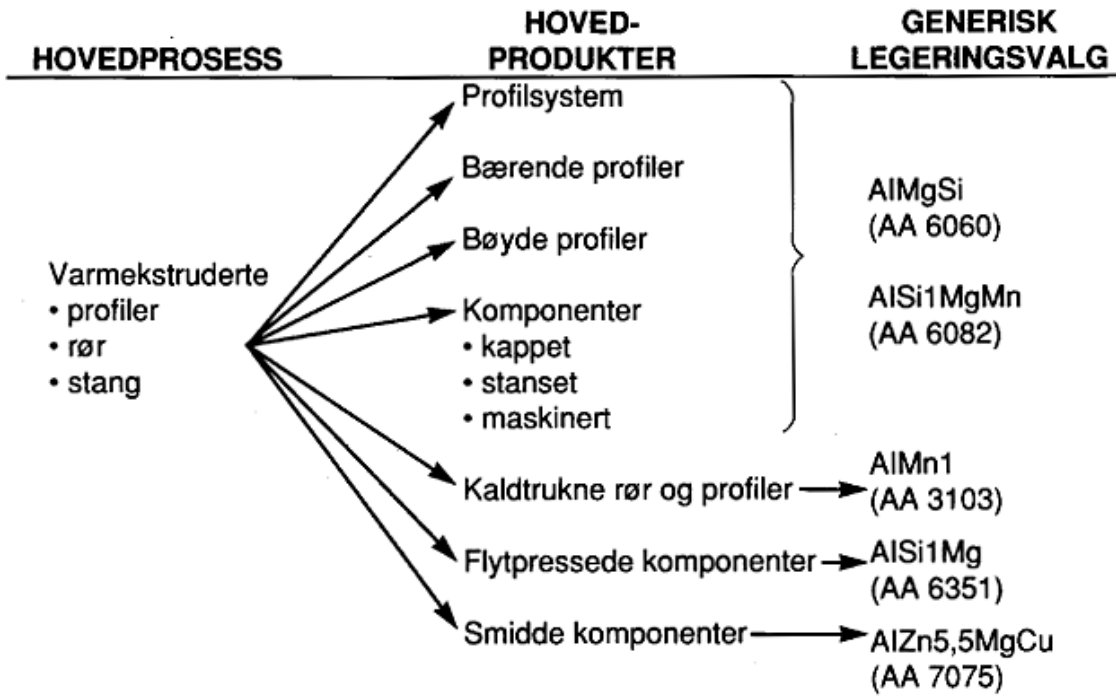
Figur 7.1  
Plater og bånd (2)

Plater og bånd produseres fra støpte og homogeniserte valseblokker. Med homogenisering forstås en utjevning av konsentrasjonsforskjeller i den støpte blokken ved å holde den ved ca. 585<sup>0</sup>C i opptil et døgn. Gjennom varmvalsing vales blokken til sluttdimensjon for grove plater eller til kveiler for kaldvalsing. Kveiler for kaldvalsing kan også støpes direkte i kontinuerlige båndstøpemaskiner. Råkveilene som har platetykkelse i området 2-6mm, vales ned i kaldvalseverk til sluttdimensjoner (tynnplater og bånd).

## 7.2 Ekstrudering og bearbeiding av profiler, rør og stenger

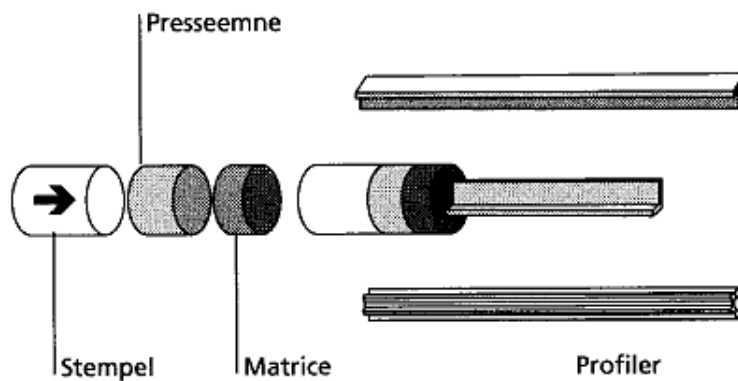
Støpt og homogenisert pressbolt (logs) forvarmes og kappes til passende lengder (billets). Disse ekstruderes i en hydraulisk presse ved utgangstemperatur i området 450-490<sup>0</sup>C til kundetilpassede profiler, standardprofiler eller til rør- eller stangemner for trekking, flytpressing eller smiing.

Figuren på neste side viser ekstruderte og flytpressede komponenter og generiske (vanlige) legeringer.



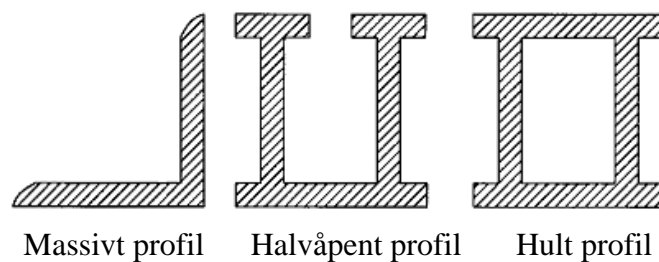
Figur 7.2  
Profiler. (2)

Den neste figuren viser prinsippet for pressing (ekstrudering) av profiler, rør og stenger. Det forvarmede pressemet presses av stempel med stor kraft gjennom et verktøy (matricen).



Figur 7.3  
Prinsippet for ekstrudering, flytpressing av profiler. (5)

Vi inndeler normalt profilene i tre hovedgrupper avhengig av kompleksiteten ved fremstilling.



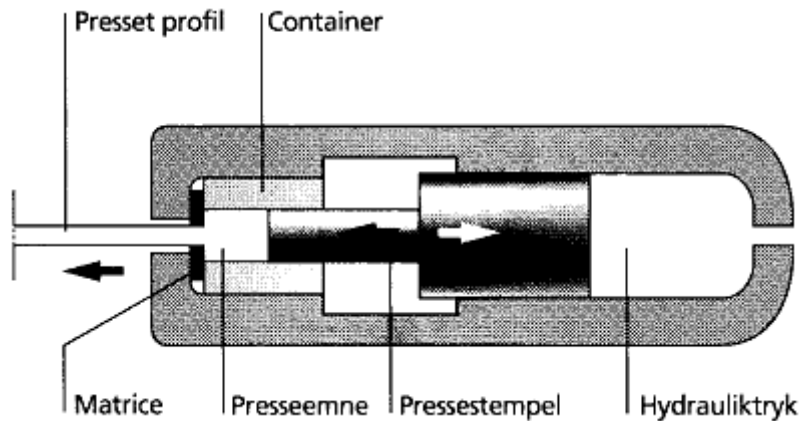
Figur 7.4  
De tre profiltypene. (5)



Ekstrudering av massive og halvåpne profiler:

Det varme emnet (pressbolten) plasseres i en konteiner og presses ved hjelp av et stempel ut gjennom matrisen (se Figur under).

Ved presningen vil det alltid bli et reststykke som skal fjernes før neste emne presses.



Figur 7.5

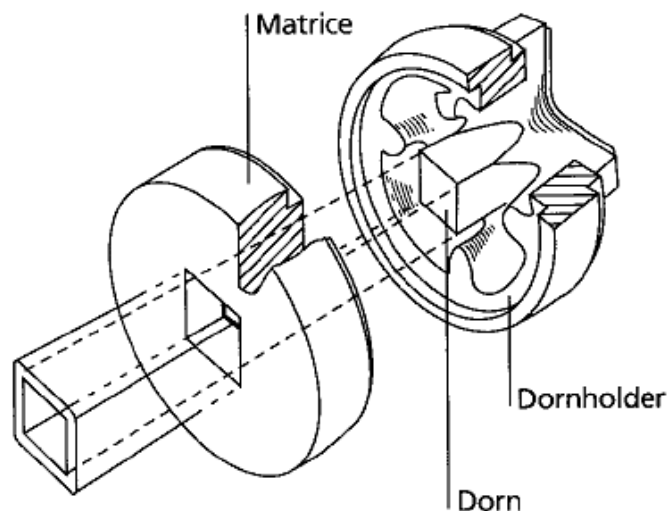
Ekstrudering av massive og halvåpne profiler. (5)

Ekstrudering av hule profiler:

Her anvender vi en matrise med en dorn. Dornen, som går inn i matrisens åpning, sitter på en dornholder (bro). Ved presningen tvinges det massive presseemne til å dele seg. Aluminiumet flyter deretter sammen i spalten som dannes mellom de to verktøydelenes.

Temperaturen til metallet under ekstruderingen er 500-510<sup>0</sup>C. Når materialet møtes etter dornholderen, skjer det en sammen-smiing av materialet.

Ved ekstrudering av rør unngår vi problemet med dornholderen ved å anbringe en lang dorn på stempelen.



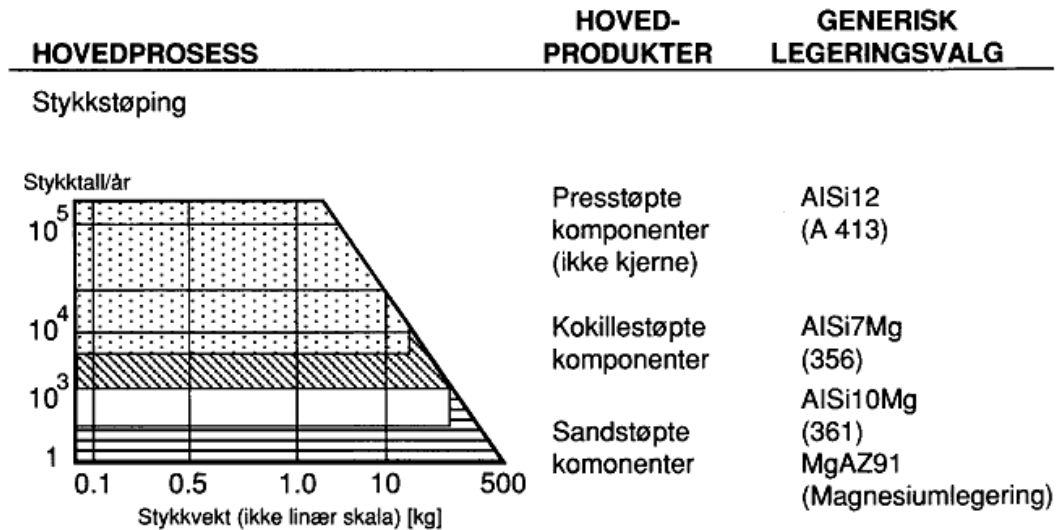
Figur 7.6

Verktøyoppbygging ved pressing av hule profiler. (5)

### 7.3 Stykkstøping

Det er tre hovedmetoder for støping av aluminiumlegeringer: Sandstøping, kokillestøping og presstøping.

Figuren under viser støpte komponenter og generiske (vanlige) legeringer.



Figur 7.8  
Støpte komponenter. (2)

Støpelegeringene har som regel høyt silisiuminnhold for å gi lavest mulig viskositet av smelten under utstøping. Presstøpte komponenter kan ikke varmebehandles og derfor velges ikke herdbare legeringer, her presentert ved AlSi12. Ved kokillestøping og sandstøping benyttes ofte de herdbare legeringene AlSi7Mg og AlSi10Mg.

Etter støping og varmebehandling, bearbeides støpestykkene som regel ved maskinering og overflatebehandling til ferdig komponent. Legeringens maskinerbarhet er derfor en viktig egenskap til støpelegeringer.

## 8 REFERANSER

- 1 European Aluminium Association, EAA. URL: <http://www.eaa.net/eea/index.jsp> (29.01.08)
- 2 Skanaluminium (1992). *Produktutvikling med Aluminium*. ISBN 82-992805-0-8
- 3 SIS handbook 12, Aluminium. (2001). SIS Forlag AB. ISBN 91-7162-476-7.
- 4 The Global Aluminium Recycling Committee (GARC), Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development. URL: <http://www.world-aluminium.org/cache/fl0000153.pdf> (21.02.08), 2006, International Aluminium Institute
- 5 Dansk Teknologisk Institut (1991). *Materialekendskab Aluminium*. Dansk Teknologisk Institut Forlaget. ISBN 87-7756-148-1.
- 6 Næss, Almar A. (2003). *Metalliske Materialer*. Tapir akademisk forlag. ISBN 82-519-1786-7.
- 7 Tor Marlow Barka (1985). *Grunnleggende Sveiseteori Aluminium*. Statens teknologiske institutt, STI. ISBN 82-567-0297-4
- 8 Teknologibedriftenes Landsforening, TBL (1991). *Materialteknisk håndbok for verkstedindustrien*. ISBN 82-9 1073-00-7.
- 9 Temper Designations, AluMatter. URL: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=75&pageid=1797238682>, (21.02.08)
- 10 Sapa, Egenskaper, URL: <http://www.sapagroup.com/no/Company-sites/Sapa-Profil-AS/Aluminium/Egenskaper/> (08.02.08)