



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

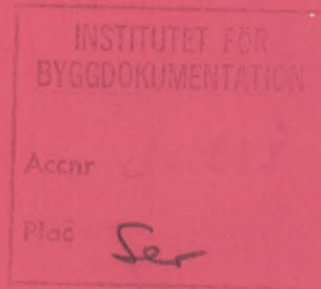
This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



R18:1989

are för
umpstillämpningar
amiska egenskaper och
för kaliumkarbonat samt
e med andra köldbärare

nder
endson
ryd m fl



forskningsrådet

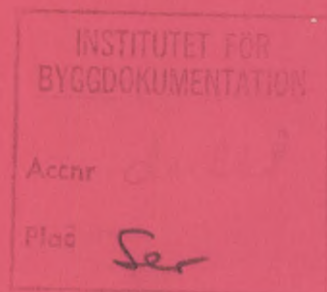
Rapport

R18:1989

**Köldbärare för
värmepumpstillämpningar**

**Termodynamiska egenskaper och
korrosion för kaliumkarbonat samt
jämförelse med andra köldbärare**

**Åke Melinder
Jaak Berendson
Eric Granryd m fl**



Byggforskningsrådet

R18:1989

KÖLDBÄRARE FÖR VÄRMEPUMPSTILLÄMPNINGAR

Termodynamiska egenskaper och korrosion för kaliumkarbonat samt jämförelse med andra köldbärare

Åke Melinder
Jaak Berendson
Eric Granryd
Björn Kyrk

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 841139-5 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för Mekanisk värmeteori och kylteknik, Tekniska högskolan, Stockholm.

REFERAT

På institutionen för Mekanisk värmeteori och kylteknik vid KTH har vattenlösningar av kaliumkarbonat som köldbärare undersökts främst med avseende på termodynamiska egenskaper och korrosion. I en första fas har dessa undersökningar resovisats i BFR rapport R114:1985.

I den nu föreliggande rapporten redovisas resultat av fortsatta studier av termodynamiska ämneskonstanter för vattenlösningar av kaliumkarbonat. Diagram ges för fryspunkt, densitet, viskositet, specifik värmekapacitet, värmeledningsförmåga, volymvidgningskoefficient, ytspänning, kokpunkt och ångtryck.

En jämförelse av olika typer av köldbärare med avseende på transport- och värmeöverföringsegenskaper visar att kaliumkarbonat termodynamiskt sett är bättre än glykoler och alkoholer men något sämre än kloridsalter.

Över två års fälterfarenheter av inhiberad kaliumkarbonat som köldbärare har givit goda resultat ur korrosionssynpunkt. Resultaten visar att allmänkorrosionen låter sig behärras genom tillsats av lämplig korrosionsinhibitor. Zink och aluminium samt mjuklod skall ej användas i system med kaliumkarbonatbaserade köldbärare. På grund av risk för lokal korrosion bör dykrör och rörliga detaljer ej vara av mässing. Kolstål och rostfritt stål är lämpliga konstruktionsmaterial.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R18:1989

ISBN 91-540-4985-3

Statens råd för bygnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1989

INNEHÅLLSID

SAMMANFATTNING	5	
1	INLEDNING	6
1.1	Varför används köldbärare?	6
1.2	Vilka egenskaper önskas?	6
1.3	Kaliumkarbonat som köldbärare	7
2	ÖNSKVÄRDA TERMODYNAMISKA EGENSKAPER	8
3	TERMODYNAMISKA ÄMNESDATA FÖR KALIUMKARBONAT	11
3.1	Allmänt	11
3.2	Litteraturkällor	11
3.3	Diagram över ämneskonstanter	12
3.3.1	Frys punkt	12
3.3.2	Densitet	12
3.3.3	Viskositet	13
3.3.4	Specifik värmekapacitet	13
3.3.5	Värmeledningsförmåga	13
3.3.6	Termisk volymsutvidgningskoefficient	14
3.3.7	Ytspänning	14
3.3.8	Kokpunkt	14
3.3.9	Ångtryck	14
3.4	Tabell med termodynamiska ämnesdata	15
3.5	Jämförelse av data med VDI-Wärmeatlas, 1984	16
3.5.1	Direkt jämförelse av data	16
3.5.2	Jämförelse baserad på mätningar av tryckfall och värmeövergång	16
4	KOMPLETERING AV TERMODYNAMISKA DATA FÖR VISSA KÖLDBÄRARE	34
4.1	Metylalkohol - vatten	34
4.2	Diagram med dubbla kurvskaror	34
4.3	Kalciumklorid - vatten	35
5	JÄMFÖRELSE AV TERMODYNAMISKA EGENSKAPER	40
5.1	Allmänt	40
5.2	Ämneskonstanter	40
5.2.1	Frys punkt	40
5.2.2	Densitet	41
5.2.3	Viskositet	41
5.2.4	Specifik värmekapacitet	41
5.2.5	Värmeledningsförmåga	41
5.2.6	Termisk volymsutvidgningskoefficient	41
5.2.7	Ytspänning	42
5.2.8	Kokpunkt	42
5.3	Transportegenskaper	43
5.3.1	Transporterad effekt	43
5.3.2	Tryckfall	43
5.4	Värmeöverföringsegenskaper	44
6	VÄRMETEKNISKA DRIFTSERFARENHETER	58
6.1	Allmänna intryck	58
6.2	Mätresultat	58

<u>INNEHÅLL</u> (forts)	<u>SID</u>
7 KORROSIONSASPEKTER MED KALIUMKARBONAT	60
7.1 Allmänt	60
7.2 Allmän korrosion	60
7.3 Lokal korrosion	61
7.3.1 Avzinkning	61
7.3.2 Erosionskorrosion	62
7.4 Förslag till materialval	63
7.5 Temperatureffekter	63
7.6 Öppna eller slutna system	63
7.7 Kontroll av inhibitorstatus	64
8 HANTERINGASPEKTER	65
8.1 Vid tillblandning	65
8.2 Vid luftning	65
9 MILJÖASPEKTER	66
BILAGA 1 KÖLDBÄRARE FÖR VÄRMEPUMPTILLÄMPNINGAR - KALIUMKARBONAT (Yttrande av SNV)	67
APPENDIX VÄRMEÖVERGÅNG OCH TRYCKFALL VID STRÖMNING I RÖR FÖR KÖLDBÄRARE	71

SAMMANFATTNING

På institutionen för Mekanisk värmeteori och kylteknik vid KTH har vattenlösningar av kaliumkarbonat som köldbärare undersökts främst med avseende på termodynamiska egenskaper och korrosion. I en första fas har dessa undersökningar redovisats i BFR Rapport R114:1985 "Köldbärare för värmepumtillämpningar. Studier av termodynamiska egenskaper och korrosion".

I den här rapporten redovisar vi de fortsatta studier av termodynamiska ämneskonstanter som gjorts för vattenlösningar av kaliumkarbonat. Diagram ges i kap 3 för fryspunkt, densitet, viskositet, specifik värmekapacitet, värmeledningsförmåga, volymsutvidgningskoefficient, ytspänning, kokpunkt och ångtryck.

I kap 5 jämförs de olika typerna av köldbärare med avseende på dessa ämneskonstanter samt transport- och värmeöverföringsegenskaper. Denna jämförelse visar att kaliumkarbonat termodynamiskt sett är bättre än glykoler och alkoholer men något sämre än kloridsalter (Se diagram 5.1 t o m 5.14).

Laboratiemätningar av värmeövergång och tryckfall vid strömning i rör har utförts av Björn Kyrk för kaliumkarbonat, kalciumklorid och etylen-glykol. Förutom att resultaten är i god överensstämmelse med jämförelsen i kap 5 utgör de en kontroll av ämnesdata. Resultaten inger förtroende för våra ämnesdata för kaliumkarbonat medan ett frågetecken gäller viskositetsvärden i litteraturen för kalciumklorid vid låga temperaturer (Se punkt 3.5, 4.3 samt APPENDIX).

Vid ovan nämnda litteraturstudier och mätningar av termodynamiska egenskaper har vi funnit en hel del material som kan hjälpa oss att få fram bättre data även för de övriga använda typerna av köldbärare. En hel del arbete har redan gjorts på detta område och vi hoppas kunna presentera resultatet av dessa studier i en kommande rapport.

Över två års fälterfarenheter av inhiberad kaliumkarbonat som köldbärare har givit goda resultat ur korrosionssynpunkt. Resultaten visar att allmänkorrosionen låter sig behäskas genom tillsats av lämplig korrosionsinhibitor. Zink och aluminium samt mjuklod skall ej användas i system med kaliumkarbonatbaserade köldbärare. På grund av risk för lokal korrosion bör dykrör och rörliga detaljer ej vara av mässing. Kolstål och rostfria stål är lämpliga konstruktionsmaterial (Se kap 7).

I kap 8 framhålls att lämpliga åtgärder bör göras för att undvika ögonstänk av kaliumkarbonatlösning vid tillblandning och luftning. Ett utlåtande från Statens naturvårdsverk framhåller att kaliumkarbonat är en ur miljösynpunkt bra köldbärare (Se bilaga 1).

Detta arbete har utförts med finansiering inom ett ramanslag från BFR. Tack vare samarbete med Vattenfall, bl a i form av ett uppdrag från Vattenfalls solenergiprojekt, har fältprov kunnat genomföras vilka givit viktiga drifterfarenheter. Vi vill här gärna framföra ett tack till anslagsgivarna och riktar ett speciellt tack för gott samarbete till Bengt Lundqvist, BFR och Per Bylander, Vattenfall.

1 INLEDNING

1.1 Varför används köldbärare?

Köldbärare används i indirekta kyl- och värmepumpsystem för att transportera värme från kylställe resp värmekälla till förångaren. Detta ger ett extra värmväxlarsteg med cirkulationspump och en extra temperatursänkning jämfört med ett direkt(expansions)system. Varför används då indirekta system? - Bland annat på grund av följande fördelar jämfört med ett direkt system:

- väsentligt mindre köldmediefyllning
- platsmontage av köldmediefyllda delar kan undvikas.

Dessa fördelar leder till mindre risk för läckage av köldmedium vilket är väsentligt, inte minst med tanke på debatten om CFC-utsläppens inverkan på jordens växthuseffekt och stratosfärens ozonlager.

1.2 Vilka egenskaper önskas hos en köldbärare?

För att kunna bedöma om en vätska är lämplig som köldbärare behöver vi beakta ett antal kriterier. Goda egenskaper önskas inom följande områden:

- termodynamik
- korrosion
- hantering
- miljö

I tabellen nedan har ett försök gjorts att belysa svagheter som de olika köldbärartyperna har med avseende på nämnda områden. Av tabellen framgår att de olika förekommande köldbärartyperna alla har mer eller mindre allvarliga svagheter när det gäller dessa kriterier.

<u>TYP AV KÖLDBÄRARE:</u>	<u>KRITERIE DÄR SVAGHET FINNS:</u>
vatten	termodyn, fryspunkt; (Korrosion ^{1/})
etylenglykol-vatten	miljö, giftig
propylenglykol-vatten	termodyn, viskös; (miljö, giftig)
metylalkohol-vatten	miljö, giftig; hantering ^{2/} ; (korrosion ^{1/})
etylalkohol-vatten	termodyn, viskös; hantering ^{2/} ; (korrosion ^{1/})
natriumklorid-vatten	korrosion ^{1/} ; termodyn, fryspunkt
kalciumpklorid-vatten	korrosion ^{1/}
kaliumkarbonat-vatten	hantering ^{3/} ; (korrosion, materialval)

^{1/} speciellt utan inhibitor och då syre finns i systemet

^{2/} brandfarligt

^{3/} undvik ögonstänk

Vatten är ur de flesta aspekter en idealisk köldbärare, men kan normalt inte användas vid tillämpningar under 0°C. Liksom nedanstående vattenbaserade köldbärare kräver vanligt vatten i allmänhet tillsats av korrosionsinhibitor.

Etylenglykol är som bekant giftigt. Användningen av etylenglykol har därför inskränkts på många orter i Sverige p g a kommunala riskbedömningar avseende konsekvenser av ett eventuellt läckage vid t ex en ytjord- eller bergvärmepumpänläggning.

Ett allvarligt problem med propylenglykol är dess höga viskositet vid låga temperaturer. Propylenglykol är något mindre giftig än etylenglykol.

Alkohol-baserade köldbärare med volymskonc på $\geq 30\%$ klassas som brandfarliga. För oinhiberad alkoholbaserad köldbärare är allmänkorrosionen hög.

Metylalkohol (metanol) är säkert den mest hälsovådliga av de förekommande vattenbaserade köldbärarna.

Etylalkohol-baserade köldbärare som säljs utgörs av "metanolhaltig cellulosasprit". */ Toxiciteten ligger mellan etylen- och propylenglykol. Hög viskositet vid låga temperaturer är ett problem.

Kloridsalterna undviks ofta i villavärmepumpsammanhang, p g a problem med yttre korrosion och val av miljövänlig inhibitor.

Kaliumkarbonat har relativt högt pH-värde och man bör därför undvika stänk i ögonen, t ex vid tillblandning och luftning. Ur korrosions synpunkt skall vissa material som zink och aluminium undvikas.

*/ I en reklamskrift för en etanol-baserad köldbärare stod följande att läsa i en jämförelse med andra köldbärare: "**GIFTIGHET**. Bland fryskyddsmedlen är propylenglykol och etanol godkända livsmedelstillsatser. Etanol säljs som bekant av systembolaget för förtäring." Detta gäller knappast den denaturerade råsprit som etanolbaserade köldbärare består av.

1.3 Kaliumkarbonat som köldbärare

Som framgår av tabellen ovan tycks kaliumkarbonat vara ett bra alternativ till övriga köldbärartyper. Kaliumkarbonat, K_2CO_3 , som även benämns "pottaska", är ett fryspunktsnedsättande i vatten lättlösligt alkaliskt ämne som förekommer i naturen.

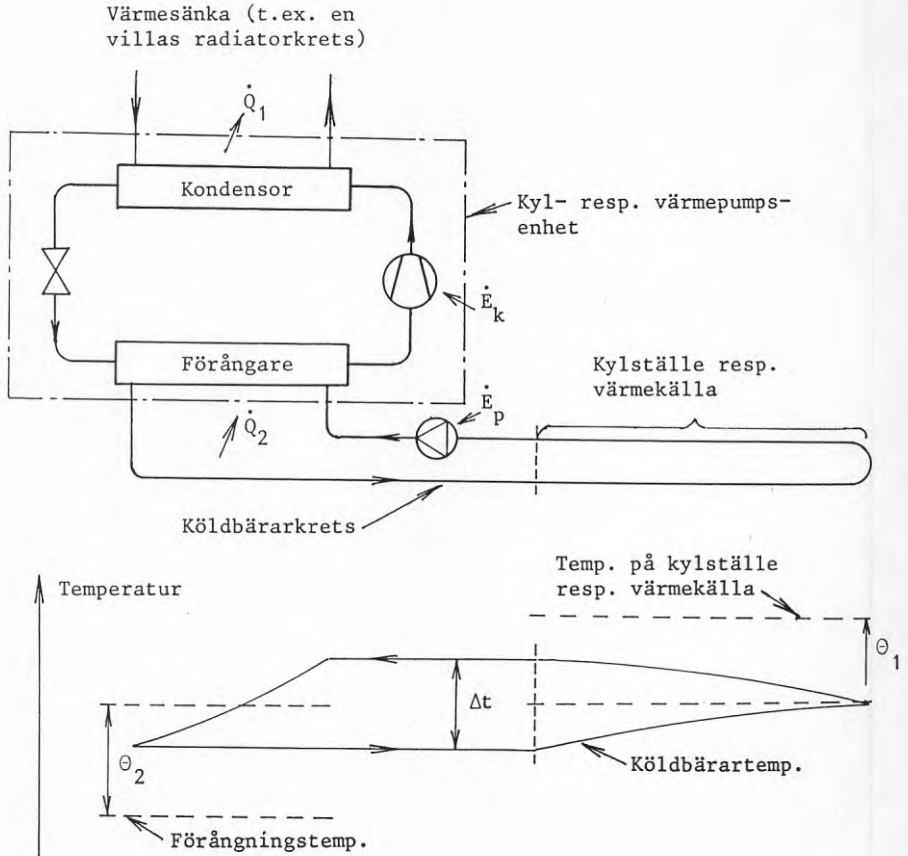
Under de senaste åren har vi på institutionen för Mekanisk värmeteori och kylteknik vid KTH undersökt vattenlösningar av kaliumkarbonat med avseende på termodynamiska egenskaper och korrosion. Resultaten är mycket lovande och har till en del redovisats i BFR Rapport R114:1985 "Köldbärare för värmepumptillämpningar. Studier av termodynamiska egenskaper och korrosion".

I den här rapporten önskar vi nu redovisa de fortsatta studier av kaliumkarbonat samt jämförelser med andra köldbärare som gjorts. Dessutom kan vi redovisa fälterfarenheter av kaliumkarbonat som köldbärare, speciellt med avseende på korrosion.

2 ÖNSKVÄRDA TERMODYNAMISKA EGENSKAPER

För att ett ämne skall komma ifråga som köldbärare måste det ha tillräcklig frys punktsnedsättande förmåga. I flertalet tillämpningar krävs att en köldbärare ger ett frysskydd ner till -15 ä -20°C .

Köldbäraren i ett indirekt kyl- eller värmepumpsystem har till uppgift att uppta och sedan transportera värme från kylstället eller värmekällan till förångaren där värmets avges, se Figur 2:1. Det är därför önskvärt att en köldbärare, förutom tillräcklig frys punktsnedsättande förmåga har goda transport- och värmeöverföringsegenskaper.



Figur 2:1 Indirekt kyl- resp värmepumpsystem med köldbärarkrets samt köldbärarkretsens temperaturförlopp

Tabell 2:1 ger exempel på sådana önskvärda termodynamiska egenskaper för köldbärare. (Jfr även figur 2:1)

Tabell 2.1 Önskvärda termodynamiska egenskaper för köldbärare

Kriterium	Samband	Gynnsamma ämneskont
Stor transporterad effekt vid givet volymflöde	$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t$	Högt $\rho \cdot c_p$
Högt värmeövergångstal ger liten temp diff vid given effektbelastning	$\dot{Q} = \alpha \cdot A_Q \cdot \vartheta$	Högt $\alpha \rightarrow$ högt λ lågt ν högt c_p
Litet pumparbete för given transport av värme	$\frac{\dot{E}_p}{\dot{Q}_2} = \frac{1}{\eta_p} \cdot \sum f_1 \cdot \frac{w^2}{c_p} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{\Delta t}$	Högt c_p Lågt $f_1 \rightarrow$ lågt ν
Litet pumparbete för given värmeövergång	$\frac{\dot{E}_p}{\dot{Q}_2} = \frac{1}{\eta_p} \cdot Pr^{2/3} \cdot \frac{w^2}{c_p} \cdot \frac{1}{\vartheta}$ (om turb strömning)	Högt c_p Lågt $Pr = \rho \cdot \nu \cdot c_p / \lambda$
Litet tryckfall - möjliggör pump med låg effekt	$\Delta p = \sum f_1 \cdot \rho \cdot \frac{L}{d} \cdot w^2$	Lågt ρ Lågt $f_1 \rightarrow$ lågt ν

Beteckningar:

- \dot{Q}_2 = transporterad effekt (W)
 \dot{V} = volymflöde (m³/s)
 \dot{E}_p = cirkulationspumpens effekt (W)
 Δp = tryckfall över köldbärarkretsen (N/m²)
 ρ = densitet (kg/m³)
 c_p = specifik värmekapacitet (J/kg,K)
 λ = värmeledningsförmåga (W/m,K)
 ν = kinematisk viskositet (m²/s)
 Pr = Prandtls tal ($Pr = \nu \cdot \rho \cdot c_p / \lambda$)
 Δt = temperaturändring över köldbärarkretsen (K)
 ϑ = medeltemperaturdifferens (K)
 A_Q = värmeöverförande yta (m²)
 α = värmeövergångstal (W/m²,K)
 η_p = pumpverkningsgrad
 f_1 = friktionsfaktor
 w = köldbärarhastighet (m/s)
 L = rör eller slanglängd (m)
 d = inre rör eller slangdiameter (m)

Olika termodynamiska egenskaper inverkar i olika delar av systemet, som framgår av följande exempel:

- Goda transportegenskaper är viktiga med hänsyn till transportledningen mellan kylställe resp värmekälla och förångare
- Goda värmeöverföringsegenskaper är speciellt viktiga i förångaren där ytbelastningen är stor men behövs också för att bibehålla liten temperaturdifferens vid värmeupptagningen från kylställe resp värmekälla.

Sammanfattningsvis kan vi med utgångspunkt från tabell 2 konstatera att det gynnsamt om en köldbärare har:

- hög densitet * spec värmekapacitet, ($\rho \cdot c_p$)
- hög värmeledningsförmåga, λ
- låg viskositet, ν

Förutom ovannämnda ämneskonstanter och egenskaper önskar man i vissa tillämpningar även känna ytspänning, volymsutvidgningskoefficient, kokpunkt eller ångtryck för köldbäraren. Uppgifter om dessa ämneskonstanter ges i kapitel 3 och 5.

3 TERMODYNAMISKA ÄMNESDATA FÖR KALIUMKARBONAT

3.1 Allmänt

Då det visat sig att kaliumkarbonat är en ur termodynamisk synpunkt bra köldbärare har vi fortsatt vår litteratursökning efter tillförlitliga värden på olika ämneskonstanter.

Förutom de tidigare undersökta ämneskonstanterna fryspunkt, densitet, viskositet, specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga har vi sökt litteraturvärden på ytspänning, kokpunkt och ångtryck, samt beräknat värden på volymsutvidgningskoefficient, temperaturledningsförmåga och Prandtl-tal.

Resultatet av de studier detta lett till redovisas här i form av diagram (engelsk text) samt en tabell med vissa av dessa värden. De laboratoriemätningar och litteraturkällor som diagrammen baserats på anges i varje diagram.

3.2 Litteraturkällor

Här följer i bokstavsordning en lista över litteraturkällor samt den bokstav de anges med i rapporten.

- A. ASHRAE Handbook, 1981 Fundamentals
- B. Carrier, Handbook of Airconditioning System Design, 1965
- C. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 67:e uppl, 1986-1987
- D. Dow, Organic Chemicals, The Glycols, 1974
- E. Handbuch der Kältetechnik; Band IV, Die Kältemittel, 1956
- F. International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology, 1928, 1929
- G. Kältetechnik, Zeitschrift für das gesamte Gebiet der Kälteerzeugung und Kälteanwendung
- H. Landolt - Börnstein, Eigenschaften der Materie in Ihren Aggregatzuständen, 1968, 1971
- I. Landolt - Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, 1977
- J. Mellor's Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, 1963
- K. The Physio-chemical Constants of Binary Systems in Concentrated Solutions, 1960
- L. VDI-Wärmeatlas, 4:e uppl, 1984
- M. Zeitschrift für die gesamte Kälte-Industrie

Många av dessa litteraturuppgifter har erhållits via Chemical Abstracts. De gjorda studierna antyder att det de senaste årtiondena knappast gjorts några publicerade mätningar av termodynamiska ämneskonstanter för vattenlösningar av kaliumkarbonat. Verk som G. och J. hänvisar ofta till mätningar som gjorts långt tidigare, ibland t o m från 1800-talet.

3.3 Diagram över ämneskonstanter

Diagram över ett antal ämneskonstanter för vattenlösningar av kaliumkarbonat återges vid slutet av detta kapitel. Våra laboratoriemätningar är gjorda med en 98-100% teknisk kvalitet. Här ges en kort beskrivning av vart och ett av dessa diagram.

3.3.1 Fryspunkt

Diagram 3:1 (sid 18) Fryspunkt som funktion av koncentrationen kaliumkarbonat i vattenlösning, dvs vikts-% K_2CO_3 .

Kurvorna är baserade på litteraturvärden från C. (s.D-242) och M. (Sept/Okt 1943, s.102) förutom de övareutektiska värdena som är hämtade ur J. (Vol 3, s.575). Fryspunktskurvan i efterföljande diagram är baserad på dessa värden.

Den eutektiska punkten anges i de två källorna till: C.: $-37,55^\circ C$ för 40% K_2CO_3 ; M.: $-36,5^\circ C$ för 39,5% K_2CO_3 .

3.3.2 Densitet

Diagram 3.2.1 (sid 19) Densitet som funktion av temperatur och vikts-% K_2CO_3 mellan -40 och $+30^\circ C$.

Våra areometermätningar finns beskrivna i BFR Rapport R114:1985, punkt 3.2 samt diagram 4.7.2.

Följande två kurvskaror finns inritade i diagram 3.2.1:

+ ---- + ; x ----x Egna okorrigerade areometermätningar

· ---- · Litteraturvärden enligt F. (Vol 3, s.90); I. (Vol IV/1b, s.46, 47)

En orsak till att våra mätvärden ligger något under litteraturvärdena är troligen att vi använt en 98-100% teknisk kvalitet. Avvikelsen är dock endast ca 0,5 %.

Diagram 3.2.2 (sid 20) Densitet som funktion av temperatur och vikts-% K_2CO_3 mellan -40 och $+100^\circ C$.

Diagrammet är baserat på de litteraturkällor som anges i diagram 3.2.1. De streckade kurvdelarna för låga temperaturer har inritats genom extrapolering samt jämförelse med egna mätningar enligt diagram 3.2.1.

3.3.3 Viskositet

Diagram 3.3 (sid 21) Viskositet (dynamisk) som funktion av temperatur och vikts-% K_2CO_3 mellan -40 och $+40$ °C.

Utrustning, metod och resultat av våra laboratoriemätningar beskrivs i BFR Rapport R114:1985, punkt 3.3 samt diagram 4.7.3

I diagram 3.3 har förutom våra mätpunkter även inritats litteraturvärden från C. (s.D-242), F. (Vol 5, s.18) och K. (Vol 3, s.577). Som synes är överensstämmelsen mycket god.

En av orsakerna till att dessa senare litteraturstudier gjorts är att L. (VDI-Wärmeatlas, 1984, tab Dd 10, 11) anger värden på viskositeten som vid låga temperaturer avviker kraftigt från våra mätvärden. I avsnitt 3.4 jämförs därför värdena i L. med övriga källor, främst med avseende på densitet och viskositet, men också i någon mån specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga.

3.3.4 Specifik värmekapacitet

Diagram 3.4 (sid 22) Specifik värmekapacitet som funktion av temperatur och vikts-% K_2CO_3 mellan -40 och $+40$ °C.

Mätutrustning, beräkningsmetod och resultat av våra laboratoriemätningar finns beskrivna i BFR Rapport R114:1985, punkt 3.4 samt diagram 4.7.4.

De mätresultat som nu återges i diagram 3.4 visar något stabilare mätserier än de i diagram 4.7.4. Orsaken är att en något längre tid (τ) mellan mätpunkterna valts. Detta ger något stabilare värden. Dessutom har medelvärden av de framräknade värdena angivits för varje koncentration.

I diagram 3.4 har även inritats litteraturvärden från F. (Vol 5, s.124) och M. (Sept/Okt 1943, s.102). Kurvorna avviker endast mycket lite från diagram 5.23 i BFR Rapport R114:1985.

3.3.5 Värmeledningsförmåga

Diagram 3.5 (sid 23) Värmeledningsförmåga som funktion av temperatur och vikts-% K_2CO_3 mellan -40 och $+30$ °C.

Utrustning, metod och resultat av våra laboratoriemätningar beskrivs i BFR Rapport R114:1985, punkt 3.5 samt diagram 4.7.5.

I diagram 3.5 är de streckade linjerna baserade på våra mätpunkter. (Jfr ovan nämnda diagram 4.7.5). I diagrammet har nu även litteraturvärden inritats (för 20 °C) från H. (Vol 5b, s.93 av L Riedel). Vid 25-30% K_2CO_3 är skillnaden mellan våra streckade linjer och värdena från H. endast c:a 1%. (Jfr punkt 3.4).

Jaeger angav ett samband i Wiener Berichte (Band 99, s.245, 1890), som återges i bl a E. (Band 4, s.75), F. (Vol 5, s.229 baserat på Jaeger) och G. (Heft 4/1950, s.99 av L Riedel). Sambandet lyder:

$$\lambda = \lambda_w (1 - \alpha \cdot x)$$

där λ = värmeledningsförmågan för lösningen vid en viss temperatur
 λ_w = värmeledningsförmågan för vatten vid denna temperatur
 α = en av ämnet beroende konstant
 x = vikts-% av ämnet som är löst i vatten

F. anger ett α -värde för K_2CO_3 ($\alpha = 265 \cdot 10^{-5}$) men en jämförelse med α -värden för andra ämnen, bl a NaCl och $CaCl_2$, tyder på att det inte är tillförlitligt. Dessutom avviker även angivna värden på λ_w från nu använda värden (0,587 mot 0,599 W/m K vid 20°C). Våra kurvor för 20-40% K_2CO_3 svarar mot $\lambda_w = 0,599$ W/m K samt $\alpha \approx 1,5 - 1,8 \cdot 10^{-3}$.

3.3.6 Termisk volymsutvidgningskoefficient

Diagram 3.6 (sid 24) Termisk volymsutvidgningskoefficient för olika temperaturintervaller som funktion av vikts-% K_2CO_3 .

Kurvorna är baserade på densitetsvärden ur C. (s.F-10) och H. (Vol IV/1b, s.46, 47).

Observera att β_v -värdena för aktuella koncentrationer av K_2CO_3 är nästan lika stora för de olika temperaturområdena, medan motsvarande värden för vatten ökar kraftigt med temperaturen.

3.3.7 Ytspänning

Diagram 3.7 (sid 25) Ytspänning som funktion av vikts-% K_2CO_3 och temperatur. För K_2CO_3 ökar ytspänningen med ökad koncentration.

Värdena för K_2CO_3 är hämtade ur J. (Vol 2, Suppl 3, s.1896) och K. (Vol 3, s.577). Värden för vatten vid olika temperaturer (inritade vid 0% K_2CO_3) är tagna ur C. (s.F-32).

3.3.8 Kokpunkt

Diagram 3.8 (sid 26) Kokpunkt vid atmosfärstryck ($p = 1,0325 \cdot 10^5$ N/m²) som funktion av vikts-% K_2CO_3 .

Litteraturkällan är K. (Vol 3, s.573; baserad på Legrand, 1835 och Gerlach, 1886).

3.3.9 Ångtryck

Diagram 3.9 (sid 27) Ångtryck som funktion av temperatur och vikts-% K_2CO_3 mellan 30 och 100°C.

Litteraturkällan är K. (Vol 3, s.573; baserad på Tasmann, 1885).

3.4 Tabell med termodynamiska ämnesdata

Som komplement till köldbärardiagrammen i punkt 3.3 har tabell 3.1 sammanställts, som för ett antal temperaturer och vikts-% K_2CO_3 ger värden på densitet, specifik värmekapacitet, värmeledningsförmåga, dynamisk och kinematisk viskositet, temperaturledningsförmåga samt Prandtl-tal. Temperaturledningsförmågan $a = \lambda/(\rho \cdot c_p)$ och Prandtl-talet $Pr = \mu \cdot c_p/\lambda$.

Tabell 3.1 Termodynamiska data för vattenlösningar av kaliumkarbonat

Vikts- procent K_2CO_3 %	Frys- punkt t_{frys} $^{\circ}C$	Tempe- ratur t $^{\circ}C$	Den- sitet ρ kg/m^3	Specifik värme- kapacitet c_p $kJ/kg\ K$	Värme- lednings- förmåga λ $W/m\ K$	Dynamisk viskositet μ (η) $10^{-3}\ Ns/m^2$	Kinematisk viskositet ν $10^{-6}\ m^2/s$	Prandtl talet Pr -
10	-3,5	20	1089	3,69	0,591	1,26	1,16	7,87
		10	1091	3,67	0,574	1,60	1,47	10,2
		0	1093	3,66	0,566	2,12	1,94	14,0
15	-5,8	20	1135	3,50	0,586	1,45	1,28	8,66
		10	1138	3,48	0,569	1,85	1,62	11,3
		0	1141	3,47	0,552	2,40	2,10	15,1
		-5	1142	3,46	0,544	2,85	2,50	18,2
20	-8,8	20	1187	3,31	0,581	1,70	1,43	9,69
		10	1190	3,29	0,564	2,15	1,81	12,6
		0	1193	3,28	0,547	2,80	2,35	16,8
		-5	1194	3,27	0,538	3,25	2,72	19,8
25	-12,8	20	1238	3,12	0,576	2,05	1,66	11,1
		10	1242	3,10	0,559	2,55	2,05	14,2
		0	1245	3,09	0,542	3,35	2,69	19,1
		-5	1247	3,08	0,534	3,90	3,13	22,5
		-10	1249	3,07	0,526	4,60	3,68	26,8
30	-18	20	1292	2,96	0,569	2,55	1,97	13,3
		10	1295	2,94	0,553	3,25	2,51	17,3
		0	1298	2,93	0,536	4,30	3,31	23,5
		-10	1302	2,91	0,520	6,00	4,61	33,6
		-15	1303	2,90	0,512	7,20	5,53	40,8
35	-26	20	1350	2,82	0,563	3,25	2,41	16,3
		10	1354	2,80	0,546	4,20	3,10	21,5
		0	1358	2,79	0,530	5,65	4,16	29,7
		-10	1361	2,77	0,514	8,05	5,91	43,4
		-20	1364	2,75	0,498	12,1	8,87	66,8
		-25	1366	2,74	0,490	15,5	11,35	86,7
40	-36	20	1404	2,71	0,554	4,30	3,06	21,0
		10	1408	2,69	0,538	5,65	4,01	28,3
		0	1412	2,68	0,522	7,90	5,59	40,6
		-10	1417	2,66	0,507	11,7	8,26	61,4
		-20	1421	2,64	0,491	18,3	12,87	98,4
		-30	1425	2,62	0,475	(32,0)	(22,5)	(177)
		-35	1427	2,61	0,467	(45,0)	(31,5)	(252)

3.5 Jämförelse av data med VDI-Wärmeatlas, 1984

3.5.1 Direkt jämförelse av data

I VDI-Wärmeatlas, tabell Dd10, 11 finns tabellvärden på densitet, specifik värmekapacitet, värmeledningstal, dynamisk samt kinematisk viskositet, temperaturledningstal samt Prandtl-tal för ett antal temperaturer och koncentrationer av K_2CO_3 (för jämna värden på fryspunkten).

Fryspunktsvärdena svarar väl mot angiven vikts-% K_2CO_3 , men densitetsvärdena är högre än de litteraturvärden vi tidigare nämnt i punkt 3.3.2. Detta dryftas i samband med diagram 3.10.

Som nämnts i punkt 3.3.3 avviker viskositetsvärdena avsevärt från våra värden vid låga temperaturer, vilket dryftas i anslutning till diagram 3.11-15.

Värden för specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga skiljer sig endast något. Speciellt vid de högre koncentrationerna är VDI-värdena något lägre än de i diagram 3.4 och 3.5. Skillnaden är dock inte mer än 2% som mest.

Diagram 3.10 (sid 28) Jämförelse av densitetsvärden. Differansen är ca 3% eller mindre. Men, det är speciellt viktigt att densitetsvärdena är så korrekta som möjligt. En orsak till detta är att en kontroll av saltkoncentrationen normalt görs genom att mäta densiteten.

Om vid en sådan mätning vi skulle avläsa $\rho = 1250$ vid $0^\circ C$, anger VDI tabellen endast 21,2% K_2CO_3 medan övriga litteraturkällor anger 24,8%. Det är en rätt stor skillnad. Följande fråga kan också ställas: Är VDI-värdena för specifik värmekapacitet, värmeledningsförmåga, viskositet och Prandtl-tal baserade på densitetsvärdet eller på vikts-% K_2CO_3 ?

Diagram 3.11 (sid 29) Jämförelse av viskositetsvärden. I diagram 3.11 har viskositetsvärden från VDI-Wärmeatlas, 1984 för ett antal koncentrationer inritats i diagram 3.3. Viskositeten ökar mot lägre temperaturer. Av diagrammet ser vi dock att VDI kurvorna är klart brantare än kurvorna i diagram 3.3.

Exempel: För 34% K_2CO_3 lösning ger kurvorna ungefär lika viskositet vid $17^\circ C$, men vid $0^\circ C$ är VDI värdena ca 30% högre, vid $-10^\circ C$ ca 45% högre och vid $-20^\circ C$ ca 60% högre.

Att våra mätvärden är i så god överensstämmelse med litteraturkällorna i diagram 3.3 är en stark indikation på att våra värden är tillförlitliga, liksom även följande betraktelse:

3.5.2 Jämförelse baserad på mätningar av tryckfall och värmeövergång

Laboratoriemätningar av värmeövergång och tryckfall vid strömning i rör har utförts av Björn Kyrk för kaliumkarbonat, kalciumklorid och etylen-glykol (Se APPENDIX). Resultaten utgör en kontroll av ämneskonstanterna för de olika köldbärarna. Dessa mätningar bekräftar att såväl densitets- som viskositetsvärden för kaliumkarbonat i diagram 3.2 och 3.3 är tillförlitliga. Detta belyses i diagram 3.12 t o m 3.15, som beskrivs och kommenteras nedan. Mätningarna utfördes med en 34% K_2CO_3 -lösning, vilken svarar emot en fryspunkt på $-25^\circ C$.

Diagram 3.12-13 (sid 30, 31) Jämförelse baserad på tryckfallsmätningar.

I diagram 3.12-13 har friktionsfaktorn f_1 representerats som funktion av Reynolds-tal, $Re = w \cdot d \cdot \rho / \mu$, där w = hastighet, d = diameter, ρ = densitet och μ = viskositet (dynamisk). I diagrammen har värden från mätpunkter inritats för fyra temperaturer (+10, 0, -10, -20 °C).

I diagram 3.12-13 har även samband som gäller för laminär resp turbulent strömning vid släta rör inritats. Övergångsområdet mellan laminärt och turbulent område förväntas ske vid ungefär samma Reynolds tal oberoende av temperaturen.

I diagram 3.12 är densitets- och viskositetsvärdena hämtade från diagram 3.2 och 3.3. Som synes sker övergången för de olika temperaturerna väl samlad vid $Re \approx 2300 - 2500$ (Jfr även APPENDIX, diagram 5.1.2).

I diagram 3.13 är densitets- och viskositetsvärdena hämtade från VDI. Enligt diagrammet skulle övergången ske vid allt lägre Reynolds-tal ju lägre temperaturen är. Då viskositeten (μ) finns i nämnaren till Reynolds tal ($Re = w \cdot d \cdot \rho / \mu$) är detta en klar indikation på att viskositetskurvorna är brantare än de borde. Värdena på Reynolds-tal vid övergången visar också att det är värdena vid de låga temperaturerna som är oriktiga.

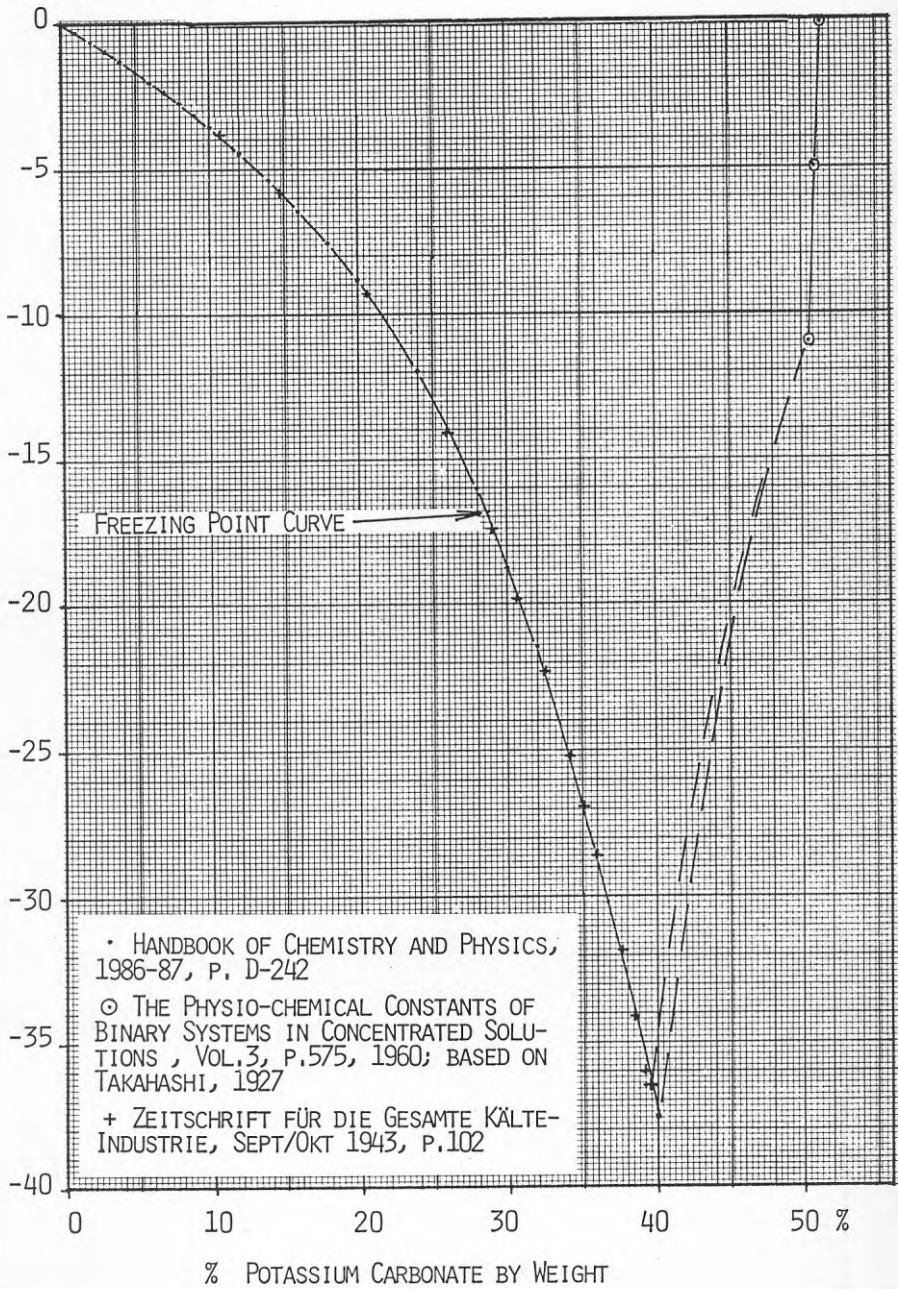
Diagram 3.14-15 (sid 32, 33) Jämförelse baserad på värmeövergångsmätningar. I diagram 3.14-15 har $Nu/Pr^{-1/3}$ uppritats som funktion av Reynolds-tal. Här gäller att $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$ och $Pr = \mu \cdot c_p / \lambda$, där α = värmeövergångstal, λ = värmeledningstal och c_p = specifik värmekapacitet. I övrigt har dessa diagram uppritats på liknande sätt som de två föregående.

Vid en jämförelse mellan diagrammen 3.14 och 3.15 är de iakttagelser som nämnts vid diagram 3.12-13 ännu mer uttalade. Allt detta styrker verkligen att viskositetsvärdena i diagram 3.3 är tillförlitliga (Jfr även APPENDIX, diagram 5.1.1).

Det faktum att provpunkterna i diagram 3.14 vid turbulent strömning är väl samlade kring en gemensam linje, som därtill nära sammanfaller med den inritade "teori-linjen", styrker även giltigheten för använda data vad avser bl.a. värmeledningsförmågan.

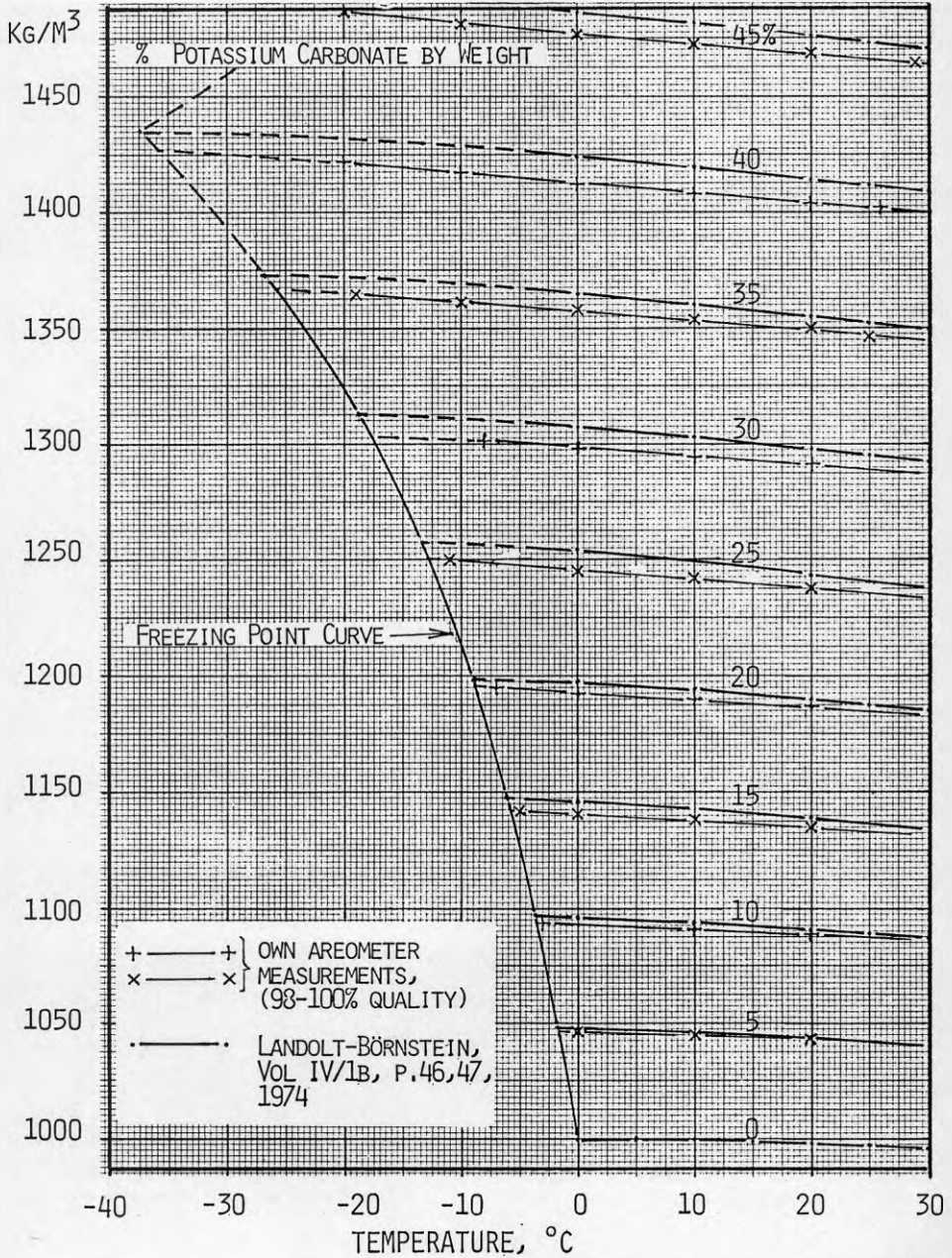
POTASSIUM CARBONATE - WATER
FREEZING POINT, °C

DIAGRAM 3:1



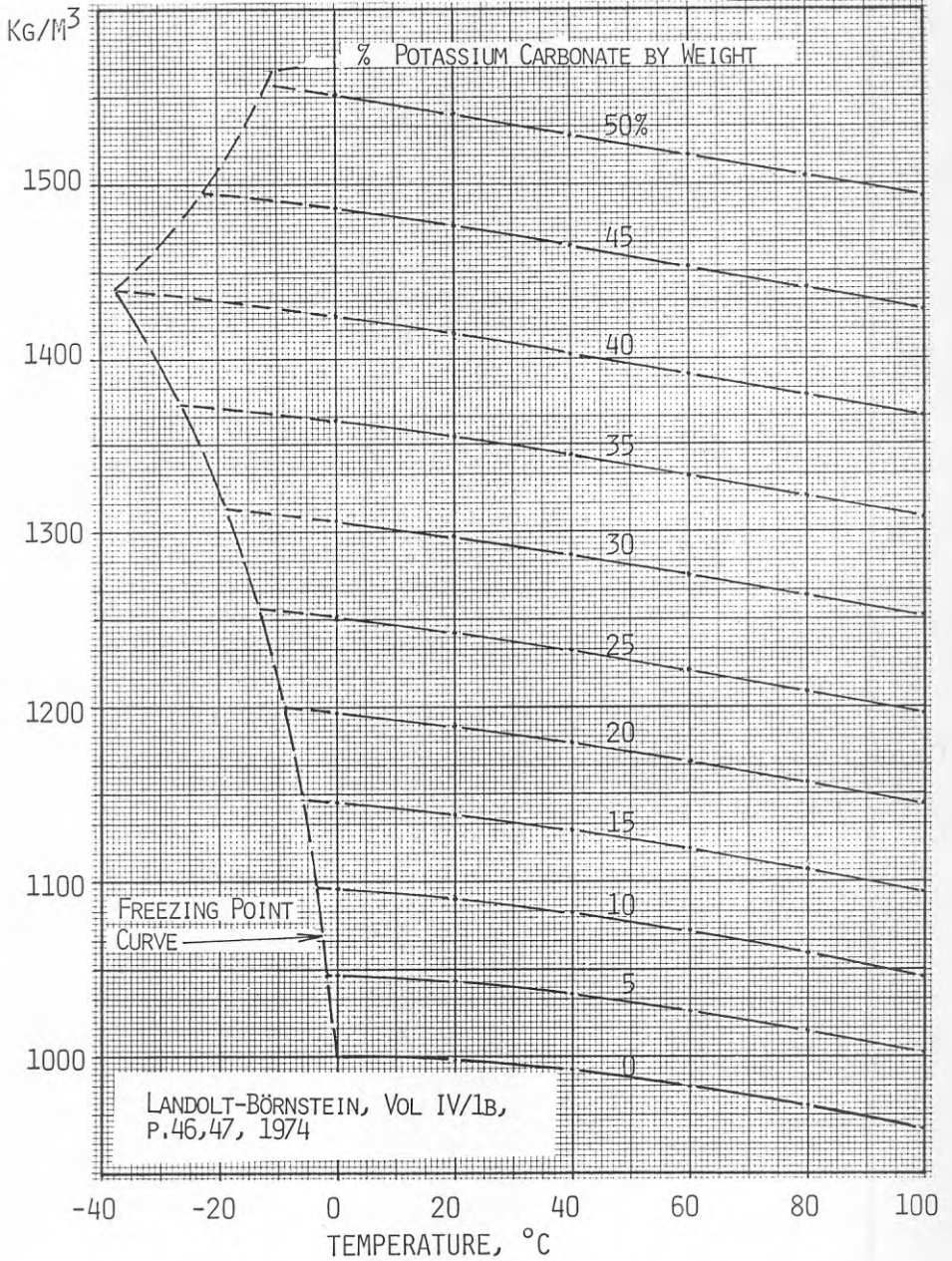
POTASSIUM CARBONATE - WATER
DENSITY

DIAGRAM 3:2.1



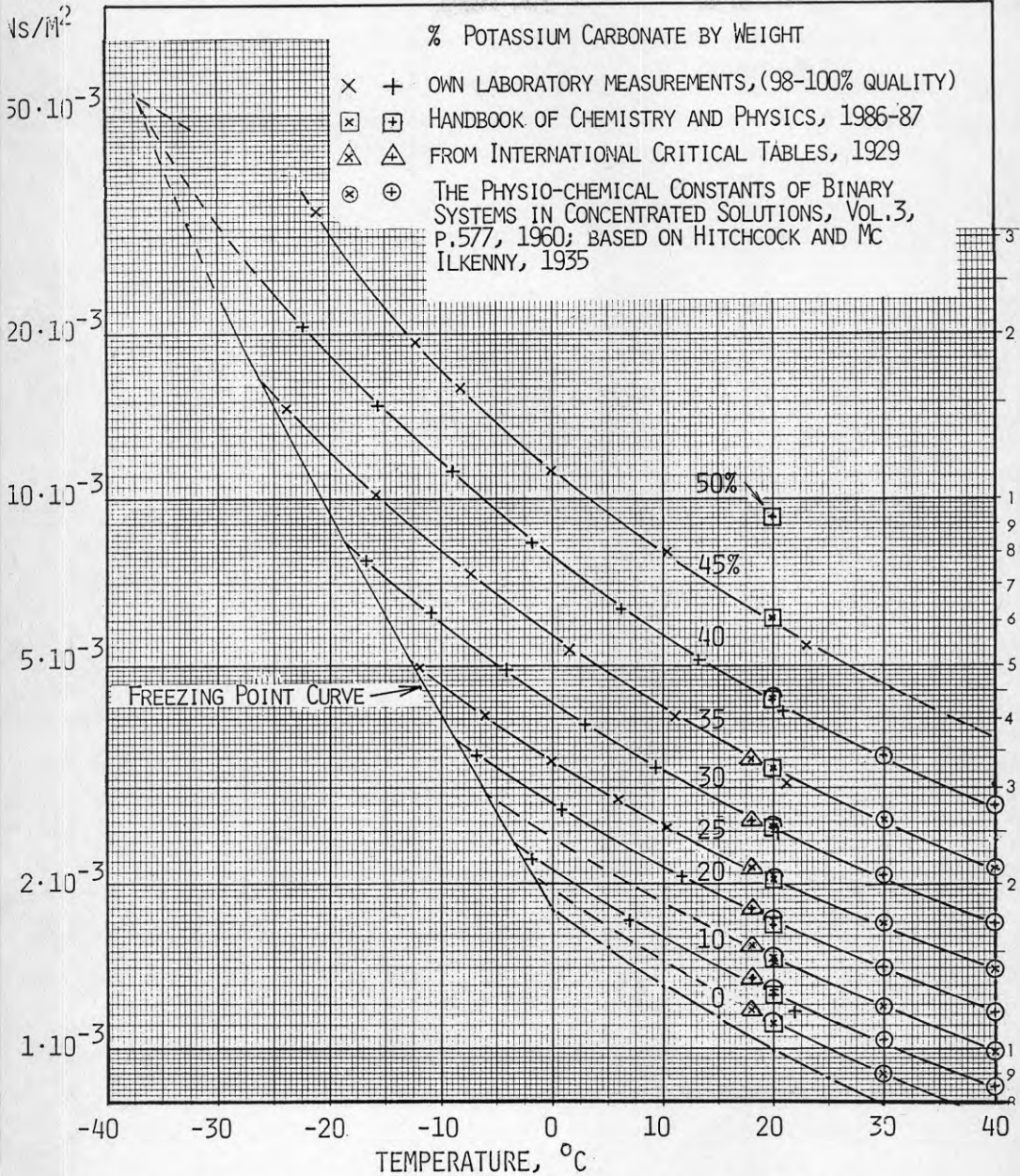
POTASSIUM CARBONATE - WATER
DENSITY

DIAGRAM 3.2.2



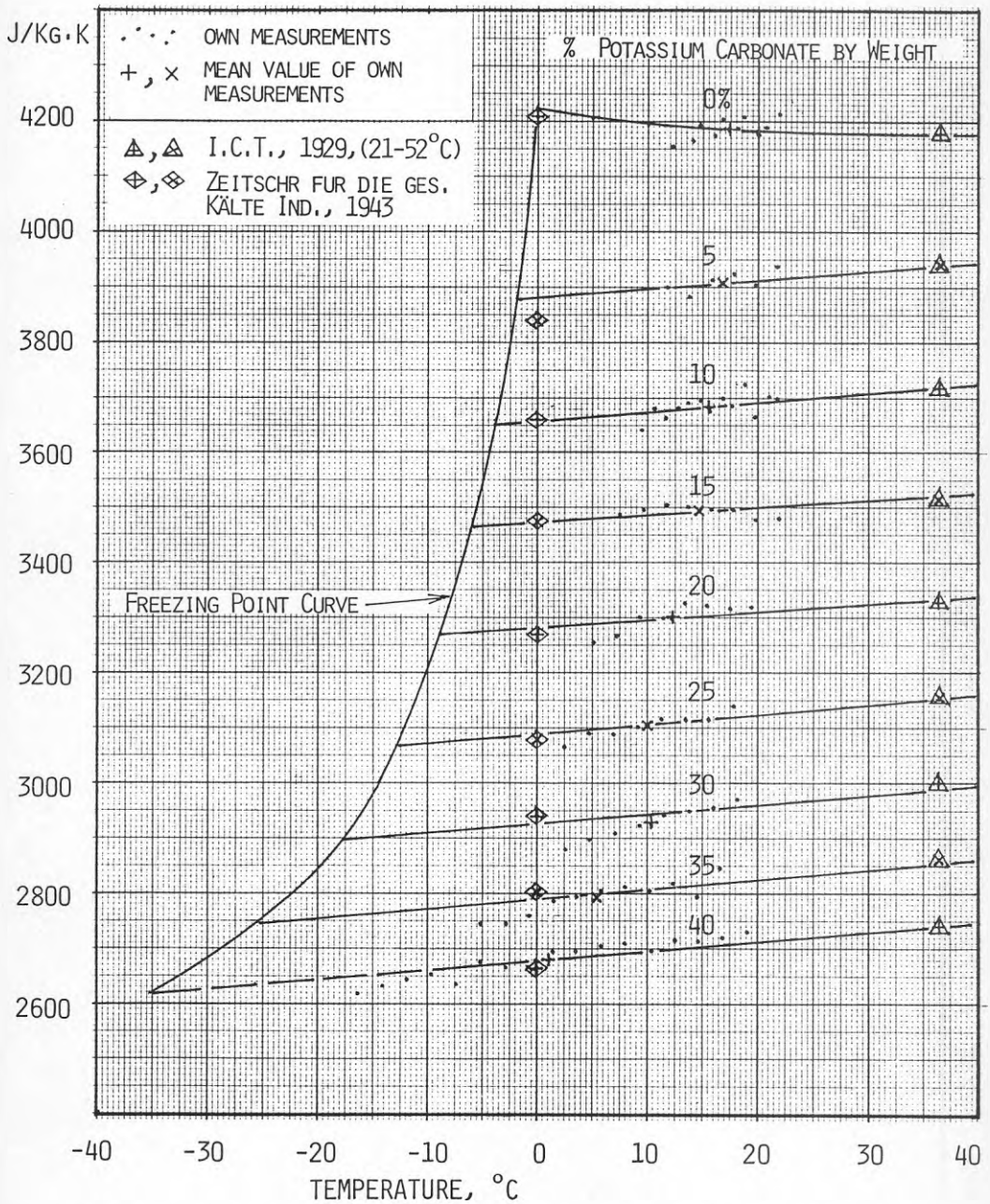
POTASSIUM CARBONATE - WATER
 VISCOSITY

DIAGRAM 3.3



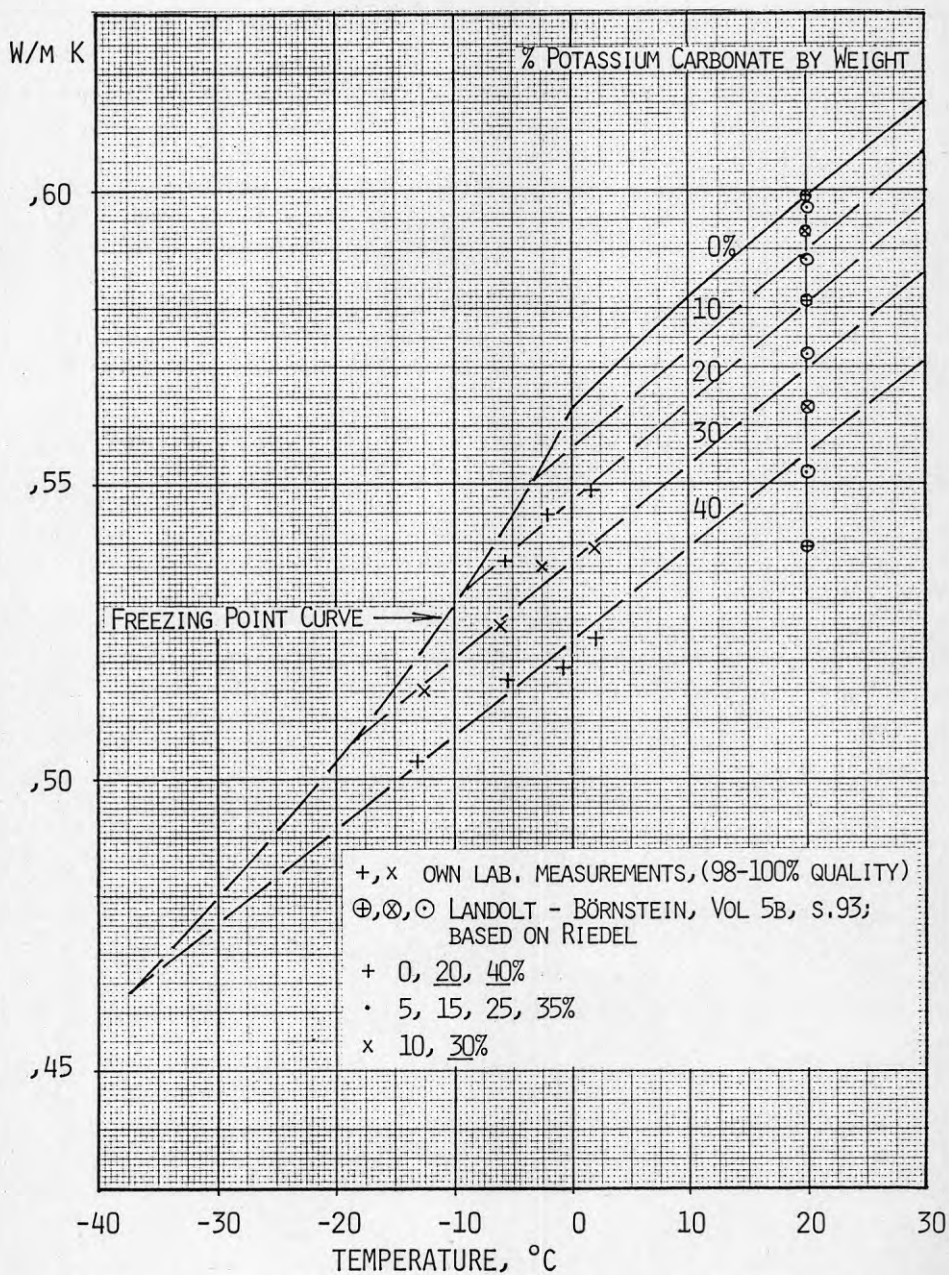
POTASSIUM CARBONATE - WATER
SPECIFIC HEAT

DIAGRAM 3.4



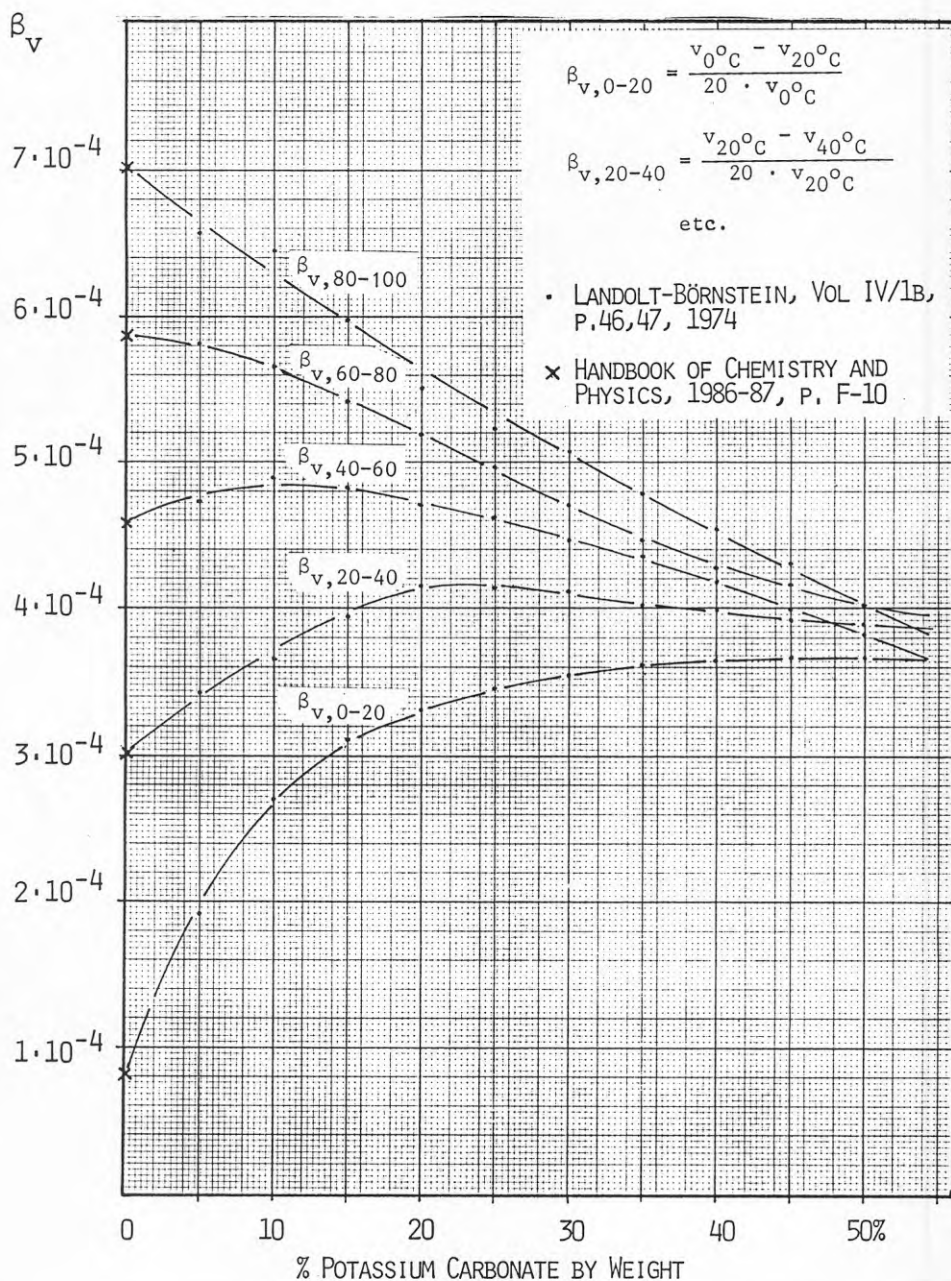
POTASSIUM CARBONATE - WATER
HEAT CONDUCTIVITY

DIAGRAM 3.5



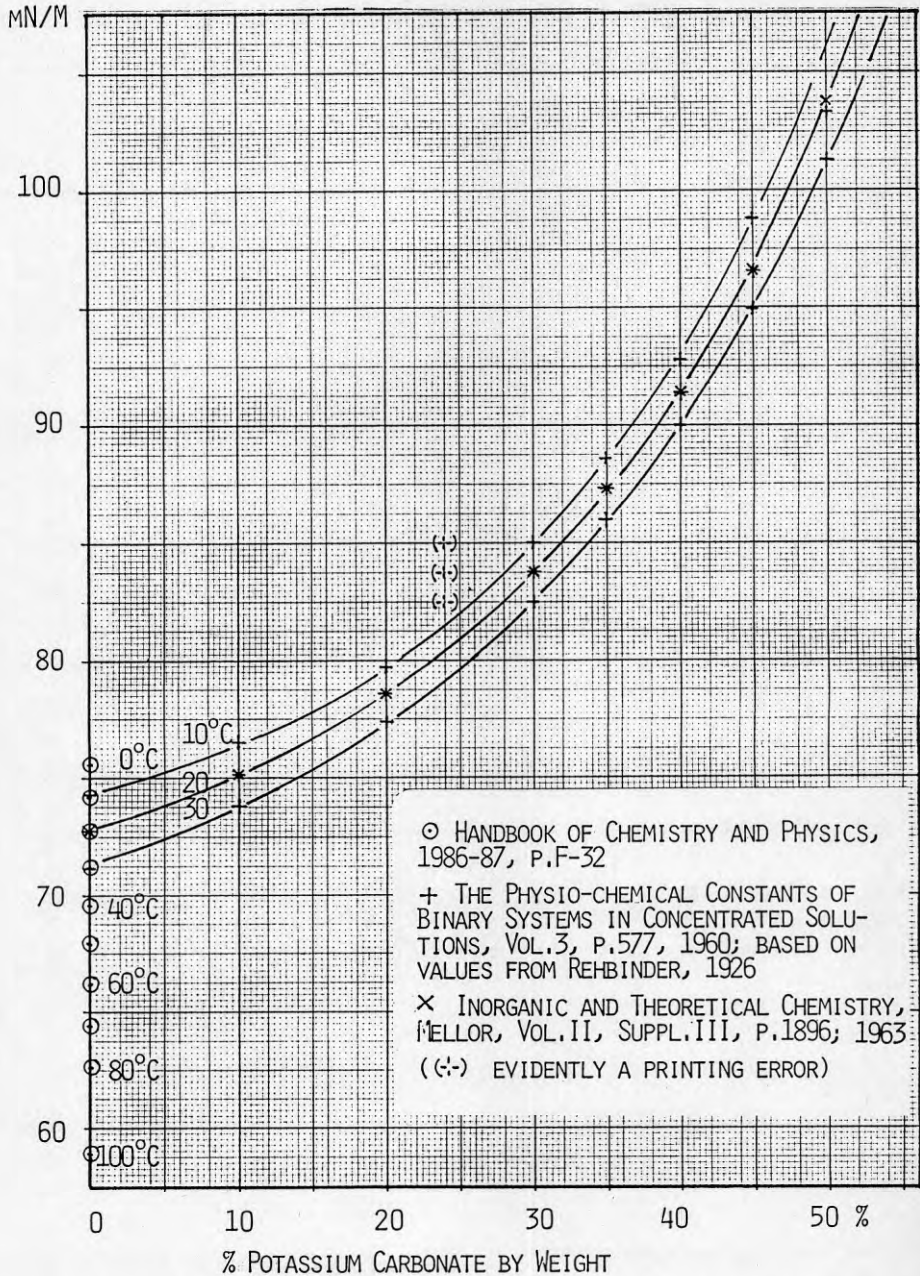
POTASSIUM CARBONATE - WATER
THERMAL COEFFICIENT OF CUBIC EXPANSION

DIAGRAM 3.6



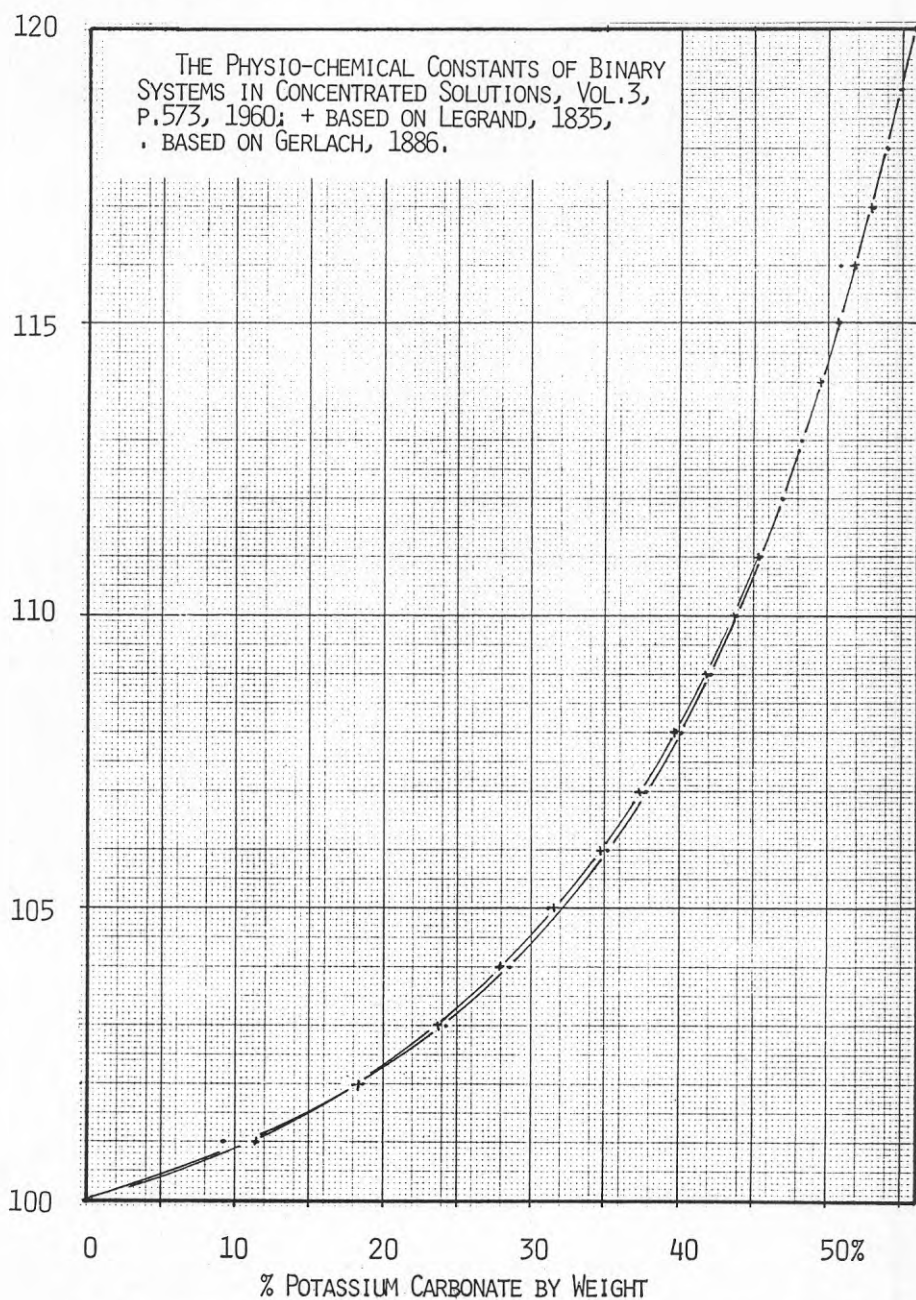
POTASSIUM CARBONATE - WATER
SURFACE TENSION

DIAGRAM 3.7



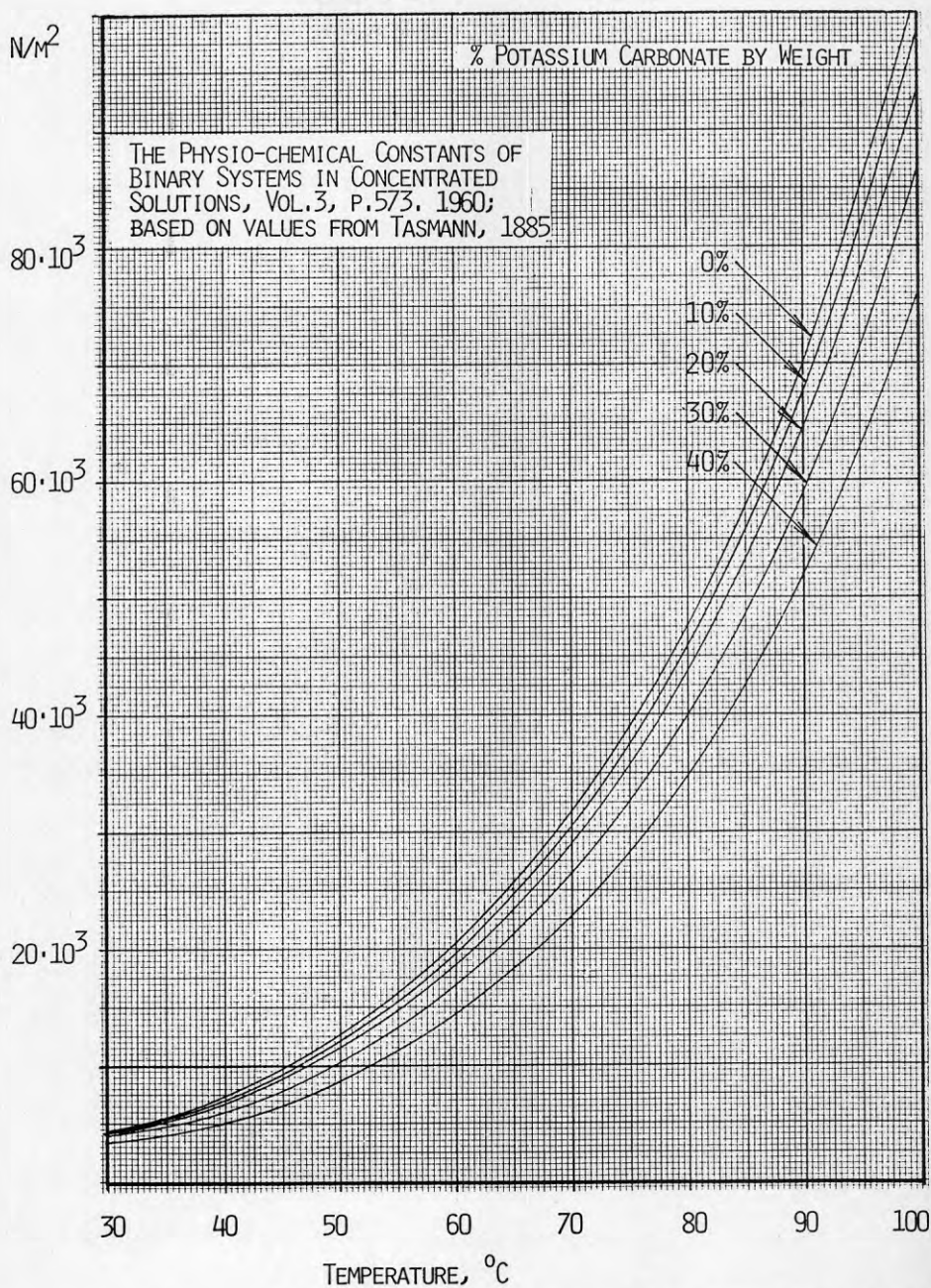
POTASSIUM CARBONATE - WATER
BOILING TEMPERATURE, °C

DIAGRAM 3.8



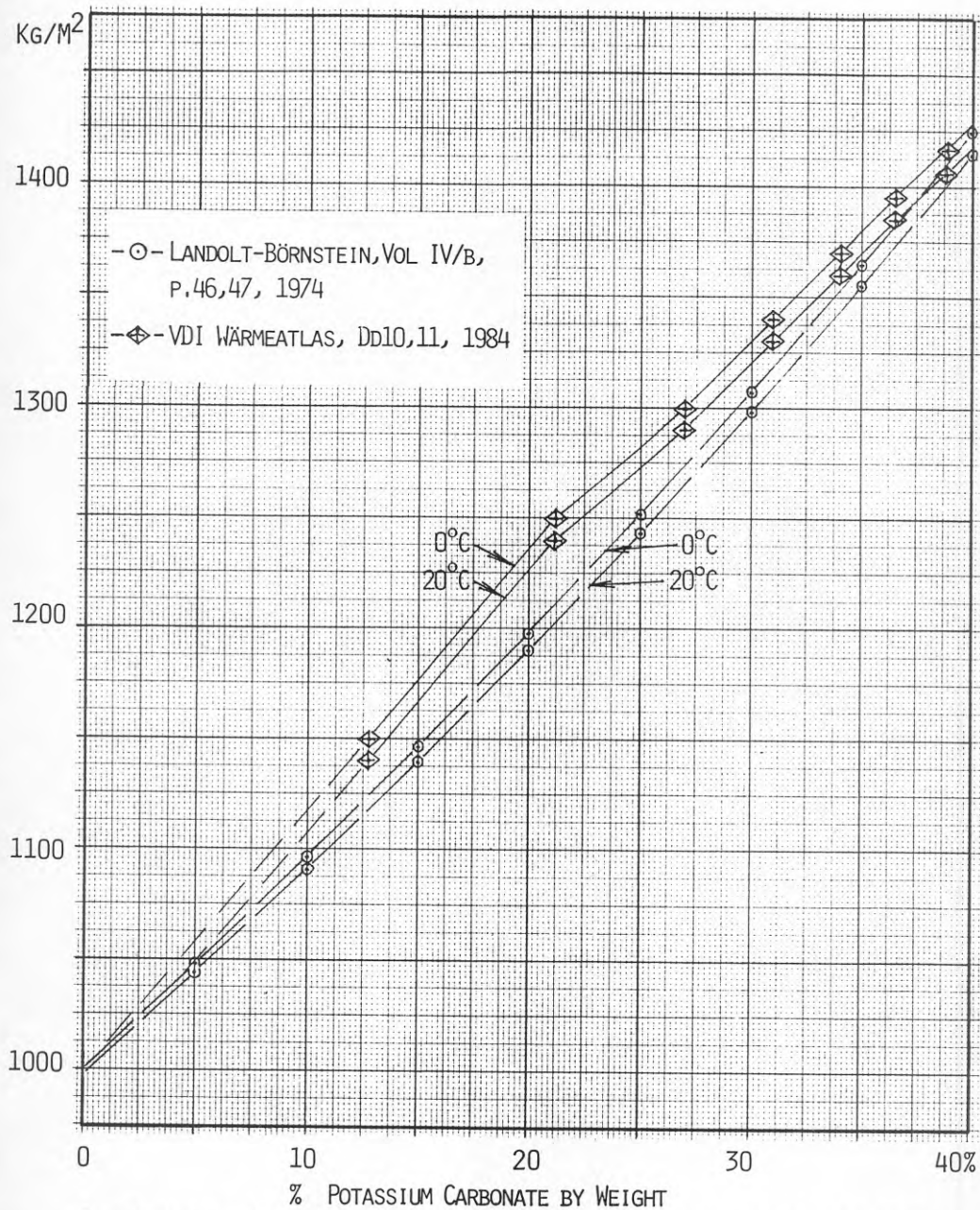
POTASSIUM CARBONATE - WATER
VAPOUR PRESSURE

DIAGRAM 3.9



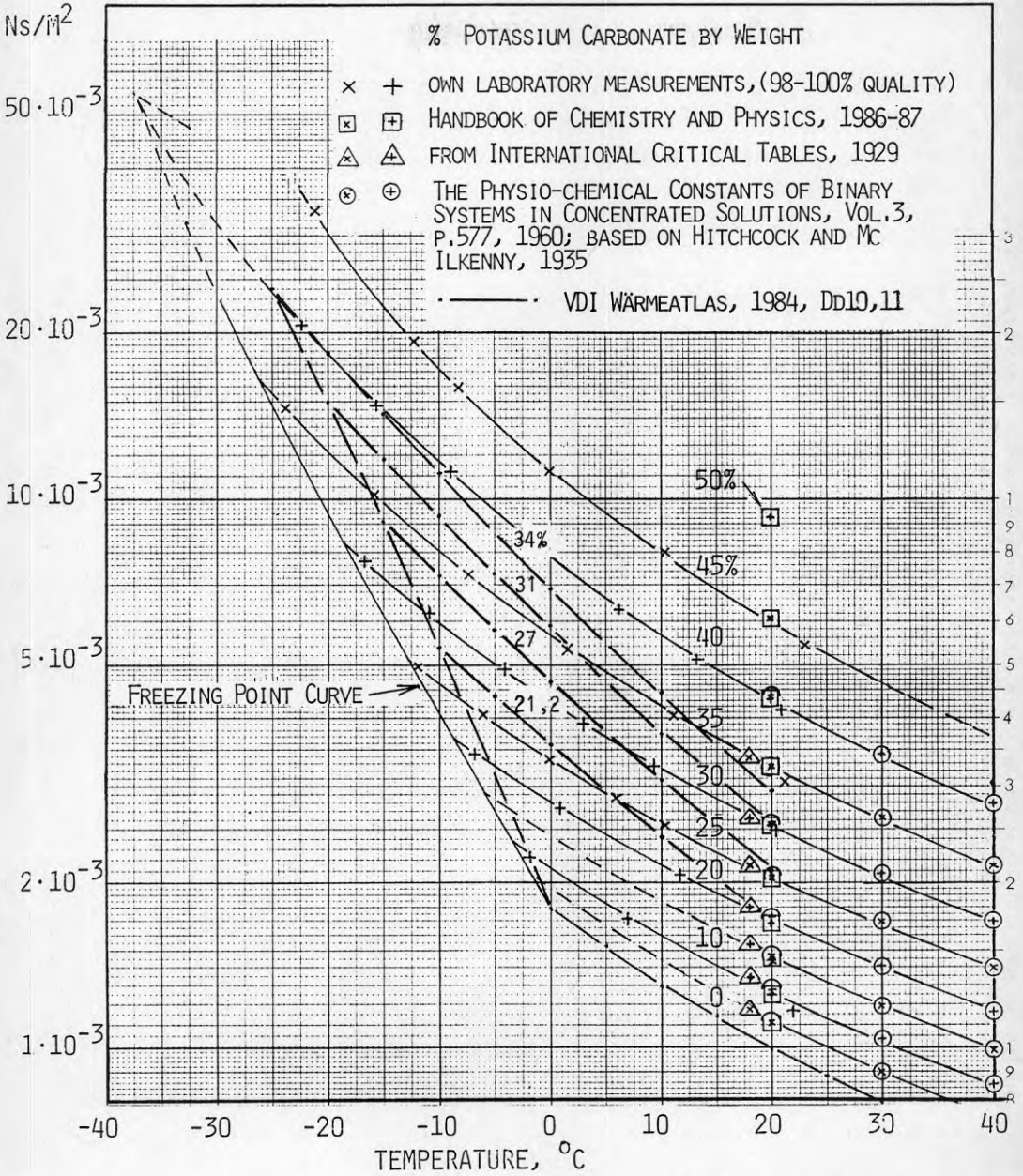
POTASSIUM CARBONATE - WATER
DENSITY (COMPARISON BETWEEN SOURCES)

DIAGRAM 3.10



POTASSIUM CARBONATE - WATER
 VISCOSITY

DIAGRAM 3.11

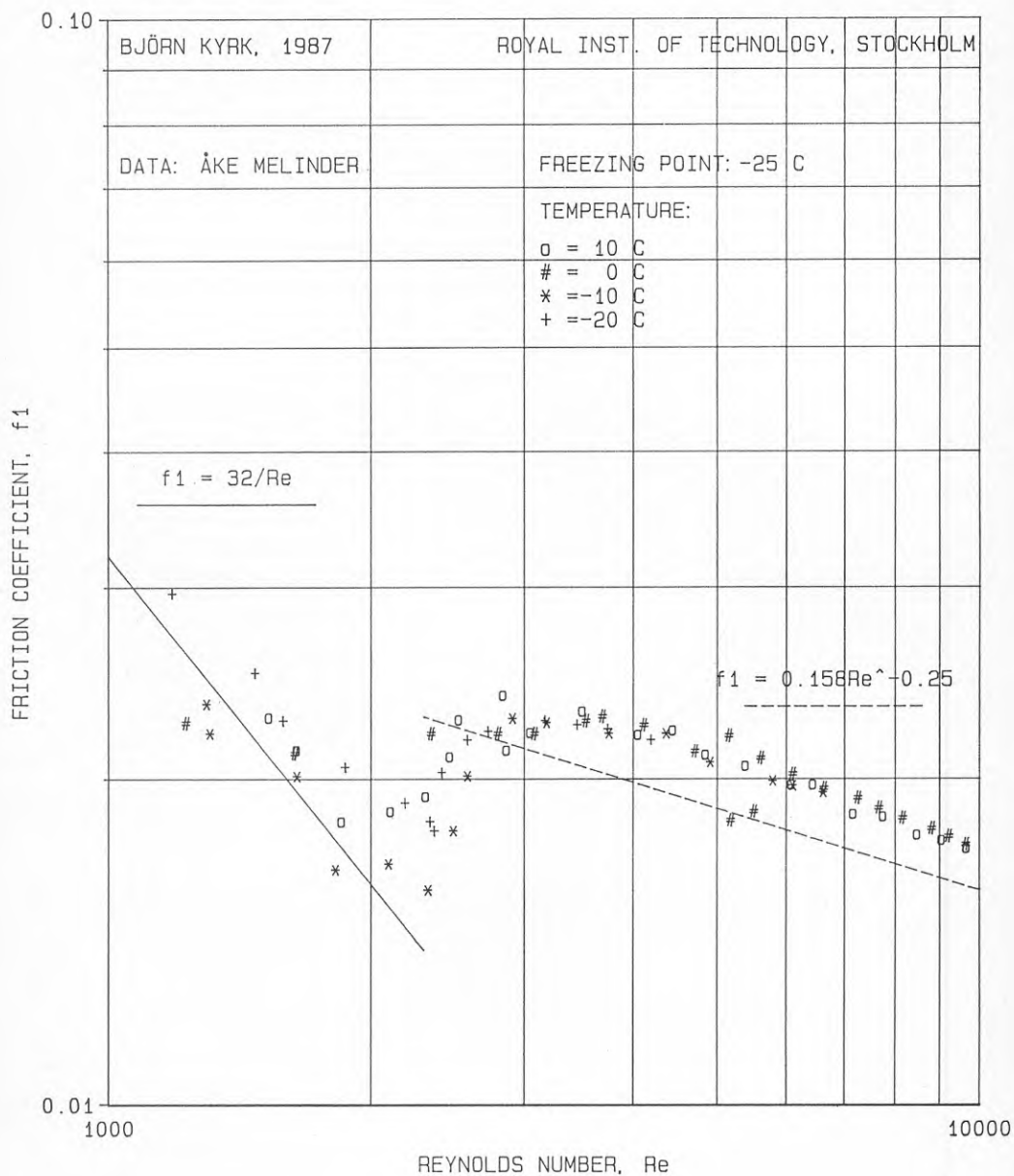


ÅKE MELINDER, 1987

ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, STOCKHOLM

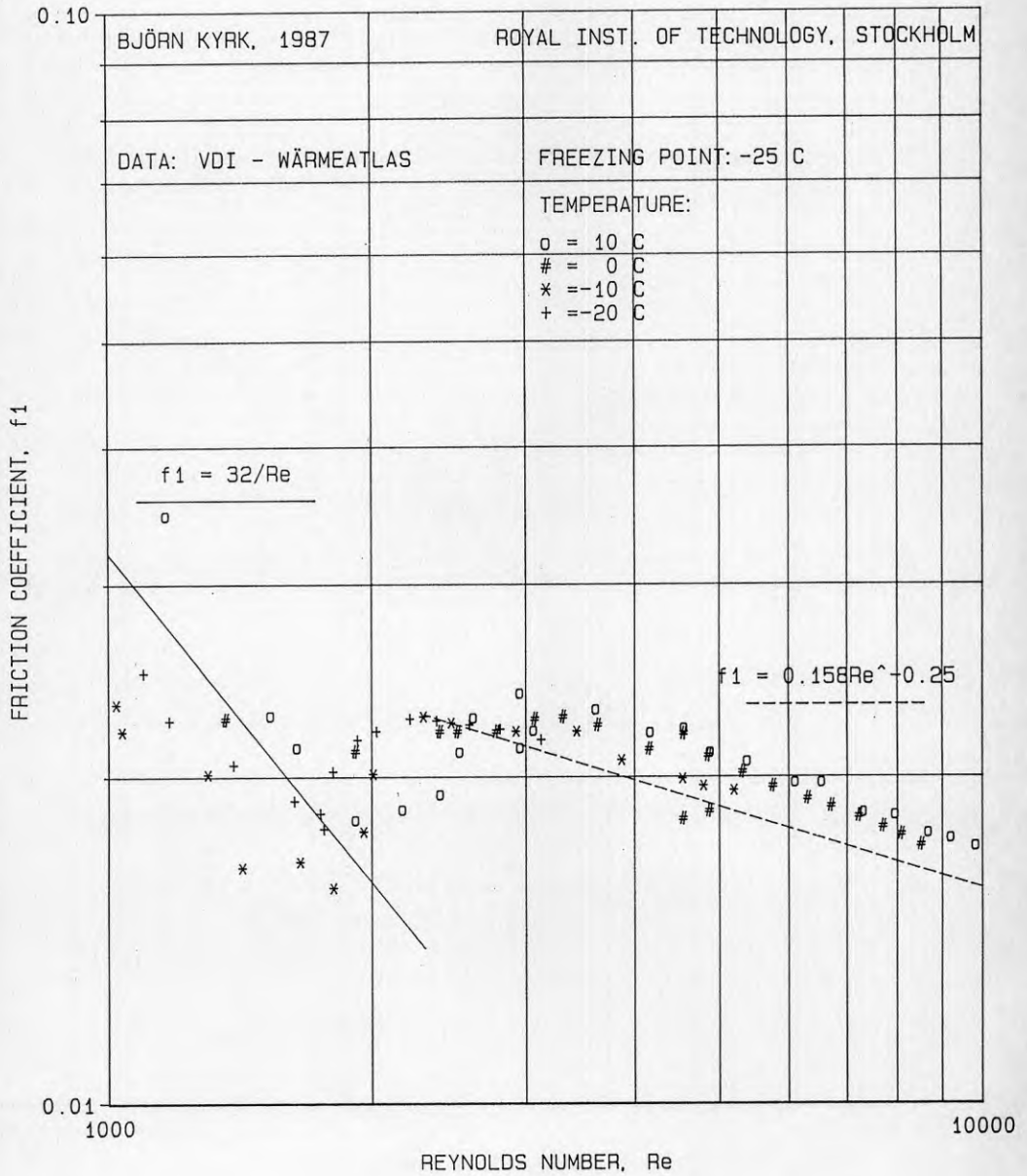
POTASSIUM CARBONATE - WATER
FRICTION COEFFICIENT

DIAGRAM 3.12



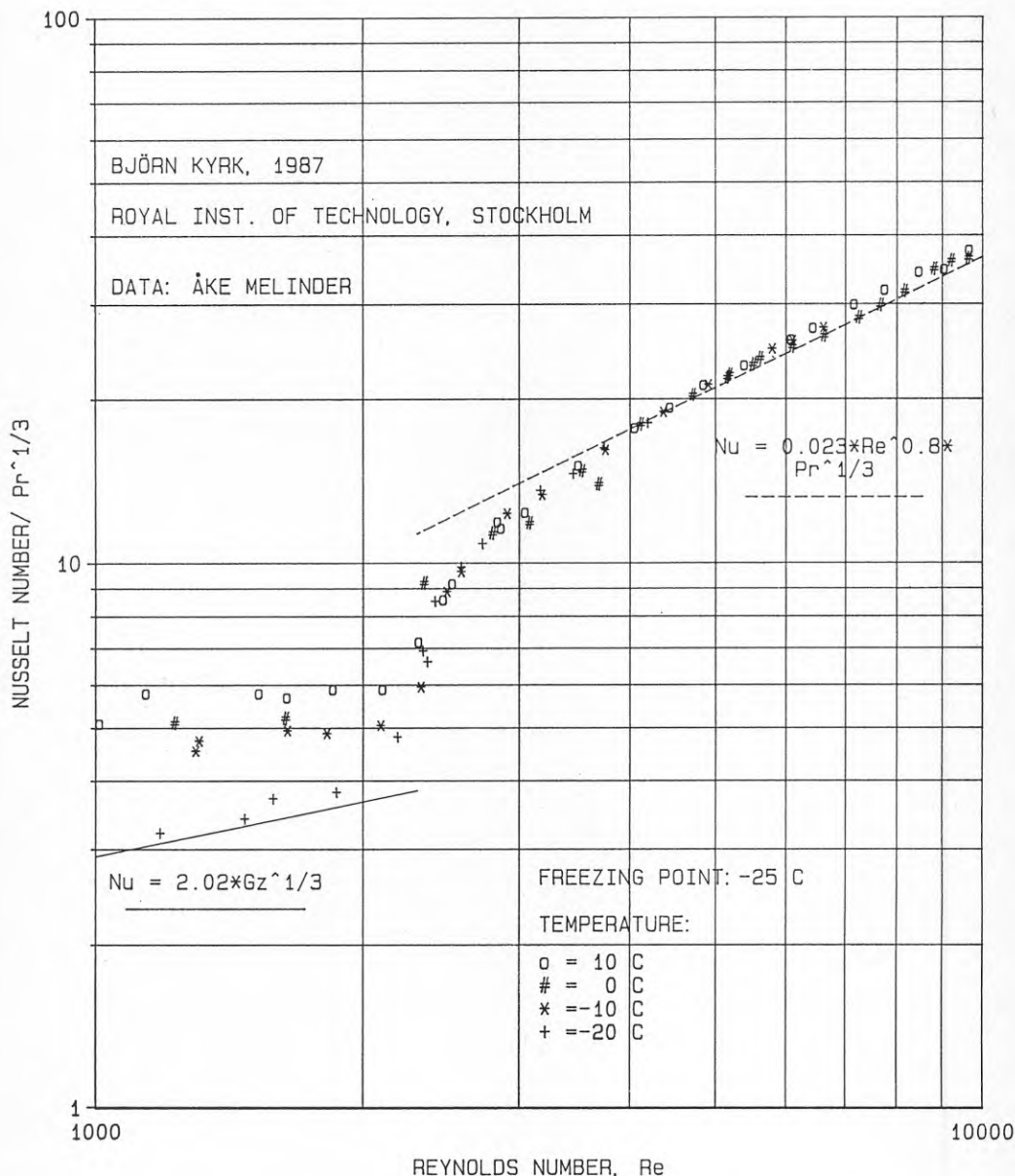
POTASSIUM CARBONATE - WATER
 FRICTION COEFFICIENT

DIAGRAM 3.13



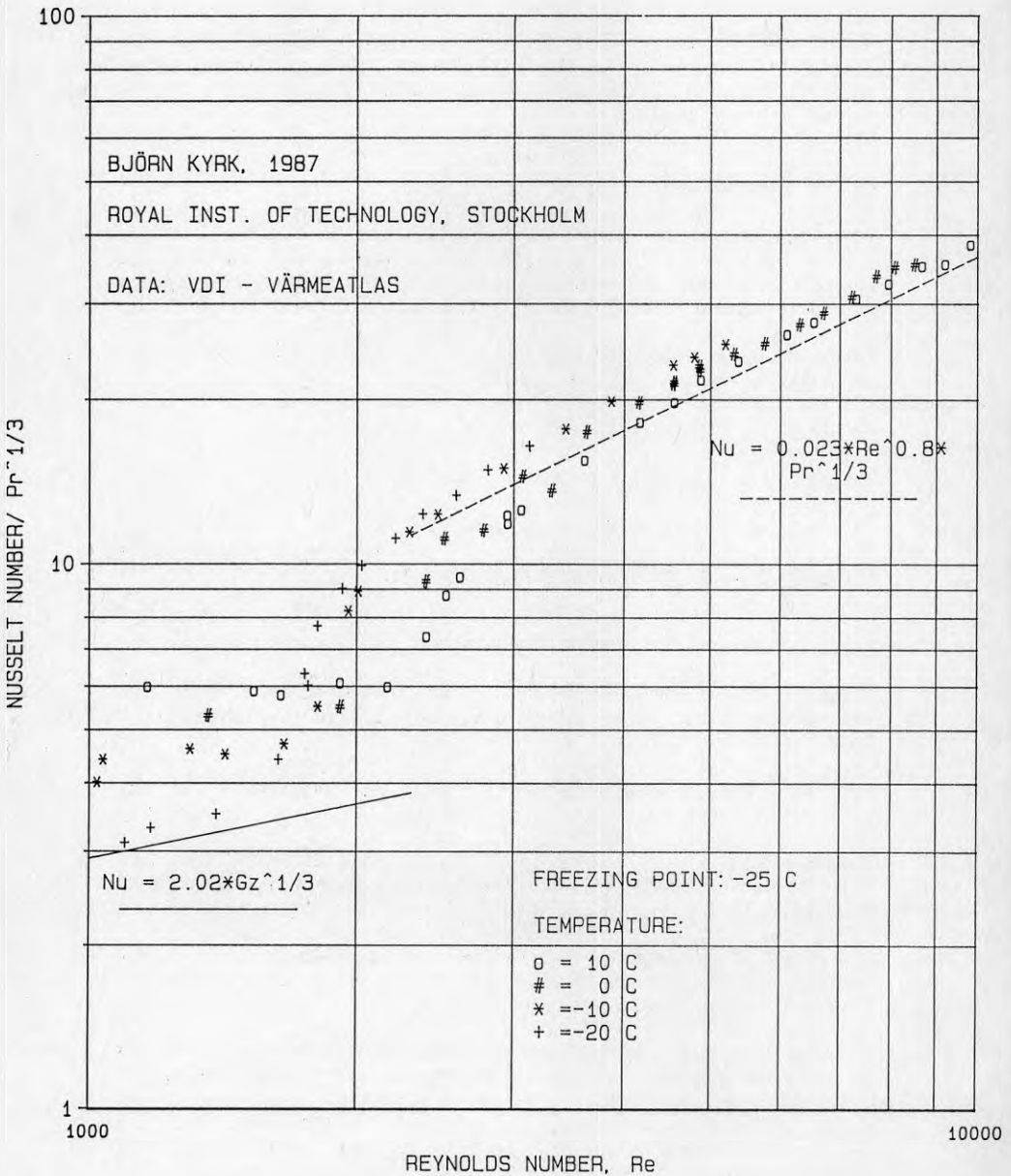
POTASSIUM CARBONATE - WATER
 NUSSELT NUMBER/ PRANDTL^{1/3}

DIAGRAM 3.14



POTASSIUM CARBONATE - WATER
 NUSSELT NUMBER/ PRANDTL^{1/3}

DIAGRAM 3.15



4 KOMPLETTERING AV TERMODYNAMISKA ÄMNESDATA FÖR VISSA KÖLDBÄRARE

I sammanställningen av köldbärardiagram i BFR Rapport R114:1985, kap 5, var metylalkohol ej medtagen. Då vi i jämförelsen av köldbärare i nästa kapitel i den här rapporten önskar ha med metylalkohol återger vi nu de fyra aktuella diagrammen som utgör en komplettering till ovan nämnda sammanställning av köldbärardiagram.

Några av diagrammen för etylalkohol och natriumklorid (5.10, 5.12 samt 5.16) var i ovannämnda sammanställning av köldbärardiagram försedda med två kurvskaror. Vilken av dessa vi använder för jämförelsen i nästa kapitel anges i punkt 4.2.

4.1 Metylalkohol - vatten

Följande diagram för metylalkohol är baserade på diagram i B. (4-36 t o m 4-39). Dessa diagram medtas huvudsakligen som underlag för kapitel 5 men kan ses som ett komplement till sammanställningen av köldbärardiagram i BFR Rapport R114:1985.

Diagrammen är uppritade som funktion av temperaturen och vikts-% metylalkohol mellan -40 och +30°C.

Diagram 4.1 Densitet (sid 36)

Diagram 4.2 Viskositet (dynamisk) (sid 37)

Diagram 4.3 Specifik värmekapacitet (sid 38)

Diagram 4.4 Värmeledningsförmåga (sid 39)

4.2 Diagram med dubbla kurvskaror

I sammanställningen av köldbärardiagram i BFR Rapport R114:1985, var som ovan nämnts tre diagram (5.10, 5.12 samt 5.16) försedda med två kurvskaror.

För jämförelsen i kapitel 5 har vi för de tre diagrammen valt att använda följande kurvskaror:

Diagram 5.10. Etylalkohol-vatten. Viskositet (dynamisk). Vi har valt att i jämförelsen i kap 5 använda kurvskaran som baserats på värden ur (I) Kylteknisk Tidskrift, MKSA Blad 8-11 och egna mätvärden.

Diagram 5.12. Etylalkohol-vatten. Värmeledningsförmåga. Vi har valt att använda kurvskaran som baserats på värden ur (B) Carrier, Handbook of Airconditioning System Design.

Diagram 5.16. Natriumklorid-vatten. Värmeledningsförmåga. Vi har valt att använda kurvskaran som baserats på värden ur (N) Kältetechnik.

Sedan köldbärardiagrammen i BFR Rapport 114:1985 samt ovan nämnda diagram för metylalkohol togs fram har vi fått tag på flera viktiga litteraturkällor med termodynamiska data för aktuella köldbärare (Jfr punkt 3.2). Det är vår önskan att rätt snart kunna presentera en ny jämförande granskning av olika litteraturvärden för de olika köldbärarna, på liknande sätt som vi här gjort för kaliumkarbonat-vatten i kapitel 3.

4.3 Kalciumklorid - vatten

I APPENDIX, punkt 5.2 redovisas i dimensionslös form resultat av mätningar som gjorts med kalciumklorid - vatten. För diagram 5.2.1 och 5.2.2 har ämneskonstanter ur BFR Rapport R114:1985, diagram 5.17 - 5.20 använts. Dessa diagram är baserade på allmänt förekommande litteraturvärden.

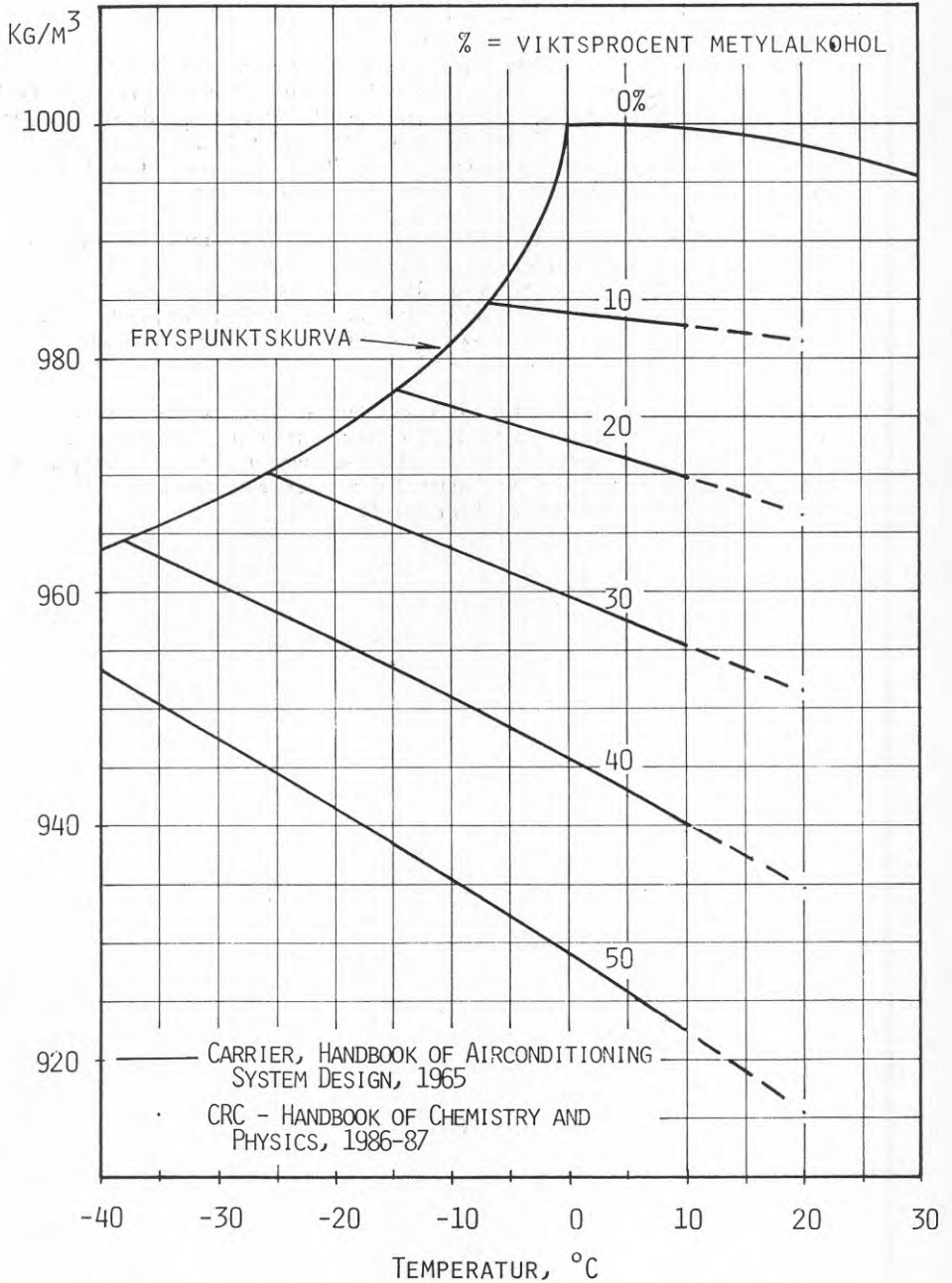
Oväntat finner vi för både tryckfall och värmeövergång mindre god överensstämmelse mellan värden för olika temperaturer. Övergången mellan laminär och turbulent strömning sker vid allt lägre Reynolds-tal ju lägre temperaturen är. Detta liknar diagram 3.13 och 3.15 där värden på ämneskonstanter för kaliumkarbonat från VDI-Wärmeatlas insatts, även om tensensen inte är lika starkt uttalad för kalciumklorid.

Dessa iakttagelser påminde oss om att viskositetsmätningar vi tidigare gjort med 22% kalciumklorid gav en mindre brant viskositetskurva än litteraturvärdenas kurva (Se BFR Rapport R114:1985, diagram 4.6.3). Då viskositetsvärden enligt våra mätningar insatts erhöll Björn Kyrk bättre överensstämmelse mellan de olika temperaturerna, vilket framgår av APPENDIX, diagram 5.3.1 och 5.3.2.

Vid våra litteraturstudier har vi också funnit vissa mätresultat som antyder att de allmänt godtagna litteraturvärdena på viskositet för kalciumklorid kan vara för höga vid lägre temperaturer. Vi hoppas att fortsatta studier skall ge mer klarhet i ämneskonstanterna för såväl kalciumklorid som de övriga köldbärarna.

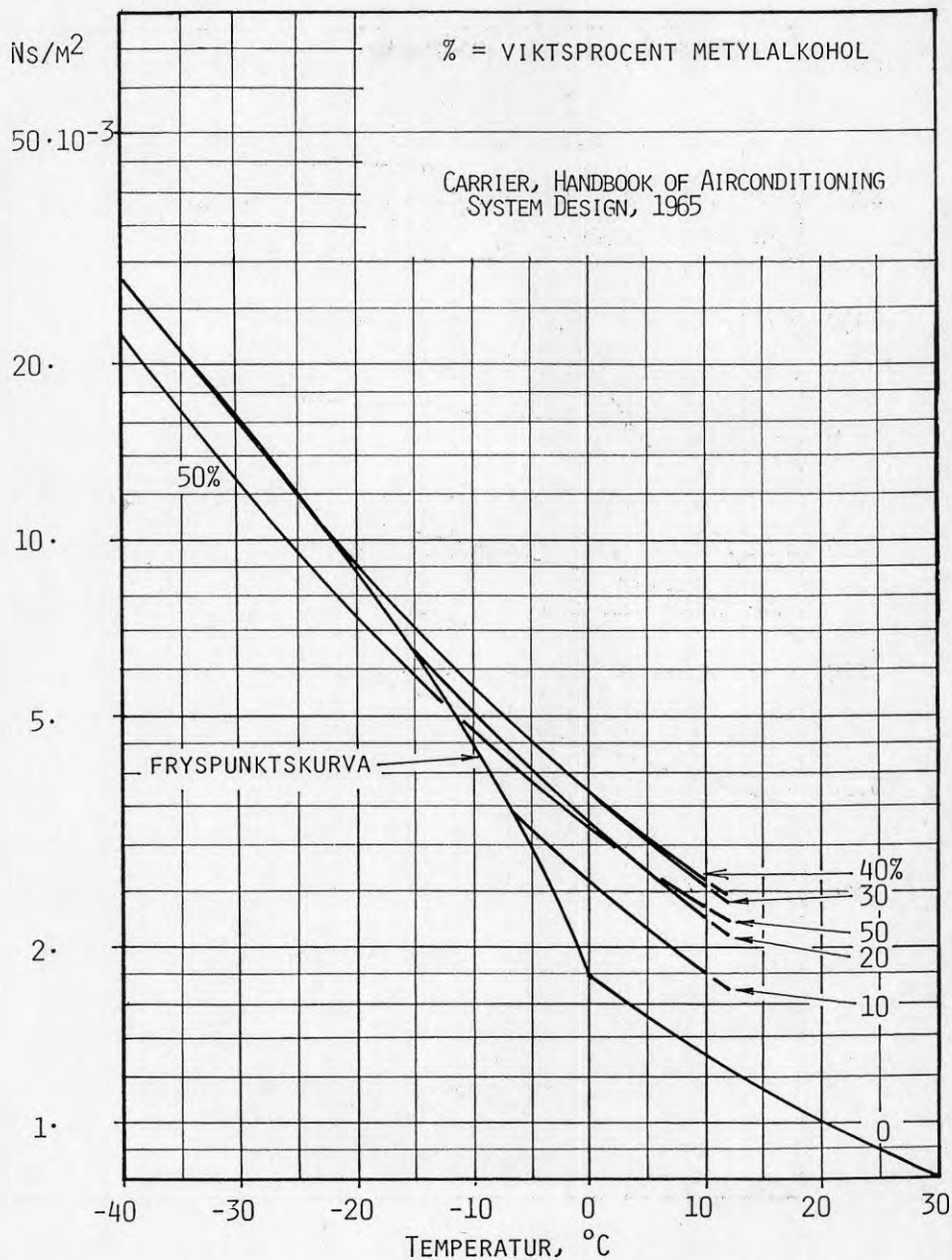
METYLALKOHOL - VATTEN
DENSITET

DIAGRAM 4.1



METYLALKOHOL - VATTEN
VISKOSITET (DYNAMISK)

DIAGRAM 4.2

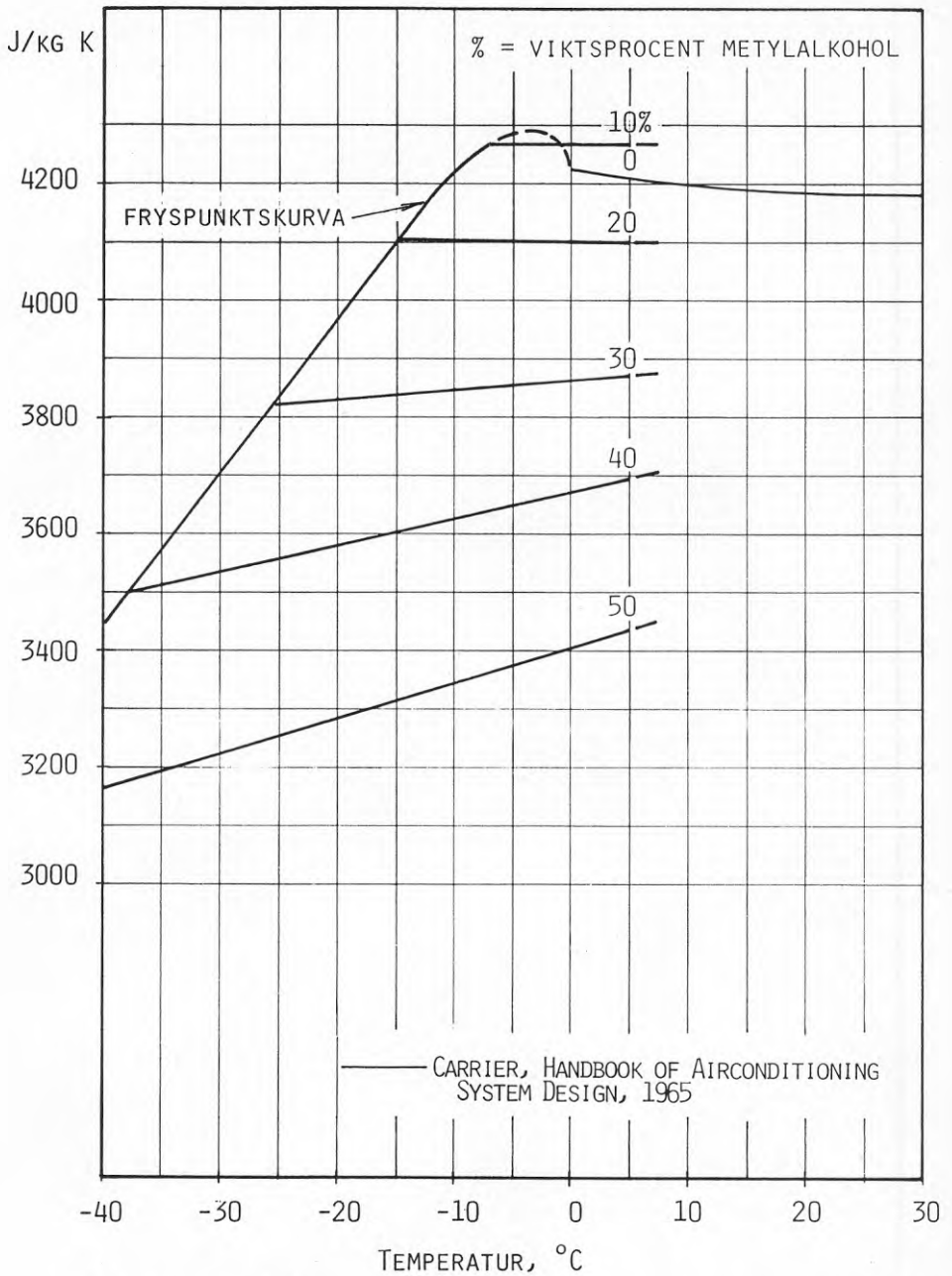


ÅKE MELINDER

INST MEK VÄRMETEORI O KYLTEKNIK, KTH

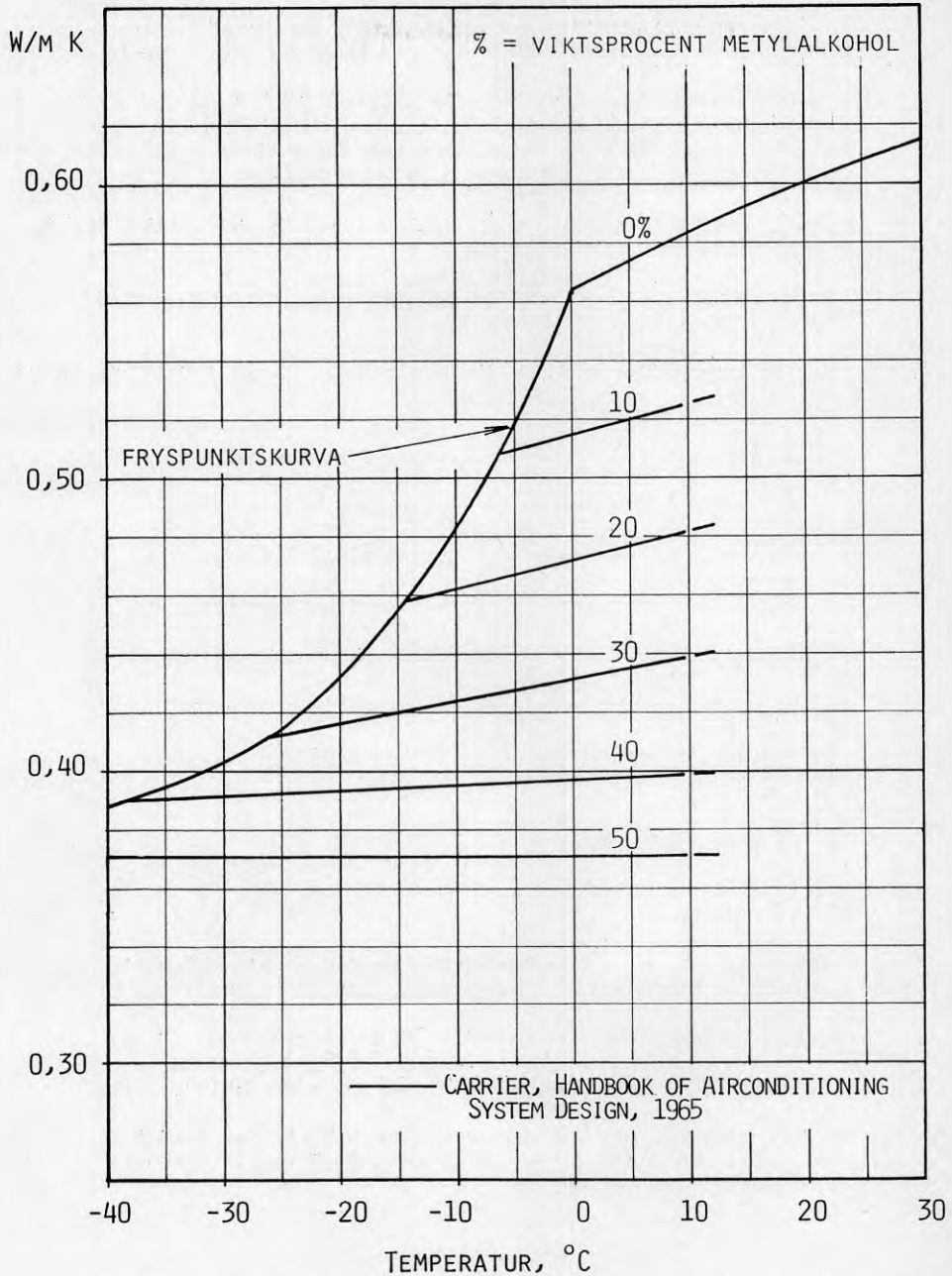
METYLALKOHOL - VATTEN
SPECIFIK VÄRMEKAPACITET

DIAGRAM 4.3



METYLALKOHOL - VATTEN
VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA

DIAGRAM 4.4



5 JÄMFÖRELSE AV TERMODYNAMISKA EGENSKAPER

5.1 Allmänt

För att kunna jämföra de olika köldbärarna med avseende på termodynamiska ämneskonstanter och egenskaper är det lämpligt att rita in dem i samma diagram, ett för varje ämneskonstant och egenskap.

I flera av dessa jämförande diagram (diagram 5.2-5, 9-11) har vi valt att representera dessa storheter som funktion av temperaturen för den koncentration av de olika köldbärarna som svarar emot fryspunkten -15°C , samt för vatten som lagts in för jämförelse.

I några diagram (diagram 5.1, 6-8) representeras storheten som funktion av koncentrationen kaliumkarbonat.

Där inte annat nämns har värden hämtats ur diagram i kap 3 och 4 resp ur BFR Rapport R114:1985, kap 5.

Följande beteckningar används genomgående för de olika köldbärartyperna:

E.G.	- ————— -	etylenglykol - vatten
P.G.	-- ————— --	propylenglykol - vatten
E.A.	- ——— - ——— -	etylalkohol - vatten
M.A.	-- ——— -- ——— --	metylalkohol - vatten
NaCl	————— ———	natriumklorid - vatten
CaCl ₂	—— ——— ———	kalciumpklorid - vatten
K ₂ CO ₃	- - - - - - - - - -	kaliumkarbonat - vatten

5.2 Ämneskonstanter

5.2.1 Fryspunkt

Diagram 5.1 (sid 46) Fryspunkt som funktion av koncentrationen. Kurvorna är baserade på litteraturvärden från C. (s. D-225 till D-254).

Följande koncentrationer av de olika köldbärartyperna ger enligt diagram 5.1 en fryspunkt på -15°C : E.G.: 30,5%; P.G.: 32,2%; M.A.: 19,9%; E.A.: 24,5%; NaCl: 18,8%; CaCl₂: 17,9%; K₂CO₃: 27,0%.

För natriumpklorid, NaCl är den eutektiska temperaturen endast ca -21°C , vilket är ett av skälen till att NaCl ej används idag i flertalet tillämpningar.

5.2.2 Densitet

Diagram 5.2 (sid 47) Densitet, ρ som funktion av temperaturen för de koncentrationer som svarar mot fryspunkten -15°C samt för vatten.

Alkoholerna har en densitet som är lägre än vatten, medan övriga ämnens densitet är högre än vattnets. Ur värmetransportsynpunkt är det gynnsamt med hög densitet (se punkt 5.3).

5.2.3 Viskositet

Diagram 5.3.1 (sid 48) Viskositet (dynamisk), μ som funktion av temperaturen för de koncentrationer som svarar mot fryspunkten -15°C samt för vatten.

Diagram 5.3.2 (sid 49) Viskositet (kinematisk), ν , ($\nu = \mu/\rho$) som funktion av temperaturen för de koncentrationer som svarar mot fryspunkten -15°C samt för vatten.

Viskositeten är av speciellt intresse när det gäller att bestämma den typ av flöde som kommer att inträffa t ex i värmepumpens förångare - dvs laminärt eller turbulent. (Jfr kommentaren till diagram 3.12-15).

I anläggningar inträffar det ofta att Reynolds-tal har ett värde som ligger nära omslagsområdet. För att ha en viss frihet i detta avseende är det önskvärt med låg viskositet även vid låga temperaturer. Som framgår av diagrammen utgör detta ett problem framför allt för propylenglykol och etylalkohol. Salterna inkl kaliumkarbonat har som synes lägst viskositet vid låga temperaturer.

5.2.4 Specifik värmekapacitet

Diagram 5.4 (sid 50) Specifik värmekapacitet, c_p som funktion av temperaturen för koncentrationer som svarar mot fryspunkten -15°C samt för vatten.

Alkoholerna har de högsta värdena på specifik värmekapacitet och salterna, spec kaliumkarbonat de lägsta. Det är önskvärt med hög specifik värmekapacitet. I huvudsak är det dock produkten $\rho \cdot c_p$ som kommer in i sambanden för tryckfall och värmeövergång (se punkt 5.3 och 5.4).

5.2.5 Värmeledningsförmåga

Diagram 5.5 (sid 51) Värmeledningsförmåga, λ som funktion av temperaturen för koncentrationer som svarar mot fryspunkten -15°C samt för vatten.

Salterna, inkl kaliumkarbonat, har de högsta värdena och propylenglykol och etylalkohol de lägsta. Det är önskvärt med höga värden för att få god värmeövergång (se punkt 5.4).

5.2.6 Termisk volymsutvidgningskoefficient

Diagram 5.6 (sid 52) Termisk volymsutvidgningskoefficient, β_v som funktion av koncentrationen för temperaturintervallet 0 till 20°C . Värden för vatten är även inritade för ett antal andra temperaturområden.

Kurvorna är baserade på densitetsvärden från C. (H₂O: s.F-10); D. (P.G.: s.40) och I. (Vol 1b: H₂O: s.1,2; E.G.: s.130 delvis interpolerade värden; M.A.: s.117; E.A.: s.129; NaCl: s.80; CaCl₂: s.14; K₂CO₃: s.46, 47).

Den termiska volymsutvidgningskoefficienten β_v fås ur sambandet $V_t = V_0 (1 + \beta_v \cdot t)$ där V_0 och V_t är volymen vid 0 resp $t^\circ\text{C}$. Motsvarande samband gäller för de övriga temperaturområdena.

Den termiska volymsutvidgningskoefficienten mellan 0 - 20°C är ungefär lika för de olika köldbärartyperna, förutom alkoholerna som har väsentligt högre värden vid höga koncentrationer. Med tanke på expansionskärl, bl a, kan det vara ofördelaktigt med alltför höga värden.

Aktuella koncentrationer för kloridsalterna uppför sig ungefär som kaliumkarbonat, dvs β_v -värdena är ungefär lika för de olika temperaturområdena (jfr diagram 3.6). Värdena på β_v för metyl- och etylalkohol ökar däremot snabbt med koncentration och temperatur.

5.2.7 Ytspänning

Diagram 5.7 (sid 53) Ytspänning, γ som funktion av koncentrationen för +25°C. Värden för vatten för ett antal temperaturer har även inritats.

Värdena är hämtade ur C. (H₂O: s.F-32; NaCl: s.F-31); D. (E.G. o. P.G.: s.42); K. (M.A. o. E.A.: Vol 4, s.165, 197; K₂CO₃ o. CaCl₂: Vol 3, s.573, 763)

En vätskas ytspänning är den kraft per längdenhet som strävar att hålla ytan så liten som möjligt. Ytspänningen minskar med ökad temperatur, vilket framgår av värden för vatten vid 0, 20, 40, 60, 80 och 100°C som inritats vid 0% i diagram 5.7. De olika köldbärarnas ytspänning vid andra temperaturer kan approximativt erhållas genom att parallellförskjuta köldbärarkurvan för 25°C till det aktuella värdet för vatten (Jfr även diagram 3.7).

En låg ytspänning innebär en större risk för att vätskan ska läcka ut i smala spalter och springor. Saltlösningarna inkl kaliumkarbonat borde klara sig bättre än de organiska lösningarna i detta avseende. Ytspänningen är speciellt låg för alkoholer vid aktuella koncentrationer.

5.2.8 Kokpunkt

Diagram 5.8 (sid 54) Kokpunkt vid atmosfärstryck ($p = 1,0325 \cdot 10^{-5}$ N/m²) som funktion av koncentrationen.

Kurvorna är baserade på litteraturvärden från D. (E.G. o. P.G.: s.18, 19); K. (M.A. o. E.A.: Vol 4, s.153, 180; NaCl, K₂CO₃ o. CaCl₂: Vol 3, s. 307, 573, 753).

Kokpunkten är av intresse bl a med hänsyn till trycket i ett system vid höga temperaturer. Den låga kokpunkten för alkoholerna kan utgöra ett problem. Avdunstning kan dessutom ske redan vid lägre temperaturer om vätskan exponeras till luft. Kokpunkten är nära knuten till ångtrycket som är av intresse vid kyltornstillämpningar.

5.3 Transportegenskaper

5.3.1 Transporterad effekt

Av kap. 2 framgår att goda transportegenskaper är viktiga för en köldbärare. För givet volymflöde \dot{V} och temperaturändring Δt fås den transporterade effekten \dot{Q}_2 ur sambandet:

$$\dot{Q}_2 = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t$$

\dot{Q}_2 är således direkt proportionell mot produkten $\rho \cdot c_p$. Ett högt värde på $\rho \cdot c_p$ är önskvärt.

Diagram 5.9 (sid 55) Densitet * specifik värmekapacitet, $\rho \cdot c_p$ som funktion av temperaturen för de koncentrationer som svarar mot -15°C samt för vatten.

Vid beräkningar av t ex erforderligt köldbärarflöde \dot{V} för en viss transporterad kyleffekt \dot{Q}_2 och temperaturdifferens Δt kan värden på $(\rho \cdot c_p)$ hämtas ur diagram 5.9. Av diagrammet framgår att, efter rent vatten, alkoholerna har högst $(\rho \cdot c_p)$ och CaCl_2 sämst. Skillnaden mellan de olika köldbärarna, inkl. rent vatten, är dock mindre än 15%, dvs relativt liten.

Exempel 5.3.1 I ett indirekt värmepumpsystem hämtas värme från jorden med hjälp av en köldbärare. Hur stor är den transporterade effekten \dot{Q}_2 för vattenlösningar av etylenglykol, etylalkohol, kalciumklorid och kaliumkarbonat om volymflödet är 40 l/min, medeltemperaturen på köldbäraren är -5°C , temperaturdifferensen över köldbärarkretsen $\Delta t = 3\text{ K}$ och koncentrationen svarar emot ett frysskydd av -15°C ?

Enligt sambandet ovan är $\dot{Q}_2 = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t$, där $\dot{V} = (40/60) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, och där $\rho \cdot c_p$ vid -5°C fås ur diagram 5.9. Följande värden på \dot{Q}_2 erhålls: E.G.: 7,66 kW; E.A.: 8,28 kW; CaCl_2 : 7,34 kW; K_2CO_3 : 7,50 kW. Skillnaderna är som synes måttliga. Värdet för etylalkohol som ger högst effekt är 13% större än värdet för kalciumklorid som ger lägst.

5.3.2 Tryckfall

Med hänsyn till transportegenskaperna är pumpeffekten \dot{E}_p viktig för att upprätthålla cirkulationen i köldbärarkretsen. Denna pumpeffekt är direkt proportionellt mot tryckfallet Δp över köldbärarkretsen.

$$\dot{E}_p = 1/\eta_p \cdot \dot{V} \cdot \Delta p_p$$

där η_p betecknar pumpens verkningsgrad och Δp_p pumpens tryckstegring. En stor del av Δp_p består av strömningstryckfallet i ledningar, Δp , vilket (med beteckningar från kap 2) kan beräknas ur:

$$\Delta p = f_1 \cdot \rho \cdot w^2 \cdot L/d$$

Vid turbulent strömning i släta rör är friktionsfaktorn

$$f_1 = 0,092 \cdot (v/w \cdot d)^{0,2}$$

Diagram 5.10 visar med utgångspunkt från dessa samband ett lämpligt sätt att jämföra de olika köldbärarna med avseende på tryckfall vid turbulent strömning.

Diagram 5.10 (sid 56) Ämneskonstantberoende faktor för bestämning av tryckfall, $F_{\Delta p}$ som funktion av temperaturen för de koncentrationer som svarar mot fryspunkten -15°C samt för vatten.

Med hjälp av diagram 5.10 kan tryckfallet per meter rör lätt beräknas ur sambandet

$$\frac{\Delta p}{L} = F_{\Delta p} \cdot \frac{w^{1,8}}{d^{1,2}} \quad (\text{N/m}^2, \text{ meter rör})$$

där

$$F_{\Delta p} = 0,092 \cdot \rho \cdot \nu^{0,2}$$

Detta samband gäller för turbulent strömning i långa rör med diametern d (m) och hastigheten w (m/s). $F_{\Delta p}$ är som tidigare nämnts direkt proportionell mot den eleffekt som måste tillföras centrifugalpumpen för att pumpa runt ett givet volymflöde.

Det är önskvärt med lågt tryckfall, dvs lågt värde på $F_{\Delta p}$, för att man skall kunna använda en pumpmotor med låg effekt. Av diagram 5.10 ser vi att $F_{\Delta p}$ för de olika köldbärarna inte skiljer så mycket. Förutom rent vatten ligger $F_{\Delta p}$ för de olika köldbärarna inom ca 15%, där dock propylenglykol och kaliumkarbonat är högst.

Exempel 5.3.2 Hur stort blir tryckfallet för de olika köldbärarna i exempel 5.3.1 om köldbärarkretsens slang är 400 meter lång och har innerdiametern 35 mm?

Låt oss först kontrollera storleksordningen på Reynolds-tal för att se om sambanden för turbulent strömning kan anses gälla. Följande värden på Reynolds-tal ($Re = w \cdot d / \nu$) erhålls: E.G.: 4850; E.A.: 3110; CaCl_2 : 7770; K_2CO_3 : 6890. Då Reynolds-tal för de olika köldbärartyperna här är över $Re \approx 2300$ kan ovan givna samband för turbulent strömning antas gälla i slangen.

Enligt sambandet ovan är $\Delta p = F_{\Delta p} \cdot (w^{1,8}/d^{0,8}) \cdot L$, där $w = 4 \cdot V / \pi \cdot d^2 = 0,693$ m/s och $F_{\Delta p}$ vid -5°C erhålls ur diagram 5.10: Med $L = 400$ m erhålls följande värden på Δp : E.G.: $25,4 \cdot 10^3$ N/m²; E.A. och CaCl_2 : $25,7 \cdot 10^3$ N/m²; K_2CO_3 : $28,5 \cdot 10^3$ N/m². Skillnaderna i tryckfall är som synes också måttliga. Tryckfallet för kaliumkarbonat är 12% högre än för etylenglykol.

5.4 Värmeöverföringsegenskaper

För att kunna hålla en så hög förångningstemperatur som möjligt är det viktigt med god värmeöverföringsförmåga, dvs högt värmeövergångstal, α . Ett högt värmeövergångstal är speciellt viktigt i förångaren där ytbelastningen är stor men behövs också för att kunna hålla liten temperaturdifferens vid värmeupptagningen från kylställe resp värmekälla (jfr fig 2:1)

Diagram 5.11 (sid 57) Ämneskonstantberoende faktor för bestämning av värmeövergång, F_{α} som funktion av temperaturen för de koncentrationer som svarar mot fryspunkten -15°C samt för vatten.

I diagram 5.11 jämförs de olika köldbärarna med avseende på värmeövergång vid turbulent strömning. Diagrammet visar den av ämneskonstanter beroende faktorn F_α som funktion av köldbärartemperaturen.

Värmeövergångstalet α kan med denna faktor lätt beräknas ur sambandet

$$\alpha = F_\alpha \cdot w^{0,8} / d^{0,2} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$$

vilket gäller för turbulent strömning i långa rör med diametern d (m) och hastigheten w (m/s).

De olika ämneskonstanterna ingår i F_α enligt följande uttryck

$$F_\alpha = 0,023 \cdot \lambda^{(2/3)} \cdot (\rho \cdot c_p)^{(1/3)} \cdot \nu^{(1/3-0,8)}$$

vilket har erhållits ur följande samband för turbulent strömning

$$\text{Nu} = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{1/3}$$

Det är önskvärt med ett stort värde på F_α vilket ger ett högt värmeövergångstal. För att kunna få ett högt värde på F_α behövs således högt λ -värde, högt $(\rho \cdot c_p)$ och lågt ν . För temperaturer över 0°C står vatten i en klass för sig. Skillnaden mellan salterna (inkl kaliumkarbonat) och de organiska föreningarna är också betydande. Vid 0°C är t ex kaliumkarbonat drygt 20% bättre än etylenglykol, ca 50% bättre än etylalkohol och 75% bättre än propylenglykol.

Exempel 5.4 Vilket värmeövergångstal, α fås enligt exempel 5.3.1 och 2 i köldbärarslangen för de olika köldbärartyperna?

I exempel 5.3.2 har redan visats att turbulent strömning kan antas råda i köldbärarslangen. Värmeövergångstalet blir därför: $\alpha = F_\alpha \cdot w^{0,8} / d^{0,2} = 1,458 \cdot F_\alpha$ där F_α fås ur diagram 5.11. Följande värden på α erhålls: E.G.: 950 W/m²·K; E.A.: 760 W/m²·K; CaCl₂: 1280 W/m²·K; K₂CO₃: 1200 W/m²·K. Den procentuella skillnaden är betydande. Värmeövergångstalet för kalciumklorid är ca 70% högre än för etylalkohol.

Enligt tabell 2.1 önskas högt värmeövergångstal för att få liten temperaturdifferens, ϑ , vid given effektbelastning. Sambandet $\dot{Q} = \alpha \cdot A_Q \cdot \vartheta$ ger ϑ -värden för slangen på endast 0,13 - 0,25°C. Temperaturdifferenserna är så små att skillnaden mellan de olika köldbärarna är obetydliga.

Exemplet ovan illustrerar hur diagram 5.12 kan användas. Värmeöverföringen är dock av mycket större betydelse i förångaren än i slangen. Förångarens värmeöverförande yta är mycket mindre än slangens och motsvarande ϑ -värden blir mycket större. Skillnaden mellan de olika köldbärartyperna kan där vara flera grader, vilket är betydande i en värmeumpsprocess.

Laminär strömning kan dessutom lätt inträffa i vissa förångarkonstruktioner. Diagrammen över värmeövergång i APPENDIX kap 5 (diagram 5.1.1, 5.3.1 och 5.4.1) visar att värmeövergångstalet sjunker till hälften nära överslagsområdet mellan laminär och turbulent strömning. Det är därför fördelaktigt med en köldbärare som har låg viskositet, eftersom detta ger högt Reynolds-tal.

FRYSPUNKT

DIAGRAM 5.1

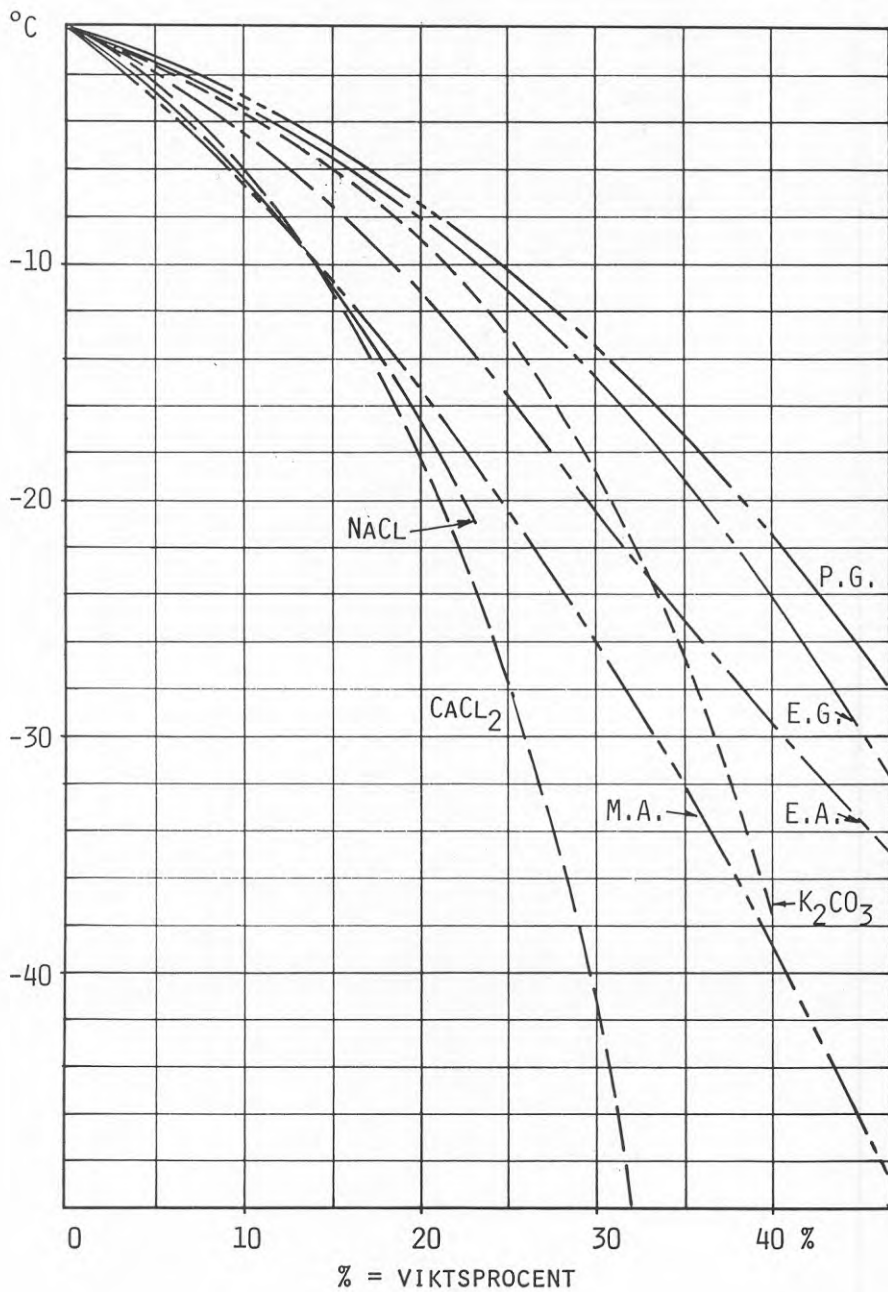
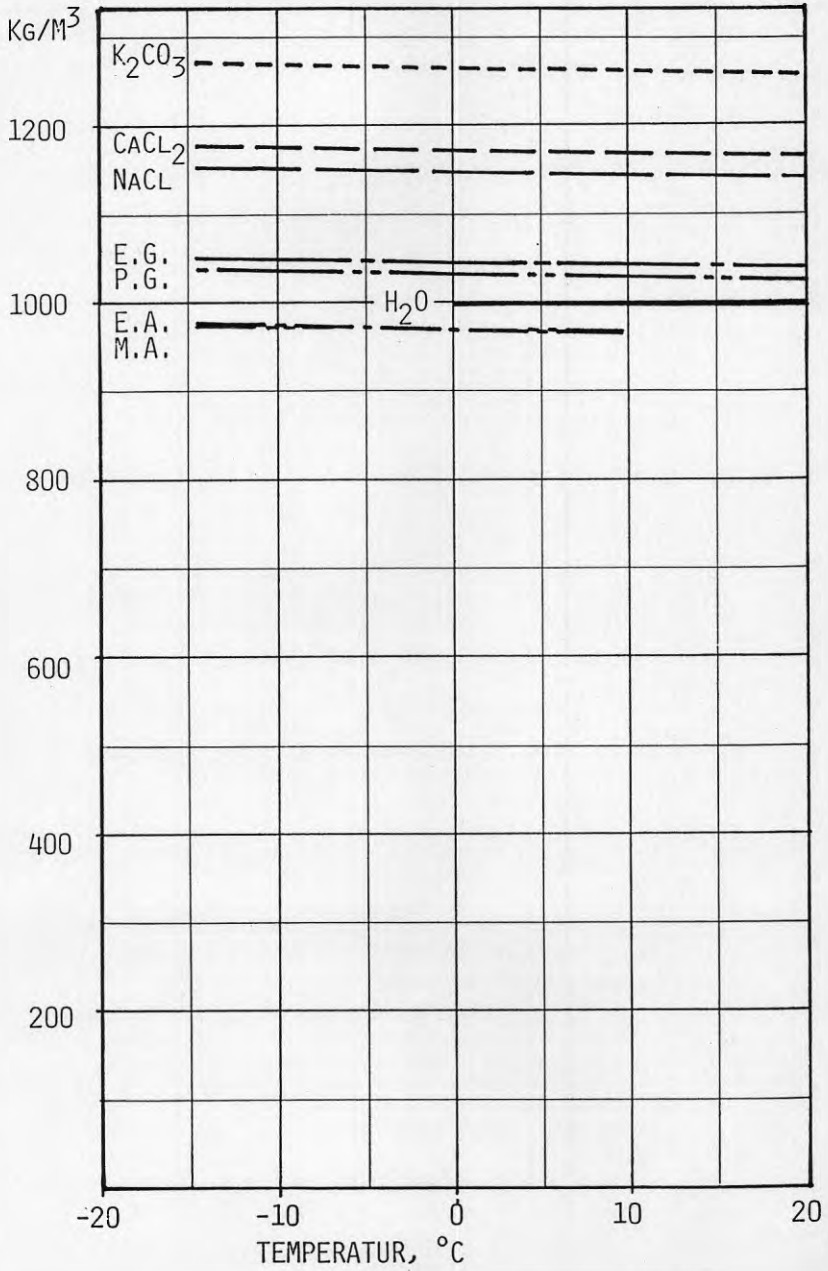
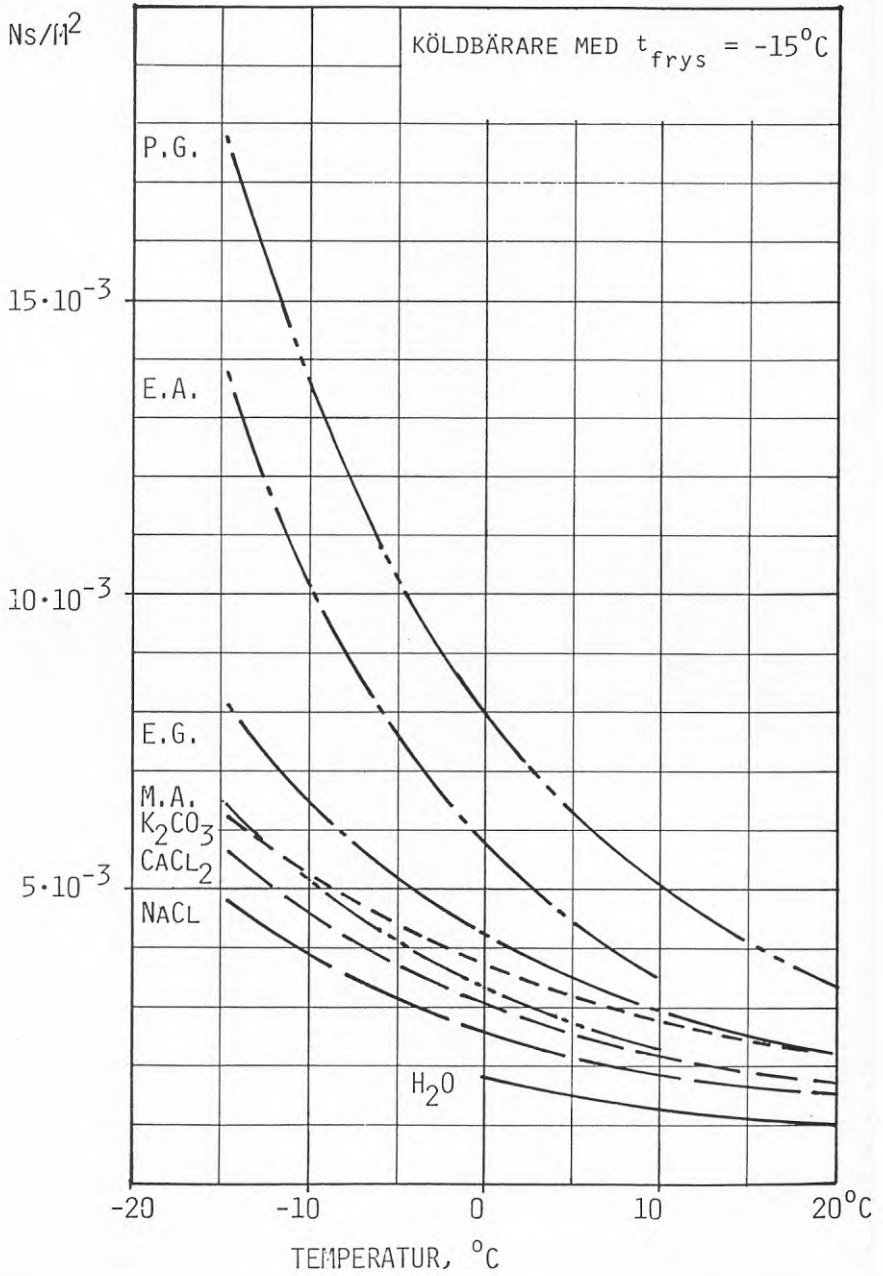


DIAGRAM 5.2
 DENSITET, ρ KÖLDBÄRARE MED $t_{frys} = -15^{\circ}\text{C}$



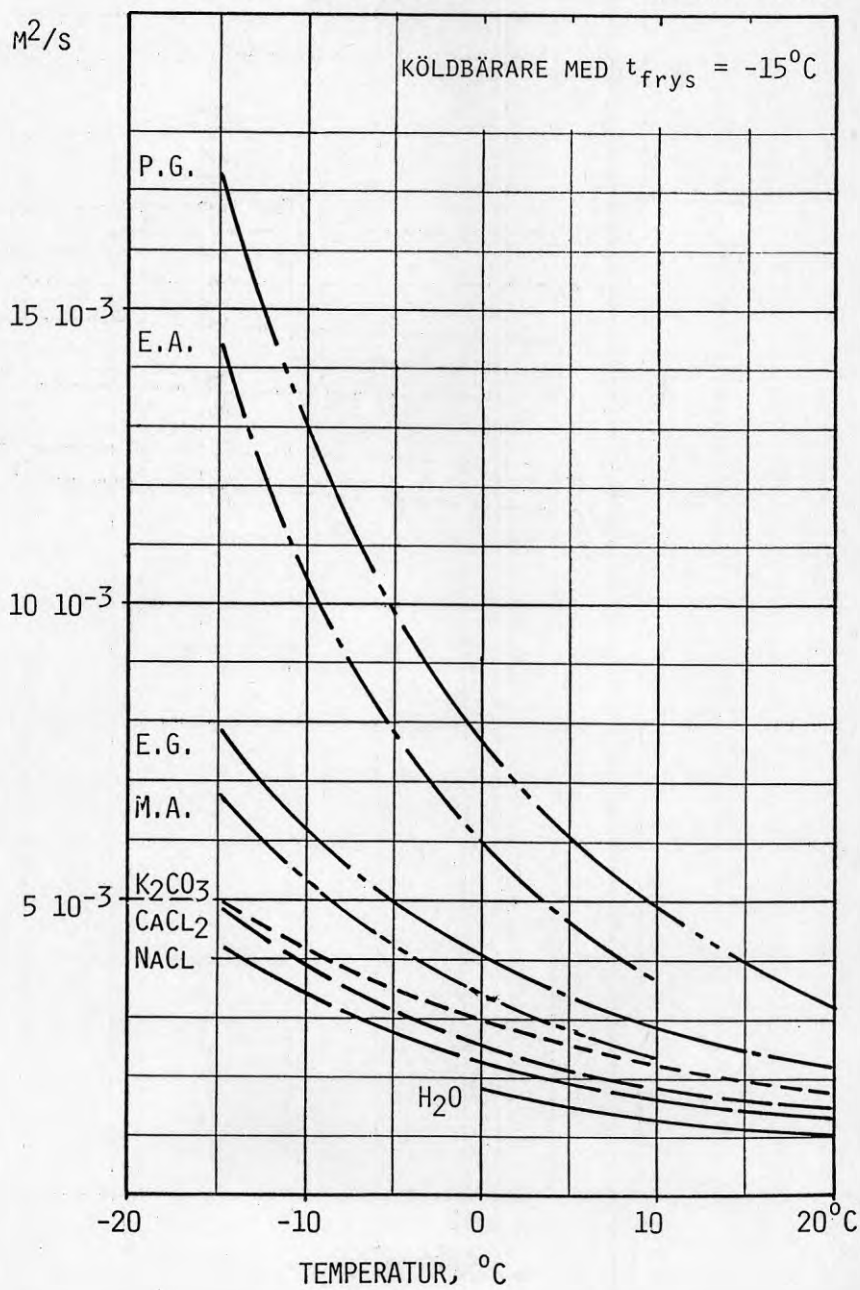
VISKOSITET (DYNAMISK), μ

DIAGRAM 5.3.1



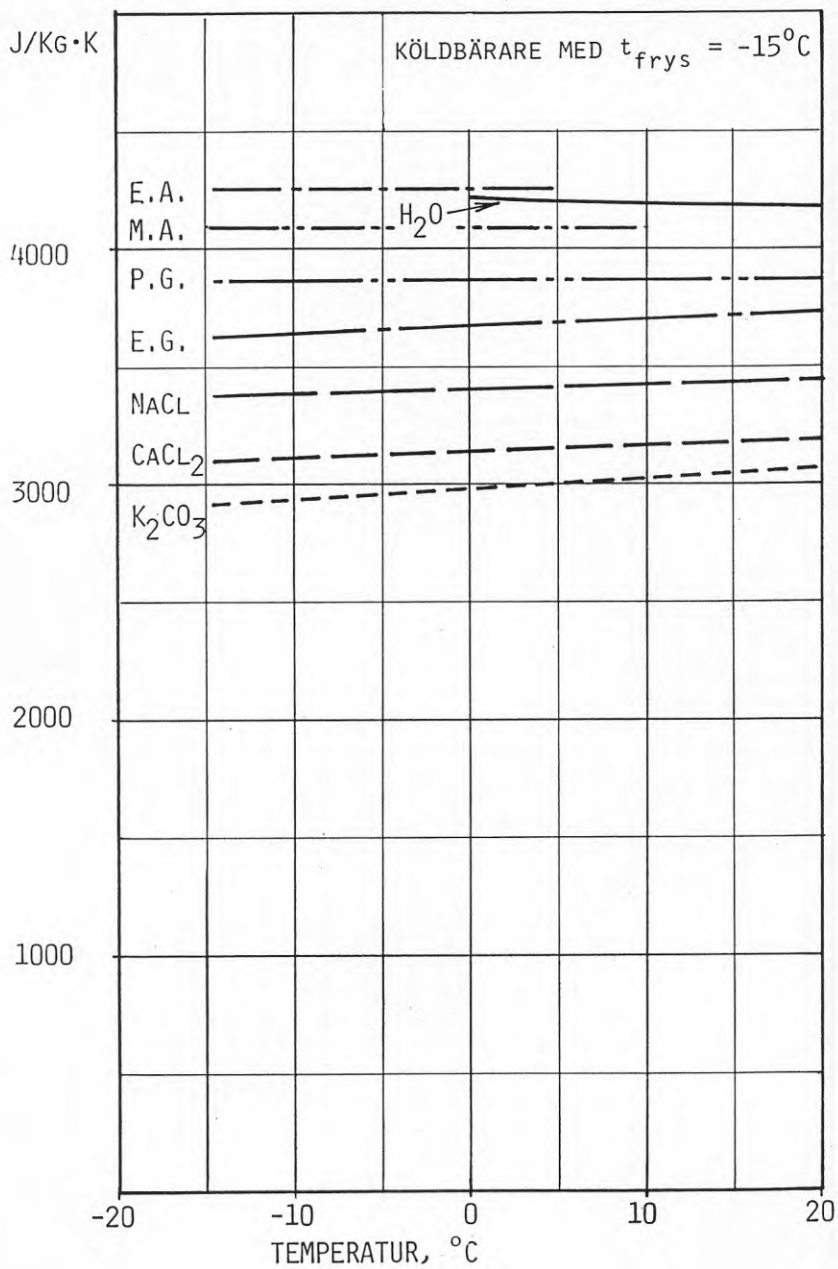
VISKOSITET (KINEMATISK), ν

DIAGRAM 5.3.2



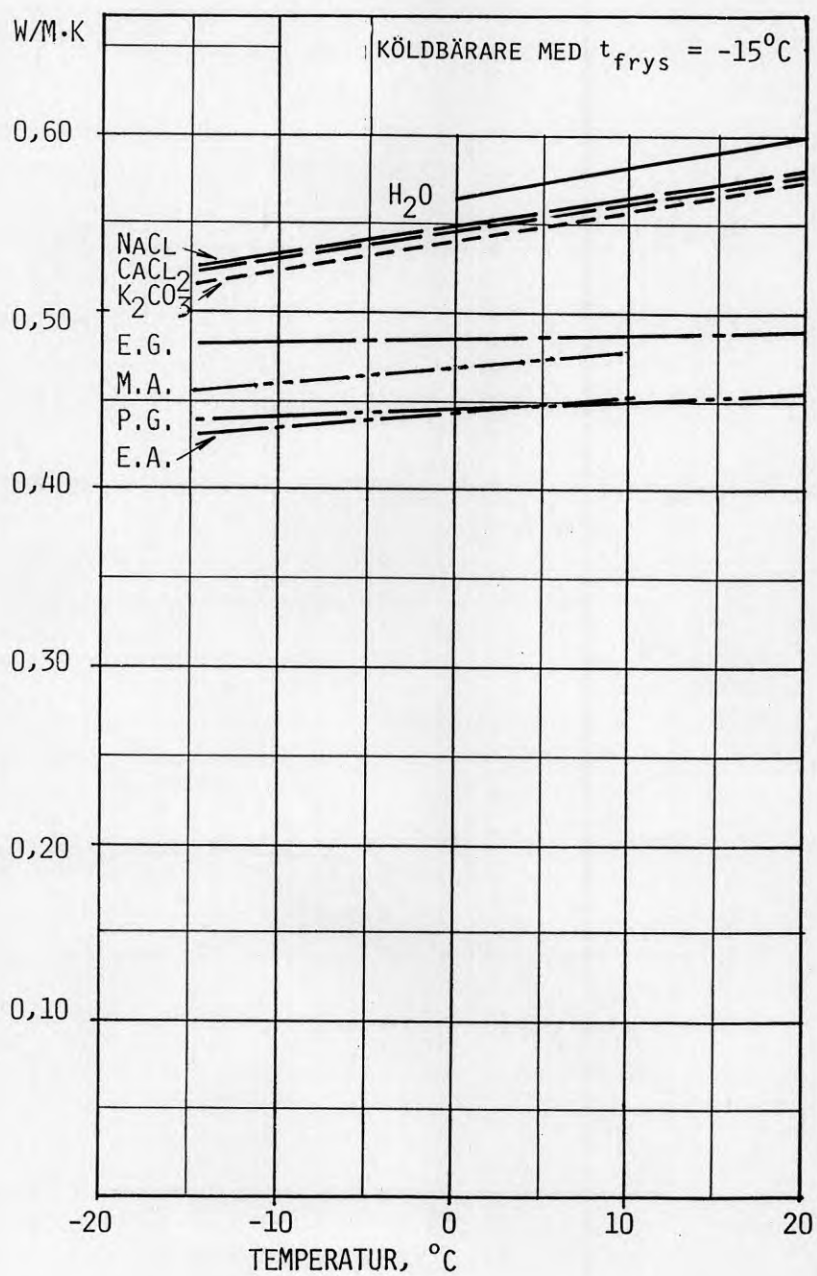
SPECIFIK VÄRMEKAPACITET, C_p

DIAGRAM 5.4



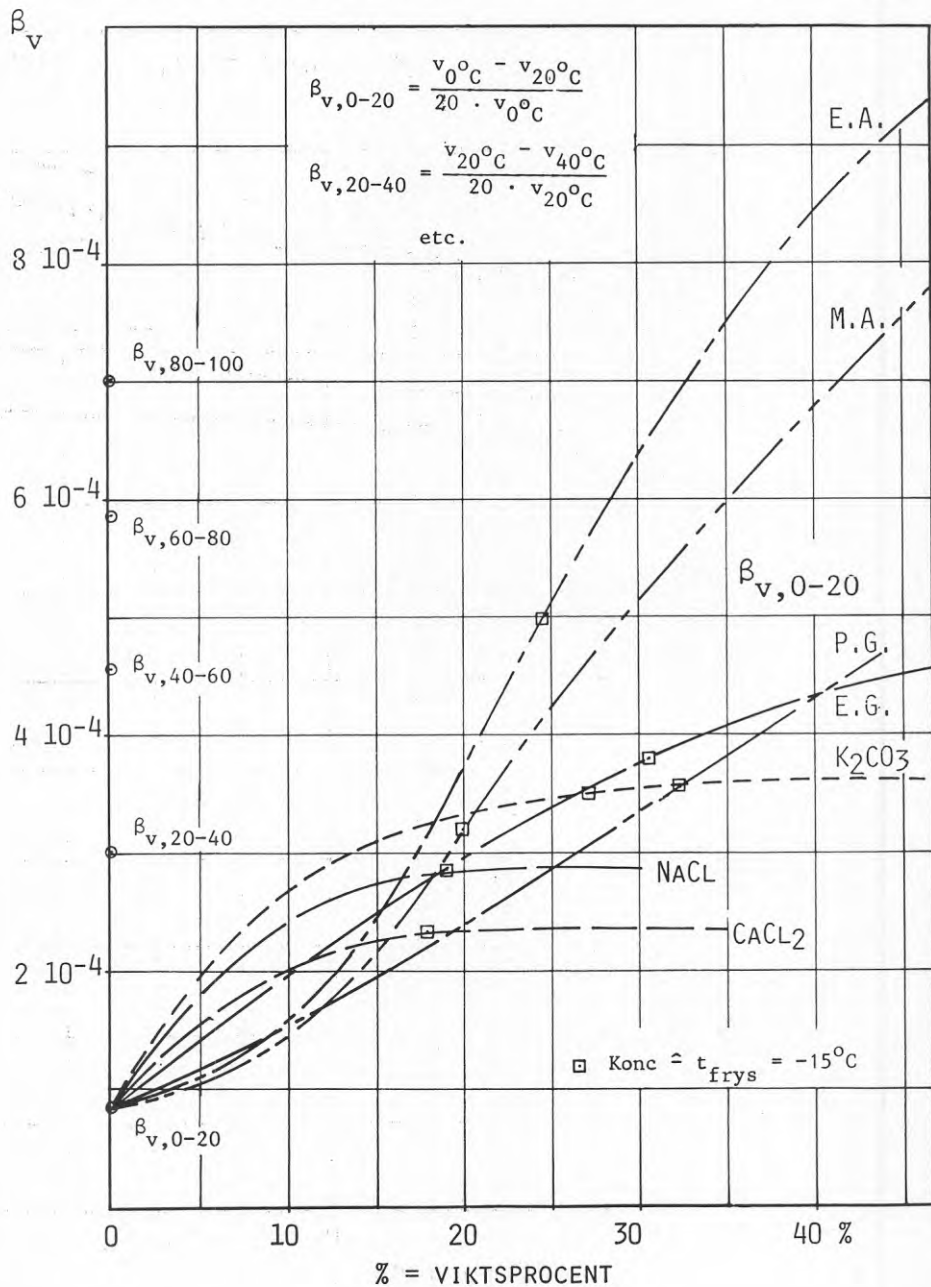
VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA, λ

DIAGRAM 5.5



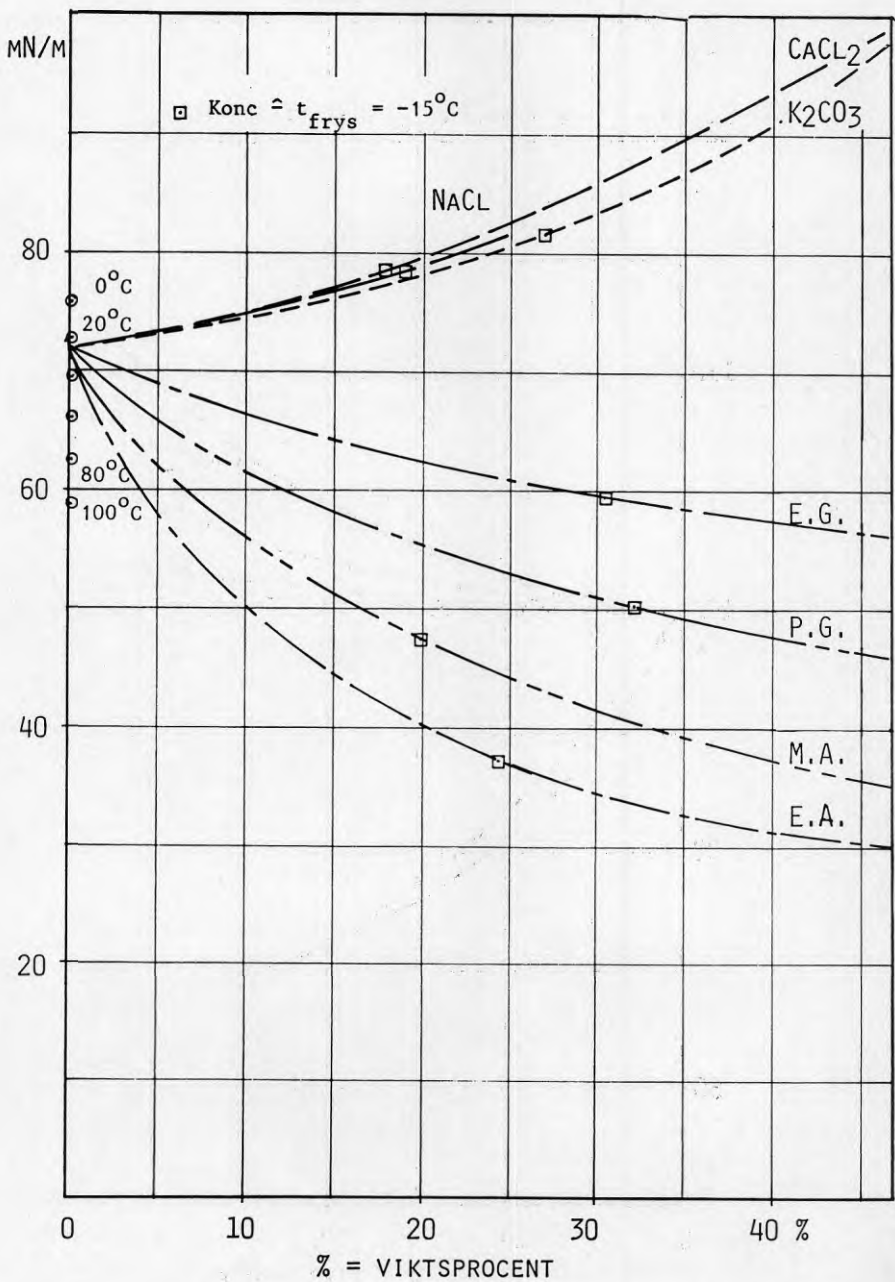
TERMISK VOLYMSUTVIDGNINGSKOEFFICIENT

DIAGRAM 5.6



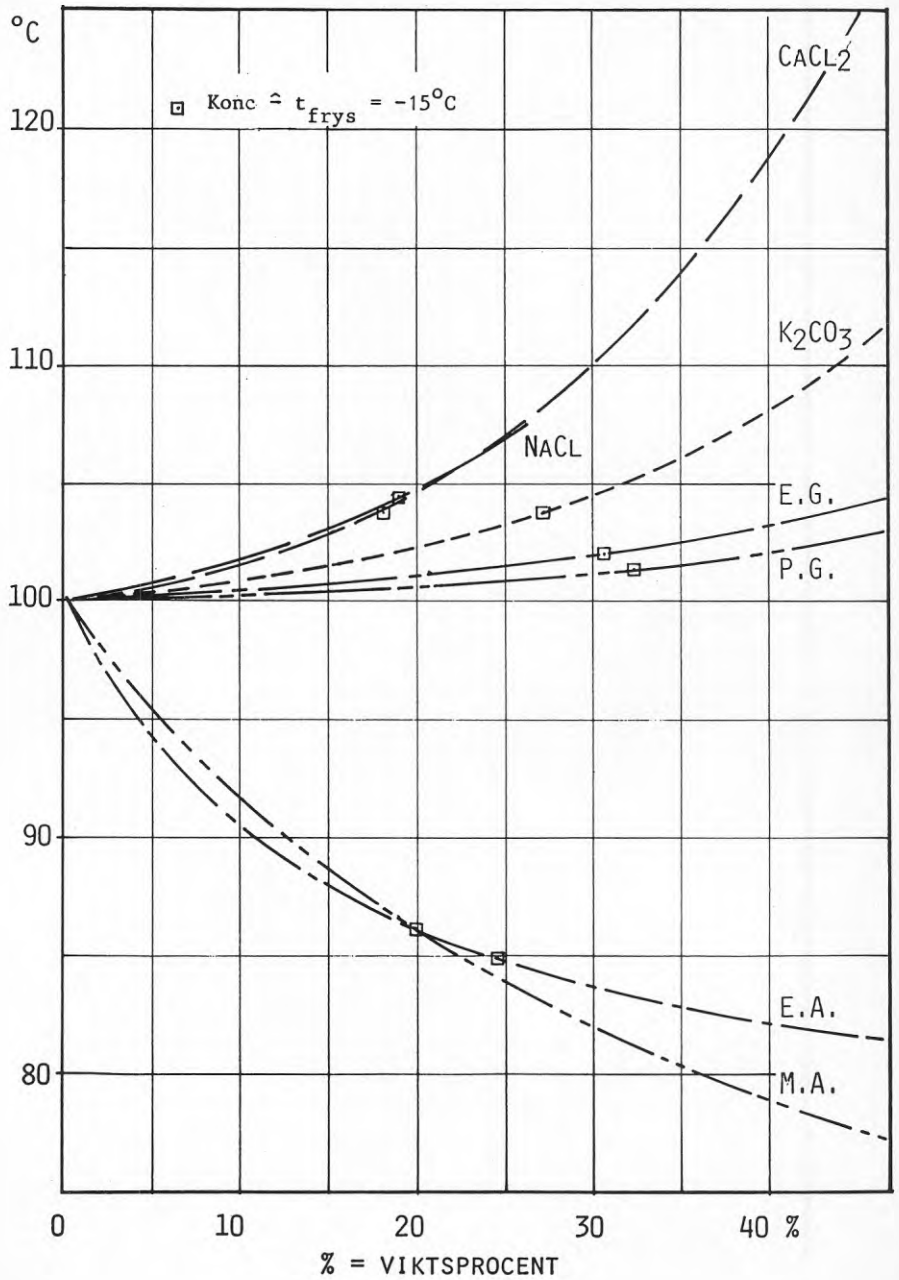
YTSPÄNNING, γ (VID 25°C)

DIAGRAM 5.7

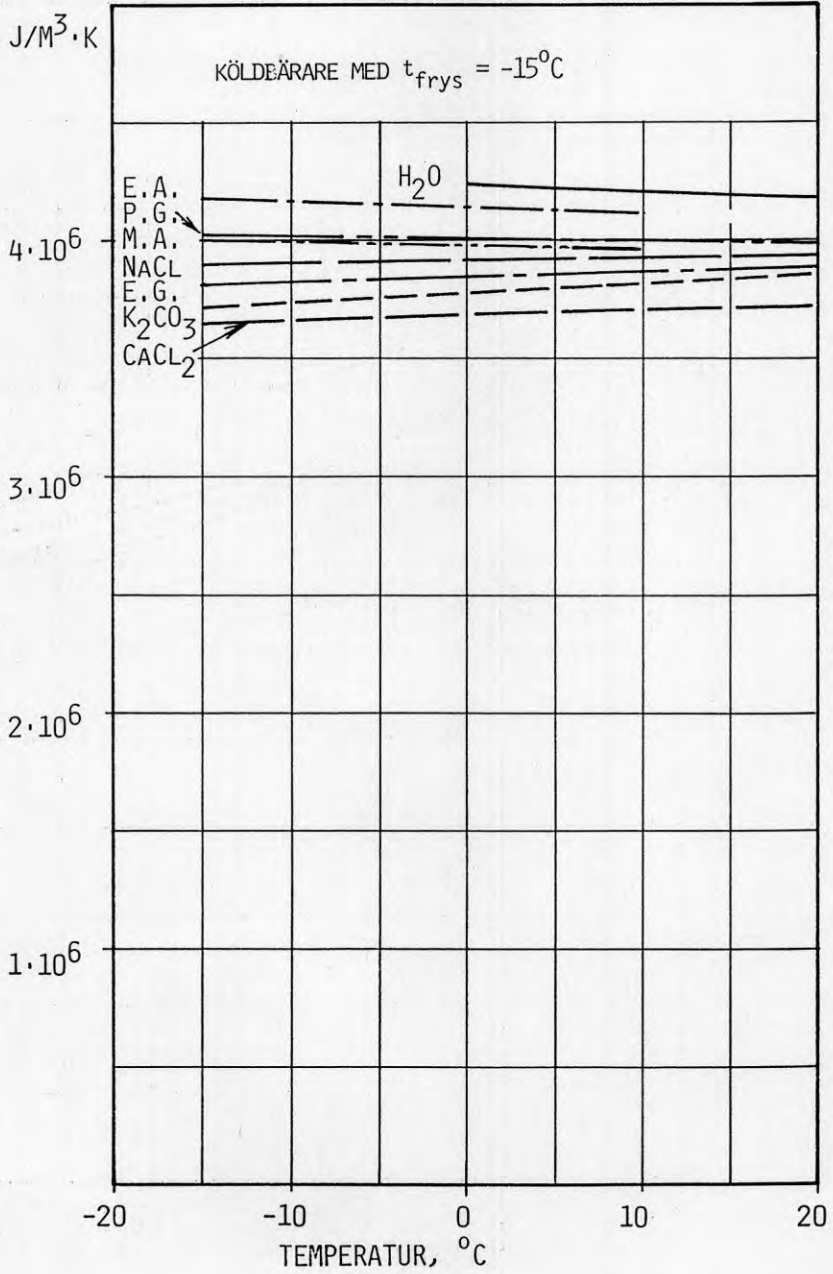


KOKPUNKT

DIAGRAM 5.8

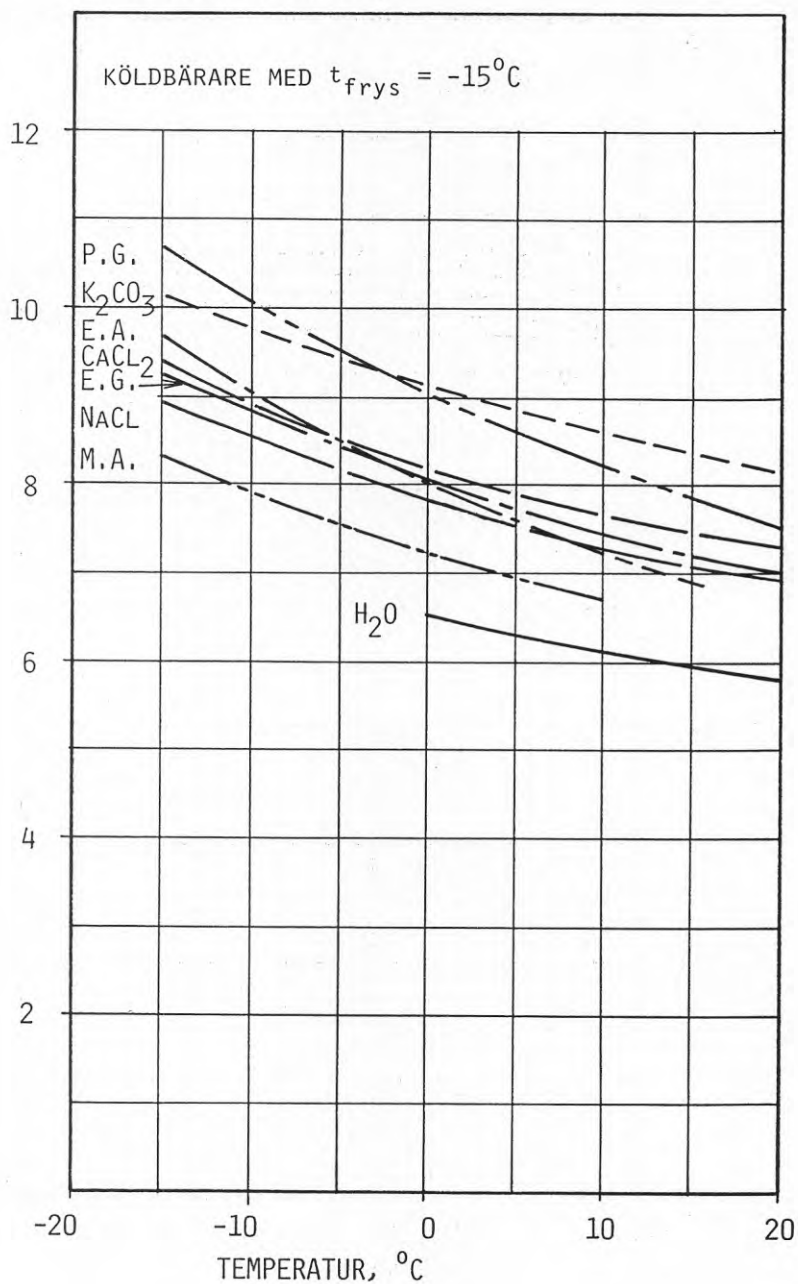


$\rho \cdot C_p$ DENSITET x SPECIFIK VÄRMEKAPACITET DIAGRAM 5.9

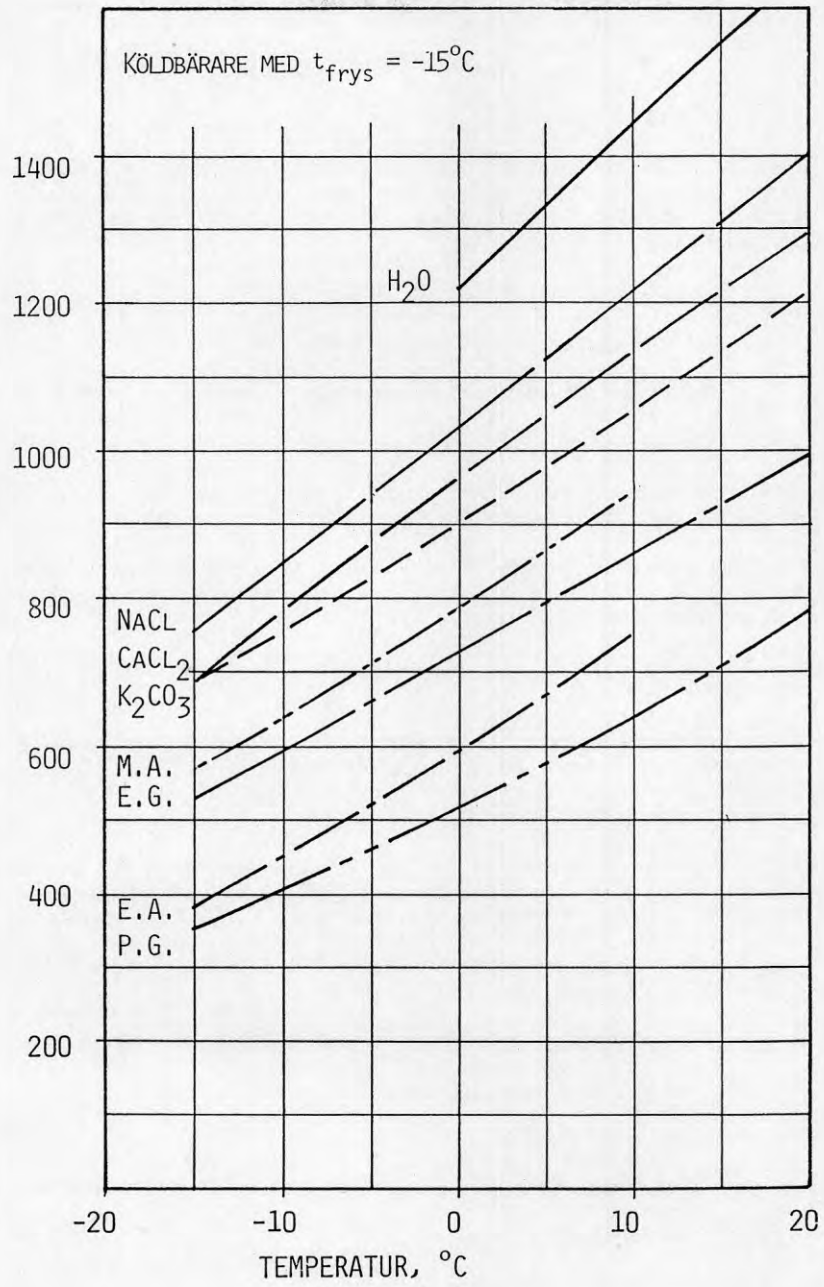


$F_{\Delta P}$ ÄMNESKONSTANTBEROENDE FAKTOR FÖR
BESTÄMNING AV TRYCKFALL

DIAGRAM 5.10



F_{α} ÄMNESKONSTANTBEROENDE FAKTOR FÖR BESTÄMNING AV VÄRMEÖVERGÅNGSTAL DIAGRAM 5.11



6 VÄRMETEKNISKA DRIFTERFARENHETER

Vattenlösningar av kaliumkarbonat som köldbärare har under de senaste åren provats i ett antal fältanläggningar i samarbete med Vattenfall.

Vid dessa anläggningar har huvudinriktningen från vår sida varit att studera korrosion, vilket behandlas i kap 7. I någon mån har vi dock kunnat få vissa intryck, uppgifter och jämförelser om anläggningarnas värmetekniska funktion.

6.1 Allmänna intryck

I en större berganläggning i Norrbotten har en etylalkoholbaserad köldbärare, "Brineol", utbytt mot en inhiberad vattenlösning av kaliumkarbonat, " K_2CO_3 ". Följande intryck har förmedlats från den som sköter anläggningen:

- "Bättre effekt nu än före bytet"
- "Kan nu gå när det är kallare jämfört med före bytet"
- "Har ej löst ut på lågtryckspressostaten, vilket den gjorde före bytet"
- "Inte lika kallt i hålet. Köldbärartemperatur $-6^{\circ}C$ mot $-9^{\circ}C$ tidigare"

Den stora temperaturskillnaden i sista citatet har sannolikt andra orsaker än enbart den nya köldbärarens egenskaper.

Muntliga uppgifter från ägare och skötare av andra värmepumpanläggningar är också positiva när det gäller den värmetekniska funktionen av kaliumkarbonat som köldbärare.

6.2 Mätresultat

Vissa jämförande värmetekniska mätresultat har erhållits från tre värmepumpanläggningar där en etylalkoholbaserad köldbärare, "Brineol", antingen utbytt mot eller arbetar parallellt med en kaliumkarbonatbaserad köldbärare, " K_2CO_3 ".

Anl 1 Två stycken parallellt arbetande värmepumpar. I VP 1 är köldbäraren " K_2CO_3 ", medan köldbäraren i VP 2 (som endast inkopplas vid behov) är "Brineol". Mätresultaten har erhållits vid samma tillfälle.

Anl 2 Utvärdering av byte från "Brineol" till " K_2CO_3 ". Samtidigt skedde utbyte av köldmedium från R22 till R500.

Anl 3 Utvärdering av byte från "Brineol" till " K_2CO_3 ".

Vid anl 2 och 3 har mätresultaten erhållits vid helt olika årstider.

Beteckningar: (Jfr fig 2.1)

- t_1 = kondenseringstemperatur
- t_2 = förångningstemperatur
- $t_{kb,in}$ = ingående köldbärartemperatur

$t_{kb,ut}$ = utgående köldbärartemperatur

Δt_{kb} = $t_{kb,in} - t_{kb,ut}$

Θ_2 = $(t_{kb,in} - t_{kb,ut})/2 - t_2$

Mätvärden och resultat:

<u>Anl 1</u>	Köldbärare:	"Brineol"	"K ₂ CO ₃ "
	Datum:	1987-05-16	1987-05-16
	t_1	-	-
	t_2	-11°C	-12°C
	$t_{kb,in}$	+5°C	+3°C
	$t_{kb,ut}$	+1°C	-1°C
	Δt_{kb}	4 K	4 K
	Θ_2	14 K	13 K
<u>Anl 2</u>	Köldbärare:	"Brineol"	"K ₂ CO ₃ "
	Datum:	1986-10-23	1988-02-01
	t_1	45°C	55°C
	t_2	-16°C	-16°C
	$t_{kb,in}$	-4,5°C	-4,5°C
	$t_{kb,ut}$	-7°C	-6,5°C
	Δt_{kb}	2,5 K	2 K
	Θ_2	10,3 K	10,5 K
<u>Anl 3</u>	Köldbärare:	"Brineol"	"K ₂ CO ₃ "
	Datum:	1986-11-06	1988-03-24
	t_1	43°C	45°C
	t_2	-21°C	-15°C
	$t_{kb,in}$	-4,5°C	-4°C
	$t_{kb,ut}$	-7°C	-7°C
	Δt_{kb}	2,5 K	3 K
	Θ_2	15,3 K	9,5 K

Goda transportegenskaper kan förväntas ge litet värde på Δt_{kb} . Ingen större skillnad kan avläsas mellan de två köldbärarna i de olika anläggningarna, vilket är i enlighet med tabell 2.1 och diagram 5.9.

Goda värmeöverföringsegenskaper bör ge litet värde på Θ_2 . I Anl 1 blev Θ_2 en grad mindre, vilket antyder en liten värmeknisk förbättring, medan skillnaden var obetydlig i Anl 2. I Anl 3 blev Θ_2 -värdet för "K₂CO₃" endast 62% av Θ_2 -värdet för "Brineol". Lägg märke till att diagram 5.11 vid -5°C för E.A. anger ett värde på F_α resp α som är 63% av värdet för K₂CO₃. Detta skulle stämma bra om värmemotståndet i och på utsidan av slangen kan försummas. Som nämnts är dock de registrerade värmekniska drifterfarenheterna mycket ofullständiga.

7 KORROSIONSASPEKTER MED KALIUMKARBONAT

7.1 Allmänt

I BFR Rapport R114:1985 beskrevs i ett appendix hur korrosionsprovning av olika konstruktionsmetaller genomförts för några tekniskt intressanta köldbärare. Korrosionshårdigheten undersöktes dels genom enkla burkförsök i laboratorieskala, dels genom pilot-plant försök med cirkulerande köldbärare.

Efter det att dessa försök väl genomförts beslöts att fältprov med kaliumkarbonat som köldbärare skulle göras i några utvalda värmepump-anläggningar. Dessa fältprov har genomförts med stöd från och i samarbete med Vattenfall. I fyra anläggningar inmonterades en s k korrosionsprovkammare i köldbärarkretsen och där insattes korrosionsprover av de metaller och enligt den metodik som redovisats i ovan nämnda rapport.

Förutom dessa fyra anläggningar har sex anläggningar tillkommit där korrosionsprover ej insatts, men där huvudmannen informerade under hand om det aktuella läget efter det att anläggningarna tagits i drift. I några fall har drifterfarenheter också erhållits via andra nyttjare av kaliumkarbonat som köldbärare i indirekt verkande värmepumpar.

Koncentrationen kaliumkarbonat i köldbäraren ligger i regel inom intervallet 27-32 vikts-% K_2CO_3 . Köldbärarens initiala pH-värde är c:a 12,5. Det höga pH-värdet medför mycket låg allmän korrosion hos bl a kolstål och gjutjärn, men viss korrosion hos koppar och mässing förekommer.

För att minska korrosionen av koppar och mässing tillsätts inhibitor i lösningen. Vi har undersökt verkan dels av egenhändigt komponerade inhibitorblandningar innehållande glukos resp glukos och natriumsilikat, dels av kommersiella inhibitorblandningar.

7.2 Allmän korrosion

I de fyra anläggningarna med korrosionsprover var avsikten främst att studera situationen vad gäller allmän korrosion. Provkuponger av kolstål, rostfritt stål, gråjärn, koppar och mässing insattes i resp korrosionskammare och uttogs successivt efter ett visst tidsschema. Erhållna resultat sammanfattas i tabell 7.1 (se nästa sida).

Som kommentar till resultaten i tabell 7.1 bör nämnas att anläggning nr 4 ej blev representativ som provanläggning. På grund av lokala omständigheter avtappades efter en tid en del av köldbäraren varefter en mängd kalciumkloridlösning av misstag tillfördes systemet. Syresättningen blev härigenom högre än normalt. Dessutom erhöles här ett slamproblem som ej finner sin motsvarighet i övriga anläggningar.

I stort sett visar resultaten från de fyra anläggningarna att allmänkorrosionen låter sig behärskas genom tillsats av lämplig korrosionsinhibitor i köldbäraren. Allmänkorrosionshastigheterna ligger alla på en acceptabel nivå. Detta innebär dock inte att man exkluderat risken för uppkomst av olika former av lokal korrosion, och det är då speciellt mässing som visat sig vara känslig i detta avseende.

Tabell 7.1 Allmän korrosion hos olika konstruktionsmetaller

Anläggning	1	2	3	4a	4b
Värmekälla	bergvärme	sjövärme	bergvärme	uteluft	uteluft
Köldbärare	27% K ₂ CO ₃	27% K ₂ CO ₃	27% K ₂ CO ₃	32% K ₂ CO ₃	32% K ₂ CO ₃
Inhibitor	glukos	glukos + Na-silikat	komm inh */	komm inh */	komm inh */
Provningstid	747 dygn	751 dygn	447 dygn	391 dygn	391 dygn
Material	Korrosionshastighet, µm/år				
Kolstål, rostfr stål, koppar	<1	<1	<1	<1	<1
Gråjärn	2	2	<1	<1	<1
Mässing	<1	<1	<1	3	6

Anl 4a. Prov i "kall del" av vp

Anl 4b. Prov i "varm del" av vp; max temp ca 40°C (intermittent)

*/ Den kommersiella inhibitor som här använts var Mitco R-24L

7.3 Lokal korrosion

De två former av lokal korrosion som främst kan uppträda är avzinkning och erosionskorrosion.

7.3.1 Avzinkning

Temperaturhöjning över rumstemperaturen har medfört ökad tendens till avzinkning, särskilt under packningar. En väsentlig temperaturhöjning kan kräva en högre inhibitorhalt i köldbäraren eller en helt annan inhibitorblandning än den som nu används.

Benägenheten för avzinkning hos mässing ökar i regel med ökad zinkhalt. I vatten som korrosionsmedium är detta förhållande tämligen väl utrett. Mässing med en zinkhalt under 15% brukar betecknas som resistent mot avzinkning. Enfasig mässing med högre zinkhalt kan fås avzinkningshärdig med lämplig legeringstillsats, t ex arsenik. I mässingskvaliteter med zinkhalter över c:a 37% erhålls en tvåfasig struktur och här uppvisar den zinkrika fasen en kvarvarande känslighet för avzinkning oavsett legerings-tillsats.

Det synes ej klarlagt om dessa erfarenheter kan överföras till en så pass alkalisk miljö som koncentrerad kaliumkarbonatlösning med ett pH-värde kring 12,5. Det är således ej klarlagt att arsenikinhiberad mässing uppvisar samma resistens mot avzinkning vid pH 12,5 som i vatten.

Avzinkningen behöver ej leda till stora viktförluster men kan ändå ställa till besvär via bildade korrosionsprodukter.

I ett praktikfall från en värmepump med kaliumkarbonat som köldbärare sattes en kulventil av mässing ur funktion genom att den kärvade så kraftigt att reglering ej längre var möjlig. Vid inspektion av ventilen visade det sig att det bildats ett tunt skikt av korrosionsprodukter (främst kopparoxid) på den del av kulans yta som blev långvarigt exponerad för den stillastående, kvarvarande brinlösningen inne i själva ventilhuset. Kulan var tillverkad av s k avzinkningsbeständig mässing.

Det torde vara svårt att i praktiken undvika en driftsituation där någon ventil blir kvar i ett visst läge en längre tid. Det är därför lämpligt att använda ventiler gjorda av ett annat material, t ex rostfritt stål, eller med en annan konstruktion.

7.3.2 Erosionskorrosion

I två värmepumpar, ej ingående bland de tio nämnda kontrollanläggningarna, har man observerat skador på dykrör av pressmässing orsakade av erosionskorrosion.

Vid erosionskorrosion samverkar korrosion och nötning. Turbulenta strömningsförhållanden underlättar materietransport och korrosionsreaktioner kan ske på ytor som ej skyddas av några korrosionsprodukter. Nötningssituationen förvärras om vätskan innehåller fasta partiklar, som t ex oxidrester, rostslam, sand, jord, saltutfällningar eller gasblåsor.

Bland bruksmetaller drabbas oftast koppar och kopparlegeringar och det innebär i praktiken att man i vätskeförande system ej får överskrida vissa strömningshastigheter. I saltvatten ligger högsta tillåtna strömningshastigheter kring 1 - 1,5 m/s vad gäller koppar och enklare mässingskvaliteter.

I de två aktuella fallen var köldbäraren helt oinhiberad, dvs några speciella korrosionsinhibitorer hade ej tillsatts. Det förefaller dock sannolikt att det funnits fasta partiklar i vätskefasen i bägge systemen, som saknade varje form av filter.

Enligt vissa tyska uppgifter så skulle mässingstyper som går under samlingsbeteckningen "pressmässing" ej vara tillrädliga att använda i system med kaliumkarbonatbaserade köldbärare. Däremot har man goda erfarenheter av gjutmässing om köldbäraren är inhiberad. Möjligen kan denna skillnad bero på att pressmässingsdetaljer ofta görs i tunt gods och att detaljerna placeras på ställen där strömningen är störd och man har kraftig turbulens. Om det dessutom finns fasta partiklar med i systemet kan det bli den avgörande faktorn för att en erosions- korrosionsskada skall kunna uppstå.

En möjlig praktisk lösning i fallen med dykrören vore utbyte till dykrör av kolstål eller eventuellt av rostfritt stål.

Det bör påpekas att vid inspektion av förångaren i anl 1, som varit i drift i mer än två år, så har inga tecken på erosionskorrosionsskador kunnat observeras på vare sig koppar- eller mässingskomponenter. Det samma gäller en inspekterad mässingsventil som suttit i anl 3 i över ett och ett halvt år.

7.4 Förslag till materialval

Det bör påpekas att detaljer av zink och aluminium ej skall användas i köldbärarsystem innehållande kaliumkarbonatlösning. Dessa metaller är termodynamiskt instabila vid det rådande höga pH-värdet. Det är således ingen mening att använda komponenter gjorda av förzinkat stål, utan obelagt kolstål är att föredra.

Kolstål och rostfritt stål är lämpliga konstruktionsmaterial i denna miljö. I inhiberade lösningar fungerar pumpar av gråjärn bra. I något fall har dock problem med axeltätningar i form av läckage rapporterats, något som även förekommit med andra typer av köldbärare.

Enligt nu gjorda erfarenheter låter sig korrosionspåfrestningarna på koppar behärras genom inhibitortillsats i kaliumkarbonatlösningar. I system med ovanligt mycket fasta partiklar kan man dock inte helt utesluta risken för erosionskorrosion.

Det vore fördelaktigt om man i ökad utsträckning kunde använda detaljer gjorda av aducergods och seggjärn i stället för mässingkomponenter. Pressade mässingsdetaljer bör helt undvikas. Genom inhibitortillsats har allmänkorrosionen kunnat nedbringas till en låg nivå även vad gäller mässing, men olika former av lokal korrosion kan ställa till med problem. Dykrör och rörliga detaljer bör därför ej vara av mässing. Kolstål och järnbas-legeringar är lämpligare material.

Mjuklod baserade på bly-tenn-legeringar skall inte användas i köldbärarsystem innehållande kaliumkarbonat.

7.5 Temperatureffekter

Egna erfarenheter av högre temperaturer inskränker sig till den "varma" delen av anl 4(b), se tabell 7.1. Den högre temperaturnivån har lett till något ökad korrosion på mässing oavsett inhibitortillsatsen. En ytterligare temperaturhöjning kan kräva en högre inhibitorhalt i köldbäraren eller en helt annan inhibitorblandning än de som nu används om man önskar bibehålla mässingskomponenter.

En ökad temperatur kan förväntas ge ökad allmänkorrosion för samtliga inblandade metaller. Vid temperaturer kring 60 - 70°C kan det finnas skäl att kontrollera risken för spänningskorrosion på kolstål med hänsyn till det relativt höga pH-värdet i kölsbärlösningen. En ökad avzinkning hos mässing kan också förutses.

7.6 Öppna eller slutna system

Från korrosionssynpunkt baseras skillnaden mellan öppna och slutna värmepumpsystem på tillgången på syre.

Helt slutna, dvs diffusionstäta, system torde vara helt säkra från korrosionssynpunkt även vid förhöjd temperatur, om man från början exkluderat tidigare nämnda olämpliga material. Man får härvid ej heller avtappa köldbäraren och tillföra ny syresatt sådan.

De anläggningar som ingår i fältproven är ej diffusionstäta, även om syrehalten i dessa är lägre än vid laboratorieproven där använda lösningar genombubblats med luft. Erfarenheterna hittills tillåter dock slutsatsen att man skulle kunna acceptera system med öppna expansionskärl om driftbetingelserna i övrigt är normala, dvs ingen "varm" del ingår i kretsen, och köldbäraren är inhiberad från start. Man bör dock inte använda dykrör, kulventiler o dyl gjorda i mässing.

7.7 Kontroll av inhibitorstatus

I nuvarande läge är det något vanskligt att föreskriva lämpliga tidsintervall för kontroll av inhibitorstatus. I fortfarighetstillstånd bör man dock sikta på att intervall på ca 5 år skall vara tillfyllest om man använder en lämplig kommersiell inhibitorblandning. Långtidsstabiliteten för den glukosbaserade inhibitorn är svårare att överblicka.

Några negativa erfarenheter har emellertid ej gjorts till dags dato i system vid låga temperaturer. Det sker ett långsamt sönderfall av glukos i alkalisk lösning. En eller flera av sönderfallsprodukterna synes också ha korrosionsinhiberande egenskaper vad gäller koppar och mässing. Vid förhöjd temperatur är dock varaktigheten av skyddsverkan osäker och därför har den kommersiella inhibitorblandningen introducerats som en möjlig ersättning.

8 HANTERINGSSASPEKTER

8.1 Vid tillblandning

Vid beredning av stora mängder kaliumkarbonatlösning i oventilerade lokaler kan saltamm komma att besvära ögon och andningsvägar. Här rekommenderas därför användning av skyddsglasögon och eventuellt också andningsskydd. För den som ofta handskas med saltet i större mängder kan skyddskläder och handskar komplettera det personliga skyddet.

Lösningsreaktionen är exoterm och det bildas primärt en varm, koncentrerad saltlösning med alkalisk reaktion. Användning av skyddsglasögon rekommenderas för att eliminera risken för eventuella ögonskador orsakade av stänk. Den kommersiellt tillgängliga produkten, ett vätskekoncentrat, klassas som vådlig kemikalie och har ett Andreaskors som färosymbol.

Om olyckan ändå skulle vara framme gäller beträffande ögonen att man spolar dem med stora mängder vatten under flera minuter och därefter uppsöker läkare för kontroll och eventuell efterbehandling.

Om man av våda skulle ha förtärt kaliumkarbonat skall man inta dryck (vatten eller mjölk) och så snart som möjligt uppsöka läkare för undersökning och eventuellt vidare behandling.

8.2 Vid luftning

När köldbäraren väl påfyllts i systemet finns en kvarvarande hanteringsrisk i samband med luftning. Genom oförsiktighet eller obetänksamhet eller andra olyckliga omständigheter skulle man kunna få en vätskestråle i ögonen, om skyddsglasögon ej bärs.

Det bör således finnas tillgång till rinnande vatten i direkt närhet till platsen där värmepumpen luftas, för att man skall kunna göra den omedelbara ögonspolning som tidigare omnämndes.

Ett bra alternativ är att konstruktivt utforma avluftningsventiler (och säkerhetsventiler) så att direktsprutning av köldbäraren omöjliggörs. Ett lämpligt sätt är att förse ventilen med ett rör som går ner till ett uppsamlingskärl vid golvet.

9 MILJÖASPEKTER

I kaliumkarbonatbaserade köldbärare finns huvudsakligen kaliumjoner, K^+ samt karbonatjoner, CO_3^{2-} . Karbonatjoner ger alkalisk reaktion genom att binda vätejoner. Vid ett eventuellt läckage kan således pH-värdet komma att stiga så att det utfälls karbonat, i naturliga vatten vanligtvis som kalciumkarbonat.

Vid ett stort utsläpp eller läckage är troligen Ca^{2+} -halten i den närmaste omgivningen för låg för att direkt binda all frisläppt karbonat, vilket temporärt leder till förhöjt pH-värde inom ett begränsat område. Karbonatjonen ingår i det naturliga kolsyrasystemet och är en viktig beståndsdel i vattnets buffertsystem. Ett lokalt höjt pH-värde kan säkerligen tolereras med tanke på den allmänna försurningstendensen i naturen. Man måste dock ta hänsyn till eventuella lokala brunnar eller närheten till någon vattentäkt.

Kaliumjonen, K^+ , bedöms inte ge några negativa effekter överhuvudtaget vid ett eventuellt utsläpp.

Statens naturvårdsverk, SNV har yttrat sig över konceptet med kaliumkarbonatbaserade köldbärare i värmepumpsystem och har därvid intagit en mycket positiv ståndpunkt. Naturvårdsverkets yttrande återges i sin helhet som bilaga 1.

**BILAGA 1 KÖLDBÄRARE FÖR VÄRMEPUMPTILLÄMPNINGAR -
KALIUMKARBONAT**

Yttrande av Statens naturvårdsverk, SNV återges i sin helhet på sid 69-71.



STATENS NATURVÅRDSVERK SNV
Tekniska avdelningen
Energienheten Te
Byrådir Folke Larsson

68

Datum
1986-05-20

Aberopas vid korrespondens

SNV:s ärendenummer
543-1420-86-Te

Eric Granryd
Kungl Tekniska Högskolan
Inst för Mekanisk värmeteori
och kylteknik
100 44 STOCKHOLM

Köldbärare för värmepumptillämpningar

I brev 1986-04-09 önskas naturvårdsverkets syn på att utnyttja K_2CO_3 som köldbärare och en bedömning av riskerna vid ytjordvärme- och bergvärmesystem.

Inom naturvårdsverket pågår ett utredningsarbete som bl a omfattar kartläggning av olika köldbärarvätskor samt sammanställning och utvärdering ur human- och ekotoxikologisk synpunkt. Utredningen syftar till att ge underlag för rekommendationer och val av köldbärarvätskor och beräknas vara klar under hösten 1986.

Av det material som nu föreligger kan följande utdrag presenteras med reservationer för eventuella tillägg och ändringar.

Kaliumkarbonat

Exponering

Kaliumkarbonat används för tillverkning av tvål, glas och keramik, garvning av läder m m. Det kan också användas som ett fryspunktsnedsättande salt. Värmepumpsanläggningar med kaliumkarbonat som köldbärarvätska förekommer. Erfarenheter från kontrollanläggningar verkar lovande och användningen kommer kanske att öka framöver.

Kaliumkarbonat (K_2CO_3) är ett salt som dissocierar till kalium- och karbonatjoner i vattenlösning och ger ett högt pH. Kaliumjoner (K^+) binds lätt till markpartiklar och tas även i stor utsträckning upp av markorganismer och växter eftersom det är ett bristämne i marken. Karbonatjonen (CO_3^{2-}) ingår i kolsyrasystemet, vattnets buffertsystem, och tar upp H^+ -joner vilket höjer pH. Följer i stor utsträckning med markvattnets rörelser. Blir pH för högt faller karbonat ut vanligtvis som kalciumkarbonat. Vid ett stort utsläpp räcker dock kanske inte Ca-jonerna till för en buffring och man får ett förhöjt pH-värde.

8

Postadress	Gatuadress	Telefon	Telegram	Telex	Postgiro
Box 1302 171 25 SOLNA	<input type="checkbox"/> Smidesvägen 5 <input type="checkbox"/> Englundavägen 5 <input type="checkbox"/> Ekensbergsvägen 128	08- 799 10 00	Environ Stockholm	111 31 ENVIRON S	156 12-5

1986-05-20 543-1420-86-Te

Effekter

Kalciumkarbonat är måttligt toxiskt. De systemiska effekter på försöksdjur som kan uppstå vid förtäring beror på de vävnadsskador som uppstår pga kaliumkarbonats frätande egenskaper. Inga uppgifter finns om effekter på människa, men de kan förväntas vara desamma som för försöksdjur.

När det gäller effekter på miljön så är de höga pH-värdena som kan uppstå vid utsläpp av kaliumkarbonat skadliga för markorganismer. Påverkan är dock begränsad till utsläppsområdet och försvinner efterhand som en utspädning sker. En eventuell akvatisk påverkan torde vara mycket låg då en snabb utspädning genast uppstår.

Miljöfarlighet

Kaliumkarbonat är ett oorganiskt ämne och kan inte bedömas enligt ESTHER-manualen. (Systems for Testing and Hazard Evaluation of Chemicals in the Aquatic Environment).

Det har tagits fram som ett alternativt fryspunktsnedsättande medel för köldbärande vätskor, men används än så länge bara i några enstaka anläggningar. Kaliumkarbonat är vattenlösligt och ger K^+ - och CO_3^{2-} -joner. Karbonatjonerna ingår i kolsyrasystemet, vattnets buffertsystem, men kan vid stora utsläpp orsaka förhöjt pH i marken. Karbonatjonerna binds som negativa joner inte till markpartiklarna i motsats till kaliumjonerna som dessutom även i stor utsträckning tas upp av organismer då det är ett bristämne i marken. Kaliumkarbonat kan inte anses som miljöfarligt.

Hälsofarlighet

Akuttoxiciteten är måttlig och de systemiska effekter man finner efter förtäring beror på de frätskador som orsakas av kaliumkarbonat i hög koncentration. De frätande egenskaperna gör också att skador uppträder vid hudkontakt och stänk i ögonen. Vid låga koncentrationer är dock kaliumkarbonat ofarligt och är godkänt som livsmedelstillsats.

Kaliumkarbonat bör märkas "frätande" på grund av sina starkt frätande egenskaper i koncentrerad form.

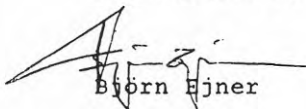
1986-05-20 543-1420-86-Te

Slutsatser

Kaliumkarbonat är en icke-toxisk lösning vilken som enda direkt negativa egenskap har ett relativt högt pH. Korrosiviteten är mycket låg och man har positiva erfarenheter från provanläggningar. Kaliumkarbonat kan därför tänkas bli en köldbärarvätska att räkna med i framtiden om inga negativa effekter visar sig längre fram. Trots allt har kaliumkarbonat bara testats under ett par år vilket är otillräckligt för att man säkert skall kunna lova att inga problem uppstår vid långvarig drift.

Som korrosionsinhibitorer har icke-toxiska kemikalier använts (glukos och natriumsilikat), och om inga tekniskt negativa egenskaper visar sig, har man här fått fram ett bra alternativ till de toxiska och korrosiva lösningar som används i dag.

För statens naturvårdsverk



Björn Ejner



Folke Larsson

Kopia till: Kemikalieinspektionen
Box 1384
171 27 SOLNA

VÄRMEÖVERGÅNG OCH TRYCKFALL VID STRÖMNING I
RÖR FÖR KÖLDBÄRARE

Jämförelse mot teori och kontroll av ämneskonstanter

Björn Kyrk

SAMMANFATTNING

I denna rapport har försök gjorts för att kontrollera ämneskonstanterna för tre olika köldbärare. Dessa var kaliumkarbonat, kalciumklorid och etylenglykol. Försöken har utförts vid fyra olika temperaturer 10, 0, -10 och -20°C. Även en jämförelse av värmeövergången har gjorts mellan de olika köldbärarna för temperaturerna 0 och -10°C.

Resultaten från kontrollen av ämneskonstanterna visar att köldbärare av kaliumkarbonat eller etylenglykol förefaller tillförlitliga. Däremot har värden vid låga temperaturer för köldbärare av kalciumklorid visat resultat som ger osäkerhet avseende viskositetsdata.

Tidigare har en provserie tagits på viskositeten för kalciumklorid av Å. Melinder. Då erhöles lägre värden på viskositeten vid låga temperaturer. Genom att använda viskositetsdata från denna provserie har en bättre överensstämmelse med teorin erhållits. Detta innebär att litteraturdata för kalciumklorid vid låga temperaturer kan vara för höga.

Jämförelse av värmeövergången vid samma volymflöde visar att kalciumkloriden har klart högst värmeövergångstal. Därefter följer kaliumkarbonat och sist etylenglykol. Se diagram 5.5.1 och 5.5.2.

Jämförelse av tryckfallet vid samma volymflöde visar en stor skillnad i tryckfall inom vissa flödesområden. Vilka dessa är beror på omslaget mellan laminär och turbulent strömning, vilket för de olika köldbärarna sker vid olika volymflöden. Se diagram 5.6.1 och 5.6.2.

För övrigt visas i rapporten även omslagsområdet för laminär respektive turbulent strömning och lokala värden för värmeövergången.

INNEHÅLL

1 INLEDNING

2 FÖRSÖKSANLÄGGNING

3 TEORI

- 3.1 Allmänt
- 3.2 Strömningsförhållanden
- 3.3 Värmeövergången
- 3.4 Tryckfallet

4 METODBESKRIVNING

- 4.1 Värmeövergången
- 4.2 Tryckfallet

5 RESULTAT

- 5.1 Kaliumkarbonat (ämnesdata från Å. Melinder)
värmeövergången
friktionsfaktorn
- 5.2 Kalciumklorid (ämnesdata från litteraturen)
värmeövergången
friktionsfaktorn
- 5.3 Kalciumklorid (ämnesdata från Å. Melinder)
värmeövergången
friktionsfaktorn
- 5.4 Etylenglykol (ämnesdata från litteraturen)
värmeövergången
friktionsfaktorn
- 5.5 Jämförelse av värmeövergången för de
olika köldbärarna
- 5.6 Jämförelse av tryckfallet för de olika
köldbärarna
- 5.7 Jämförelse av friktionsfaktorn för de
olika köldbärarna.
- 5.8 Påverkan av övergången mellan laminär
och turbulent strömning
- 5.9 Lokala värden över värmeövergången

1 INLEDNING

På senare år har olika undersökningar gjorts om köldbärare för kylanläggningar och värmepumpar. Dessa undersökningar har rört sig om ämnesdata, giftighet, korrosionsbenägenhet samt värmeövergång mm.

Ett behov har funnits att praktiskt undersöka en del köldbärarens värmeöverföringsegenskaper och tryckfall, i en och samma försöksanläggning. Detta för att sedan bättre kunna jämföra de olika köldbärarna.

Här nedan redovisade försök har genomförts på institutionens för Mekanisk värmeteori och kylteknik laboratorium som en del i ett större BFR-projekt om köldbärare.

Syftet med försöken är att kontrollera ämneskonstanterna samt jämföra värmeövergången och tryckfallet för några olika köldbärare.

2 FÖRSÖKSANLÄGGNING

Försöksanläggningen består av ett slutet rörsystem i vilken köldbäraren cirkuleras av en kraftig pump. Mätsträckan består av ett 4 m långt rör med innerdiametern 15 mm. Köldbäraren värms elektriskt genom ett kanthalband som lindats runt röret utmed mätsträckan. Genom en kraftig isolering av mätsträckan kan värmeförlusterna till omgivningen försummas.

Köldbärarens blandningstemperatur mäts vid inloppet respektive utloppet. Rörväggens temperatur mäts vid fyra olika snitt utefter mätsträckan, se fig 2.1 Minst två stycken temperaturgivare finns vid varje mätställe och dessa är kopplade till en temperatur-skrivare.

Tryckdifferensen utmed röret mäts med en kvicksilvermanometer.

Köldbäraren cirkulerar således runt i systemet, och värms då den passerar mätsträckan, och kyls då den passerar kylaggregatet.

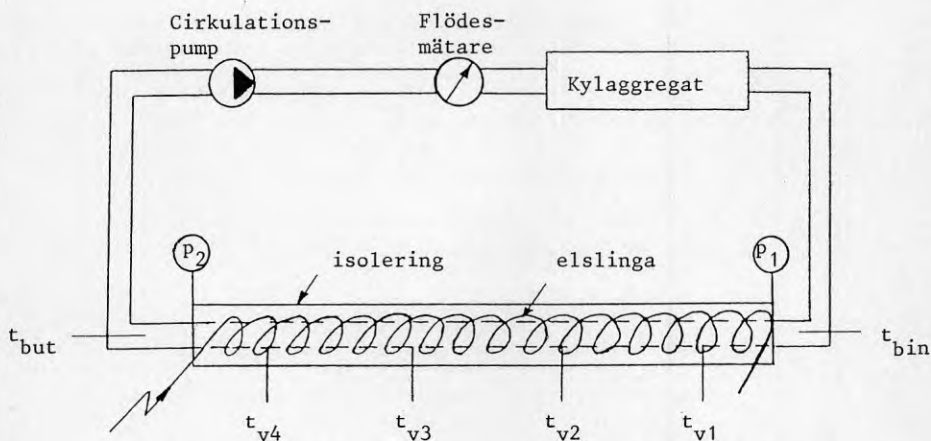


Fig 2.1 Principskiss över försöksanläggningen

- P_1 = tryckkutttag vid inloppet
- P_2 = tryckkutttag vid utloppet
- t_{bin} = temperaturgivare vid inloppet
- t_{but} = temperaturgivare vid utloppet
- t_{v1} = temperaturgivare för rörväggens i
snitt 1. Analogt för snitt 2 - 4.

3 TEORI

3.1 Allmänt

En köldbärarens uppgift är att transportera värme från en värmekälla i omgivningen till värmepumpens förångare. Detta skall ske med så litet temperaturfall som möjligt. En dålig värmeöverföring medför att temperaturfallet blir stort och därmed fås en låg förångningstemperatur. Detta medför i sin tur en låg värmefaktor, och liten kapacitet samt en hög tryckrörstemperatur hos värmepumpen.

3.2 Strömningsförhållanden

Värmeöverföring i rör är beroende av om strömningen sker laminärt eller turbulent.

Laminär strömning: är en ordnad virvelfri strömning som erhålls om Reynolds' talet är lågt ($Re < 2300$ ger alltid laminär strömning i cirkulära rör). Vid högre Reynolds' tal än ca 2300 är den laminära strömningen beroende av att strömningen sker mer eller mindre störningsfritt.

Turbulent strömning: är en oordnad, slumpmässigt varierande och virvlande strömning, som ger en betydligt bättre värmeöverföring än den laminära.

För att vara säker på att omslag till turbulent strömning sker strax över $Re = 2300$ bör man således störa strömningen vid eller före inloppet (genom exempelvis skarpa kanter eller dylikt).

Reynolds' tal är ett dimensionslöst mått på strömningshastigheten jämfört med vätskans viskositet. Definitionen på Reynolds' talet är:

$$Re = w \cdot d / \nu = w \cdot d \cdot \rho / \mu$$

w = vätskehastigheten

d = rördiametern

ν = kinematiska viskositeten

ρ = densiteten

μ = dynamiska viskositeten

3.3 Värmeövergången

För beräkning av värmeövergången kan följande empiriska samband användas:

$$\text{Laminär rörströmning} - Nu = 2.02 \cdot Gz^{1/3}$$

$$\text{Turbulent rörströmning} - Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3}$$

$$Nu = \text{Nusselts tal} = \alpha \cdot d / \lambda$$

$$Re = \text{Reynolds' tal} = w \cdot d / \nu = w \cdot d \cdot \rho / \mu$$

$$Pr = \text{Prandtls tal} = \mu \cdot c_p / \lambda$$

$$Gz = \text{Graetz tal} = \pi \cdot d \cdot Re \cdot Pr / 4L$$

c_p = värmekapaciteten

d = rörets innerdiameter

L = rörlängden

w = vätskehastigheten

α = värmeövergångstalet

λ = värmeledningstalet

ρ = densiteten

ν = kinematiska viskositeten

μ = dynamiska viskositeten

Vid den turbulenta rörströmningen används vanligtvis exponenten 0.4 för Prandtls tal, men för vätskor viskösa än vanligt vatten kan man med fördel använda exponenten 1/3. I synnerhet då Reynolds' talet är lägre än ca 10 000.

3.4 Tryckfallet

En köldbärare måste normalt pumpas runt, för att transporten av värme, och tillräcklig värmeöverföring skall erhållas. Detta ger då upphov till ett tryckfall som måste övervinnas.

Tryckfallet och därmed effektbehovet för cirkulationspumpen kan lätt bli oacceptabelt stort om köldbärarvätskan blir alltför viskösa. Nackdelarna med en stor pumpeffekt är att värmefaktorn blir lägre då driveffekten ökar. Dessutom ökar naturligtvis kostnaden för pumpen då dess storlek ökar.

Viskositeten är den ämneskonstant som varierar mest med avseende på temperaturen. Därmed kan viskositeten påverka hela köldbärarsystemets funktion kraftigt.

- * Ökad viskositet ökar tryckfallet så att massflödet och hastigheten minskar. Minskat massflöde minskar värmeövergången, vilket leder till större temperaturdifferens i köldbärarkretsen.
- * Ökad viskositet ger lägre Reynolds' tal, vilket innebär att risk för omslag till laminär strömning finns, då Reynolds' talet sjunker ned mot 2300.
- * Ökad viskositet fås vid lägre temperaturer eller om koncentrationen i köldbärarvätskan ökas.

För tryckfallsberäkningar i raka rör gäller, då inga stöförluster ingår.

$$\Delta p = f_1 \cdot \rho \cdot w^2 \cdot L/d$$

Δp = tryckfallet
 f_1 = friktionsfaktorn
 d = rördiametern
 L = rörlängden
 ρ = densiteten

Friktionsfaktorn f_1 i ovanstående samband kan erhållas ur följande empiriska samband:

Laminär rörströmning - $f_1 = 32/Re$

Turbulent rörströmning - $f_1 = 0.158 \cdot Re^{-0.25}$

4 METODBESKRIVNING

4.1 Värmeövergången

Vid varje försök hålls den tillförda effekten \dot{Q} konstant utefter mätsträckan. Därmed kan även köldbärarens temperaturgradient antas vara konstant utefter mätsträckan.

Köldbärarens blandningstemperatur t_b beräknas sedan för de snitt där väggtemperaturerna mäts. Den lokala temperaturdifferensen v erhålls då enligt

$$v_1 = t_{v1} - t_{b1} ; \quad v_2 = t_{v2} - t_{b2} ;$$

$$v_3 = t_{v3} - t_{b3} ; \quad v_4 = t_{v4} - t_{b4} .$$

v_1 = den lokala temperaturdifferensen i snitt 1
 t_{v1} = den lokala väggtemperaturen i snitt 1
 t_{b1} = den lokala blandningstemperaturen i snitt 1

Det aritmetiska medelvärdet av v blir då

$$v_m = (v_1 + v_2 + v_3 + v_4) / 4.$$

Ur sambandet för den tillförda effekten \dot{Q} kan både det lokala samt medelvärdet av värmeövergångstalet α beräknas.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot v_m$$

Det dimensionslösa talet för värmeövergången, Nu- talet, beräknas enligt sambandet

$$Nu = \alpha \cdot d / \lambda .$$

Det dimensionslösa talet för strömningshastigheten, Re- talet, beräknas från avläst värde på flödesmätaren och fås då enligt

$$Re = w \cdot d / \nu .$$

Alla ingående ämneskonstanter för de olika sambanden har tagits vid köldbärarens medeltemperatur t_m .

$$t_m = (t_{bin} - t_{but}) / 2$$

4.2 Tryckfallet

Under varje försök avläses kvicksilvermanometern, och tryckfallet fås då enligt sambandet

$$\Delta p = (\rho_{kv} - \rho_{va}) \cdot g \cdot h .$$

Då sedan inga stötförluster förekommer kan friktionsfaktorn f_1 beräknas ur sambandet

$$\Delta p = f_1 \cdot \rho_{kb} \cdot w^2 \cdot L/d .$$

Δp = tryckfallet

f_1 = friktionsfaktorn

g = tyngdaccelerationen

h = höjden

w = köldbärarens medelhastighet

L = rörlängden

ρ_{kv} = densiteten för kvicksilver

ρ_{va} = densiteten för vatten

ρ_{kb} = densiteten för köldbäraren

5 RESULTAT

Resultaten från proven redovisas här i diagramform. Diagram 5.1.1-5.4.2 är uttryckta helt i dimensionslös form. Detta medför att oavsett vid vilken temperatur som försöken har utförts vid, så skall försöken sammanfalla med de teoretiska sambanden. Om försöken ej sammanfaller med de teoretiska sambanden kan således ämneskonstanterna vara felaktiga.

Försöksanläggningen har dock främst anpassats till den turbulenta strömningen genom att strömningen störts vid inloppet. Man får då en större avvikelse mellan försöksvärdena och det laminära sambandet då mätsträckan är relativt kort (4m).

5.1 Kaliumkarbonat (ämnesdata från Å. Melinder)

I diagram 5.1.1 och 5.1.2 redovisas prov med kaliumkarbonat och vatten vars ämneskonstanter är tagna från Å. Melinder.

Diagram 5.1.1 visar värmeövergången som funktion av Reynolds' talet. Försöken överensstämmer väl med det empiriska sambandet för turbulent strömning.

Diagram 5.1.2 visar friktionen f_1 som funktion av Reynolds' talet. Här visar försöken också en god överensstämmelse med sambanden. Detta bekräftar då att data över ämneskonstanterna för kaliumkarbonat och vatten är riktiga.

5.2 Kalciumklorid (ämnesdata från litteraturen)

I diagram 5.2.1 och 5.2.2 redovisas prov med kalciumklorid och vatten vars ämneskonstanter är tagna från litteraturen.

Diagram 5.2.1 visar värmeövergången som funktion av Reynolds' talet. Försöken visar här en sämre överensstämmelse med det empiriska sambandet för turbulent strömning. Det är vid -10 och -20°C som avvikelsen är störst. Försöksvärdena vid -20°C visar att omslagsområdet mellan laminär och turbulent strömning sker strax över $Re = 2000$.

Här verkar ämneskonstanterna vara något felaktiga. Ju lägre temperatur desto större fel. Den ämneskonstant som varierar mest med temperaturen är viskositeten. En del viskositetsprov på kalciumklorid och vatten har tidigare utförts av Å. Melinder. Dessa prov visade lägre värden på viskositeten vid låga temperaturer än de som erhålls från litteraturen (jfr 5.3).

Diagram 5.2.2 visar friktionstalet f_1 som funktion av Reynolds' talet för kalciumklorid och vatten. Även här visar försöken en sämre överensstämmelse och tendensen att överslagsområdet sker vid lägre Reynolds' tal för lägre temperaturer syns också tydligt.

5.3 Kalciumklorid (ämnesdata från Å. Melinder)

I diagram 5.3.1 och 5.3.2 redovisas försök från kalciumklorid och vatten vars ämneskonstanter är tagna från en provserie av Å. Melinder, se (2).

Diagram 5.3.1 visar värmeövergången som funktion av Reynolds' talet. Försöken visar ett klart bättre sammanfallande av försöksvärdena utefter det turbulenta sambandet samt att omslaget uppskjutits över $Re = 2300$. Detta styrker då att viskositeten för kalciumklorid och vatten kan vara lägre än de som erhålls ifrån litteraturen vid låga temperaturer.

Diagram 5.3.2 visar friktionsfaktorn f_1 som funktion av Reynolds'talet för kalciumklorid och vatten. Även här visar försöken en bättre överensstämmelse med teorin. Omslaget till turbulent strömning sker också ovanför $Re = 2300$ för de olika temperaturerna.

5.4 Etylenglykol (ämnesdata från litteraturen)

I diagram 5.4.1 och 5.4.2 redovisas prov från etylenglykol och vatten vars ämneskonstanter är tagna från litteraturen.

Diagram 5.4.1 visar värmeövergången som funktion av Reynolds' talet. Försöken visar godtagbar överensstämmelse med det empiriska turbulenta sambandet. Spridningen av försöksvärdena är större än för kaliumkarbonat. Detta beror troligen på att då viskositeten ökar drastiskt vid låga temperaturer försvåras uttagningen av det rätta värdet i viskositetsdiagrammet.

Diagram 5.4.2 visar friktionstalet f_1 som funktion av Reynolds' talet. Försöksvärdena visar också här en godtagbar överensstämmelse med sambanden även om resultaten för -10°C konsekvent avviker. Resultat för omkringliggande temperaturer faller dock väl in i förväntat mönster.

Värmeövergångsförsök med kalium-
 karbonat och vatten.
 Fryspunkt ca -25°C .
 Ämnesdata från Å. Melinder

o = 10°C
 # = 0°C
 * = -10°C
 + = -20°C

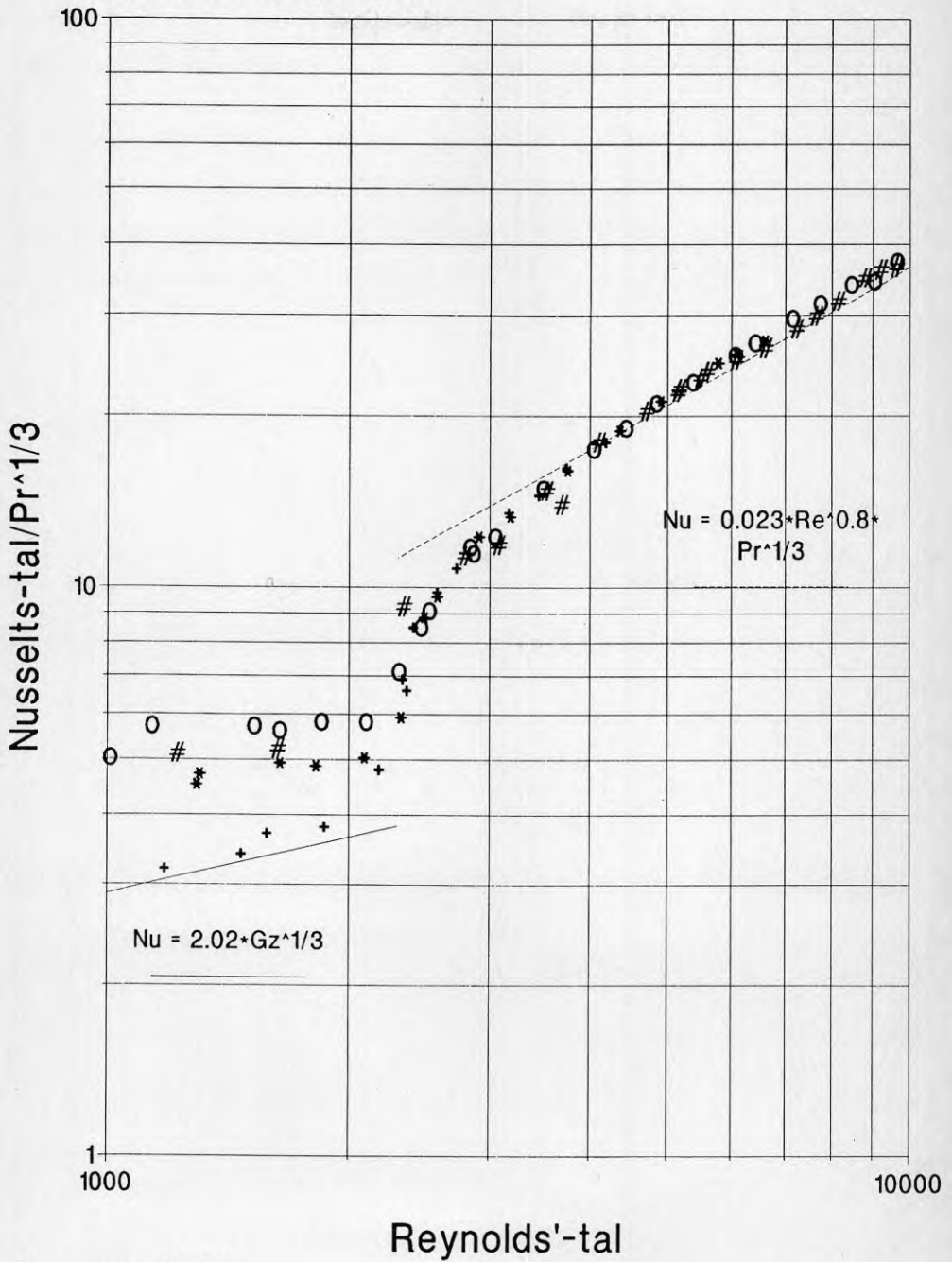


Diagram 5.1.1

Kaliumkarbonat och vatten.
Frysunkt ca -25°C.
Ämnesdata från Å. Melinder

o = 10°C
= 0°C
* = -10°C
+ = -20°C

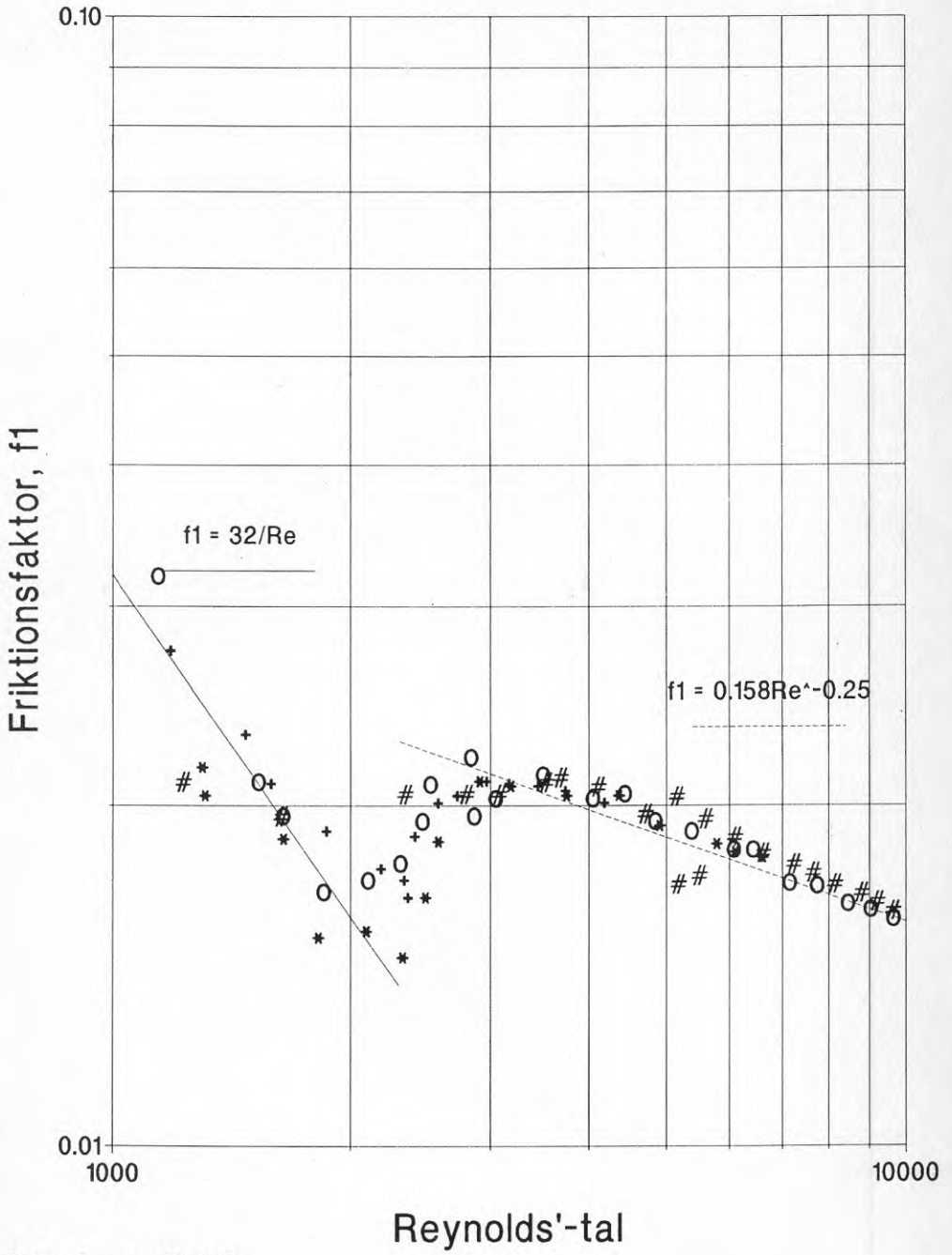


Diagram 5.1.2

Värmeövergångsförsök med kalciumklorid
och vatten.
Frys punkt ca -25°C .
Ämnesdata från litteraturen

o = 10°C
= 0°C
* = -10°C
+ = -20°C

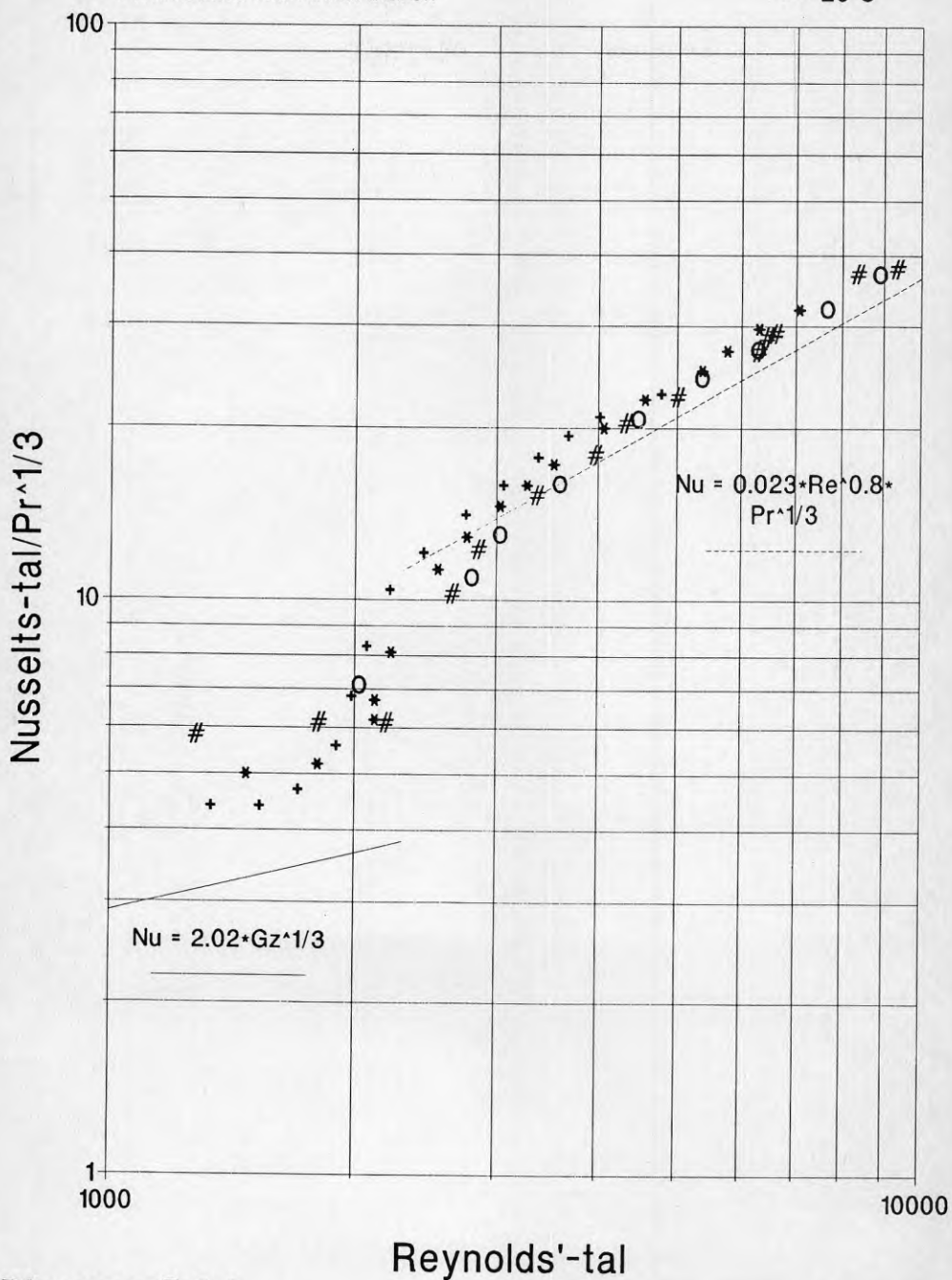


Diagram 5.2.1

Kalciumklorid och vatten.
 Fryspunkt ca -25°C .
 Ämnesdata från litteraturen

o = 10°C
 # = 0°C
 * = -10°C
 + = -20°C

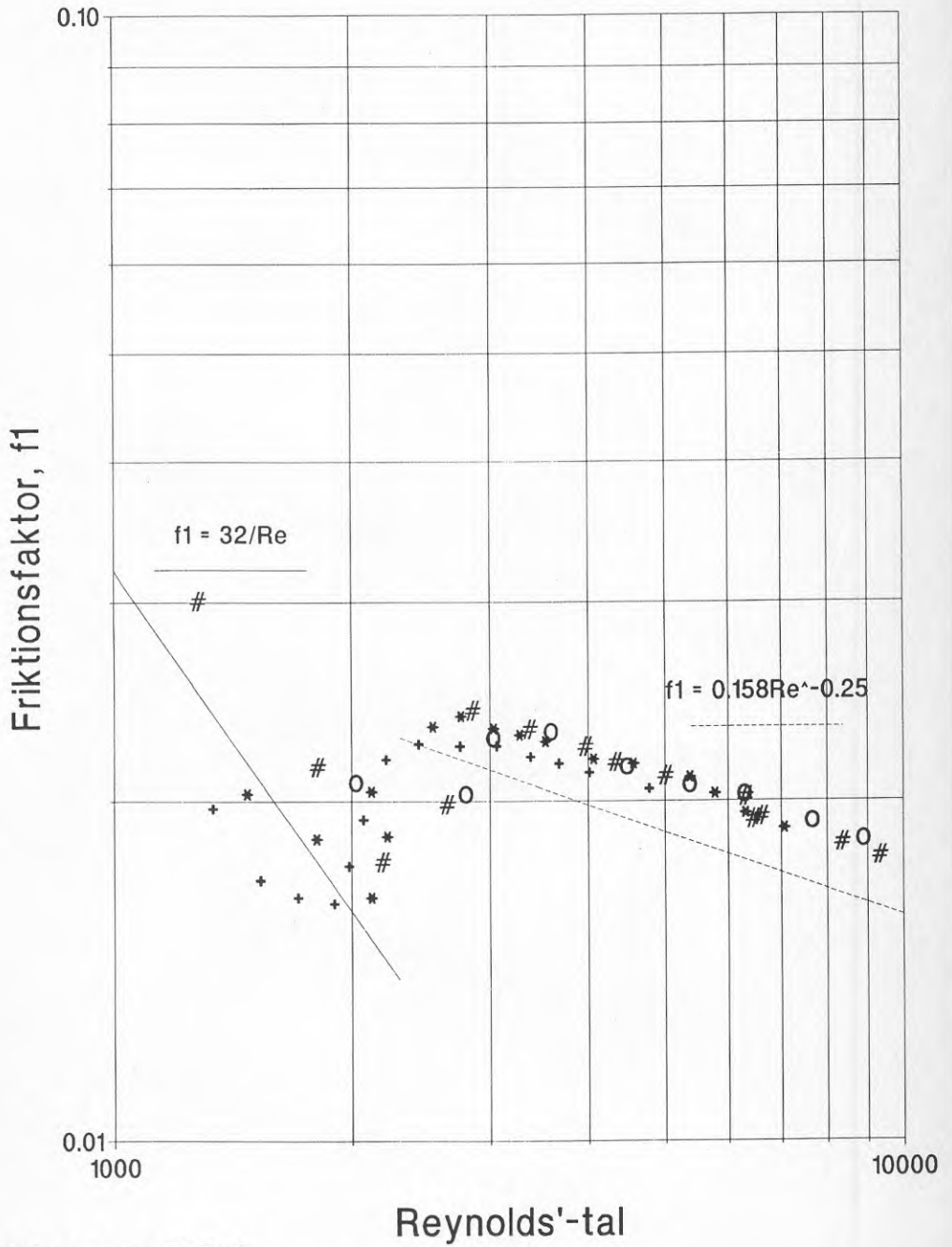


Diagram 5.2.2

Värmeövergångsförsök med kalciumklorid
och vatten.
Frys punkt ca -25°C .
Ämnesdata från Å. Melinder

o = 10°C
= 0°C
* = -10°C
+ = -20°C

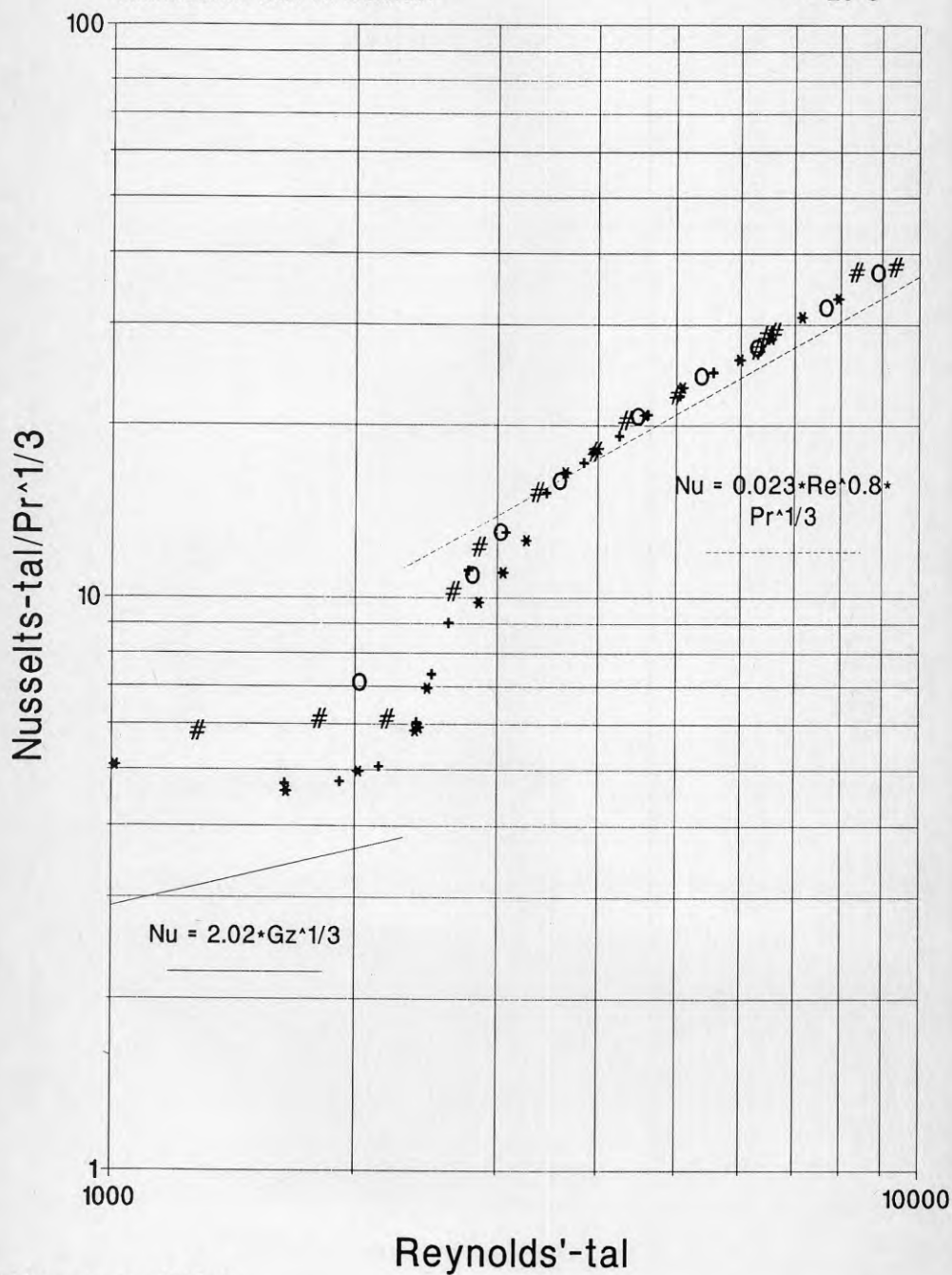


Diagram 5.3.1

Kalciumklorid och vatten.
 Fryspunkt ca -25°C.
 Ämnesdata från Å. Melinder

o = 10°C
 # = 0°C
 * = -10°C
 + = -20°C

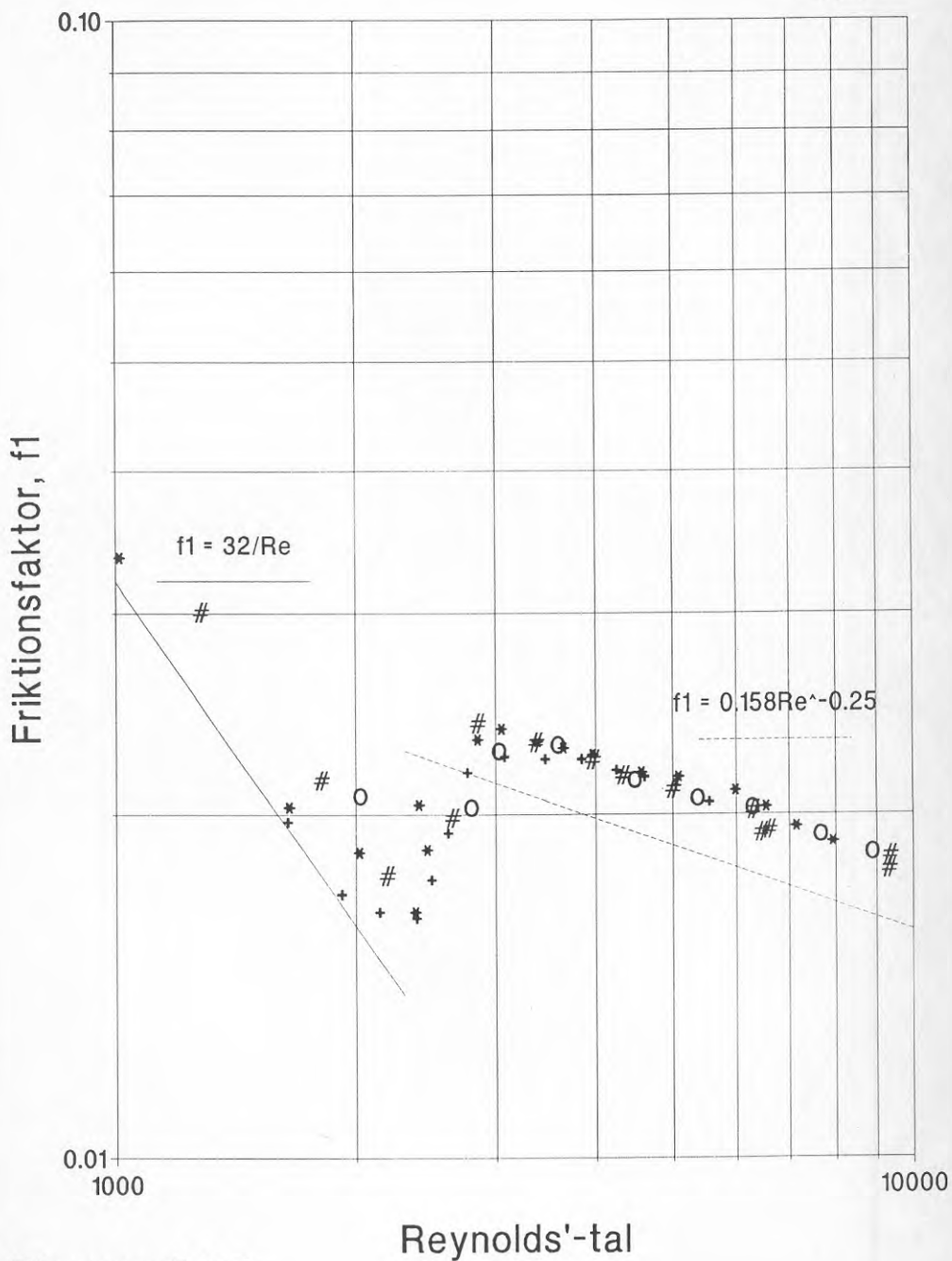


Diagram 5.3.2

Värmeövergångsförsök med etylenglykol
och vatten.
Frys punkt ca -25°C .
Ämnesdata från litteraturen

o = 10°C
= 0°C
* = -10°C
+ = $-15 - (-20)^{\circ}\text{C}$

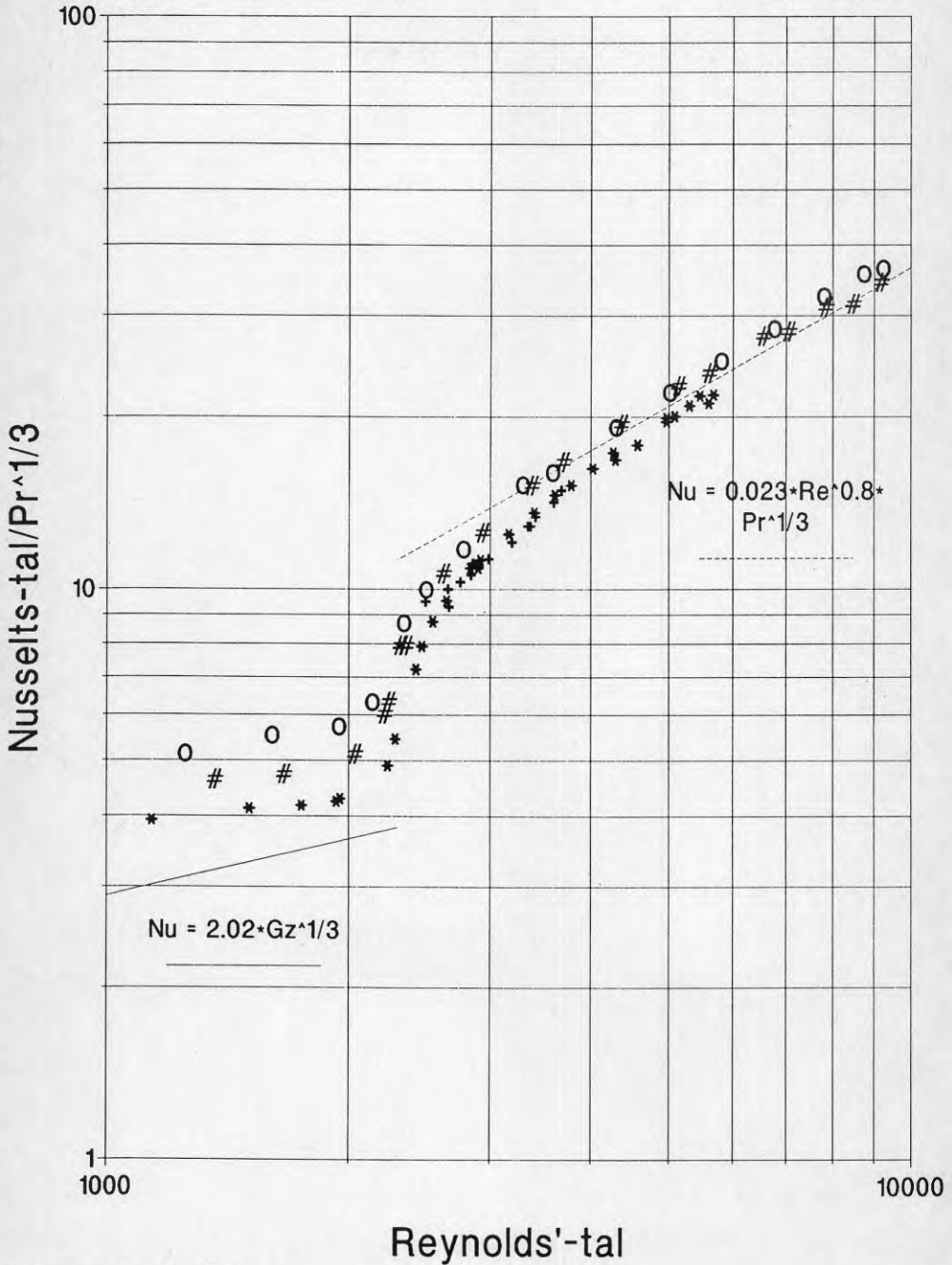


Diagram 5.4.1

Etylenglykol och vatten.
 Fryspunkt ca -25°C .
 Ämnesdata från litteraturen

o = 10°C
 # = 0°C
 * = -10°C
 + = $-15 - (-20)^{\circ}\text{C}$

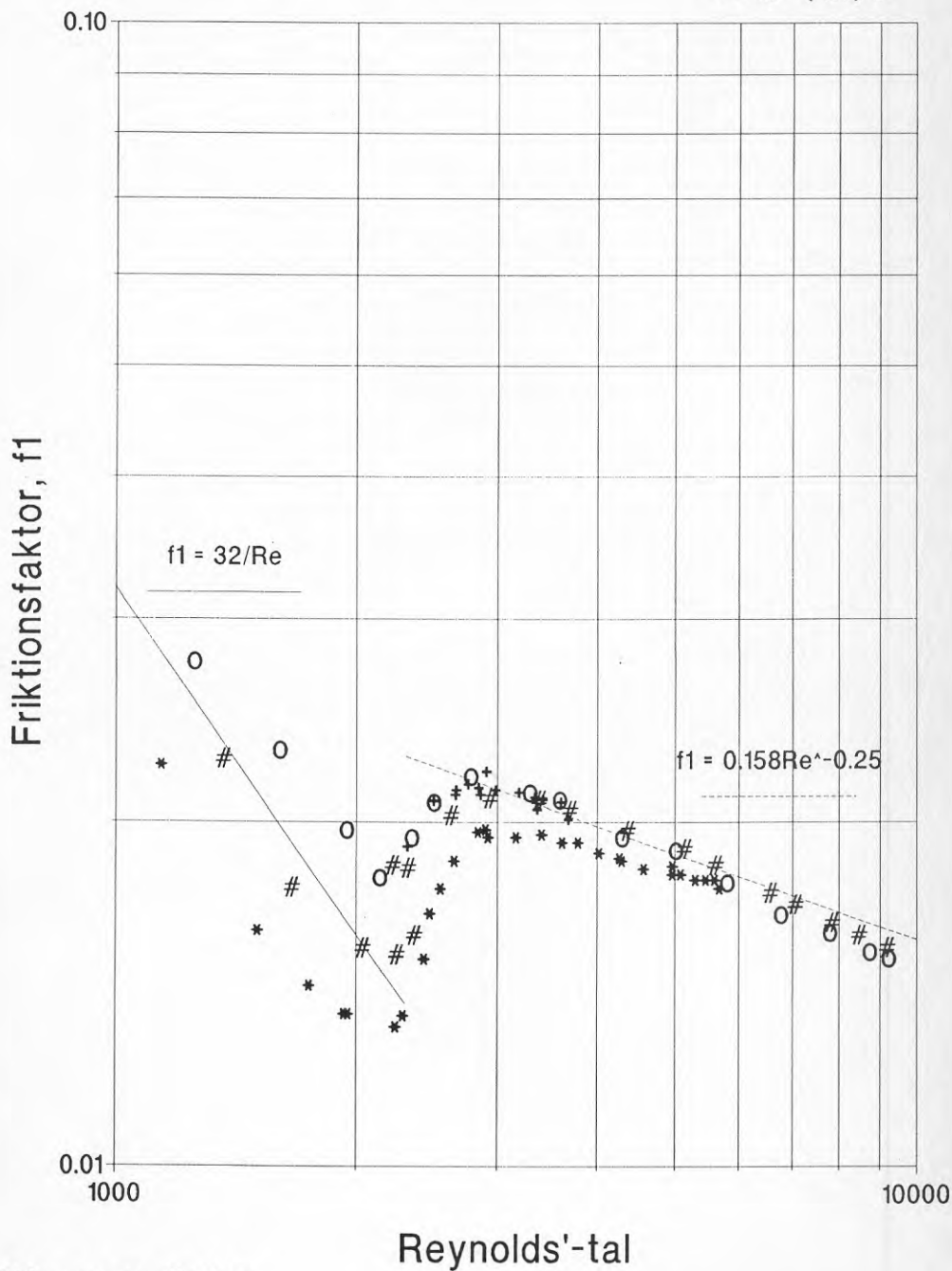


Diagram 5.4.2

5.5 Jämförelse av värmeövergången för de olika köldbärarna.

För att direkt jämföra de olika köldbärarnas värmeövergångstal har försöksvärdena införts vid en och samma temperatur i diagrammen 5.5.1 och 5.5.2. Värmeövergångstalet är satt som funktion av volymflödet och diagrammen gäller för rördiametern 15 mm.

Diagram 5.5.1 gäller för 0°C och diagram 5.5.2 för -10°C. Av försöken erhålls det högsta värmeövergångstalet för kalciumklorid då köldbärarna jämförs vid samma volymflöde. Därefter kommer kaliumkarbonat och till sist etylenglykol.

5.6 Jämförelse av tryckfallet för de olika köldbärarna

Liksom den föregående jämförelsen av värmeövergångstalet har även tryckfallet över mätsträckan jämförts för de olika köldbärarna. Detta visas i diagrammen 5.6.1 och 5.6.2 där tryckfallet visas som funktion av volymflödet. Diagrammen gäller för rördiametern 15 mm.

Diagram 5.6.1 gäller för 0°C och diagram 5.6.2 för -10°C. Försöksvärdena visar en stor tryckskillnad inom ett mindre volymflödesområde. Detta beror på att omslaget mellan laminär och turbulent strömning sker vid olika volymflöden för de olika köldbärarna.

5.7 Jämförelse av friktionsfaktorn för de olika köldbärarna.

Diagram 5.7.1 visar friktionsfaktorn f_1 för de olika köldbärarna som funktion av Reynolds' talet. Ämneskonstanterna för de olika köldbärarna är tagna från litteraturen. Försöksvärdena ansluter sig väl till de empiriska sambanden. Man kan dock urskilja att för det turbulenta området ligger kalciumkloridens värden högst, sedan följer kaliumkarbonat och till sist etylenglykolen. Friktionsfaktorn har tydligen en tendens att minska något när viskositeten ökar.

Värmeövergångsförsök vid 0°C för
kaliumkarbonat, kalciumklorid samt
etylenglykol med en frysp. på ca -25°C
Rördiameter 15 mm

* = kaliumkarbonat
o = kalciumklorid
+ = etylenglykol

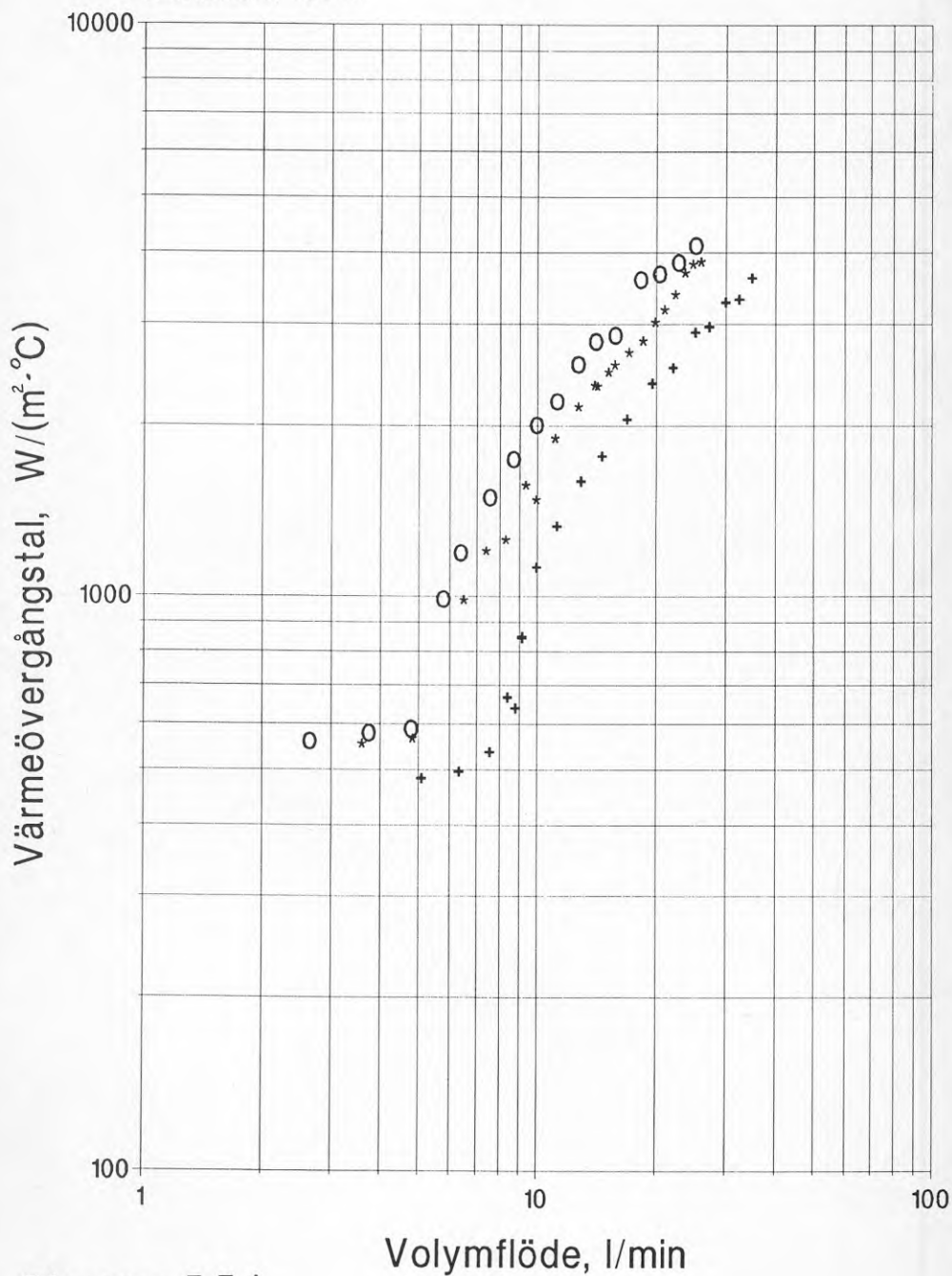


Diagram 5.5.1

Värmeövergångsförsök vid -10°C för
 kaliumkarbonat, kalciumklorid samt
 etylenglykol med en frysp. på ca -25°C
 Rördiameter 15 mm

* = kaliumkarbonat
 o = kalciumklorid
 + = etylenglykol

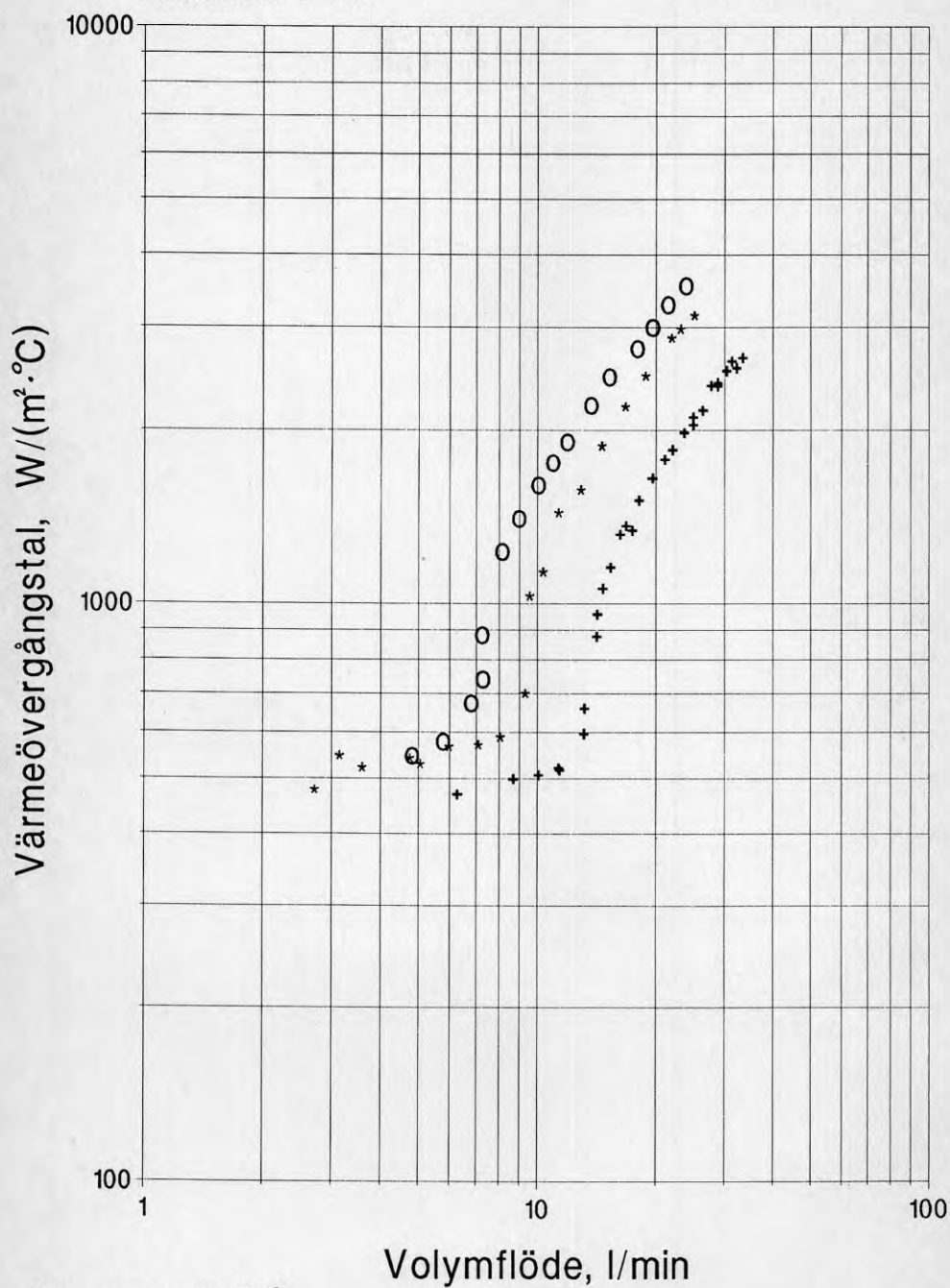


Diagram 5.5.2

Tryckfallsförsök vid 0°C för
kaliumkarbonat, kalciumklorid samt
etylenglykol med en frysp. på ca -25°C
Rördiameter 15 mm

* = kaliumkarbonat
o = kalciumklorid
+ = etylenglykol

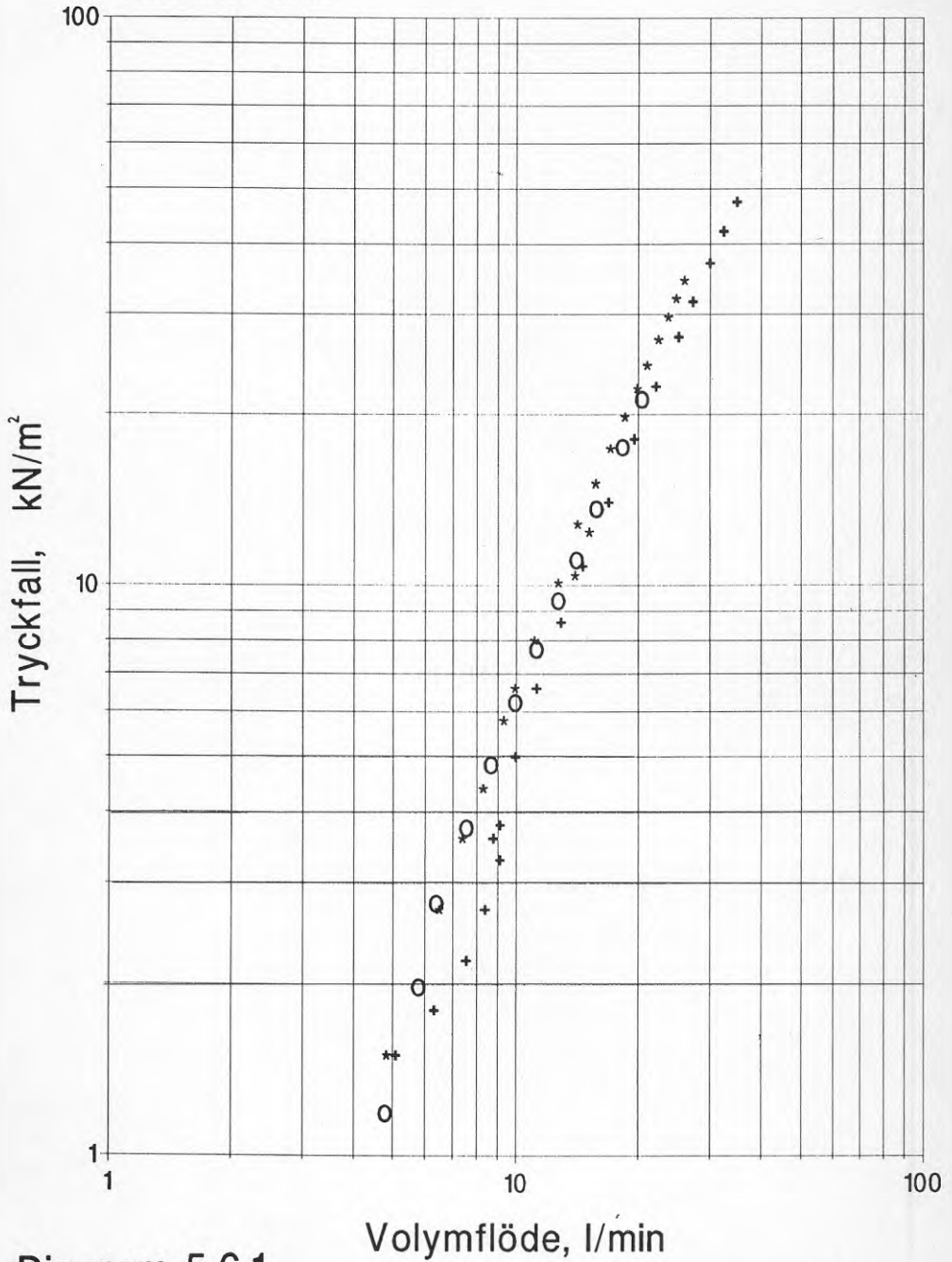


Diagram 5.6.1

Tryckfallsförsök vid -10°C för
kaliumkarbonat, kalciumklorid samt
etylenglykol med en frysp. på ca -25°C
Rördiameter 15 mm

* = kaliumkarbonat
o = kalciumklorid
+ = etylenglykol

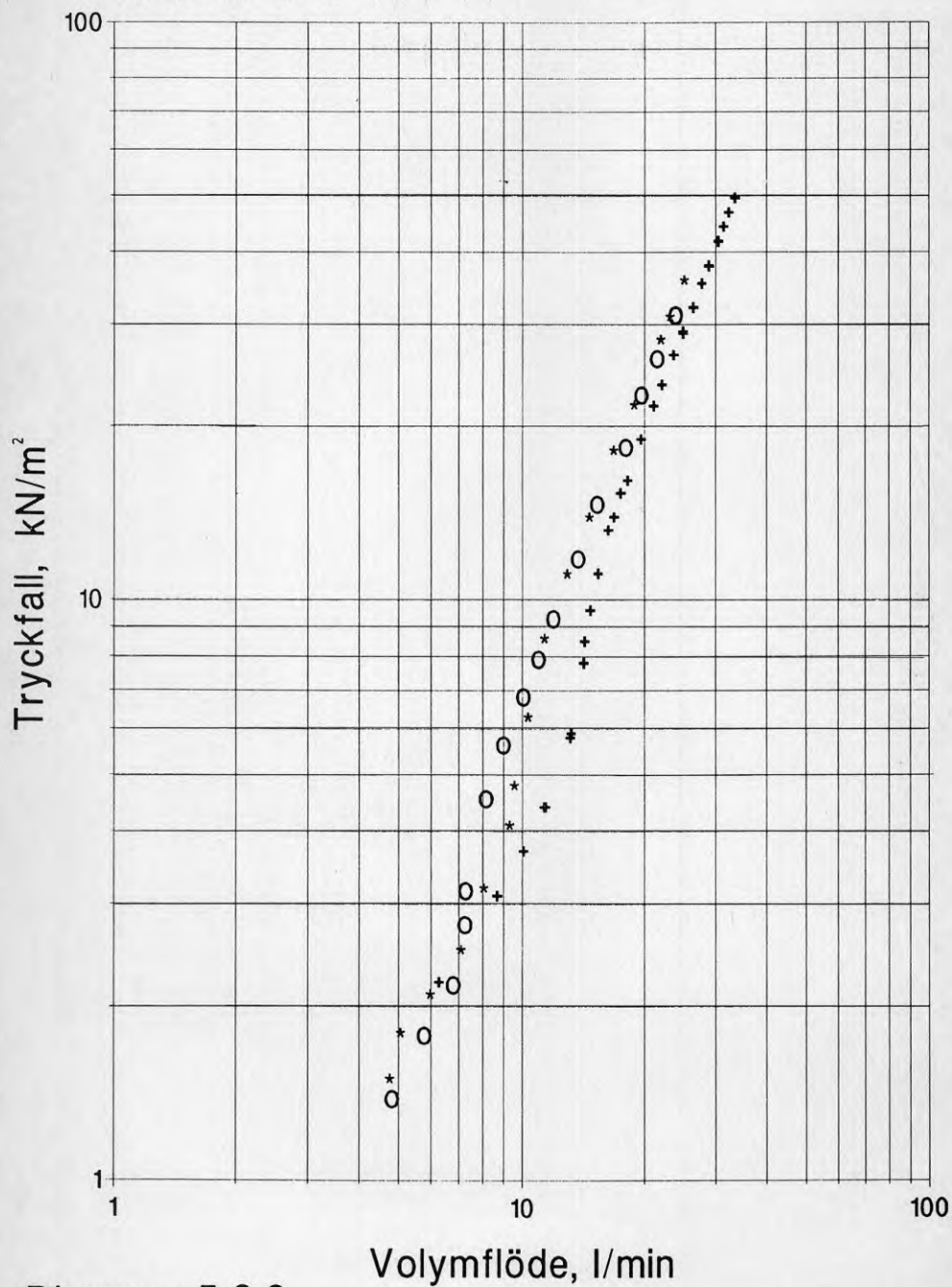


Diagram 5.6.2

Diagram över friktionsfaktorn f_1 för kaliumkarbonat, kalciumklorid samt etylenglykol med en frysp. på ca -25°C . Ämnesdata från litteraturen.

* = kaliumkarbonat
o = kalciumklorid
+ = etylenglykol

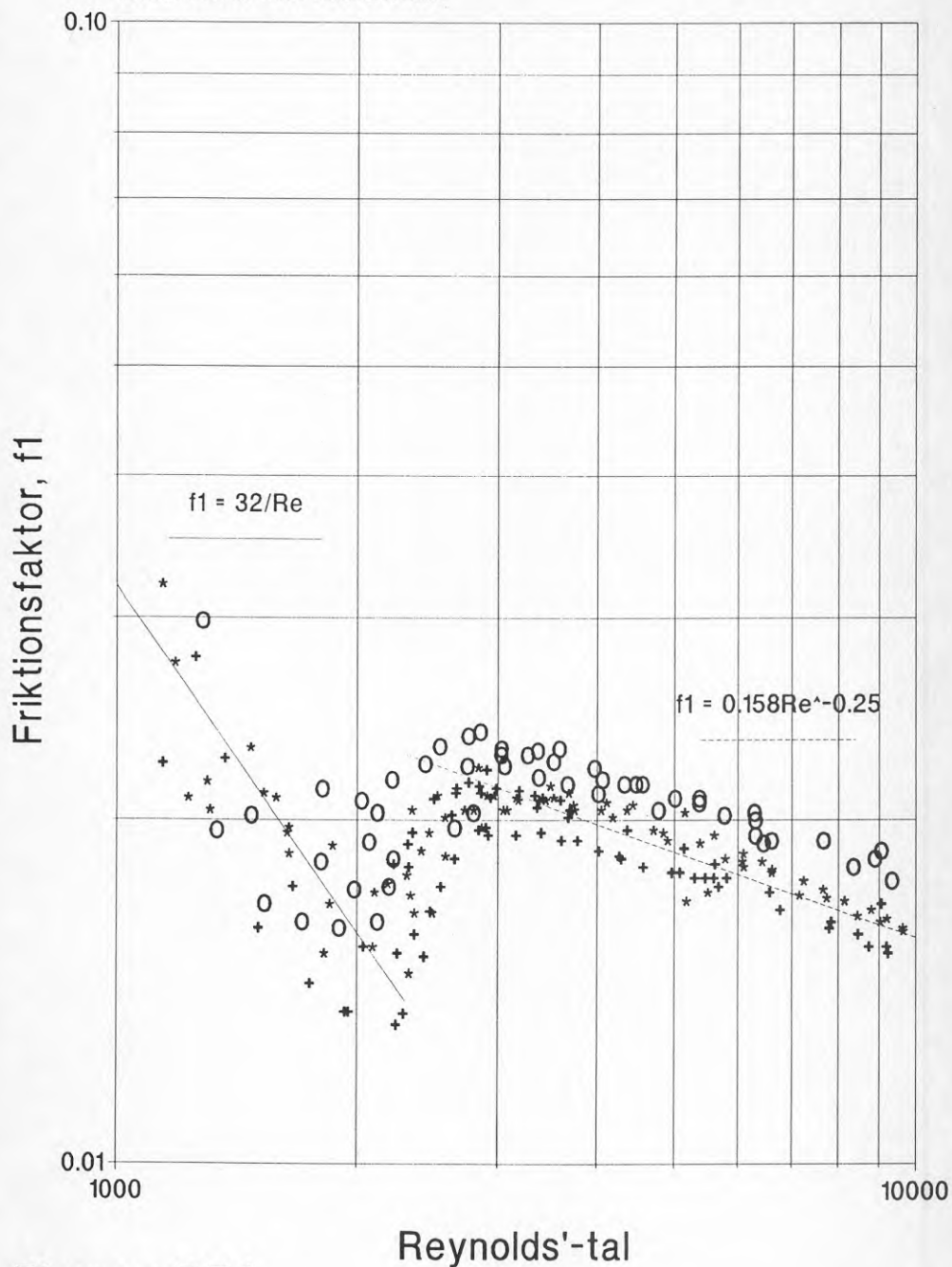


Diagram 5.7.1

5.8 Påverkan av övergången mellan laminär och turbulent strömning

Diagram 5.8.1 visar värmeövergången som funktion av Reynolds'talet för en vid inloppet störd och icke störd strömning, se fig 5.8.2. Försöken är gjorda med kaliumkarbonat vid -10°C .

Man får enligt diagrammet för den icke störda strömningen en förskjutning av omslagsområdet, mellan laminär och turbulent strömning. Omslagsområdet har förskjutits från ca $Re = 2300$ till ca $Re = 3000$. Detta innebär att man fortfarande har laminära förhållanden fastän man passerat den annars så magiska gränsen på ca $Re = 2300$.

För att undvika förskjutningen av omslagsområdet bör strömningen vara störd vid inloppet. Till exempel med skarpa kanter eller dylikt.

Med en störd strömning vid inloppet säkerställs omslaget till turbulent strömning vid ca $Re = 2300$.

Ju högre Reynolds'talet är desto högre blir värmeövergången. Men med ett högre Reynolds'tal följer också ett högre pumparbete samt risken för att turbulensen lokalt sett blir så stor att fenomenet turbulenskorrosion (erosionskorrosion) uppträder.

5.9 Lokala värden över värmeövergången

I diagram 5.9.1 redovisas värmeövergångsförsök med kaliumkarbonat och vatten vid -10°C . För varje försök visas de lokala värdena på värmeövergången utefter mätsträckan.

För det turbulenta området är värmeövergången något sånär lika vid de olika snitten. Vandrar man sedan ned mot det laminära området, visar det sig att värmeövergången för det första snittet ligger långt över de övriga.

Vid det första lokala snittet, som ligger 0.5 m in från inloppet, följer värmeövergången mera det turbulenta sambandet än det laminära.



Fig 5.8.2

- Koniskt inlopp som ej stör strömningen.
- Samma koniska inlopp som i fig a. Men med ett kort ogradat rör instuckat som stör strömningen.

Värmeövergångsförsök med kaliumkarbonat vid -10 °C

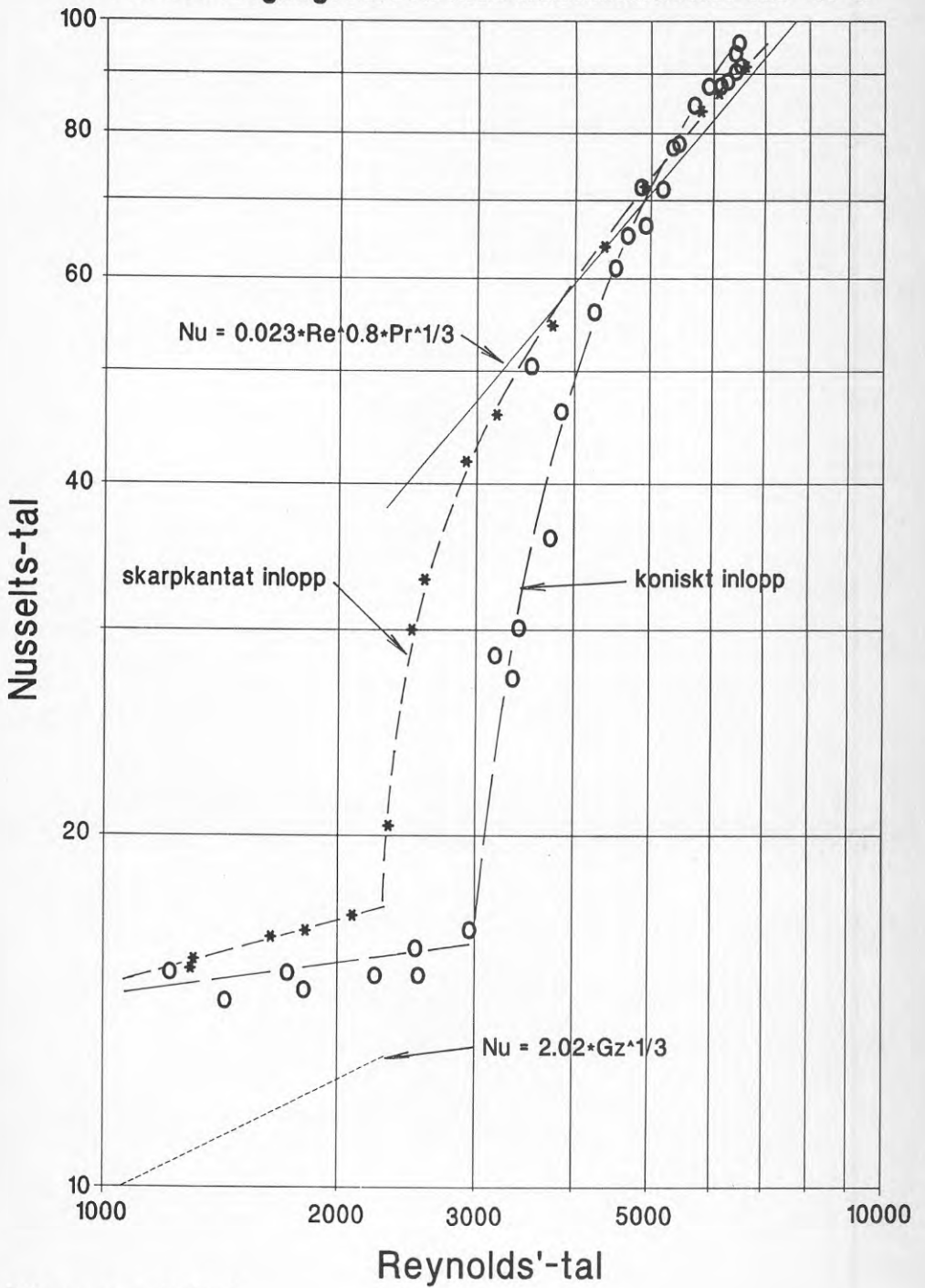


Diagram 5.8.1

Värmeövergångsförsök med kaliumkarbonat vid -10 °C

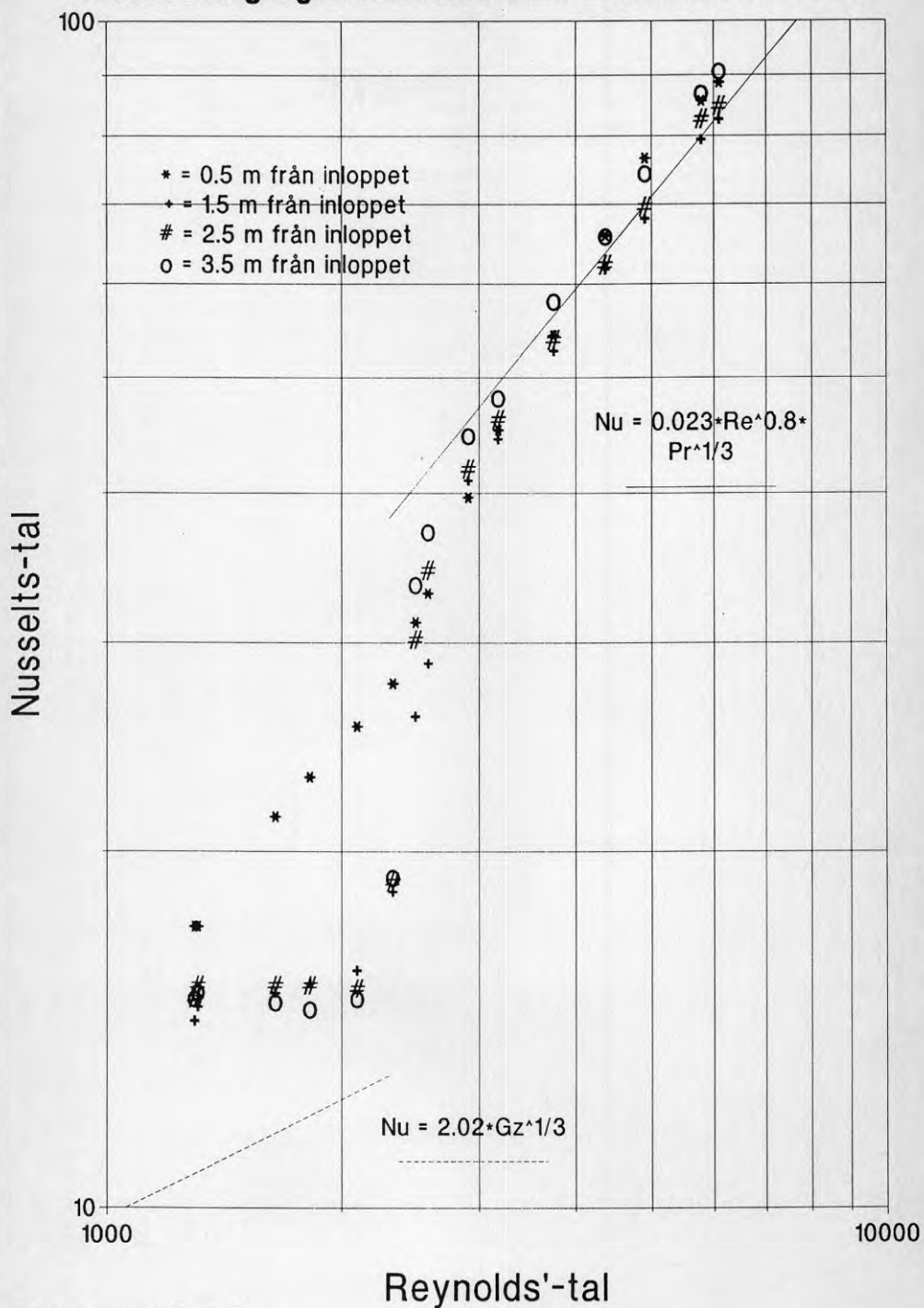


Diagram 5.9.1

LITTERATUR

- (1) Pierre, Bo: Kompendium i Mekanisk värmeteori fortsättningskurs., Inst. Mekanisk värmeteori och kylteknik, KTH, Stockholm, 1982.
- (2) Melinder, Åke: Köldbärare för värmepumptillämpningar., BFR-rapport R114:1985.
- (3) Ljung L., Olin C., Tollin J.: Köldbärare i värmepumps- och värmeåtervinningssystem. BFR-rapport R11:1986.
- (4) Kyrk, Björn: Värmeövergång och tryckfall vid strömning i rör för köldbärare. (fullständig intern rapport), Inst. Mekanisk värmeteori och kylteknik, KTH, Stockholm, 1988.

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 841139-5 från
Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för
Mekanisk värmeteori och kylteknik, Tekniska högskolan,
Stockholm.

R18: 1989

ISBN 91-540-4985-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709018

Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang

Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna

Cirka pris: 50 kr exkl moms