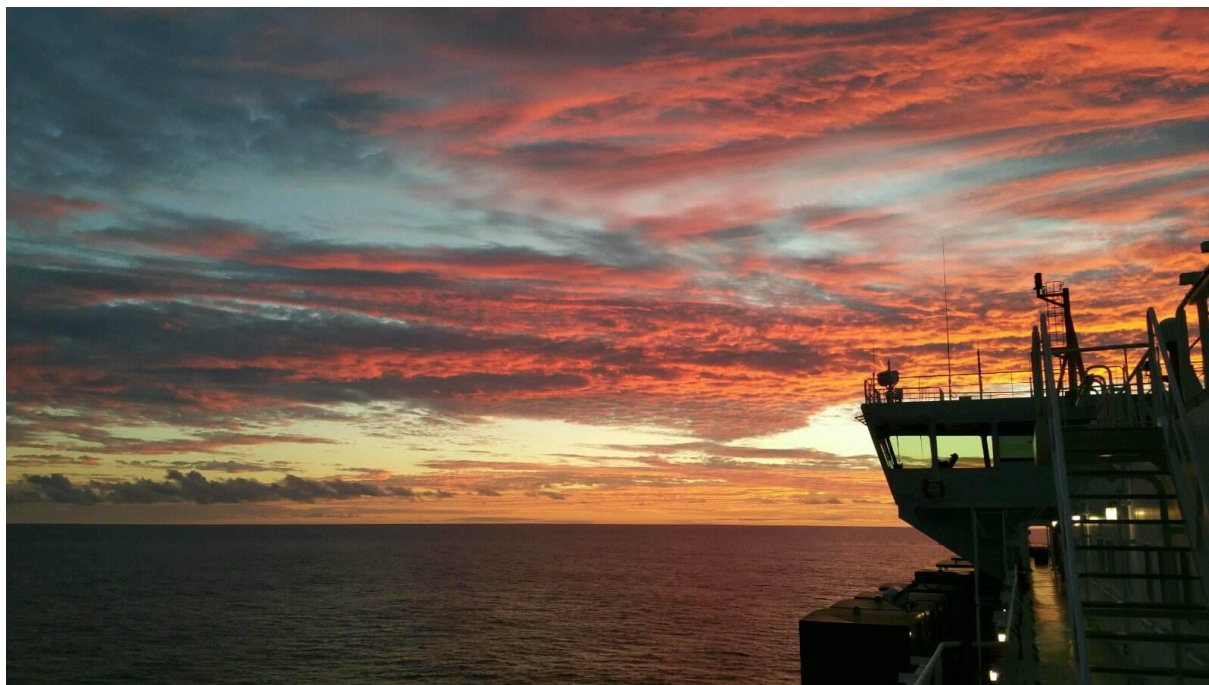




CHALMERS



Energitillförsel till kylanläggningar och dess påverkan på växthusgasutsläpp

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

PATRIK BERNDTSSON

PATRICK TILLMAN

RAPPORTNR. SI-18/213

Energitillförseln till kylanläggningar och dess påverkan på växthusgasutsläpp

PATRIK BERNDTSSON
PATRICK TILLMAN

Institutionen för sjöfart och marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, år 2017

Energitillförselns påverkan på kylanläggningar och dess påverkan på växthusgasutsläpp

The Energy production on refrigeration facilities and its influence on greenhouse gas emissions.

PATRIK BERNDTSSON
PATRICK TILLMAN

© PATRIK BERNDTSSON, 2017.

© PATRIK TILLMAN, 2017.

Rapportnr. SI-18/213
Institutionen för sjöfart och marin teknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Fartygsbrygga i solnedgång (författarnas egen bild 2016)

Tryckt av Chalmers
Göteborg, Sverige, år 2017

Energitillförselns påverkan på kylanläggningar och dess påverkan på växthusgasutsläpp

PATRIK BERNDTSSON

PATRICK TILLMAN

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Denna studie har haft som syfte att utröna hur ett byte av köldmedium i befintliga kylanläggningar påverkar växthusgasutsläppen med inriktning på energitillförseln för driften av kylanläggningen och dess CO₂ utsläpp. Metoden har varit att ta fram driftsdata med hjälp av en simulator och komplettera med anläggningsdata från verkliga fartyg.

Det finns ett par olika beräkningsmodeller för att beräkna miljöpåverkan på kylanläggningar där man även tar hänsyn till energiproduktionens miljöpåverkan. TEWI (Total Equivalent Warming Potential) är den metod som valts i denna studie.

I de beräkningarna som utförts påvisas att byte till nya mer miljövänliga köldmedier i gamla anläggningar medför en ökad miljöpåverkan främst i form av CO₂ utsläpp. Det visar sig att energibehovet i gamla anläggningar som är optimerade för gamla köldmedier ökar och därmed kräver mera energiproduktion.

Det visar sig också att landanslutningar, dock beroende på var i världen anslutningen sker, jämfört med egenproducerad energi ger en minskad miljöpåverkan. Främst beroende på att landbaserad energi ofta är mer miljövänligt producerad än den vanligaste formen på fartyg som är dieseltillverkad.

Nyckelord: **GWP** (Global Warming Potential), **LCCP** (Life Cycle Climate Performance) och **TEWI** (Total Equivalent Warming Potential), **CO₂** (Koldioxid)

Abstract

This study has aimed to determine how a change of refrigerants in existing refrigeration plants affect greenhouse gas emissions by focusing on energy production for the operation of the cooling system and its CO₂ emissions. The method has been to generate operating data using a simulator and supplementing real-time vessel data.

There are a few different calculation models to calculate environmental impact on refrigeration plants, which also consider the environmental impact of energy production. In this study, the TEWI (Total Equivalent Warming Potential) method is used.

In the calculations performed demonstrated that switching to new, more environmentally friendly refrigerants in older plants results in an increased environmental impact mainly in the form of CO₂ emissions. It turns out that the energy needs of old plants optimized for old refrigerants increase and thus require more energy production.

It also turns out that a shore connection, depending on where in the world, reduce the environmental impact, mainly because land-based energy is often more environmentally-friendly than the most common form of vessel diesel produced energy.

Keywords: **GWP** (Global Warming Potential), **LCCP** (Life Cycle Climate Performance) and **TEWI** (Total Equivalent Warming Potential), **CO₂** (Carbon Oxide)

Förord

Arbetet som genomförts som en del i studiearbetet med att erhålla nödvändiga behörigheter för framtida yrkesval har varit inspirerande och till viss del även lärorik då nya kunskaper samt överraskande resultat framkommit.

Författarna skulle vilja tacka vår handledare Cecilia Gabrielli och Henrik Pahlm för den vägledning och förslag som gavs under arbetets gång. Kylmaskinisterna ombord på M/V Superstar Virgo som har bidragit med verklighetsbaserade data som ej kunde erhållas ifrån simulatorn som användes i arbetet vilket möjliggjorde att ett resultat kunde erhållas. Våra familjer som korrekturläst och stått ut med oss, även vänner som trodde på oss och gav stöd under arbetets gång. Chalmers tekniska högskola som har låtit oss använda simulatorutrustningen för att införskaffa nödvändiga data för genomförda beräkningar.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	ii
Abstract.....	iv
Förord	vi
1 Inledning.....	1
1.1 Syfte.....	2
1.2 Frågeställning.....	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Bakgrund.....	3
2.1 Växthusgaser.....	3
2.2 GWP - Global Warming Potential.....	3
2.3 TEWI – Total Equivalent Warming Impact	4
2.3.1 Vad är TEWI	4
2.3.2 Faktorer och Parametrar som används i TEWI	5
2.4 LCCP – Life Cycle Climate Performance	5
2.5 Beskrivning av en kylanläggning	6
2.5.1 Kompressor	7
2.5.2 Kondensorn	7
2.5.3 Expansionsventil.....	7
2.5.4 Förångare	7
2.5.5 Köldmedium	7
2.6 Kort fakta om valda köldmedium.....	7
2.6.1 R22.....	7
2.6.2 R134A	8
2.6.3 R404A	8
2.6.4 R407C.....	8
2.7 Simuleringskörning av kylanläggning	8
2.7.1 Simulatormodell specifikationer	9
2.8 Energitillförsel ombord på fartyg	11
3 Metod.....	13
3.1 Introduktion beräkningar	13
3.2 Beräkningar	14
3.2.1 Verkningsgraden	14

3.2.2	Processens ideala (Δi) -värden	15
3.2.3	Mängd köldmedium i systemet.....	15
3.2.4	Beräkning emissionsfaktor	16
3.2.5	Övriga parametrar	16
4	Resultat.....	17
5	Diskussion	19
5.1	<i>Resultatdiskussion</i>	<i>19</i>
5.2	<i>Metoddiskussion.....</i>	<i>19</i>
6	Slutsatser	21
6.1	<i>Lämpliga fortsatta studier.....</i>	<i>21</i>
	Referenser	23
	Appendix	25
	<i>Superstar Virgo Data</i>	<i>25</i>
	<i>Mollierdiagram beräkningar</i>	<i>26</i>
	<i>Beräkningar</i>	<i>28</i>

Figurförteckning

Figur 1. Flödesschema för enstegs kylanläggning	6
Figur 2. Beskrivning av elsystemets uppbyggnad för generatorerna	10
Figur 3. Beskrivning elsystemets uppbyggnad för kylkompressorerna.	11

1 Inledning

Dagens kylanläggningar och dess miljöpåverkan i form av växthusgaser består främst av två delar, dels finns de direkta utsläppen i form av köldmedieläckage med väldigt stor miljöpåverkan på växthuseffekten, och sedan de indirekta utsläppen i form av koldioxid (CO₂) som härstammar ifrån elproduktionen som krävs för att driva kylanläggningarna.

En metod för att mäta de totala växthusgasutsläppen från en kylanläggning är Total Equivalent Warming Impact (TEWI). Denna metod avses att mäta både de direkta och indirekta utsläppen. De direkta utsläppen är i jämförelse med det indirekta förhållandevis enkla att uppskatta. Då mängden köldmedium i systemet är känt samt hur mycket påfyllning som sker går det att uppskatta förlusterna på grund av läckage. Det är svårare att få en uppfattning av mängden CO₂ utsläpp som elproduktionen orsakar. Speciellt när elektriciteten framställs med hjälp av generator påkopplad till dieseldriven maskin. Kylsystemet påverkas ytterligare av att många nya modernt blandade köldmedier påverkar anläggningarnas prestanda och driftansträngning och därmed även den elkonsumtion systemen kräver.

Avsikten med denna studie är att med hjälp av de modeller som finns beskrivna inom TEWI ta fram en metod som beskriver de indirekta CO₂ utsläppen. Detta genomförs med hjälp av maskinrumssimulator som kan simulera olika typer av driftlägen ombord på ett fartyg och därigenom uppskatta mängden med hjälp av TEWI-modellen.

Baserat på den miljöpåverkan som kylsystem ger är det viktigt att öka användningen av miljövänligare köldmedier i dessa. Här finns det flera metoder för att underlätta beslutsfattandet i att välja kylmedier med låg miljöpåverkan. De vanligaste metoderna för detta är GWP (Global Warming Potential), LCCP (Life Cycle Climate Performance) och TEWI (Total Equivalent Warming Potential)

GWP beräknar enbart miljöpåverkan och växthuseffekten på själva köldmedierna. Eftersom det visat sig vid byte till miljövänligare köldmedier så ändras även prestandan och således energiförbrukningen på kylanläggningen. Därav behövs ett alternativt beräkningsunderlag som ser till hela påverkan, utifrån detta har TEWI tagits fram.

Det är inte enbart köldmedierna och deras miljöpåverkan i sig som har en inverkan på växthusgasutsläppen. Det har även visat sig att det i vissa fall går åt mer energi till att driva äldre kylanläggningarna när man byter köldmedium till ett nyare och mer miljövänligt köldmedium. Byte av köldmedium sker oftast på grund av nya regelverk och lagar som förbjuder användandet av gamla köldmedium.

På grund av att det i äldre kylanläggningar inte är möjliga att optimera för de nya köldmedierna, eftersom det köldmedium som kylanläggningen konstruktion är avsedda för

skiljer sig något mot de nyare i bland annat densitet och entalpi. Detta gör att det påverkar det spektrum anläggningen är designade för att arbeta och vara effektiva inom. Vilket innebär att systemet ofta behöver arbeta hårdare och kräver mer energi som påverkar elproduktionen ombord på fartyget. Konsekvensen av detta blir då ökade CO₂ utsläpp som bidrar till negativ miljöpåverkan.

På fartyg används i allmänhet någon form av dieseldriven generator i kombination med andra sätt att producera energi såsom axelgeneratorer och turbogeneratorer. Tack vare detta blir det komplicerade beräkningar huruvida den exakta påverkan utfaller. Undersökningen syftar på att underlätta beräkningsunderlag för beslut och miljöklassning av fartyg.

1.1 Syfte

Syftet med denna studie är att komplettera GWP metoden med TEWI. Fokus är tänkt att jämföra skillnaden mellan dessa två metoder.

1.2 Frågeställning

- Vilken påverkan har olika belastningar av kylanläggningar på CO₂-utsläppen?
- Vilket resultat ger TEWI vid byte av köldmedium i befintliga anläggningar?
- Vad blir TEWI med fokus på den indirekta CO₂ påverkan?
- Vad blir skillnaden om man jämför med HFO, DO och landansluten el?

1.3 Avgränsningar

Simuleringar av energibehovet görs enbart på ett passagerarfartyg som generellt har ett mycket stort kylbehov. I simulatoranläggningen finns en sådan modell därav valdes denna.

Den del av simulatören studien avser att undersöka är enbart AC-anläggningen vid olika driftsfall och härifrån beräkna CO₂ utsläppen. Belastningsfall med dess påverkan på elförbrukning och fartygets elproducenter som kommer att begränsas till fartygets dieselgeneratorer då dessa är de vanligaste förekommande. Fartygets grundförbrukning tas inte med då den ej påverkar beräkningarna i denna analys.

Antagandet för köldmediet mängd och volym kommer att tas från ett jämförbart fartyg i förhållande till den simulatormodell som valts, och studien kommer sedan att implementera och jämföra ett antal vanliga köldmedier i beräkningarna. Antalet köldmedium som jämförs begränsas av tidsskäl till endast 4 olika.

Inga vidare studier med avseende på köldmediets övriga miljöpåverkan kommer att göras i denna studie då dessa antas ingå i GWP. Dessutom kommer inga beräkningar av GWP värden att göras eftersom dessa kan hittas i redan uträknade tabeller ifrån IPCC-utvärderingen (Intergovernmental Panel on Climate Change) från 2013 som kan hittas i olika publikationer. Beräkningar kommer endast att göras med TEWI modellen även om andra metoder beskrivs.

2 Bakgrund

2.1 Växthusgaser

Växthusgaser är gaser som påverkar jordens temperatur vid ytan. Detta sker genom växthusgasernas förmåga att släppa igenom solstrålar och värme men också att absorbera och behålla den värme som försöker stråla ut från jorden i form av infraröd strålning. Växthusgaser finns i naturlig form i atmosfären exempelvis vattenånga, Ozon, CO₂, Metan, och Dikväveoxid. Det är framförallt människans påverkan i form av förbränning av fossila bränslen där frigörelse av främst CO₂ förändrar den balans som råder och på så sätt ökar medeltemperaturen på jorden med allt vad det innebär. (*Växthusgaser 2011*)

2.2 GWP - Global Warming Potential

GWP är ett mått på förmågan hos en växthusgas att bidra till globala uppvärmningen den medverkar till. Skalan är relativ och jämför den aktuella gasens klimatpåverkan med effekten av samma mängd CO₂. (*KTH 2014*)

GWP-värdet påverkas av följande faktorer:

- Hur effektiv gasen absorberar infraröd strålning
- I vilka delar av det infraröda våglängdsområdet som gasen absorberar strålning
- Livslängden på gasen när den befinner sig i atmosfären

En gas som har lång livslängd i atmosfären samt effektivt absorberar infraröd strålning får således ett högt GWP-värde enligt givna resultat ifrån litteraturen.

GWP-värdet beror också på vilken tidsrymd beräkningarna avser. De flesta fall utgår ifrån effekterna utsläppen ger på en hundraårs period. Beräkningar av de olika växthusgasernas GWP-värden redovisas i utvärderingar som regelbundet genomförs av FN:s klimatpanel (IPCC). Dessa uppdateras löpande då ny kunskap samt förståelse för effekterna förbättras över tid.

GWP värdet beräknas enligt formel: (*KTH 2014, IPCC 2013*)

$$GWP_i(H) = \frac{\int_0^H RF_i(t)dt}{\int_0^H RF_{CO_2}(t)dt}$$

Där RF står för strålningsdrivning (eng. Radiative Forcing) som kan definieras som nettoförändringen i jordens energibalans orsakad av en given störning, tex utsläpp av en växthusgas.

Exempel på GWP-värden som är framtagna. (Naturvårdsverket, 2017)

Type	Product R-number	GWP
HCFC	R22	1700
HFC	R134A	1430
HFC	R404A	3706
HFC	R407C	1774

2.3 TEWI – Total Equivalent Warming Impact

2.3.1 Vad är TEWI

TEWI är en beräkningsmetod där hänsyn tas till totala påverkan av växthusgaser under användandet av en kylutrustning samt avfallet av förbrukat köldmedium som används i en kylanläggning. TEWI tar hänsyn till utsläpp ifrån själva elproduktionen av den energi som åtgår att driva enheten. Metoden beräknar mängden CO₂ i kg som påverkar miljön vilket i sin tur är känt enligt flera undersökningar vilket studien inte går in på djupare i denna rapport. Det är en av de faktorer som påverkar växthuseffekten negativt globalt med de effekter som därav åsamkas. (*Australien institute 2012*)

TEWI blev framtaget i och med behovet av ett verktyg som beräknar totala utsläppen av växthusgaser. Detta behov har växt fram över tiden i samband med att fokus har ökat inom detta område, bland annat via Kyotoprotokollet 1997. Avtalet har en överenskommelse om att minska utsläppen av växthusgaser. (*United Nation 1998*)

TEWI används också i samband med studier i LCCP vilket beskrivs i eget stycke. Liknelse emellan dessa två metoder beskrivs i en rapport av Pavel Makhnatch och Rahmatollah Khodabandeh ifrån 2014, där jämförelseberäkningar och slutsatser av olika köldmedium görs där GWP är en parameter i beräkningarna av TEWI. Vidare görs en slutsats i rapporten att TEWI är en bra metod att använda för beräkningar av miljöpåverkan när köldmedium används, därav kommer studien härfter använda sig av enbart beräkningar med hjälp av TEWI.

2.3.2 Faktorer och Parametrar som används i TEWI

Faktorer i beräkningarna av TEWI för en anläggning är flera. Hänsyn tas till läckage av köldmedium och CO₂ utsläpp av energitillverkningen. TEWI definieras som följer. (Australien institute 2012)

$$TEWI = [GWP * m * L * n] + [GWP * m * (1 - \alpha)] + [n * E * \beta]$$

Där parametrarna innebär:

GWP = Global Warming Potential

L = genomsnittligt läckage av köldmedium per år (kg)

n = beräknad livstid för kylsystemet i år

m = total mängd köldmedium i kg

E = genomsnittlig energiförbrukning (W)

α = återvinningsfaktor av köldmedium (0–1)

β = indirekt emissionsfaktor [kgCO₂ / kWh]

2.4 LCCP – Life Cycle Climate Performance

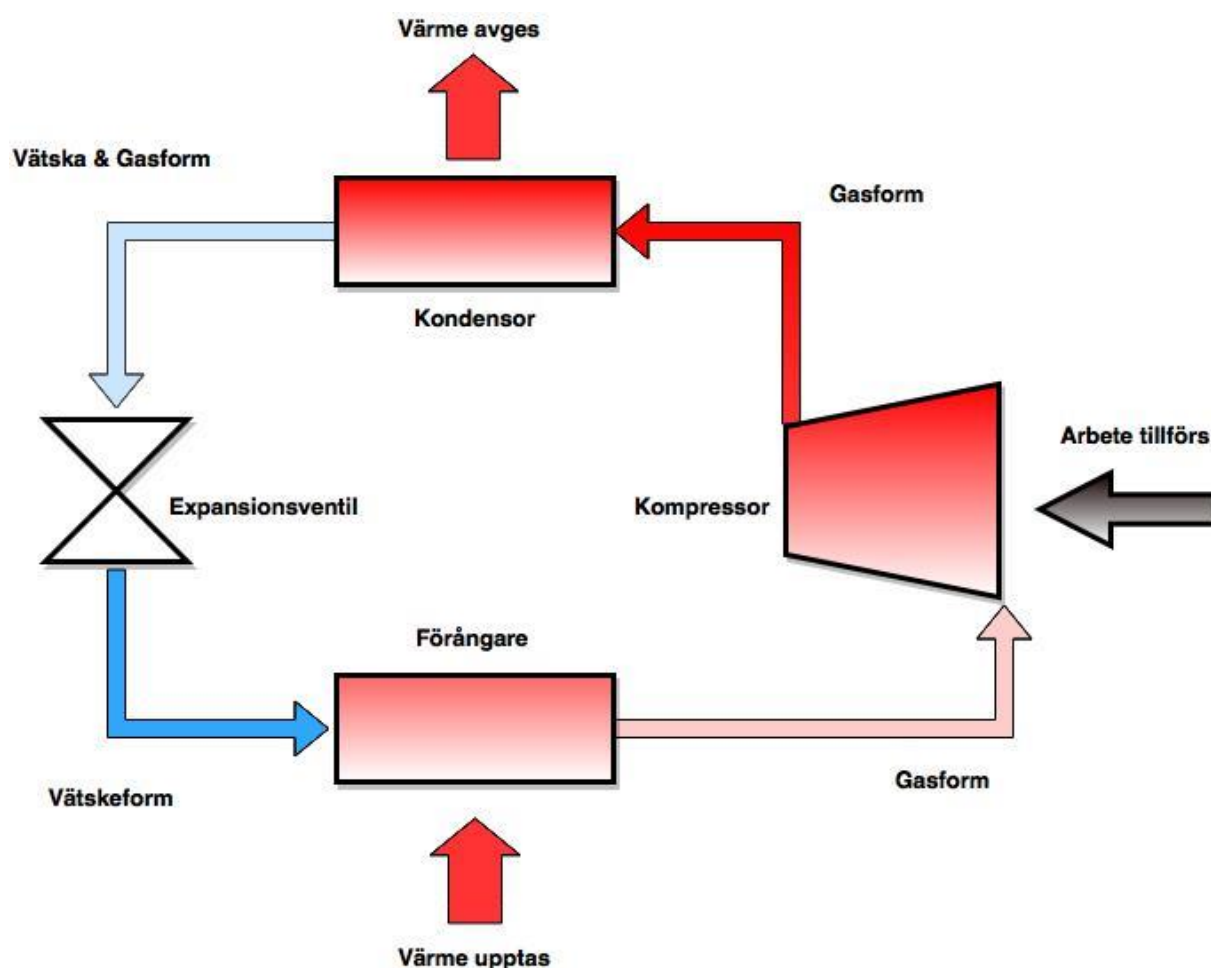
LCCP är en mer komplex metod att använda än TEWI medans GWP inte tar hänsyn till andra faktorer såsom var energin kommer ifrån och hur den i sin tur framställs med dess påverkan av miljön.

LCCP är ett måttetal som avses att mäta den totala klimatpåverkan av en kylanläggning eller en värmepump. Det är möjligt att använda till att jämföra olika köldmediernas miljöpåverkan hos olika anläggningar. Beräkningen av LCCP baseras på ofta osäkra indata som bidrar till den totala osäkerheten i LCCP-värdet. Hur mycket koldioxid som släpps ut vid genereringen av anläggningens elenergi, enhetens livslängd, årlig energianvändning, köldmediefyllning samt koldioxidutsläpp vid tillverkning och återanvändning av materialen i anläggningen är bara några av de parametrar som behövs som ingångsvärden för LCCP beräkningen. Guidelines för livslängd är 15 år, samma även för TEWI. Detta kan vara rimligt men trolig livslängd på en anläggning är betydligt längre vilket redan här ger en osäkerhet. CO₂ utsläppen vid energitillverkningen baseras ofta på utsläpp genererat i land. Då utsläppen varierar i olika länder medför detta ytterligare en osäkerhetsfaktor. (KTH 2016) När metoden tillämpas på en fartygsanläggning bygger det på ytterligare en felkälla tack vare, liksom i TEWI att variationen av utsläpp ifrån fartygets elproduktion är svåra att mäta.

2.5 Beskrivning av en kylanläggning

En kylanläggning är en konstruktion som är designad för att förflytta värme från ett ställe till ett annat i form av kylar, frysar och luftkonditionering mm. Kylkompressorsystemet är idag den mest vanliga konstruktionen som används (Feiza, 2015). De finns fyra grundläggande huvudkomponenterna i ett kylkompressorsystem och dessa är kompressorn, kondensorn, expansionsventil och försångare. Utöver detta tillkommer dessutom lämpligt köldmedium som är det köldmedium som uträttar själva arbetet med att förflytta värmen (Nydal, 2007).

Ett kylkompressorsystem kan bestå av både en eller flera steg men principen är dock densamma förutom att man bygger på flera steg för ytterligare kylning och värmebortförel. Därför beskrivs här bara en enstegsanläggning för att förklara principen (*Figur 1*)



Figur 1. Flödesschema för en ideell enstegs kylanläggning. Författarnas egen bild

2.5.1 Kompressor

När köldmediet kommer till kompressorn från förångaren är det i gasform. Kompressorns uppgift är att höja trycket på gasen vilket sker mekaniskt via t.ex. en kolvkompressor som komprimerar gasen till en mindre volym. Det är här som den stora energitillförseln krävs i ett kylsystem då kompression kräver stor rörelseenergi som ofta drivs av en stor elmotor. Sidoeffekten av kompression är också att temperaturen höjs. (Löfqvist Skoglycke Morlin 2017)

2.5.2 Kondensorn

Kondensorn är en värmeväxlare vars uppgift är att ta den komprimerade gasen från kompressorn och kyla ner den till vätskeform igen samt kyla bort den värme som bortförts via förångaren från det som skall kylas. (Löfqvist Skoglycke Morlin 2017)

2.5.3 Expansionsventil

Reglerar och kontrollerar anläggningens utnyttjande dvs. kontrollerar flödet och expanderar köldmediet till en lämplig mängd gas som skall fortsätta in i förångaren. Det är här kylanläggningens inställningar regleras, dvs. vilken kyleffekt som önskas uppnås regleras med i vilken mängd, blandning och under vilket tryck som köldmediet släpps igenom till förångaren. (Löfqvist Skoglycke Morlin 2017)

2.5.4 Förångare

Förångaren är liksom kondensorn en värmeväxlare. Förångarens uppgift är att ta upp värme och detta sker genom att köldmediet som passerar förångaren absorberar värmen genom att expansionsventilen har anpassat köldmediet via trycksänkning så att det förångas vid en temperatur som är lägre än omgivningens. (Löfqvist Skoglycke Morlin 2017)

2.5.5 Köldmedium

Köldmedium är en energibärare som används för att transportera värme. Det har en hög förmåga att via olika aggregationstillstånd (tryck, temperatur) uppta eller avge värme. (Löfqvist Skoglycke Morlin 2017)

2.6 Kort fakta om valda köldmedium

Antalet köldmedium som finns att tillgå på marknaden är stor och det finns därför inte utrymme att i denna studie utforska dem alla. Därför har endast 4 olika köldmedium valts utifrån några av de idag vanligaste förekommande i kylanläggningar på fartyg, dessa är R22, R134A, R404A och R407C. Ett av dem (R22) är dock idag förbjuden att användas men valdes att tas med då den historiskt var ett vanligt förekommande freonbaserat köldmedium för att få en jämförbar bild av tidigare köldmedium gentemot idag förekommande freonfria köldmedium.

2.6.1 R22

Klordinfluorometan eller R22 som är det korta namnet har kemisk formel CHClF_2 med molekylvikten 86,5 g/mol. Egenskaper hos gasen är att den är färglös och lukten eterisk men har dålig luktvarning vid mindre mängder. Smältpunkten är redan vid -157°C samt kokpunkt

vid -40,9°C. Densiteten är 3 gånger luftvikten i gasform och 1.2 gånger vatten i vätskeform, och kan därför samlas i slutna utrymmen i gasform, speciellt vid eller under marknivå. Lösligheten i vatten är 3628 mg/l. Gasen är heller inte biologisk nedbrytbar. (AGA 2016) Gasen påverkar ozonlagret negativt och har sedan 1 januari 2015 ett användningsförbud i Sverige (SFS 2007:846) därav anledningen att det har ersatts i huvudsak med R134A och R407C i befintliga system.

2.6.2 R134A

Tetraflouroethan eller R134A som är det korta namnet har kemisk formel $C_2H_2F_4$ med molekylvikt 102 g/mol. Egenskaper hos gasen är att den är färglös och har etherisk lukt. Smältpunkten ligger vid -101°C och kokpunkten vid -26,5°C. Densiteten i gasform är 3.6 gånger luftens. Lösligheten i vatten är 1930 mg/l. Gasen har ingen påverkan på Ozonskiktet men har däremot påverkan på växthuseffekten. Då innehållet delvis består av flourinerade växthusgaser vilket omfattas i Kyotoprotokollet (United Nation 1998) så gäller de överenskommelser som däri behandlas. (AGA 2012)

2.6.3 R404A

Köldmediet R404A är en blandning av 52 % Triflouretan (R143A), 44 % Pentaflouretan och 4% Tetraflouroetan (R134A). Egenskaper hos gasen är att den är färglös och luktfri med en densitet högre än luft. Exakt kokpunkt och smältpunkt går ej att fastställa då de olika delar som ingår har olika temperaturpunkter. Ämnet anses också ha låg löslighet i vatten. I och med att R404A innehåller växthusgaser som innefattas av Kyotoprotokollet så gäller de överenskommelser som däri behandlas. (AGA 2012)

2.6.4 R407C

Köldmediet R407C är en blandning av 52 % Tetraflouroetan (R134A), 23 % Pentaflouretan och 23 % Diflourmetan (R32). Egenskaper hos gasen är att den är färglös och luktfri med en densitet högre än luft. Exakt kokpunkt och smältpunkt går ej att fastställa då de olika delar som ingår har olika temperaturpunkter. Ämnet anses också ha låg löslighet i vatten. I och med att R407C innehåller växthusgaser som innefattas av Kyotoprotokollet så gäller de överenskommelser som däri behandlas. (AGA 2012)

2.7 Simuleringskörning av kylanläggning

Simulatorn som har använts är den som används av sjöbefälslever på Chalmers tekniska högskola och är av modellen Kongsberg. Denna simulator har möjligheten att använda sig av flera olika fartygsmodeller men valet gjordes att använda en som heter ”Neptune Diesel Electric-III”, (ERS-DE-III). Valet av denna modell gjordes på grund av att studien ville ha ett fartyg med stora kyl- och luftkonditioneringsanläggningar och då föll valet på ett typiskt kryssningsfartyg, samt att studien i detta fallet kunde få verklighetsbaserade data från en liknande båttyp.

2.7.1 Simulatormodell specifikationer

Valda data om simulatormodellen.

För mer data och specifikationer se Kongsberg simulator manualer:

So-1010-E DE-III-Machinery&Operation-Manual,

So-1039-E ERS DE-III AlarmList,

So-1040-E ERS DE-III MalfunctionList,

So-1041-E ERS DE-III VariableList

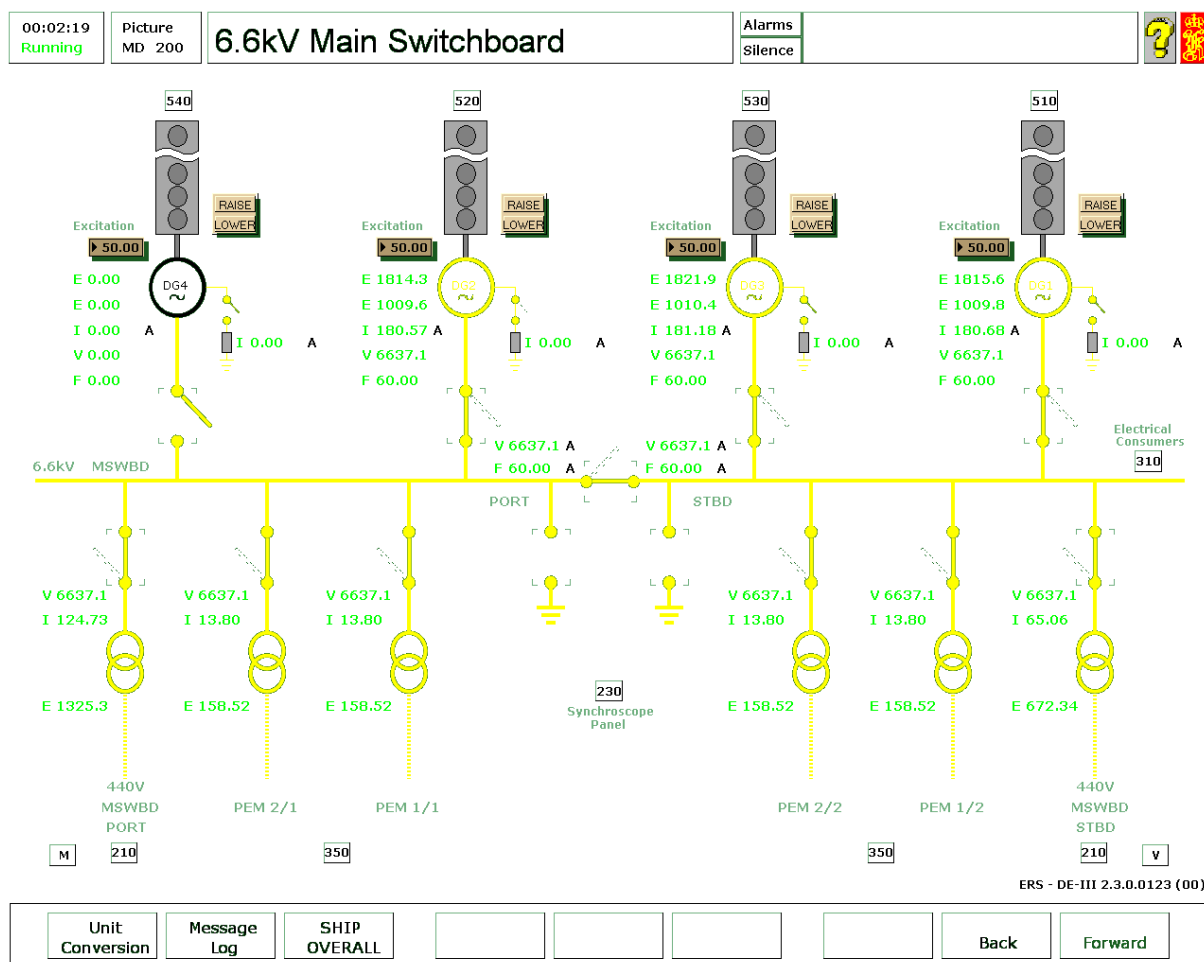
2.7.1.1 Fartygsdata

Tonnage:	77000 Bruttoton
Längd överallt:	261 meter..
Bredd:	33.60 meter.
Djupgående:	7.95 meter.
Antal passagerare:	2000 st.
Besättning:	1000 st.
Kryssningsfart:	18.5 knop
Huvud generatorer:	Fyra diesel-generator set på vardera 11.1 MW.
Nöd generatorer:	Två diesel-generator set på vardera 600 kW.
Framdrift:	Två synkron motorer på vardera 14 MW
Propellrar:	Två direkt kopplade med fast pitch.
Roder:	Två.
Propeller varvtal:	0 - 145 varv per minut.
Bogpropeller:	2 st.
Akterpropeller:	2 st.

2.7.1.2 Huvud generatorer:

Fyra medium hastighetsdieselmotorer, turboladdade, luftstart och direktkopplade till generatorerna.

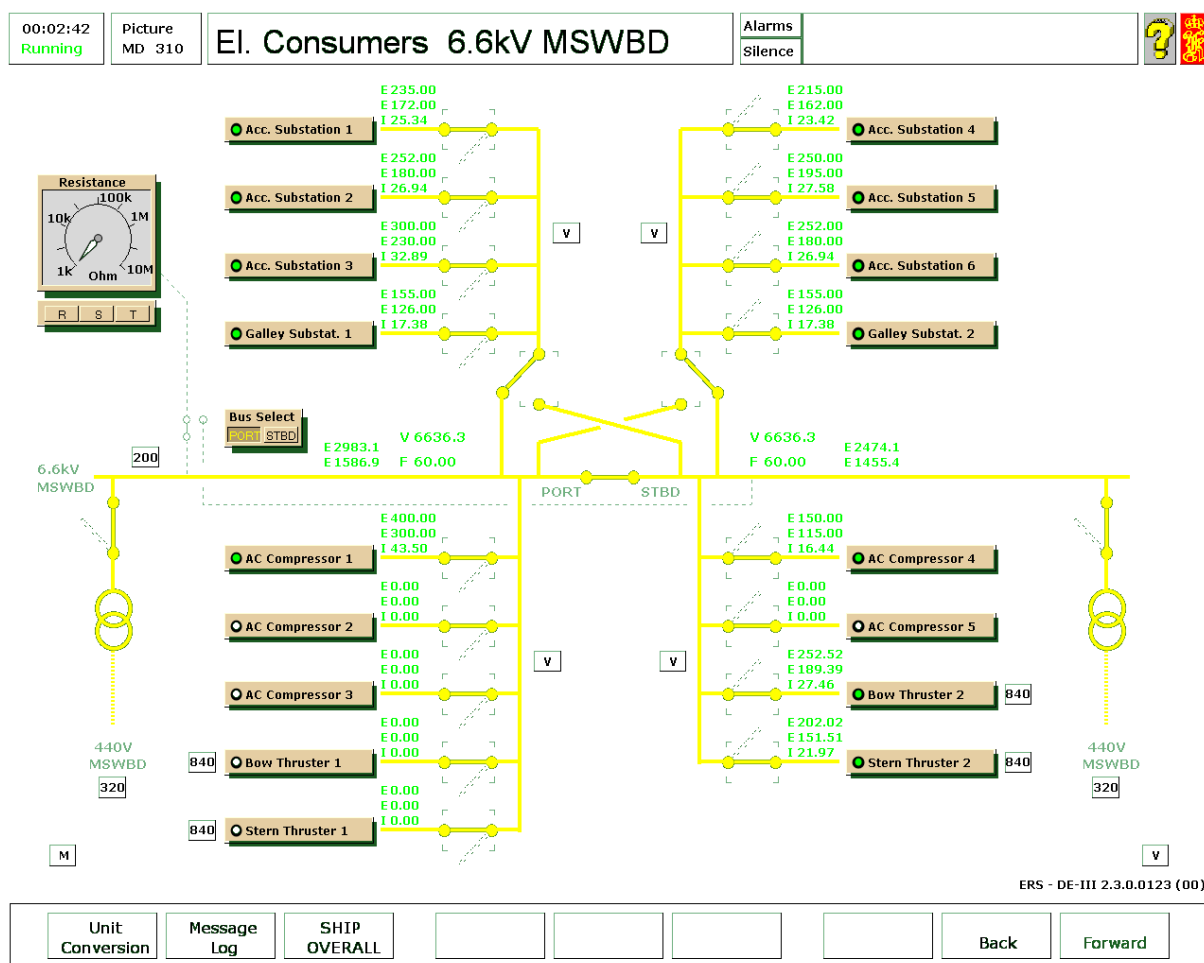
- 11520 kW / St.
- Hastighet 514 rpm
- Bränsleförbrukning 188g/kWh vid MCR (Maximus Continuous Rating)



Figur 1. Beskrivning av elsystemets uppbyggnad för generatorerna. Taget från manualen för kongsberg simulatoren. So-1010-E DE-III-Machinery&Operation-Manual.

2.7.1.3 Luftkonditioneringsanläggning:

- 3 stycken luftkonditioneringsanläggningar med kompressorer av centrifugal typ på 3000 kW
- 2 stycken luftkonditioneringsanläggningar med kompressorer av centrifugal typ på 2000 kW



Figur 2. Figur 3. Beskrivning elsystemets uppbyggnad för kylkompressorerna. Taget från manualen för kongsberg simulatort. So-1010-E DE-III-Machinery&Operation-Manual.

2.8 Energitillförsel ombord på fartyg

Det finns ett antal sätt att producera elektricitet ombord på ett fartyg där exempelvis dieselgeneratorer, axelgeneratorer och turbogeneratorer tillhör de vanligaste. Oftast finns det dessutom inte bara en utan flera olika elproducerande system i olika konfigurationer, och dessa kan i sin tur användas i olika kombinationer beroende på driftläge. De flesta av dessa är dessutom beroende av att fartygets huvudmaskin är igång och att fartyget är under drift.

Ytterligare ett alternativ är när fartyget ligger till kaj och lastar och lossar och kan ansluta sig till landproducerad el via en landanslutning. Denna studie har valt att titta på Dieselgeneratorer och landanslutningar. (SJO555)

3 Metod

För studiens genomförande användes främst två typer av metoder. Dels en litteraturstudie där sökningar gjordes efter vetenskapliga artiklar i ett antal databaser för att få fram de metoder och beräkningsmodeller som fanns tillgängliga samt vilken tidigare forskning som fanns i ämnet för att besvara studiens frågeställning (Höst, Regnell och Runesson 2006).

Data erhöles ifrån maskinrumssimulatore (Kongsberg) och den beräkningsmodell som valts att applicera den på. I simulatore simulerades ett antal olika driftlägen där data till beräkningarna hämtades. Då simulatore inte har några möjligheter att ställa in volym eller vilken typ av köldmedium som används kontaktades kylmaskinisten ombord på kryssningsfartyget M/V Superstar Virgo (SSV) och på så sätt erhöles verklighetsbaserade data från motsvarande fartyg.

Sökmotorer som användes:

Summon
Chalmers bibliotek
Web of Science
Google
Scopus
Science Direct

3.1 Introduktion beräkningar

Nödvändig information för att göra det möjligt att genomföra de olika TEWI-beräkningarna som behövs i analysen har olika simuleringar gjorts i simulatore där bränsleförbrukningen hos dieselgeneratorerna togs fram vid olika belastningar av AC-anläggningen. På så sätt har ett CO₂ värde framtagits vilket har antagits vara samma oberoende val av köldmedium, detta då inga inställningar av olika köldmedium kan göras i simulatore. Bränslet som användes i simulatore är både diesel oil (DO) och heavy fuel oil (HFO), där data angående emissionen av CO₂ ifrån bränslet har hämtats ifrån referens Ministry for the Enviroment som anger 2,94 kg CO₂/liter DO samt 3,04 kg CO₂/liter HFO bränsle. Vidare har olika data för köldmedierna tagits fram via tabeller och datablad som sökts fram ifrån företaget AGA och Naturvårdsverkets hemsidor.

Vissa antaganden har varit nödvändiga eftersom ingen information kunde hittas i simulatordokumentationen så som vilket köldmedium respektive mängd simulatore innehåller. Därför har studien utgått från uppgifter av Kylmaskinisten ombord på fartyget M/V Superstar Virgo (SSV) vilket är ett jämförbart fartyg till simulatore och använt dessa i beräkningarna. Mängden som antas är 1400 kg R407C, vilket är det köldmedium och den mängd som antagits gälla för simulatore, det vill säga samma som används på SSV. Med hjälp av densitet har volymen tagits fram och sedermera har även rätt mängd beräknats för de andra köldmedierna som beräkningarna är utförda på. Dock måste densiteten beräknas på

samma temperatur i och med att olika temperaturer ger olika densiteter. 25°C har valts som referenstemperatur för hela processen.

Beräkningsformel är:

$$\text{Mängd Medie X} = \frac{\text{Mängd R407C} * \text{Densitet Medie X}}{\text{Densitet R407C}}$$

Det åtgår också olika mängd energi i processen då olika köldmedium används. Detta medför att i beräkningarna har antagit en omräkningsfaktor i TEWI där bränsleförbrukningen som mättes upp i simulatören har antagits vara köldmedium R407C. Studien har använt sig av entalpiändringen för köldmediumerna för att skapa en omräkningsfaktor som multipliceras till Emissionsfaktorn i TEWI-formeln.

Beräkningen beräknas enligt formel:

$$\text{Omräkningsfaktor} = \frac{\Delta i_{\text{verklig}}(\text{Medium X})}{\Delta i_{\text{verklig}}(\text{R407C})}$$

Antagning har gjorts att temperatur före kompressor är 10° C och efter 35° C. Verkningsgrad har antagits vara samma för alla medier och beräknas utifrån uppgifter ifrån anläggningen ombord på SSV.

3.2 Beräkningar

3.2.1 Verkningsgraden

För att beräkna fram verkningsgraden på kompressorn har värden ifrån ett ögonblicksvärde på SSV används tillsammans med mollierdiagram för R407C. Mollierdiagrammet av ögonblicket återfinns i Appendix. Värden som läses av är:

Tryck före kompressor: 5.1 Bar

Temperatur på gas före kompressor: 13°C

Tryck efter kompressor: 14.1 Bar

Temperatur på gas efter kompressor: 66°C

Med dessa värden införda i mollierdiagrammet över kompressorn ger $\Delta i_{\text{verklig}} = 37 \text{ KJ/Kg}$

Med idealprocess ges istället ett $\Delta i_{\text{ideal}} = 23 \text{ KJ/kg}$

Med dessa två värden ger verkningsgraden: $\eta = \frac{\Delta i_{\text{ideal}}}{\Delta i_{\text{verklig}}} = \frac{23}{37} = 0,62$

3.2.2 Processens ideala (Δi) -värden

Studien antar även i den ideala processen har temperatur 35°C i kondenseringsfasen och 10°C i förångningsfasen, med dessa temperaturvärden i ett mollierdiagram för samtliga gaser studeras den ideala processen som ger Δi_{ideal} . Det värdet används med verkningsgraden att beräkna fram $\Delta i_{verklig}$. Kompressionen antas påbörja exakt då mediet är 100 % gas. Processen ritas in i mollierdiagram för respektive gas och värden läses av på ideal process, diagrammen återfinns i appendix.

Formel som används för att räkna fram $\Delta i_{verklig}$ är:

$$\Delta i_{verklig} = \frac{\Delta i_{ideal}}{\eta}$$

Följande värden lästes av och beräknas:

Köldmedium	Entalpi före kompressor	Entalpi efter kompressor	Δi_{ideal}	$\Delta i_{verklig}$
R22	408 KJ/kg	422 KJ/kg	14 KJ/kg	23 KJ/kg
R134A	404 KJ/kg	421 KJ/kg	17 KJ/kg	27 KJ/kg
R404A	370 KJ/kg	383 KJ/kg	13 KJ/kg	21 KJ/kg
R407C	414 KJ/kg	434 KJ/kg	20 KJ/kg	32 KJ/kg

Dessa värden används i beräkningarna för bränsleförbrukningsskillnad av de olika köldmedierna att uppnå samma kyleffekt.

3.2.3 Mängd köldmedium i systemet

Uppgifter ifrån SSV ger att det finns 1400 kg köldmedium i systemet. Med denna mängd som utgångspunkt beräknas volymen som anses vara konstant storlek. För att kunna beräkna mängd i kg som finns i systemet användes densiteten vid 25°C för samtliga köldmedier som återfinns i tabellen ovan. Densiteten hittas i datatabeller för respektive köldmedium.

Formel som används är:

$$Massa = volym * densitet$$

Beräkningar gav följande värden för respektive köldmedium:

Köldmedium	Volym	Densitet	Mängd
R22	1257 liter	1,194	1501 kg
R134A	1257 liter	1,207	1517 kg
R404A	1257 liter	1,044	1312 kg
R407C	1257 liter	1,1138	1400 kg

3.2.4 Beräkning emissionsfaktor

Emissionsfaktorn β , (Kg CO₂ / KWh) beräknas utifrån bränsleförbrukningen som krävs att framställa den energi som AC-anläggningen i simulatören kräver. I från bränsleförbrukningen kan teoretisk mängd CO₂ i kg per liter förbränd HFO beräknas genom att multiplicera med faktor 3,04 och för DO är faktorn 2,94. (*Ministry for the environment, 2015*) I simulatören anges bränsleförbrukningen i liter per minut vilket innebär att erhålla förbrukningen per timme behöver mängden multipliceras med 60 minuter.

Vilket ger formel för HFO beräkningen enligt:

$$\beta = \frac{\text{Bränsleförbrukning} * 3,04 * 60}{\text{Energiförbrukning}}$$

För DO enligt:

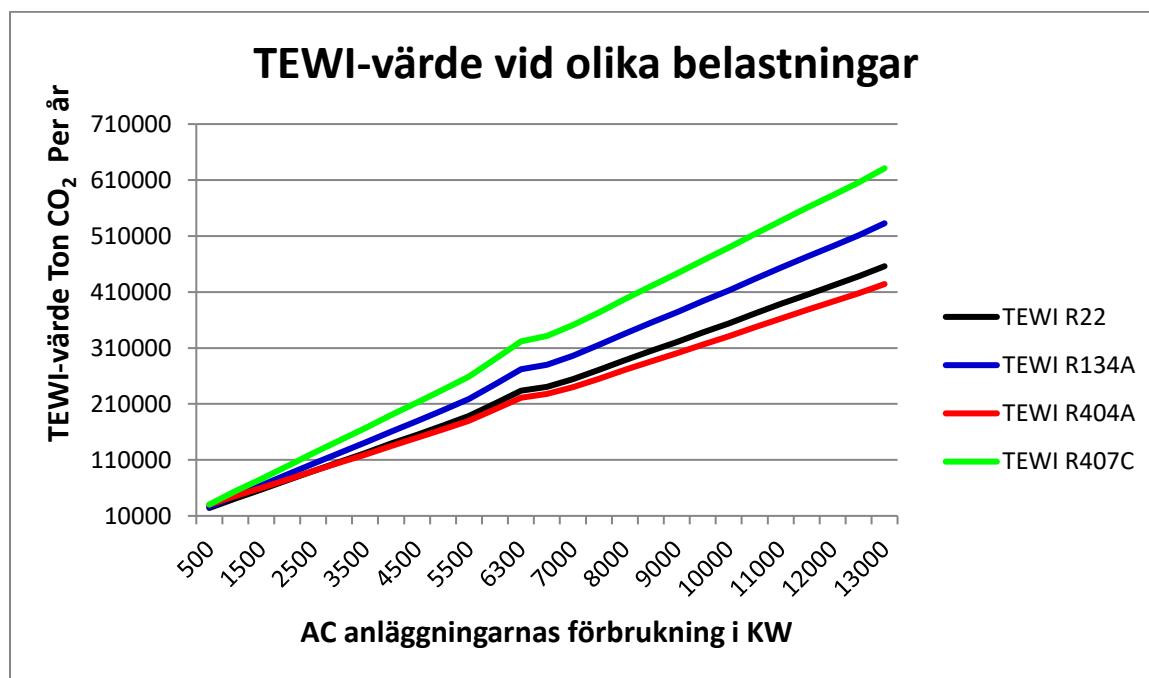
$$\beta = \frac{\text{Bränsleförbrukning} * 2,94 * 60}{\text{Energiförbrukning}}$$

3.2.5 Övriga parametrar

Det finns ett antal parametrar i TEWI beräkningen som krävs. Beräkningarna för livslängden har antagits till 15 år, förlustfaktorn per år för fartyg har antagits till 15 % (*Australian Institute 2012*).

4 Resultat

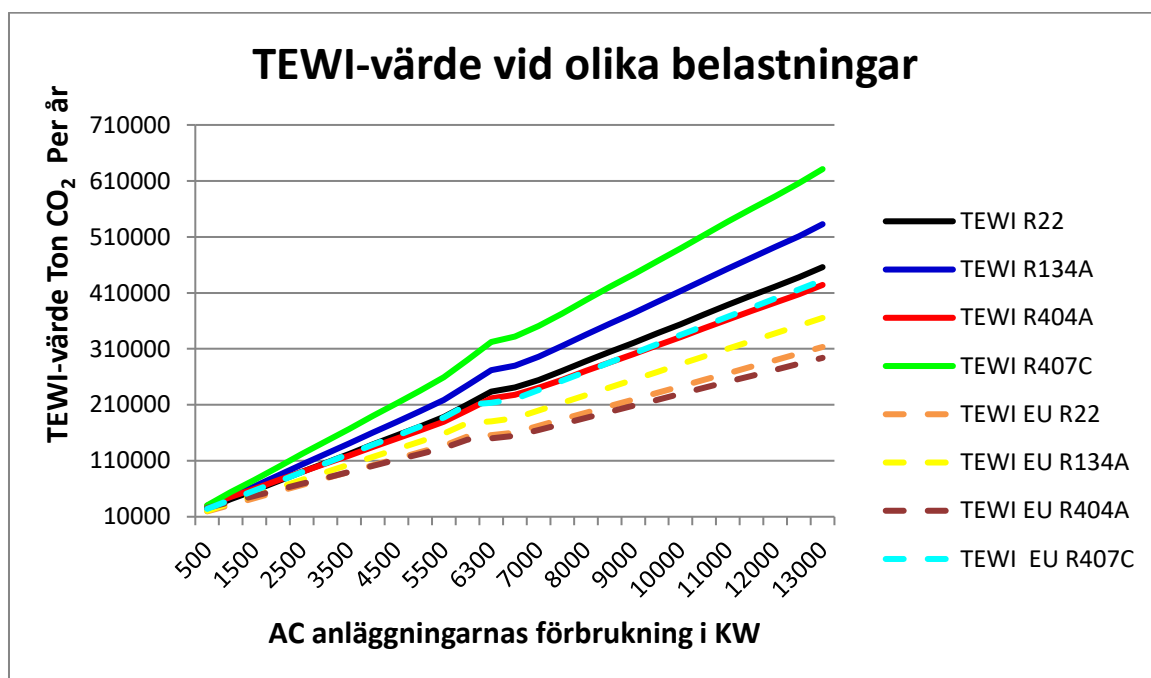
Resultatet av beräkningarna visar på ett högre TEWI-värde vid högre belastning vilket var väntat. Det går också att upptäcka skillnad i värdet beroende på vilket köldmedium som använts samt att ökningen av påverkan sker snabbare för vissa medier än andra. I följande graf visar skillnaden på TEWI-värdet vid beräkningar med ombordtillverkad elenergi.



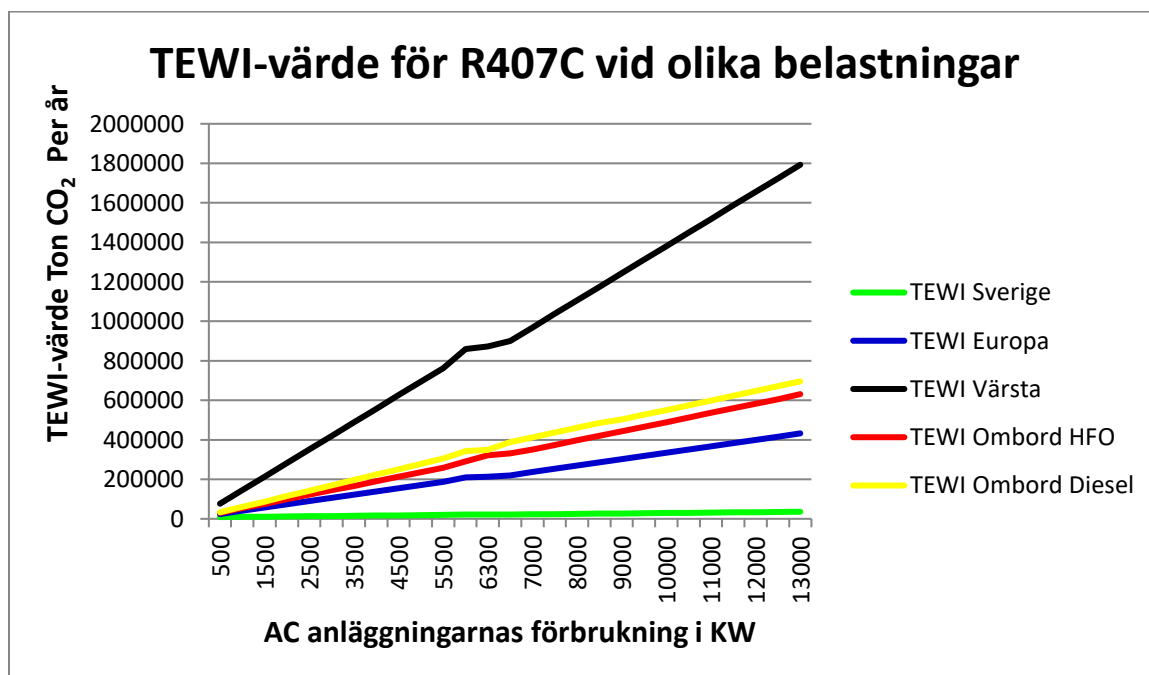
Jämförs värdena med att använda landanslutning ger det lite perspektiv på effekten utav ombordproducerad elenergi. I beräkningarna som följer har ett genomsnitt på emissionsfaktorn β används för några områden. Värden som har valts i beräkningarna är genomsnitt för Europa: (KTH 2016)

Fartygsområde	Emissionsfaktorn β
Europa	0,454
Sverige	0,030
Värsta i världen	1,907

Följande graf visar skillnaden på TEWI-värden ombord och Europaproducerad elenergi. Detta visar då att landanslutningen ger en lägre påverkan. I grafen är Europa landanslutningen sträckande linjer.



Vidare jämförelser av värdena som tagits fram sammanställdes grafiskt och visar då på ett brett spann på CO₂ påverkan med hjälp av TEWI-beräkning. Nedan redovisas grafiskt skillnaden för R407C. Fullständiga siffror för övriga valda köldmedier återfinns i Appendix Beräkningar. Grafen visar att det beroende på vilken del av världen landanslutning sker så blir miljöpåverkan markant olika. Studien har även valt att här lägga till en jämförelse med dieseloljedrift. Observera att DO har en större miljöpåverkan än HFO.



5 Diskussion

5.1 Resultatdiskussion

Målet med denna undersökning var att utröna hur ett byte av köldmedium i befintliga kylanläggningar påverkar växthusgasutsläppen med inriktning på energitillförseln för driften av kylanläggningen och dess CO₂ utsläpp.

Vissa resultat överraskade dock! Framförallt uppmärksammades det att DO ger större CO₂ utsläpp och därmed större miljöpåverkan än HFO. Detta kommer sig av att enligt simulatoranläggningen som användes blir resultatet på förbrukningen i liter större för DO än för HFO vilket kommer sig av att energivärdet i DO är lägre än HFO. Sedan också beror det på den näst intill betydelselösa skillnaden på emissionsfaktorn bränslena emellan så behövs det inte stor skillnad i förbrukning innan det ger effekt i beräkningarna

I beräkningarna som framtagits kan en viss fingervisning erhållas i de fall där ett byte av köldmedium sker. Där trots den minskade miljöpåverkan av köldmediet i sig självt tydligt visar att skillnaden i energibehovet att driva anläggningen ökar och därmed ger en ökad mängd växthusgasutsläpp. Resultaten visar att freonfria köldmedier på gamla anläggningar som är designade för viss typ av äldre köldmedier inte alltid fungerar miljömässigt och ger det resultat som önskas. Det medför att delar av eller hela anläggningen behöver bytas till energieffektivare kompressorer mm för att erhålla den miljömässiga effekt som var tanken med bytet av köldmediet.

Slutsatsen blir att byten av freonbaserade köldmedium till icke freonbaserade inte i sig är fullt ut problemfria trots att dessa är mer miljövänliga i sig själva. Nya problem uppstår då effekterna på miljön ändrar karaktär till annan inte helt önskvärd miljöpåverkan såsom CO₂ utsläpp mm. Det finns ett stort behov av mer forskning och utveckling utav kylanläggningar och köldmedium. Mänskligheten kommer med största sannolikhet ha en fortsatt stor önskan av nedkylning i olika sammanhang. Högst troligt kommer detta behov också att finnas kvar och förmodligen öka med tiden. Utvecklingen av alternativa bränslen med minskad miljöpåverkan är därför önskvärda.

5.2 Metoddiskussion

Metoden att använda sig av en simulator för framtagning av data kan dock ifrågasättas eftersom det finns en stor osäkerhet i varifrån och hur data processas fram. Tack vare att det finns stora svårigheter i att erhålla verklighetsbaserade data, behövs en fullskalig anläggning där det finns möjlighet att byta köldmedium och därmed få korrekt uppmätta driftdata. Detta kunde dock inte utföras inom begränsningen av detta arbete. Ytterligare en svårighet att få fram korrekta data tillkommer då fartyg ofta har en kombination av energitillförselmetoder till exempel turbogeneratorer, avgaspannor och axelgeneratorer vilket gör det svårt att avgöra produktionen av CO₂ särskilt under framdrift av fartyget då dessa ofta används.

6 Slutsatser

Byta köldmedier påverkar energibehovet vilket i sin tur påverkar växthuseffekten. Freoner eller växthusgaser.

TEWI-Beräkningar

- Vid byte av köldmedium på äldre anläggningar ger TEWI beräkningarna indikationer på att CO₂ utsläppen ökar då anläggningen kräver mer energi för att uppnå samma kyleffekt.
- GWP ger en något felaktig bild av miljöpåverkan då den inte tar hänsyn till den ökade CO₂ utsläppen som finns med i TEWI beräkningarna vid den ökade energikonsumtionen som sker vid köldmediebyte.

Landanslutningar lönar sig miljömässigt

- Dock beroende på var i världen anslutningen sker, vissa delar av världen produceras el på ett icke helt miljövänligt sätt genom Diesel eller kolkraft som har hög CO₂ utsläpp.

DO kontra HFO är något marginaliserad

- Dock måste kanske hänsyn tas till Svavel och dess förurning
- Även partiklar och andra föroreningar som finns i HFO men inte i DO
- Energivärdet i DO är också lägre vilket innebär att det förbrukas lite mer per kW.

Kylanläggningarna behöver förnyas eller uppgraderas.

- För att energi optimeras vid byte av köldmedium.

6.1 Lämpliga fortsatta studier

Alternativa bränslen som är mindre miljöpåverkande bör användas. Forskning inom detta finns redan men behöver fortgå för att på sikt fasa ut alla fossila bränslen och på så sätt minska CO₂ utsläppen. Dock måste forskningen vara vaksam för de effekter som de nya bränslena påverkar miljön.

Forskningar inom området köldmedium behöver utvecklas vidare för att minimera energiåtgången för att driva processen. Även när det gäller köldmediumforskningen måste forskningen vara vaken liksom för alternativa bränslen hur miljöpåverkan kommer att gestalta sig. Detta är idag eventuellt inte fullt känt och måste beaktas.

Alternativa anläggningar bör utvecklas vidare för att få ner energibehovet att driva anläggningarna. Även bör det utvecklas anläggningar som är mindre känsliga för köldmediebyten. Tekniken kanske redan finns men behöver kombineras på ett korrekt sätt.

Referenser

AGA hemsida. Hämtad från: <http://www.aga.se/sv/index.html>

AGA Säkerhetsdatablad R22 (2016). Hämtad från: <http://www.aga.se/>

AGA Säkerhetsdatablad R134a (2012). Hämtad från: <http://www.aga.se/>

AGA Säkerhetsdatablad R404a (2012). Hämtad från: <http://www.aga.se/>

AGA Säkerhetsdatablad R407c (2012). Hämtad från: <http://www.aga.se/>

The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating. (2012). *Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI)*. Hämtad från: [http://www.hvaceducationaustralia.com/Resources/PDF/Best%20Practice%20Tewi%20No%20ISBN%20Draft%20\(1\).pdf](http://www.hvaceducationaustralia.com/Resources/PDF/Best%20Practice%20Tewi%20No%20ISBN%20Draft%20(1).pdf)

Feiza, M. (2015). A GUIDE FOR ASSESSING VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEMS, FOR FUTURE MARINE ENGINEERS. *Universitatii Maritime Constanta. Analele*, 16(23)61–66. Hämtad från: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com/docview/1704264837?accountid=10041>

Höst, M., Regnell, B., Runeson, P. (2006) *Att genomföra examensarbete*. Lund: Studentlitteratur AB.

IPCC, "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

KTH exjobb referens (2014). *Miljöindikatorer TEWI och LCCP*. Hämtad från: <https://www.kth.se/itm/inst/energiteknik/forskning/ett/projekt/koldmedier-med-lag-gwp/low-gwp-news/naqot-om-hur-gwp-varden-bestams-1.474589>

KTH, *Miljöindikatorer TEWI och LCCP* (2016) Hämtad från: <https://www.kth.se/itm/inst/energiteknik/forskning/ett/projekt/koldmedier-med-lag-gwp/low-gwp-news/miljoindikatorer-tewi-och-lccp-1.654267>

Löfqvist M. Skoglycke Morlin G. (2017) *En kartläggning energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg*

Makhnatch P., & Khodabandeh R. (2014). *The role of enviromental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant*. Hämtad från: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214030525>

Ministry for the Environment. (2015). Summary of emissions factors for guidance for voluntary corporate greenhouse gas reporting. Hämtad från: [www.mfe.govt.nz > default > files > media](http://www.mfe.govt.nz/default/files/media)

Naturvårdsverket. (2017). Koldmedieförteckning. Hämtad från: <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledningar/Kemikalier-och-miljogifter/Ozon/Koldmedieforteckningen/>

Nydal, R. (2007). Praktisk kylteknik. Svenska kyltekniska föreningen. Hämtad från: <http://libris.kb.se/bib/11199965>

SJO555 Grundläggande fartygsmaskinteknik, Chalmers tekniska högskola

Svensk författningssamling (2007). Förordning om fluorerade växthusgaser och ozonnedbrytande ämnen, SFS 2007:846

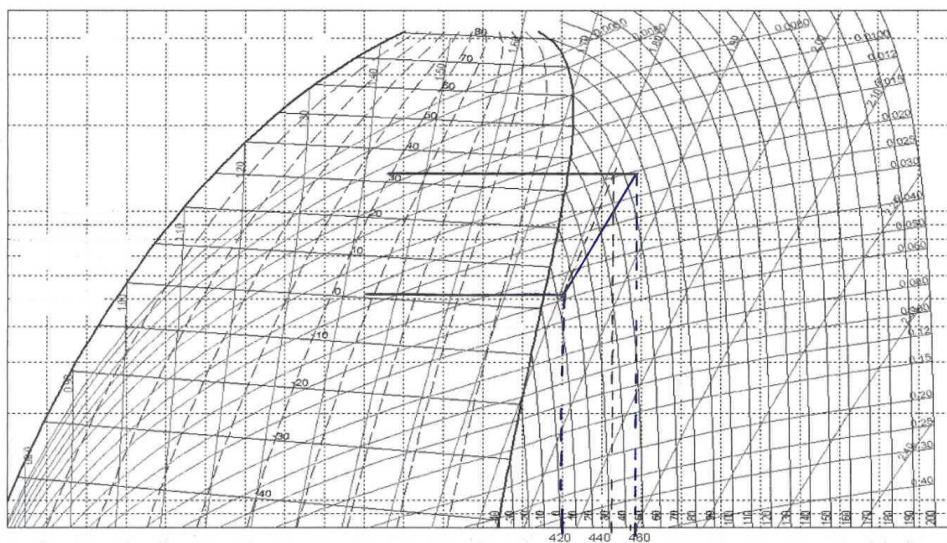
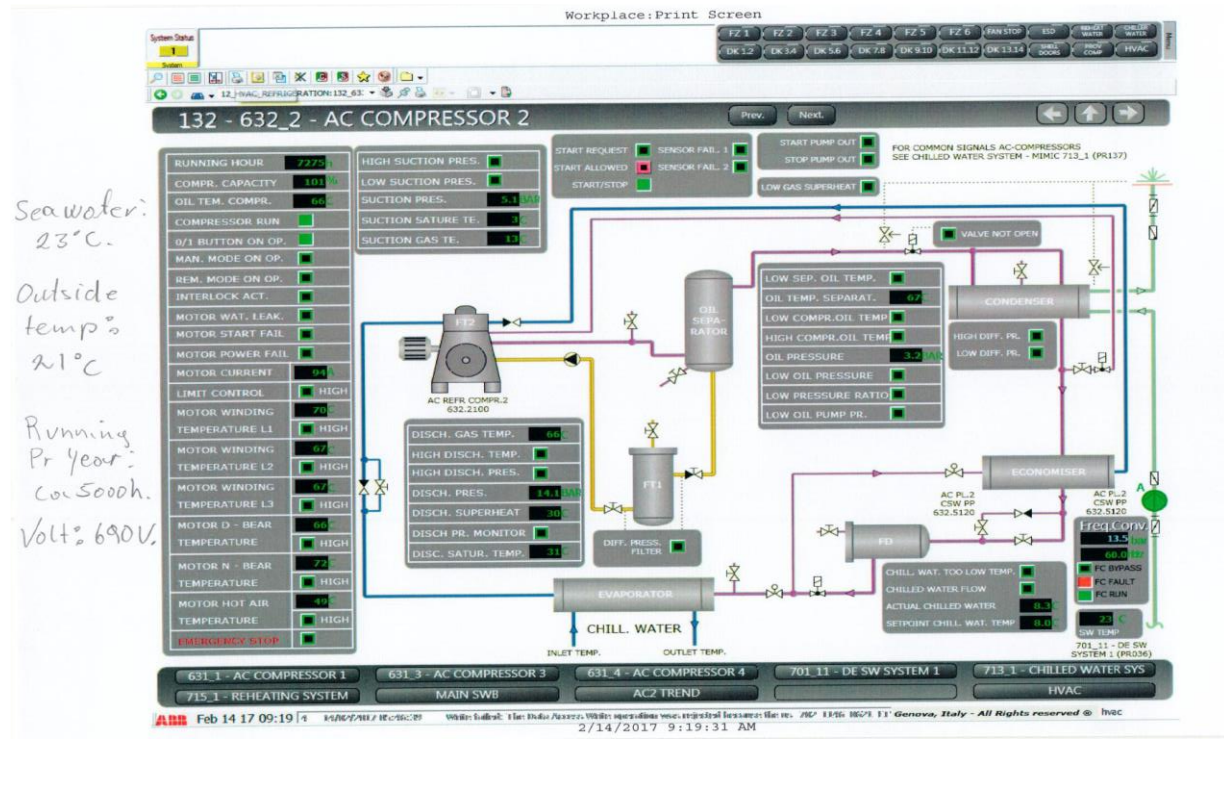
United Nation (1998). KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Hämtad från: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpenq.pdf>

Växthusgaser (2011) Tellus, Göteborgs Universitet, hämtad från http://tellus.science.gu.se/fokus_arktis/globala_uppvarmningen/uppvarmningens_orsaker/vaxthusgaser

Appendix

Superstar Virgo Data

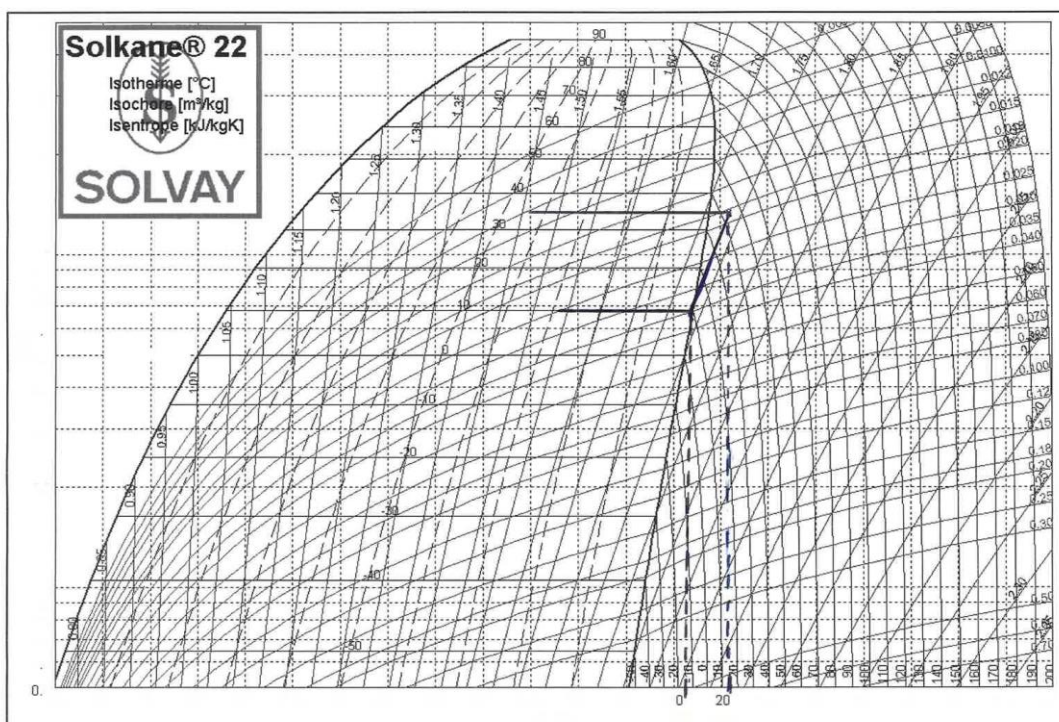
Screenprint av ögonblicksdata och mollierdiagram av R407C varav verkningsgraden beräknas.



420 443 457

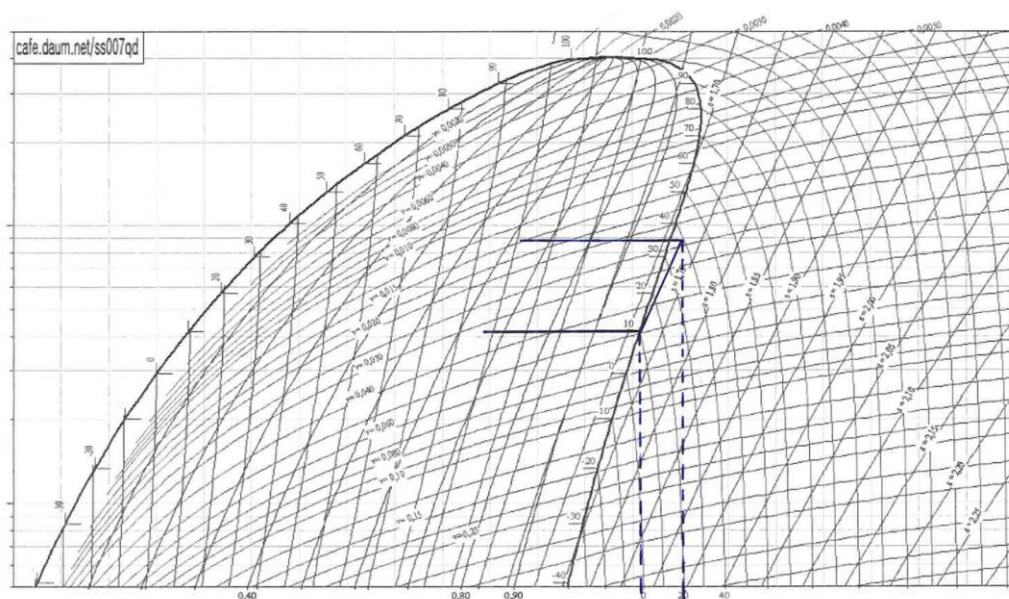
Mollierdiagram beräkningar

R22



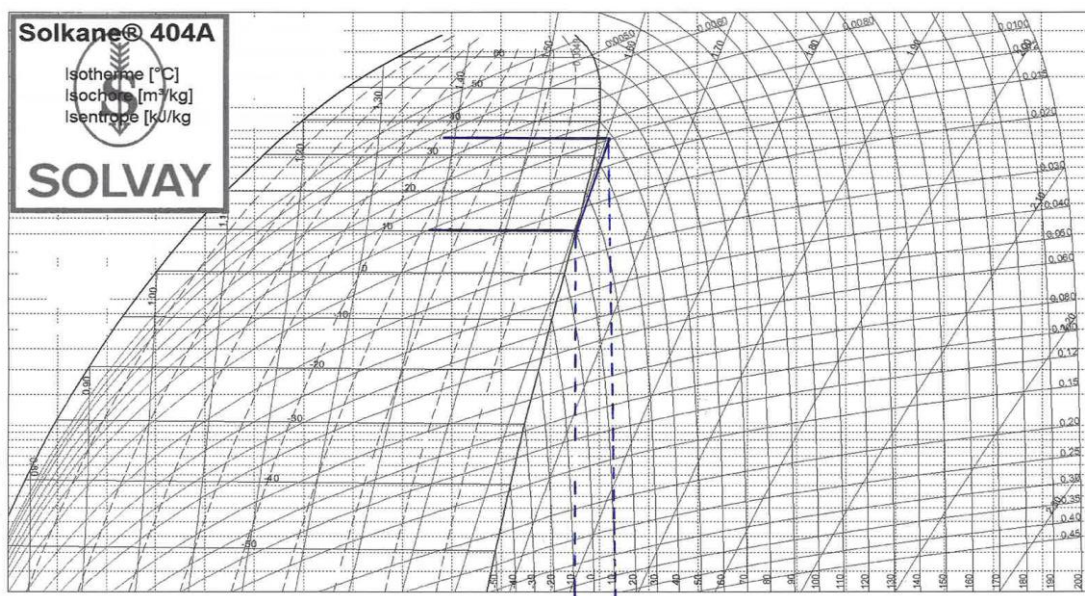
408 422

R134A



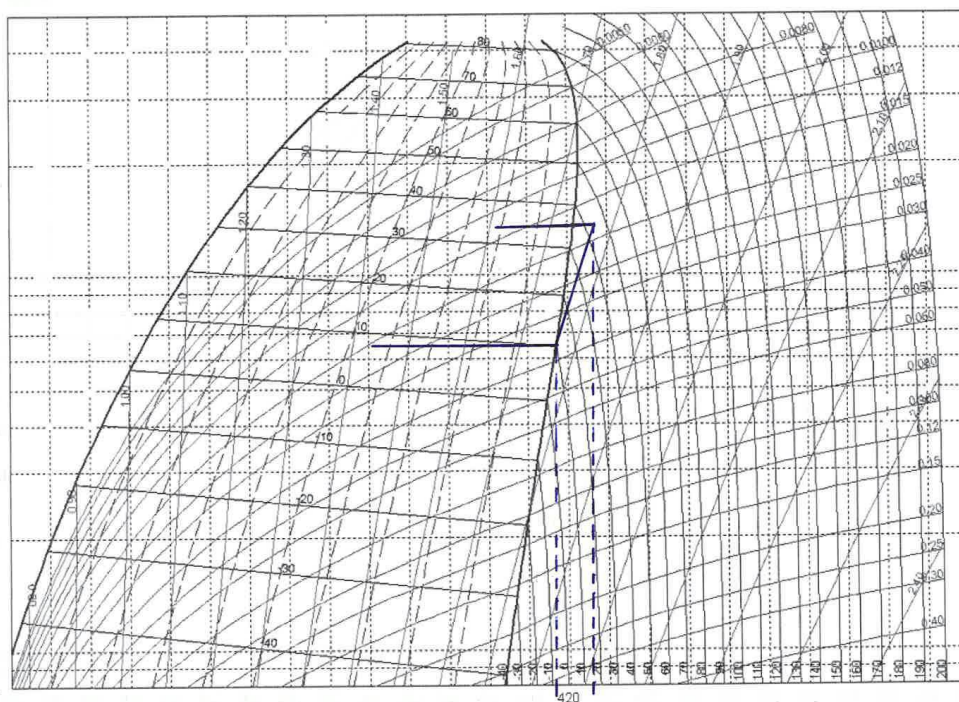
404 421

R404A



370 383

R407C



414 434

Beräkningar

Fullständig förtäckning av data från beräkningar som genomförs i beräkningsavsnittet redovisas här.

Grunddata

Köldmedium	GWP	Entalpi Δi	Mängd kg	Densitet
R22	1700	23	1501	1,194
R134A	1430	27	1517	1,207
R404A	3706	21	1312	1,044
R407C	1774	32	1400	1,1138

Livslängd i år	20
Läckage i %	15%
Återvinningsfaktor	0,9
Liter till KWh faktor:	10,786
CO2 från HFO kg/lit	3,04
CO2 från DO kg/lit	2,94

Emissionfaktor β	
Europa	0,454
Sverige	0,023
Värsta land	1,907

Beräkningar Ombordtillverkad energi HFO

AC-belastning KW (E)	Belastning Engine 2	Belastning Engine 4	Br. Förbr. 2 Lit/min	Br. Förbr. 4 Lit/min	CO2 - E2 per min	CO2 - E4 per min	Emissionsfaktor KgCO2/KWH (β)	TEWI R22	TEWI R134A	TEWI R404A	TEWI R407C
0	28,35	0	13,12	0	39,8848	0	0,000	0	0	0	0
500	32,07	0	14,84	0	45,1136	0	0,627	24145	25784	29900	30288
1000	35,09	0	16,64	0	50,5856	0	0,642	41135	45730	45413	53927
1500	39,65	0	18,32	0	55,6928	0	0,632	56993	64346	59892	75990
2000	43,4	0	20,06	0	60,9824	0	0,633	73417	83626	74888	98841
2500	47,21	0	21,85	0	66,424	0	0,637	90313	103461	90315	122349
3000	50,85	0	23,54	0	71,5616	0	0,634	106266	122187	104880	144543
3500	54,51	0	25,22	0	76,6688	0	0,631	122124	140803	119359	166606
4000	58,51	0	27,01	0	82,1104	0	0,633	139020	160638	134786	190114
4500	62,05	0	28,7	0	87,248	0	0,632	154972	179364	149351	212308
5000	65,87	0	30,45	0	92,568	0	0,632	171491	198756	164433	235291
5500	69,74	0	32,26	0	98,0704	0	0,635	188576	218812	180032	259061
6200	74,8	0	34,62	0	105,2448	0	0,633	210852	244963	200372	290054
6300	40,09	40,02	18,54	18,51	56,3616	56,2704	0,693	233789	271889	221314	321967
6500	40,89	40,78	18,92	18,87	57,5168	57,3648	0,692	240774	280089	227692	331685
7000	42,41	42,44	19,61	19,63	59,6144	59,6752	0,681	254461	296156	240189	350728
7500	44,3	44,27	20,49	20,47	62,2896	62,2288	0,677	270697	315215	255012	373316
8000	46,24	46,25	21,39	21,4	65,0256	65,056	0,676	287970	335493	270784	397349
8500	48,15	48,13	22,3	22,24	67,792	67,6096	0,674	304489	354884	285866	420332
9000	49,98	50,01	23,13	23,12	70,3152	70,2848	0,671	320630	373832	300604	442789
9500	51,98	51,96	24,03	24,01	73,0512	72,9904	0,670	337526	393667	316031	466297
10000	53,78	53,82	24,88	24,9	75,6352	75,696	0,669	353950	412948	331027	489148
10500	55,81	55,79	25,81	25,8	78,4624	78,432	0,669	371224	433226	346798	513181
11000	57,24	57,76	26,71	26,72	81,1984	81,2288	0,668	388403	453393	362484	537082
11500	59,68	59,66	27,59	27,59	83,8736	83,8736	0,667	404922	472784	377566	560065
12000	61,53	61,52	28,45	28,45	86,488	86,488	0,665	421157	491843	392390	582653
12500	63,41	63,44	29,33	29,32	89,1632	89,1328	0,664	437676	511234	407472	605636
13000	65,47	65,52	30,28	30,31	92,0512	92,1424	0,666	455988	532731	424192	631113

Beräkningar Ombordtillverkad energi DO

AC-belastning KW (E)	Belastning Engine 2	Belastning Engine 4	Br. Förbr. 2 Lit/min	Br. Förbr. 4 Lit/min	CO2 - E2 per min	CO2 - E4 per min	Emissionsfaktor KgCO2/KWH (β) DO	TEWI R407C
0	28,35	0	14,83	0	43,6002	0	0,000	0
500	32,07	0	16,83	0	49,4802	0	0,706	33101
1000	35,09	0	18,95	0	55,713	0	0,727	60026
1500	39,65	0	21,06	0	61,9164	0	0,733	86825
2000	43,4	0	23,32	0	68,5608	0	0,749	115529
2500	47,21	0	25,34	0	74,4996	0	0,742	141185
3000	50,85	0	27,49	0	80,8206	0	0,744	168491
3500	54,51	0	29,71	0	87,3474	0	0,750	196687
4000	58,51	0	31,84	0	93,6096	0	0,750	223740
4500	62,05	0	33,95	0	99,813	0	0,750	250538
5000	65,87	0	36,09	0	106,1046	0	0,750	277718
5500	69,74	0	38,25	0	112,455	0	0,751	305152
6200	74,8	0	41,26	0	121,3044	0	0,752	343381
6300	80,11	0	41,66	0	122,4804	0	0,751	348462
6500	40,89	40,78	22,34	22,4	65,6796	65,856	0,812	387580
7000	42,41	42,44	23,32	23,31	68,5608	68,5314	0,801	411585
7500	44,3	44,27	24,27	24,27	71,3538	71,3538	0,793	435843
8000	46,24	46,25	25,23	25,23	74,1762	74,1762	0,786	460229
8500	48,15	48,13	26,12	26,25	76,7928	77,175	0,779	484487
9000	49,98	50,01	26,92	26,9	79,1448	79,086	0,764	502903
9500	51,98	51,96	27,87	27,88	81,9378	81,9672	0,760	527416
10000	53,78	53,82	28,8	28,78	84,672	84,6132	0,754	550658
10500	55,81	55,79	29,73	29,76	87,4062	87,4944	0,750	574917
11000	57,24	57,76	30,71	30,7	90,2874	90,258	0,747	599302
11500	59,68	59,66	31,65	31,67	93,051	93,1098	0,744	623561
12000	61,53	61,52	32,62	32,6	95,9028	95,844	0,741	647692
12500	63,41	63,44	33,53	33,54	98,5782	98,6076	0,737	671189
13000	65,47	65,52	34,51	34,49	101,4594	101,4006	0,735	695701

Beräkningar genomsnitt Europatillverkad energi

AC-belastning KW (E)	Belastning Engine 2	Belastning Engine 4	Br. Förbr. 2 Lit/min	Br. Förbr. 4 Lit/min	CO2 - E2 per min	CO2 - E4 per min	Emissionsfaktor KgCO2/KWH (β)	TEWI R22	TEWI R134A	TEWI R404A	TEWI R407C
0	28,35	0	13,12	0	39,8848	0	0,454	0	0	0	0
500	32,07	0	14,84	0	45,1136	0	0,454	19657	20516	25802	24043
1000	35,09	0	16,64	0	50,5856	0	0,454	31404	34306	36528	40387
1500	39,65	0	18,32	0	55,6928	0	0,454	43151	48096	47253	56731
2000	43,4	0	20,06	0	60,9824	0	0,454	54898	61887	57979	73075
2500	47,21	0	21,85	0	66,424	0	0,454	66646	75677	68705	89419
3000	50,85	0	23,54	0	71,5616	0	0,454	78393	89467	79431	105763
3500	54,51	0	25,22	0	76,6688	0	0,454	90140	103257	90156	122107
4000	58,51	0	27,01	0	82,1104	0	0,454	101887	117048	100882	138451
4500	62,05	0	28,7	0	87,248	0	0,454	113635	130838	111608	154795
5000	65,87	0	30,45	0	92,568	0	0,454	125382	144628	122334	171139
5500	69,74	0	32,26	0	98,0704	0	0,454	137129	158418	133059	187483
6200	74,8	0	34,62	0	105,2448	0	0,454	153575	177725	148075	210365
6300	40,09	40,02	18,54	18,51	56,3616	56,2704	0,454	155925	180483	150221	213634
6500	40,89	40,78	18,92	18,87	57,5168	57,3648	0,454	160624	185999	154511	220171
7000	42,41	42,44	19,61	19,63	59,6144	59,6752	0,454	172371	199789	165237	236515
7500	44,3	44,27	20,49	20,47	62,2896	62,2288	0,454	184118	213579	175962	252859
8000	46,24	46,25	21,39	21,4	65,0256	65,056	0,454	195865	227370	186688	269203
8500	48,15	48,13	22,3	22,24	67,792	67,6096	0,454	207613	241160	197414	285547
9000	49,98	50,01	23,13	23,12	70,3152	70,2848	0,454	219360	254950	208140	301891
9500	51,98	51,96	24,03	24,01	73,0512	72,9904	0,454	231107	268740	218865	318235
10000	53,78	53,82	24,88	24,9	75,6352	75,696	0,454	242854	282531	229591	334579
10500	55,81	55,79	25,81	25,8	78,4624	78,432	0,454	254602	296321	240317	350923
11000	57,24	57,76	26,71	26,72	81,1984	81,2288	0,454	266349	310111	251043	367267
11500	59,68	59,66	27,59	27,59	83,8736	83,8736	0,454	278096	323901	261768	383611
12000	61,53	61,52	28,45	28,45	86,488	86,488	0,454	289843	337692	272494	399955
12500	63,41	63,44	29,33	29,32	89,1632	89,1328	0,454	301591	351482	283220	416299
13000	65,47	65,52	30,28	30,31	92,0512	92,1424	0,454	313338	365272	293946	432643

Beräkningar genomsnitt Sverige tillverkad energi

AC- belastning KW (E)	Belastning Engine 2	Belastning Engine 4	Br. Förbr. 2 Lit/min	Br. Förbr. 4 Lit/min	CO2 - E2 per min	CO2 - E4 per min	Emissionsfaktor KgCO2/KWH (β)	TEWI R22	TEWI R134A	TEWI R404A	TEWI R407C
0	28,35	0	13,12	0	39,8848	0	0,023	0	0	0	0
500	32,07	0	14,84	0	45,1136	0	0,023	8504	7424	15619	8527
1000	35,09	0	16,64	0	50,5856	0	0,023	9100	8123	16163	9355
1500	39,65	0	18,32	0	55,6928	0	0,023	9695	8821	16706	10183
2000	43,4	0	20,06	0	60,9824	0	0,023	10290	9520	17250	11011
2500	47,21	0	21,85	0	66,424	0	0,023	10885	10219	17793	11839
3000	50,85	0	23,54	0	71,5616	0	0,023	11480	10917	18336	12667
3500	54,51	0	25,22	0	76,6688	0	0,023	12075	11616	18880	13495
4000	58,51	0	27,01	0	82,1104	0	0,023	12670	12315	19423	14323
4500	62,05	0	28,7	0	87,248	0	0,023	13265	13013	19966	15151
5000	65,87	0	30,45	0	92,568	0	0,023	13861	13712	20510	15979
5500	69,74	0	32,26	0	98,0704	0	0,023	14456	14410	21053	16807
6200	74,8	0	34,62	0	105,2448	0	0,023	15289	15388	21814	17966
6300	40,09	40,02	18,54	18,51	56,3616	56,2704	0,023	15408	15528	21923	18132
6500	40,89	40,78	18,92	18,87	57,5168	57,3648	0,023	15646	15808	22140	18463
7000	42,41	42,44	19,61	19,63	59,6144	59,6752	0,023	16241	16506	22683	19291
7500	44,3	44,27	20,49	20,47	62,2896	62,2288	0,023	16836	17205	23227	20119
8000	46,24	46,25	21,39	21,4	65,0256	65,056	0,023	17431	17904	23770	20947
8500	48,15	48,13	22,3	22,24	67,792	67,6096	0,023	18026	18602	24313	21775
9000	49,98	50,01	23,13	23,12	70,3152	70,2848	0,023	18622	19301	24857	22603
9500	51,98	51,96	24,03	24,01	73,0512	72,9904	0,023	19217	19999	25400	23431
10000	53,78	53,82	24,88	24,9	75,6352	75,696	0,023	19812	20698	25944	24259
10500	55,81	55,79	25,81	25,8	78,4624	78,432	0,023	20407	21397	26487	25087
11000	57,24	57,76	26,71	26,72	81,1984	81,2288	0,023	21905	20679	35456	23973
11500	59,68	59,66	27,59	27,59	83,8736	83,8736	0,023	22180	21002	35707	24356
12000	61,53	61,52	28,45	28,45	86,488	86,488	0,023	22451	21319	35954	24733
12500	63,41	63,44	29,33	29,32	89,1632	89,1328	0,023	22726	21643	36206	25116
13000	65,47	65,52	30,28	30,31	92,0512	92,1424	0,023	23031	22001	36484	25540

Beräkningar genomsnitt värsta land tillverkad energi

AC-belastning KW (E)	Belastning Engine 2	Belastning Engine 4	Br. Förbr. 2 Lit/min	Br. Förbr. 4 Lit/min	CO2 - E2 per min	CO2 - E4 per min	Emissionsfaktor KgCO2/KWH (β)	TEWI R22	TEWI R134A	TEWI R404A	TEWI R407C
0	28,35	0	13,12	0	39,8848	0	1,907	0	0	0	0
500	32,07	0	14,84	0	45,1136	0	1,907	57253	64651	60129	76351
1000	35,09	0	16,64	0	50,5856	0	1,907	106597	122576	105182	145003
1500	39,65	0	18,32	0	55,6928	0	1,907	155940	180501	150235	213655
2000	43,4	0	20,06	0	60,9824	0	1,907	205284	238426	195288	282307
2500	47,21	0	21,85	0	66,424	0	1,907	254627	296351	240340	350959
3000	50,85	0	23,54	0	71,5616	0	1,907	303971	354276	285393	419611
3500	54,51	0	25,22	0	76,6688	0	1,907	353315	412201	330446	488263
4000	58,51	0	27,01	0	82,1104	0	1,907	402658	470127	375499	556915
4500	62,05	0	28,7	0	87,248	0	1,907	452002	528052	420552	625567
5000	65,87	0	30,45	0	92,568	0	1,907	501346	585977	465605	694219
5500	69,74	0	32,26	0	98,0704	0	1,907	550689	643902	510658	762871
6200	74,8	0	34,62	0	105,2448	0	1,907	619770	724997	573732	858984
6300	40,09	40,02	18,54	18,51	56,3616	56,2704	1,907	629639	736582	582742	872714
6500	40,89	40,78	18,92	18,87	57,5168	57,3648	1,907	649376	759752	600763	900175
7000	42,41	42,44	19,61	19,63	59,6144	59,6752	1,907	698720	817677	645816	968827
7500	44,3	44,27	20,49	20,47	62,2896	62,2288	1,907	748064	875602	690869	1037479
8000	46,24	46,25	21,39	21,4	65,0256	65,056	1,907	797407	933528	735922	1106131
8500	48,15	48,13	22,3	22,24	67,792	67,6096	1,907	846751	991453	780975	1174783
9000	49,98	50,01	23,13	23,12	70,3152	70,2848	1,907	896095	1049378	826028	1243435
9500	51,98	51,96	24,03	24,01	73,0512	72,9904	1,907	945438	1107303	871081	1312087
10000	53,78	53,82	24,88	24,9	75,6352	75,696	1,907	994782	1165228	916134	1380739
10500	55,81	55,79	25,81	25,8	78,4624	78,432	1,907	1044125	1223153	961186	1449391
11000	57,24	57,76	26,71	26,72	81,1984	81,2288	1,907	1093469	1281078	1006239	1518043
11500	59,68	59,66	27,59	27,59	83,8736	83,8736	1,907	1142813	1339003	1051292	1586695
12000	61,53	61,52	28,45	28,45	86,488	86,488	1,907	1192156	1396929	1096345	1655347
12500	63,41	63,44	29,33	29,32	89,1632	89,1328	1,907	1241500	1454854	1141398	1723999
13000	65,47	65,52	30,28	30,31	92,0512	92,1424	1,907	1290844	1512779	1186451	1792651

